

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号

特許第7340532号

(P7340532)

(45)発行日 令和5年9月7日(2023.9.7)

(24)登録日 令和5年8月30日(2023.8.30)

(51)国際特許分類

F I

C 0 1 B 3/38 (2006.01)

C 0 1 B 3/38

B 0 1 J 23/46 (2006.01)

B 0 1 J 23/46 3 1 1 M

H 0 1 M 8/0432(2016.01)

H 0 1 M 8/0432

H 0 1 M 8/04746(2016.01)

H 0 1 M 8/04746

H 0 1 M 8/0612(2016.01)

H 0 1 M 8/0612

請求項の数 15 (全64頁) 最終頁に続く

(21)出願番号 特願2020-545482(P2020-545482)

(86)(22)出願日 平成31年2月22日(2019.2.22)

(65)公表番号 特表2021-514927(P2021-514927
A)

(43)公表日 令和3年6月17日(2021.6.17)

(86)国際出願番号 PCT/US2019/019183

(87)国際公開番号 WO2019/168756

(87)国際公開日 令和1年9月6日(2019.9.6)

審査請求日 令和3年12月24日(2021.12.24)

(31)優先権主張番号 15/908,200

(32)優先日 平成30年2月28日(2018.2.28)

(33)優先権主張国・地域又は機関
米国(US)

(73)特許権者 520326220

アップスタート パワー インク
UP START POWER, INC.
アメリカ合衆国 0 1 7 7 2 - 1 0 3 4
マサチューセッツ州 サウスボロ ノース
ボロロード 1 5 3

(74)代理人 100098497

弁理士 片寄 恭三

(72)発明者 ネイサン パルンボ

アメリカ合衆国 0 1 5 8 3 マサチュー
セッツ州 ウェストボイルストン マルデ
ンストリート 1 8 4

(72)発明者 ジッドハント シンハル

アメリカ合衆国 0 2 1 3 5 マサチュー
セッツ州 ブライトン エービーティー 3
最終頁に続く

(54)【発明の名称】 C P O X 原子炉制御システムおよび方法

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】

触媒部分酸化（C P O X）を開始して、炭化水素燃料酸化剤混合物を改質し、そこから合成ガス改質物を送達するための燃料改質装置モジュールであって、

入力端および出力端を有する触媒体であって、前記入力端と、前記触媒体の前記出力端および前記触媒体の前記出力端にない燃料通路出力端のうち的一方との間に延在する複数の触媒燃料通路と、を含むように形成された固体非多孔質セラミック基板を備える、触媒体と、

前記C P O X 反応を開始するように選択された材料を含み、前記複数の触媒燃料通路の各々の内側表面上に形成された触媒層と、

5 0 W / m ° K 以上の熱伝導係数を有する材料を含み、接触表面積の上で前記触媒体と熱伝導的に結合された熱伝導要素と、

第1の熱センサであって、前記熱伝導要素と熱伝導的に結合され、前記第1の熱センサによって感知された温度に対応する第1の温度信号を生成するための第1の熱センサと、を備える、燃料改質装置モジュール。

【請求項2】

前記入力端および前記出力端が、前記触媒体の長手方向軸に沿って延在する第1の長手方向寸法によって分離され、前記接触表面積が、前記長手方向軸に沿って延在する第2の長手方向寸法を有し、前記第2の長手方向寸法が、前記第1の長手方向寸法の少なくとも4分の1である、請求項1に記載の燃料改質装置。

【請求項 3】

前記第 2 の長手方向寸法が、前記第 1 の長手方向寸法の 4 分の 1 から 2 分の 1 の範囲内にある、請求項 2 に記載の燃料改質装置。

【請求項 4】

前記第 2 の長手方向寸法が、前記第 1 の長手方向寸法の 4 分の 1 からそれと等しい範囲内にある、請求項 2 に記載の燃料改質装置。

【請求項 5】

前記触媒体が、前記触媒体の第 1 の長手方向軸に沿って前記入力端と前記出力端との間に延在する第 1 の長手方向寸法と、前記長手方向軸を中心とする外径寸法と、を有する、円筒形であり、前記第 1 の長手方向寸法が、25 mm 以上であり、外形寸法が、25 mm 以上である、請求項 1 に記載の燃料改質装置。

10

【請求項 6】

前記接触表面積は、前記触媒体と前記熱伝導要素との間で十分に高い熱伝導率を促進し、前記第 1 の熱センサが、前記接触表面積の摂氏 1～2 度の平均温度での変化を 30 秒未満で感知するようにサイズ決めされており、前記熱伝導要素の材料体積は、前記触媒体と前記熱伝導要素との間で十分に高い熱伝導率を促進し、前記第 1 の熱センサが、前記接触表面積の摂氏 1～2 度の平均温度での変化を 30 秒未満で感知するようにサイズ決めされている、請求項 1 に記載の燃料改質装置。

【請求項 7】

前記接触表面積および前記熱伝導要素の材料体積の各々が、前記触媒体と前記熱伝導要素との間の十分に高い熱伝導率を促進して、前記第 1 の熱センサが、前記接触表面積の摂氏 1～2 度の平均温度での変化を 30 秒未満で感知するようにサイズ決めされており、前記入力端および前記出力端が、前記触媒体の長手方向軸に沿って延在する第 1 の長手方向寸法によって分離され、前記複数の触媒燃料通路の各々が、前記第 1 の長手方向軸と平行である、異なる燃料通路の長手方向軸に沿って、前記入力端と前記出力端との間に延在する、請求項 1 に記載の燃料改質装置。

20

【請求項 8】

前記非多孔質セラミック基板が、固体非多孔質セラミック発泡材料を含み、前記複数の触媒燃料通路が、前記入力端と、前記触媒体の前記出力端および前記触媒体の前記出力端にない前記燃料通路出力端のうち的一方との間に延在する複数の相互接続オープンセルを備える、請求項 5 に記載の燃料改質装置。

30

【請求項 9】

前記熱伝導要素が、前記触媒体の前記外径と嵌合接触して配置されたプリズムロッドを備え、前記プリズムロッドの長手方向軸が、前記第 1 の長手方向軸と実質的に平行に配向され、前記熱伝導要素が、前記触媒体の前記外径と嵌合接触して配設されたプリズムロッドを備え、前記プリズムロッドの長手方向軸が、前記第 1 の長手方向軸と実質的に平行に配向されている、請求項 5 に記載の燃料改質装置。

【請求項 10】

前記熱伝導要素が、前記触媒体の前記外径と嵌合接触して配設された円筒形セグメントを備え、前記円筒形セグメントの長手方向軸が、前記第 1 の長手方向軸と実質的に平行に配向され、前記円筒形セグメントが、前記円筒形触媒体の外周面の曲率半径と一致する曲率半径を伴って形成される接触表面積を含む、請求項 5 に記載の燃料改質装置。

40

【請求項 11】

前記熱伝導要素は、前記触媒体の前記外径と嵌合接触して配設された、その内径を有する、中空シリンダを備え、前記中空シリンダの長手方向軸が、前記第 1 の長手方向軸と実質的に平行に配向され、前記中空シリンダが、前記触媒体の前記外径と実質的に一致するようにサイズ決めされた内径を伴って形成され、前記中空シリンダが、前記中空シリンダによって形成される環状壁の所望の厚さを提供するようにサイズ決めされた外径を伴って形成される、請求項 5 に記載の燃料改質装置。

【請求項 12】

50

前記熱伝導要素が、前記触媒体の前記外径と嵌合接触して配設された、その内径を有する、中空シリンダのらせん部分を備え、前記中空シリンダの前記らせん部分の長手方向軸が、前記第1の長手方向軸と実質的に平行に配向され、前記中空シリンダの前記らせん部分が、前記触媒体の前記外径と実質的に一致するようにサイズ決めされた内径を伴って、かつ前記中空シリンダの前記らせん部分によって形成されたらせん状の環状壁の所望の厚さを提供するようにサイズ決めされた、前記中空シリンダの前記らせん部分の外径を伴って形成される、請求項5に記載の燃料改質装置。

【請求項13】

前記触媒体が、前記円筒形触媒体を完全にまたは部分的に通って延在する中央円筒形キャビティを含むように形成され、前記中央円筒形キャビティが、内径を伴って形成され、前記熱伝導要素が、前記中央円筒形キャビティの内側に配設された固体円筒形要素を備え、前記中央円筒形キャビティの内径が、前記固体円筒形要素の外径と実質的に一致するようにサイズ決めされ、前記固体円筒形要素と前記中央円筒形キャビティとの間に形成された前記接触表面積と、前記固体円筒形要素の材料体積とが、各々、前記触媒体と前記熱伝導要素との間の十分に高い熱伝導率を促進し、前記第1の熱センサが、前記接触表面積の摂氏1～2度での平均温度の変化を30秒未満で感知するようにサイズ決めされている、請求項5に記載の燃料改質装置。

【請求項14】

請求項1に記載の燃料改質装置モジュールを備えるSOFCシステムであって、

前記触媒体の前記入力端に送達するために、炭化水素燃料供給源から受容した炭化水素燃料を、酸化剤供給源から受容した酸化剤と混合することによって、前記炭化水素燃料酸化剤混合物を生成するように構成された燃料酸化剤制御モジュールであって、前記炭化水素燃料源と前記入力端との間に配設された炭化水素燃料流量モジュレータと、前記酸化剤源と前記入力端との間に配設された酸化剤流量モジュレータと、を含む、燃料酸化剤制御モジュールと、

前記炭化水素燃料流量モジュレータおよび前記酸化剤流量モジュレータの各々に独立したコマンドおよび制御信号を送信するように動作する電子制御器と、

固体酸化物燃料電池（SOFC）スタックであって、固体酸化物アノード電極層を各々備える複数の個々のSOFC燃料電池を備え、前記燃料改質装置モジュールから出力された前記合成ガス改質物が、前記固体酸化物アノード電極層の上を流れて、SOFC反応を開始および維持する、固体酸化物燃料電池（SOFC）スタックと、

前記SOFCスタックを取り囲むホットゾーンキャビティを包囲するように共に接合された複数のホットゾーン包囲体壁を備えるホットゾーン包囲体であって、 $100\text{ W/m}^{\circ}\text{K}$ 以上の熱伝導係数を有する材料から形成され、共に接合されて第1の連続的な熱伝導経路を形成する、ホットゾーン包囲体と、

前記第1の熱伝導経路の表面と熱伝導的に結合され、前記第1の熱伝導経路の前記表面の温度に対応する第2の温度信号を生成するための第2の熱センサと、

前記電子制御器によって格納される第1の設定点温度値範囲であって、所望の合成ガス組成物を有する前記合成ガス改質物を生成することが知られている第1の温度信号値の範囲に対応する校正された動作温度範囲に対応する、第1の設定点値範囲と、

前記電子制御器によって格納される第2の設定点温度値範囲であって、前記SOFCスタックの所望の性能特性を生成することが知られている第2の温度信号値の校正された動作温度範囲に対応する、第2の設定点値範囲と、をさらに備え、

前記電子制御器が、前記第1の熱センサ信号値のサンプリングに基づいて第1の制御ループを動作させ、前記第1の制御ループが、前記サンプリングされた第1の温度信号値を前記第1の設定点値の範囲内に維持するために、前記酸化剤の流量を増加または減少させるように前記酸化剤流量モジュレータに命令し、

前記電子制御器が、サンプリングされた第2の熱センサ信号値に基づいて第2の制御ループを動作させ、前記第2の制御ループが、前記サンプリングされた第2の温度信号値を前記第2の設定点値の範囲内に維持するために、前記炭化水素燃料の流量を増加または減

10

20

30

40

50

小さくするように前記炭化水素燃料流量モジュレータに命令する、S O F Cシステム。

【請求項15】

燃料酸化剤制御モジュールによって、前記炭化水素燃料酸化剤混合物を請求項1に記載の前記燃料改質装置に送達することであって、前記燃料酸化剤制御モジュレータは、炭化水素燃料供給源と前記触媒体の前記入力端との間に配設された炭化水素燃料流量モジュレータと、酸化剤供給源と前記触媒体の前記入力端との間に配置された酸化剤流量モジュレータとを含むことと、

第1のコマンドおよび制御信号を電子制御器から前記酸化剤流量モジュレータに送達して酸化剤の流量を調節することと、

電子制御器から前記炭化水素燃料流量モジュレータに第2のコマンドおよび制御信号を送達して、炭化水素燃料の流量を調節することと、

前記触媒体から出力された前記合成ガス改質物を固体酸化物燃料電池(S O F C)スタックに送達することであって、前記S O F Cスタックは、各々が前記触媒体から出力された前記合成ガス改質物と流体連通する固体酸化物アノード電極層を含む複数の個々のS O F C燃料電池を備え、前記合成ガスは、前記固体酸化物アノード電極層と反応して、S O F C反応温度でS O F C反応を開始することと、

前記電子制御器によって、前記第1の温度センサによって生成された第1の温度制御信号値をサンプリングすることと、

前記電子制御器によって、第2の温度センサによって生成された第2の温度制御信号値をサンプリングすることであって、前記第2の熱センサは、前記S O F C反応温度の温度変化に比例して温度を変化させる表面の温度を検知するように配置されることと、

前記電子制御器によって、第1の設定点温度値の範囲を格納することであって、前記第1の設定点値の範囲は、所望の合成ガス組成物を有する前記合成ガス改質物を生成することが知られている第1の温度信号値の範囲に対応する較正された動作温度範囲に対応することと、

前記電子制御器によって、第2の設定点温度値の範囲を格納することであって、前記第2の設定点値の範囲は、前記S O F Cスタックの所望の性能特性を生成することが知られている第2の温度信号値の範囲に対応する較正された動作温度範囲に対応することと、

前記電子制御器によって、第1の温度センサ信号値のサンプリングに基づいて第1の制御ループを動作させることであって、前記第1の制御ループは、前記酸化剤を増加または減少させて、前記サンプリングされた第1の温度信号値を前記第1の設定点値の範囲内に維持するように前記酸化剤流量モジュレータに命令することと、

前記電子制御器によって、第2の熱センサ信号値のサンプリングに基づいて第2の制御ループを動作させることであって、前記第2の制御ループは、前記炭化水素燃料の流量を増加または減少させて、前記サンプリングされた第2の温度信号値を前記第2の設定点値の範囲内に維持するように前記炭化水素燃料流量モジュレータに命令し、前記電子制御器によって、前記燃料改質装置モジュールから出力される前記合成ガス改質物の所望の組成物に対応する第1の設定点温度値の範囲を格納する工程が、前記電子制御器によって、複数の異なる炭化水素燃料タイプに対応する第1の設定点値の各範囲を有する複数の第1の設定点温度値を格納することをさらに含み、前記複数の異なる炭化水素燃料タイプが、メタン、(C H 4)、エタン(C 2 H 6)、プロパン(C 3 H 8)、およびブタン(C 4 H 1 0)のうちのいずれか1つを少なくとも含むことと、を含む方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本明細書に記載される例示的な技術は、固体酸化物燃料電池(S O F C)システムに関し、具体的には、熱伝導性材料から包囲体壁を形成し、所望の様式で熱伝導によって熱エネルギーを分散するように設計された熱伝導経路を提供する包囲体を形成する構造的特徴および方法に関する。より具体的には、本開示は、動作性能、安全性、および信頼性を改善するように構成された熱伝導経路を提供することによるS O F Cシステム内の熱エネル

10

20

30

40

50

ギー管理に関する。

【背景技術】

【0002】

関連技術

通常、ガス間熱交換器を利用して、熱エネルギーを排気ガスから流入空気に伝達する電気化学プロセスによって電気エネルギーを生成するために使用される従来の固体酸化物燃料電池（SOFC）システム。例示的实施形態は、2013年10月15日発行の、「Fuel Processor for Fuel Cell System」、と題した米国特許第8,557,451号、および、「Solid Oxide Fuel Cell System with Hot Zones and Two-Stage Tail Gas Combustors」、と題する米国特許第8,197,976号で開示される。ガス間熱交換器は、排気ガスから流入するカソード空気に廃熱を伝達する一方で、全体的なシステムは、テールガス燃焼チャンバおよび燃料が燃焼されている他の位置でホットスポットと共に動作する。

10

【0003】

従来のSOFCシステムでは、ホットスポットを取り囲む温度は、銅およびアルミニウムなどの多くの熱伝導性の高い金属にとって安全な動作温度を超える傾向がある。加えて、銅およびアルミニウムなどの熱伝導性の高い金属は、従来のSOFCシステムで使用されている酸素豊富なカソードガスに曝露されると酸化によって損傷することが多い。これにより、当該技術分野では、従来のSOFCシステムを有する高熱伝導性金属を使用することを敬遠し、代わりにホットスポットを取り囲む温度抵抗性金属で構成して、溶け落ちおよび金属酸化によって引き起こされる製品寿命の短縮を含む他の障害を回避している。耐温金属は、通常、ハステロイ、モネル、インコネルなどのニッケルおよびコバルト、ならびに長時間の昇温および酸素曝露によって損傷を受けにくい、他のものを含む昇温常駐超合金を含む傾向がある。昇温耐性超合金を使用する1つの問題は、それらが約40W/m²・K未満、より一般的に20W/m²・K未満など、熱伝導係数が低いことである。200W/m²・K超の熱伝導係数を有するより多くの熱伝導性金属（例えば、アルミニウムおよび銅合金）と比較して、昇温耐性超合金は、熱伝導体としてはあまり好適ではない。その結果、従来のSOFC包囲体における熱伝導による熱伝達は遅く、熱伝導の速度が遅いことにより、SOFCシステムの全体構造において永続的なホットスポットまたは温度勾配を生じる傾向がある。

20

30

【0004】

より最近では、温度勾配を低減するために熱伝導による熱エネルギー伝達を促進するためにSOFCシステムが構築されている。このようなシステムの1つとして、2016年4月7日にUS20160099476A1として公表された「SOFC-Conduction」と題する米国特許出願第14/399,795号が挙げられる。本明細書では、構造のホットスポットから冷却域への熱伝導率を向上させるために、アルミニウムおよび銅合金などの、より熱伝導性の高い金属から作られた熱伝導経路として形成された、内側および外側の金属包囲体を伴って形成されるSOFCシステムを開示している。より高い熱伝導係数を有する熱伝導経路を提供し、他よりも熱質量が大きい壁を提供することによって、各異なる包囲体壁システムは、場合によっては銅芯を含むアルミニウムと銅の包囲体壁を通ることで、より急速に熱伝導することが可能になり、均一な温度により急速に正規化する傾向があるため、温度勾配が軽減される。

40

【0005】

従来のSOFCシステムは、内部温度センサを利用して、SOFCシステムのホットゾーン内部に位置するホットスポット位置における瞬間温度を測定する。電動制御器は、各内部温度センサが報告した瞬間温度を監視する。過温度状態が検出された場合、電子制御器は、流入燃料バルブを閉じることによって、SOFCシステムの動作を停止するように動作可能である。しかしながら、昇温環境における内部センサの使用に関する1つの問題は、熱センサが瞬間内部温度を全く提供できない可能性があること、または不正確な瞬間

50

温度を提供する可能性があることである。内部熱センサの損傷または、不正確である結果、過温度状態が検出されず、包囲体壁の1つの溶け落ちなどの大惨事の原因となり得る。他の結果としては、ホットゾーン周辺の断熱性の損傷および内外の包囲体壁面に適用される被覆層の損傷が挙げられる。過温度状態による損傷が最小限であっても、内部温度センサが故障した場合は交換が必要である。損傷した内部温度センサを交換するには、S O F Cシステムを分解する必要がある、コストがかかる。

【0006】

前述の考察を考慮すると、当該技術分野では、内部センサに依存することなく、システムの損傷または故障につながり得る過温度操作伝導を検出するために、外部温度センサを使用するS O F Cシステムを提供する必要がある。当該技術分野では、過温度状態を検出する熱センサに受動バックアップを提供する必要がある。温度センサが故障した場合、またはその他の方法で不正確な温度を報告した場合、S O F Cシステムをシャットダウンするために受動バックが提供される。

【発明の概要】

【0007】

本開示は、固体酸化物燃料電池システムの制御および炭化水素燃料および酸化剤、例えば空気の混合物を改質するように動作する触媒部分酸化（C P O X）燃料改質装置の制御に関する問題を解決する。合成ガス改質物は、電力を生成するために動作する複数の固体酸化物燃料電池（S O F C）のアノード側に送達される。本開示のC P O X改質装置は、各C P O X反応の温度の変化および温度、またはS O F C反応の変化を監視するための制御システムおよび制御方法、ならびに炭化水素燃料の入力流量を独立して変更し、酸化剤の入力流量を独立して変更するための制御要素を含む。

【0008】

本開示の燃料改質装置モジュールは、炭化水素燃料酸化剤混合物を合成ガス改質物に改質するためにC P O X反応を開始する。燃料改質装置モジュールは、その中に炭化水素燃料酸化剤混合物を受容するための入力端と、そこから合成ガス改質物を送達するための出力端とを有する触媒体を含む。触媒体は、入力端と各燃料通路の出力端との間に延在する複数の独立触媒燃料通路を有する固体非多孔質セラミック基板から形成される。各触媒燃料通路の内側表面は、C P O X反応を開始するために選択された材料を含む触媒層で被覆される。50 W/m²・K以上、好ましくは100 W/m²・K以上の熱伝導係数を有する材料を含む熱伝導要素は、接触表面積の上で触媒体と熱伝導的に結合される。接触表面積は触媒体の外表面または内面であり得、好ましくは触媒体の長手方向軸に沿って延在する。第1の熱センサは、熱伝導要素と熱伝導的に結合される。第1の熱センサは、第1の熱センサが連結される熱伝導要素の任意の表面に近接する熱伝導要素の表面温度に対応する第1の温度信号を生成する。

【0009】

本開示のS O F Cシステムは、上述の燃料改質装置モジュールおよび炭化水素燃料酸化剤混合物を様々な割合で混合するように構成された燃料酸化剤制御モジュールを含む。燃料酸化剤制御モジュールは、炭化水素燃料供給源と酸化剤供給源と触媒体の入力端との間に配設される。炭化水素燃料流量モジュレータは、炭化水素燃料源と入力端との間に配設される。酸化剤流量モジュレータは、酸化剤源と入力端との間に配設される。電子制御器は、独立したコマンドおよび制御信号を炭化水素燃料流量モジュレータおよび酸化剤流量モジュレータの各々に送信するように動作する。

【0010】

S O F Cシステムは、固体酸化物アノード電極層を各々備える複数の個々のS O F C燃料電池を含む固体酸化物燃料電池（S O F C）スタックを備える。燃料改質装置モジュールから出力される合成ガス改質物は、S O F C反応を開始および維持するために固体酸化物アノード電極層上を流れるように方向付けられる。ホットゾーン包囲体は、S O F Cスタックを取り囲むホットゾーンキャビティを包囲するように共に接合された複数のホットゾーン包囲体壁を備える。ホットゾーン包囲体壁は、100 W/m²・K以上の熱伝導係数

を有する材料から形成され、共に接合されて、全てのホットゾーン包囲体壁を含む第1の連続的な熱伝導経路を形成する。第2の熱センサは、第1の熱伝導経路の表面と熱伝導的に結合され、第2の熱センサが結合される第1の熱伝導経路の表面の温度に対応する第2の温度信号を生成する。

【0011】

第1の設定点温度値の範囲は、電子制御器によって格納される。第1の設定点値の範囲は、所望の合成ガス組成物を有する合成ガス改質物を生成するために知られている較正された動作温度範囲に対応する。一例では、第1の設定点温度値は、未反応炭化水素燃料分子の割合が低い合成ガス組成物に対応する。第2の設定点温度値の範囲は、電子制御器によって格納される。第2の設定点値の範囲は、知られている較正された動作温度範囲に対応して、SOFCスタックの所望の性能特性を生成する。一例では、第2の設定点温度値は、燃料－電力効率定格に対応する。

【0012】

電子制御器は、第1の熱センサ信号値のサンプリングに基づいて第1の制御ループを動作させる。第1の制御ループは、酸化剤流量モジュレータに酸化剤の流量を、増加または減少させるように命令して、サンプリングされた第1の温度信号値を第1の設定点値の範囲内に維持する。電子制御器は、第2の熱センサ信号値のサンプリングに基づいて第2の制御ループを動作させる。第2の制御ループは、炭化水素燃料流量モジュレータに炭化水素燃料の流量を、増加または減少させるように命令して、サンプリングされた第2の温度信号値を第2の設定点値の範囲内に維持する。

【0013】

SOFCシステムを制御するための方法は、炭化水素燃料と酸化剤の混合物を触媒体の入力端に送達することを含んでいた。炭化水素燃料流量モジュレータは、炭化水素燃料供給源と触媒体の入力端との間に配設される。酸化剤供給源と触媒体の入力端との間に配設された酸化剤流量モジュレータ。電子制御器は、酸化剤流量モジュレータに第1のコマンドおよび制御信号を送達し、酸化剤の流量を調節する。電子制御器は、炭化水素燃料流量モジュレータに第2のコマンドおよび制御信号を送達して、炭化水素燃料の流量を調節する。触媒体出力端とSOFCスタックとの間に設けられた入力マニホールドは、触媒体から出力される合成ガス改質物を、固体酸化物燃料電池（SOFC）スタックの固体酸化物アノード電極に送達して、SOFC反応温度でSOFC反応を開始する。電子制御器は、第1の温度センサによって生成された第1の温度制御信号をサンプリングし、第2の温度センサによって生成された第2の温度制御信号もサンプリングする。電子制御器は、燃料改質装置モジュールから出力される合成ガス改質物の所望の組成物に対応する第1の設定点温度値の範囲を格納し、SOFCスタックの所望の性能特性に対応する第2の設定点温度値の範囲を格納する。電子制御器は、サンプリングされた第1の温度信号値を第1の設定点値の範囲内に維持するために、第1の温度センサ信号値のサンプリングおよび酸化剤流量モジュレータに酸化剤の流量を増加または減少させる命令に基づいて、第1の制御ループを動作させる。電子制御器は、第2の熱センサ信号値を、第2の設定点値の範囲内に維持するために、第2の温度信号値をサンプリングすること、および炭化水素燃料流量モジュレータに、炭化水素燃料の流量を増加または減少させるよう命令することに基づいて、第2の制御ループを動作させる。

【図面の簡単な説明】

【0014】

本開示の特徴は、例示の目的のために選択され、添付の図面に示された、目的の技術の詳細な説明およびその例示的实施形態から最もよく理解されるであろう。

【図1】本開示による、非限定的に例示するSOFCシステムの概略図を示す。

【図2】本開示による、非限定的に例示する固体酸化物燃料電池スタックアセンブリの概略側面断面図を示す。

【図3】本開示による、非限定的に例示する燃料改質装置モジュールの概略側面断面図を示す。

10

20

30

40

50

【図 4】本開示による、S O F C システムの非限定的に例示する触媒体実施形態の概略側面断面図を示す。

【図 4 A】本開示による、触媒燃料通路から放射されている熱エネルギーを吸収するために利用可能な、原子炉基部壁の表面積を示す概略図である。

【図 5】本開示による、非限定的に例示するカソードチャンバの概略上部断面図を示す。

【図 6】本開示による、非限定的に例示する燃料改質装置モジュールの底面概略断面図を示す。

【図 7】本開示による、非限定的に例示する固体酸化物燃料電池スタックアセンブリの概略側面断面図を示す。

【図 8】本開示による、燃料および空気入力システムを含む、固体酸化物燃料電池（S O F C）システムのさらなる非限定的な例示的实施形態の概略表現を示す。

【図 9】本開示による、触媒体と熱伝導接触における、第 1 の例示的な非限定的な熱伝導要素実施形態を示す。

【図 10】本開示による、触媒体と熱伝導接触における、第 2 の例示的な非限定的な熱伝導要素実施形態を示す。

【図 11】本開示による、触媒体と熱伝導接触における、第 3 の例示的な非限定的な熱伝導要素実施形態を示す。

【図 12】本開示による、触媒体と熱伝導接触する、第 4 の例示的で非限定的な熱伝導要素の実施形態を示す。

【図 13 A】本開示による、その中に熱伝導要素を受容するように設けられた中心長手方向通路を伴って形成された円筒形触媒体を示す、第 5 の例示的で非限定的な実施形態の等角上面図を示す。

【図 13 B】中心長手方向通路を伴って形成された円筒形触媒体の長手方向軸を通る断面図であり、その内部に本開示による固体円筒形熱伝導要素を示す。

【図 14】本開示による固体セラミック発泡体構造を通じて分布する相互接続されたオープンセルを伴って形成された固体非多孔質セラミック発泡材料として形成された、触媒体と熱伝導接触した状態の、第 6 の例示的な非限定的な熱伝導要素実施形態の等角上面図を示す。

【図 15 A】O : C 比対 T _ C P O X 値、% C H 4 値および % C 2 H X 値をグラフィック表現で示す。

【図 15 B】図 15 A にプロットされた O : C 比対 T _ C P O X 値、% C H 4 値および % C 2 H x 値を列挙するデータテーブルを示す。

【0015】

4. 定義

特に指示がない限り、以下の定義が全体を通して使用される。

【表 1】

用語	定義
ハステロイ	主に金属ニッケルに加えて、モリブデン、クロム、コバルト、鉄、銅、マンガン、チタン、ジルコニウム、アルミニウム、およびタンタムを 0 ~ 20 % の変動割合で含む合金。ハステロイ合金は、主に中等度から重度の腐食性環境における高温および、または高い応力下での長期生存のために使用される。ハインズインターナショナル社、米国モデルから入手可能。
モネル	最大 67 % の金属ニッケルおよびコバルト、最大 30 % の銅、0 ~ 5 % の鉄、チタン、マンガン、炭素、およびシリコンおよびアルミニウムを含む合金。モネルは腐食に強いために使用される。米国ニューヨーク州、ニューハートフォードスベシャルメタル社より入手可能。
S O F C	固体酸化物燃料電池
インコネル	ニッケル 40 ~ 70 %、クロム 14 ~ 20 %、鉄 3 ~ 9 %、マンガン 0、3 ~ 1 % プラスシリコン、炭素、炭素、および他の元素を含む、オーステナイト系ニッケルクロム合金。インコネルは、幅広い温度範囲で酸化や腐食に対する耐性を有しているため使用される。加熱すると、インコネルは表面をさらなる攻撃から保護する厚い古い保護酸化被膜を形成する。クリープを許容する高温適用に魅力的である。米国ニューヨーク州、ニューハートフォードスベシャルメタル社より入手可能。
セルメット	セラミックと融着金属で作られたいずれかのクラスの前駆体。セラミック酸化物金属化合物として形成および焼結され、酸化セラミックから金属相への遷移を促進することが多い。OIG-YZ-18-YZ2。
ペロブスカイト	一般構造 A ¹⁺ B ³⁺ X ₃ 。B ³⁺ 酸化チタンカルシウム (C a T i O ₃) と同じタイプの配位構造を有する三元材料。

【0016】

5. 項目番号リスト

別段の指示がない限り、以下の項目番号は全体を通して使用される。

10

20

30

40

50

【表 2 - 1】

項目番号	説明	項目番号	説明
100	ＳＯＦＣシステム	5000	ＳＯＦＣシステム
105	ホットゾーン	5002	カソードチャンバ
110	コールドゾーン	5010	円筒部
115	ホットゾーン内面絶縁壁	5015	内筒部隔壁
120	ホットゾーンキャビティ	5020	外筒部隔壁
125	アノードガス	5025	カソード排気管
125a	使用済みアノードガス	5030	燃焼方向中心軸
126	カソードガス	5035	内筒内径パターン
126a	使用済みカソードガス	5040	管状燃焼電流
127	燃焼燃焼ガス	5045	外筒内径パターン

【表 2 - 2】

127a	使用済み燃焼ガス		
130	燃焼	7000	燃焼燃焼電流システム
132	外筒内面絶縁壁	7005	燃焼チャンバ
135	燃焼電流スラック	7010	燃焼円筒壁
140	燃焼電力出力モジュール	7015	燃焼円筒壁基部壁
145	燃焼電流電流	7020	燃焼燃焼電流モジュール
150	燃焼電流電流アノード電極	7035	燃焼燃焼電流キャビティ
155	燃焼電流電流カソード電極	7040	燃焼円筒壁
157	ホットゾーン燃焼電流/温度センサ	7045	燃焼電流
160	燃焼燃焼	7060	燃焼燃焼電流
165	燃焼燃焼電流モジュール	7102	外筒内面壁ラジエータ
167	燃焼燃焼電流	7105	燃焼燃焼電流
170	燃焼燃焼電流	7110	燃焼燃焼電流
175	燃焼燃焼電流モジュール	7135	燃焼燃焼電流
180	燃焼燃焼電流モジュール	7140	燃焼燃焼電流
185	燃焼燃焼電流	7610	燃焼燃焼電流
190	燃焼燃焼電流	7666	燃焼燃焼電流
195	燃焼燃焼電流モジュール	7830	燃焼燃焼電流
197	燃焼燃焼電流モジュール	7860	燃焼燃焼電流
198	燃焼燃焼電流モジュール		
2000	燃焼燃焼電流モジュール	8000	燃焼燃焼電流
2005	燃焼燃焼電流モジュール	8005	燃焼燃焼電流
2005	燃焼燃焼電流モジュール	8010	燃焼燃焼電流
2010	燃焼燃焼電流モジュール	8015	燃焼燃焼電流
2015	燃焼燃焼電流モジュール	8017	燃焼燃焼電流
2016	燃焼燃焼電流モジュール	8020	燃焼燃焼電流
2017	燃焼燃焼電流モジュール	8022	燃焼燃焼電流
2020	燃焼燃焼電流モジュール	8025	燃焼燃焼電流
2025	燃焼燃焼電流モジュール	8030	燃焼燃焼電流
2026	燃焼燃焼電流モジュール	8031	燃焼燃焼電流
2027	燃焼燃焼電流モジュール	8035	燃焼燃焼電流
2028	燃焼燃焼電流モジュール	8040	燃焼燃焼電流
2045	燃焼燃焼電流モジュール	8041	燃焼燃焼電流
2055	燃焼燃焼電流モジュール	8045	燃焼燃焼電流
2060	燃焼燃焼電流モジュール	8050	燃焼燃焼電流
2080	燃焼燃焼電流モジュール	8055	燃焼燃焼電流

【表 2 - 3】

2082	燃焼燃焼電流モジュール		
2084	燃焼燃焼電流モジュール	9005	燃焼燃焼電流
2086	燃焼燃焼電流モジュール	9010	燃焼燃焼電流
2115	燃焼燃焼電流モジュール	9015	燃焼燃焼電流
2135	燃焼燃焼電流モジュール	9020	燃焼燃焼電流
2145	燃焼燃焼電流モジュール	9025	燃焼燃焼電流
2150	燃焼燃焼電流モジュール		
2155	燃焼燃焼電流モジュール		
2165	燃焼燃焼電流モジュール	10005	燃焼燃焼電流
2200	燃焼燃焼電流モジュール	10010	燃焼燃焼電流
2205	燃焼燃焼電流モジュール	10015	燃焼燃焼電流
2210	燃焼燃焼電流モジュール	10020	燃焼燃焼電流
2212	燃焼燃焼電流モジュール	10025	燃焼燃焼電流
2214	燃焼燃焼電流モジュール		
2230	燃焼燃焼電流モジュール		
2235	燃焼燃焼電流モジュール	11005	燃焼燃焼電流
2240	燃焼燃焼電流モジュール	11010	燃焼燃焼電流
2245	燃焼燃焼電流モジュール	11015	燃焼燃焼電流
2300	燃焼燃焼電流モジュール	11020	燃焼燃焼電流
2302	燃焼燃焼電流モジュール		
2304	燃焼燃焼電流モジュール		
2306	燃焼燃焼電流モジュール	12005	燃焼燃焼電流
2510	燃焼燃焼電流モジュール	12010	燃焼燃焼電流
2511	燃焼燃焼電流モジュール	12015	燃焼燃焼電流
2512	燃焼燃焼電流モジュール	12020	燃焼燃焼電流

10

20

30

40

50

【表 2 - 4】

2513	ディスク型中間上隔壁		
2514	外側円筒形隔壁	13005	熱伝導要素
2516	ディスク型外側上隔壁	13007	中央キャビティ
2518	ディスク型外側隔壁	13010	円筒外壁
2830	燃料供給バルブ電力導管	13020	円筒形熱伝導の熱伝導方向中心軸
		13025	熱伝導または伝導性
3000	燃料改質装置システム	13030	円筒形熱伝導
3005	円筒形燃料チャンバ	13032	円筒形熱伝導の入り口
3010	燃料外隔壁	13034	円筒形熱伝導の出力口
3015	燃料シールド蓋部壁		
3017	燃料チャンバキャップ	14010	円筒外壁
3020	燃料改質装置セシウム	14020	円筒形熱伝導の熱伝導方向中心軸
3025	流入燃料改質装置	14030	円筒形熱伝導
3030	円筒形熱伝導	14031	オープンセル
3032/3033	熱伝導出力口	14032	入力口
3034	熱伝導出力口	14034	出力口
3035	円筒形熱伝導キャビティ		
3040	燃料改質装置	1500	熱伝導方向グラフ
3055	燃料改質装置キャビティ	1505	熱伝導方向
3060	燃料改質装置	1510	熱伝導方向
3065	熱伝導方向グラフ	1515	熱伝導方向
3070	円筒形熱伝導	1520	熱伝導方向
3075	第1の燃料改質装置	1530	熱伝導方向
3080	燃料改質装置		
3085	熱伝導方向		
3088	熱伝導方向 (より大きな距離)		
3090	熱伝導		
3095	燃料改質装置		
3100	燃料改質装置		
3102	ディスク型外側上隔壁上隔壁		
3105	燃料改質装置		
3110	燃料改質装置		
3115	燃料改質装置		
3120	燃料改質装置		
3125	燃料改質装置		
3130	燃料改質装置		
3135	燃料改質装置		
3140	燃料改質装置		

10

20

【発明を実施するための形態】

【0017】

固体酸化燃料電池システム

図1を参照すると、本開示の第1の例示的な非限定的な実施形態の概略図は、固体酸化燃料電池（SOFC）システム（100）を示す。システム（100）は、本実施形態では、円筒形ホットゾーンキャビティ（120）を包囲する、ホットゾーン包囲体壁（115）内に包囲されたホットゾーン（105）を含む。ホットゾーン包囲体壁（115）は、外側包囲体壁（132）によってさらに包囲された断熱層（130）によってさらに包囲される。ホットゾーン包囲体壁（115）および外側包囲体壁（132）は、各々、以下にさらに説明される異なる対の、対向するディスク型端壁と機械的に相互作用する各側壁を有する別個の円筒形の側壁を含む。

30

【0018】

ホットゾーン包囲体壁（115）は、燃料電池スタック（135）を包囲する。燃料電池スタック（135）は、少なくとも1つのSOFC燃料電池を含むが、好ましくは、直流電力出力モジュール（140）と直列または並列に各々電氣的に相互接続された複数のSOFC燃料電池を含む。直流電力出力モジュールは、燃料電池スタックによって生成された電力を受信し、外部電力負荷（図示せず）に出力電力を送達する。各燃料電池は、ホットゾーンキャビティ（120）内部に存在するカソードガスに曝露するために配向される固体酸化燃料電池カソード電極（155）を備える。ホットゾーンキャビティ（120）は、動作中に酸素、例えば空気（126）を含む少なくとも含むカソードガスで充填され、ホットゾーンキャビティ（120）内のカソードガスは、固体酸化燃料電池カソード電極（155）の表面と化学反応する。各燃料電池はさらに、ホットゾーンキャビティ（120）またはその中に含まれるカソードガスに暴露されないが、代わりに、アノードガス（改質燃料）（125）に曝露するように配向された固体酸化燃料電池アノード電極（150）を備えているため、動作中、固体酸化燃料電池アノード電極（150）と化学反応するために、アノードガスは、固体酸化燃料電池アノード電極（150）の上を通過する。SOFC燃料電池は、固体酸化燃料電池カソード電極（155）を固体酸化燃料電池アノード電極（150）から分離するように配設された固体電解質層（145）をさらに備える。固体電解質層（145）は、固体酸化燃料電池アノード電極（150）と固体酸化燃料電池カソード電極（155）との間のイオン交換用の

40

50

イオン交換媒体として提供される酸素イオン伝導層である。

【0019】

燃料電池スタック（135）は、燃料電池スタックの固体材料層の組成およびアノードガスとカソードガスの特性に依存して、高い動作温度（例えば、350～1200℃の範囲）に維持される。好ましい動作温度を選択して、効率的な電気化学エネルギー発生を支援する。水素を含むアノードガス（125）を固体酸化物アノード電極（150）と反応させ、酸素を含むカソードガス（126）を固体酸化物カソード電極（155）と反応させると、燃料電池スタック（135）によって電気エネルギーが生成される。

【0020】

ホットゾーン（105）は、使用済みアノードガスおよび使用済みカソードガスの各々が対応する固体酸化物アノード電極（150）および固体酸化物カソード電極（155）と反応した後に、使用済みアノードガス（125a）および使用済みカソードガス（126a）を受容するように構成された燃焼チャンバを備える、燃焼器モジュール（180）またはテールガス燃焼器をさらに包囲する。燃焼器モジュール（180）内で混合すると、使用済みアノードガス（125a）および使用済みカソードガス（126a）が燃焼される。燃焼モジュール（180）内部で起こる燃焼によって発生した熱エネルギーは、ホットゾーン包囲体壁（115）ならびにホットゾーンキャビティ（120）を加熱するために使用される。

【0021】

ホットゾーンキャビティ（120）は、復熱装置モジュール（175）をさらに包囲する。復熱装置モジュール（175）は、燃焼器モジュール（180）と流体連通し、そこから出る燃焼排気ガス（127）を受容する。燃焼排気ガス（127）は、燃焼排気ガス（127）および流入空気（170）がガスカウンタフロー熱交換器（図示せず）の別個のガス導管を通るときに、復熱装置モジュール（175）を通過し、そこからの熱エネルギーを流入空気（170）に伝達する。その後、使用済み燃焼排気ガス（127a）は、復熱装置モジュール（175）から出て、排気ポート（185）を介してホットゾーンから送達される。復熱装置モジュール（175）から出た後の流入空気（170）は、ホットゾーンキャビティ（120）に送達されるカソードガス（126）を含む。

【0022】

システムのコールドゾーン（110）は、燃料入力モジュール（197）を含む。プロパン、メタン、または灯油などの様々な炭化水素燃料、ならびに他の好適な燃料は、様々な燃料源（図示せず）から燃料入力モジュール（197）に受容される。燃料入力モジュール（197）は、燃料源から送達される流入燃料（160）を調節し、所望の体積または体積流量の流入燃料（160）を燃料改質装置モジュール（165）に送達するように動作可能である。燃料改質装置（165）は、流入燃料を固体酸化物アノード電極（150）との所望の化学反応により好適な様式で燃料を改質するように動作可能である。

【0023】

流入燃料（160）は、水素を抽出することができる液体または気体炭化水素化合物を含む。流入燃料（160）は、空気と混合されてもよく、霧化されてもよく、またはそうでなければ気化されてもよい。本開示の燃料改質装置モジュール（165）は、触媒層によって被覆されたその表面のいくつかを有する触媒支持構造（167）を提供する触媒部分酸化（CPOX）原子炉を備え、以下に記載する。流入燃料が触媒層上を通過すると、燃料は、触媒支持構造（167）内部で燃焼または部分燃焼される。燃焼によって発生した熱は、流入燃料（160）を水素ガス（H_{sub}2）および一酸化炭素ガス（CO）に改質する。改質燃料は、SOFC燃料電池スタック（135）内の各燃料電池の固体酸化物アノード電極（150）と反応するアノードガス（125）として燃料改質装置モジュール（165）を出る。

【0024】

システムのコールドゾーン（110）は、復熱装置モジュール（175）への流入空気（170）または別の酸素豊富な源ガスのための空気入力モジュール（198）を含む。

10

20

30

40

50

空気または任意の他の酸素豊富な源ガスは、様々な空気源（図示せず）から空気入力モジュール（１９８）に受容されるか、または空気は、ファンによって復熱装置モジュール（１７５）に圧送される室内空気を含む。空気入力モジュール（１９８）は、復熱装置モジュール（１７５）への空気の流れを調節するように動作可能である。復熱装置モジュール（１７５）は、燃焼排気ガスをガスカウンタフロー熱交換器（図示せず）に通すことによって、流入空気（１７０）を燃焼排気ガス（１２７）で加熱する。加熱された空気は、カソードガス（１２６）として復熱装置から出る。

【００２５】

システムのコールドゾーン（１１０）は、燃料入力モジュール（１９７）および空気入力モジュール（１９８）と電気通信する電子制御器（１９０）を含む。電子制御器（１９０）は、ＳＯＦＣシステム（１００）の動作を管理するために、様々な動作プログラムおよび、またはその上で動作するデジタル論理制御要素を有するデジタルデータプロセッサおよび関連付けられたデジタルデータメモリを含む。電子制御器（１９０）は、直流電力出力モジュール（１４０）と電気通信して、負荷への直流電力出力を監視および調節する。電子制御器はまた、流入燃料（１６０）を監視および調節するために燃料入力モジュール（１９７）と電子通信し、さらに、流入空気（１７０）を監視および調節するために空気入力モジュール（１９８）と電子通信し、さらに、ＳＯＦＣシステム（１００）の様々な表面の温度を監視するために必要とされ得るように、ホットゾーン包囲体壁（１１５）、外側包囲体壁（１３２）、燃料改質装置モジュール（１６５）および他の表面の１つ以上の表面の温度を監視するために少なくとも１つの温度センサ（１５７）と電子通信する。

【００２６】

燃料入力モジュール（１９７）および空気入力モジュール（１９８）の各々は、１つ以上のガス圧力レギュレータ、ガス流アクチュエータバルブ、質量または体積ガス流量制御器、および、または体積流量センサなど、ガス圧力センサなどを含み得、温度センサなどは、各々電子制御器（１９０）によって動作可能であるか、あるいは電気通信して、燃料改質装置モジュール（１６５）への流入燃料（１６０）または復熱装置モジュール（１７５）への流入空気（１７０）を調節し得る。より具体的には、電子制御器（１９０）と協働して燃料入力モジュール（１９７）は、入力燃料圧力を調節し、流入燃料質量または体積流量を変動的に調整し、必要に応じて、流入燃料（１６０）がＳＯＦＣシステム（１００）に入るのを止めるように動作可能である。同様に、電子制御器（１９０）と協働して空気入力モジュール（１９８）はまた、入力空気圧を調整し、流入空気量または体積流量を変動的に調整し、必要に応じて流入空気（１７０）がＳＯＦＣシステム（１００）に入るのを止めるように動作可能であり得る。いくつかの動作環境では、空気入力モジュール（１９８）は、いかなるさらなる空気入力制御センサまたは要素もなしに一定の角速度で動作する単純なファンを備え得る。

【００２７】

本開示によれば、燃料改質装置モジュール（１６５）は、燃料を水素ガス（ $H_{sub}2$ ）および一酸化炭素（ CO ）に改質するために、セラミック触媒担体構造（１６７）の表面上に設けられた流入燃料（１６０）と触媒層との間で放熱反応を引き起こすように構成される。さらに、本開示によれば、改良された燃料改質装置モジュール（１６５）は、以下に記載される複数の長手方向燃料流通路を含むセラミック触媒担体構造（１６７）を備え、各長手方向燃料流通路は、その内面上を触媒層で被覆される。加えて、燃料改質装置モジュール（１６５）は、セラミック触媒担体構造（１６７）内部で起こる放熱反応によって発生した熱エネルギーを、流入燃料に向かって長手方向経路に沿ってセラミック触媒担体構造（１６７）から伝達する手段として、長手方向の燃料流通路を提供することによって、セラミック触媒担体構造（１６７）に入る未処理燃料の自動点火を一部防止するように構成される。図１に見られるように、燃料改質装置モジュール（１６５）は、一部が外側包囲体壁（１３２）の間に配設され、一部が外側包囲体壁（１３２）の外側に配設され、さらに、外側包囲体壁（１３２）を通過する熱伝導経路を提供するように構成される。加えて、ＳＯＦＣシステム（１００）は、任意選択で、外側包囲体壁（１３２）の

外側に配設される燃料改質装置モジュール（１６５）の部分を冷却するための１つ以上の冷却装置（例えば、エアファン、ウォーターポンプなど）を含む。

【００２８】

ＳＯＦＣシステム（１００）は、コールドスタートモジュール（１９５）を任意選択で含み得る。コールドスタートモジュール（１９５）は、コールドスタートモジュール（１９５）にリダイレクトされる流入燃料（１６０）の一部を受容し、燃焼させるように構成される。コールドスタートモジュール（１９５）の動作は、流入燃料（１６０）の温度またはホットゾーン包囲体壁（１１５）の温度または燃料電池スタック（１３５）の温度が所望の動作温度または反応温度を下回るときに電子制御器（１９０）によって開始される。動作中、流入燃料（１６０）の一部は、コールドスタートモジュール（１９５）に関連付けられた燃焼チャンバに回される。制御可能な燃料点火器が、コールドスタートモジュール（１９５）の燃焼チャンバ内部に設けられ、燃焼チャンバ内部の燃料は、コールドスタート中に流入燃料（１６０）、燃料改質装置モジュール（１６５）、およびホットゾーン包囲体壁（１１５）を加熱するために点火され、燃焼される。ＳＯＦＣシステム（１００）が所望の動作温度に達すると、コールドスタートモジュール（１９５）の動作は終了する。

10

【００２９】

動作中は、電子制御器（１９０）は、燃料入力モジュール（１９７）、空気入力モジュール（１９８）および電力出力検出器などに関連付けられた１つ以上の冷却ファン、１つ以上の電氣的に動作可能なガス流量アクチュエータバルブ、ガス流量検出器、および、またはガスモジュレータなどの電子要素、ならびにＳＯＦＣ（１００）の様々な動作パラメータを制御するために必要とされ得る他の要素と通信状態にある。電子制御器（１９０）は、直流電流／電源出力ならびに１つ以上の熱電対などによって測定される温度を監視し、直流電流／電源出力を増加または減少させる手段として、流入燃料および任意選択で流入空気の体積流量を変化させるようにさらに動作する。

20

【００３０】

８．２ 固体酸化物燃料電池スタック側セクション

次に図２を参照すると、本開示による改良されたＳＯＦＣ燃料電池スタックアセンブリ（２０００）の第２の非限定的な例示的实施形態が側面断面図で示されている。ＳＯＦＣ燃料電池スタックアセンブリ（２０００）は、実質的に円筒形のホットゾーンキャビティまたはカソードチャンバ（２０１０）に沿って各々長手方向に延在する複数の管状燃料電池（２０８０）を含むＳＯＦＣ燃料電池スタック（２００５）を含む。

30

【００３１】

次に図２を参照すると、本開示による改良されたＳＯＦＣ燃料電池スタックアセンブリ（２０００）の第２の非限定的な例示的实施形態が側面断面図で示されている。ＳＯＦＣ燃料電池スタックアセンブリ（２０００）は、実質的に円筒形のホットゾーンキャビティまたはカソードチャンバ（２０１０）に沿って各々長手方向に延在する複数の管状燃料電池（２０８０）を含むＳＯＦＣ燃料電池スタック（２００５）を含む。

【００３２】

本例示的实施形態では、ディスク型底端壁（２０１６）はまた、復熱装置チャンバ（２２１０）の底壁を形成する。上述したように、復熱装置チャンバ（２２１０）は、カソード供給管（２１４５）を介して燃料電池スタックアセンブリに入る流入空気（２２００）を加熱するように提供される。流入空気（２２００）、すなわちカソードガスは、復熱装置入力ポート（２２３０）を介して復熱装置チャンバ（２２１０）に流入し、復熱装置出力ポート（２２３５）を介してカソード供給管（２１４５）に戻る復熱装置チャンバ（２０１０）から流出する。復熱装置入力ポート（２２３０）および復熱装置出力ポート（２２３５）の１つまたは複数は、カソード供給管（２１４５）の周囲に配設されてもよい。フローバリア（２２１２）は、空気の流れを復熱装置チャンバ（２２１０）の周辺壁に向け、それによって復熱装置チャンバを通過する空気とその周辺壁との間の熱エネルギー交換を増加させる。復熱装置チャンバ（２２１０）は、その上側が、燃焼チャンバ（２１３

40

50

5)と復熱装置チャンバ(2210)との間に配設されたディスク型隔離壁(2214)によって囲まれる。ディスク型隔離壁(2214)は、使用済みアノードとして熱エネルギーを吸収するように構成され、使用済みカソードガスが燃焼チャンバ(2135)内で燃焼され、吸収された熱エネルギーが復熱装置チャンバ(2210)内部に再放出されるようになる。

【0033】

中間円筒形包囲体は、ホットゾーン包囲体壁を取り囲む。中間円筒形包囲体は、ディスク型中間底端壁(2511)および対向するディスク型中間上端壁(2513)と機械的に相互作用する端部が開放された長手方向中間円筒形側壁(2510)によって囲まれる。中間円筒形包囲体は、長手方向円筒形側壁(2015)およびディスク型上端壁(2017)を実質的に取り囲む空隙(2155)を形成するようにサイズ決めされる。空隙(2155)は、ホットゾーン包囲体壁の部分に近接した流体流通路を提供し、流体通路は、システム出口ポート(2165)と流体連通する。空隙(2155)は、1つ以上の燃焼器出口ポート(2150)を通じて燃焼チャンバ(2135)とさらに流体連通し、1つ以上のコールドスタート燃焼チャンバ(2300)と1つ以上のコールドスタート出口ポート(2302)を通じて流体連通している。したがって、燃焼チャンバ(2135)およびコールドスタート燃焼チャンバ(2300)の各々から出る排気ガスは、システム出口ポート(2165)を通して燃料電池スタックアセンブリ(2000)から出る前に、ホットゾーン包囲体壁の外側表面上を流れる。1つの非限定的な例示的实施形態では、壁(2015)の外面から壁(2510)の内面までの空隙(2155)の寸法は、1〜4mmの範囲である。中間円筒形包囲体は、また、以下にさらに説明されるコールドスタート燃焼チャンバ(2300)を包囲する。

【0034】

中間包囲体壁(2510、2511、および2513)の各々は、2000°F(1095℃)までの優れた高温強度と非常に良好な酸化環境に対する耐性を組み合わせた、コバルト-ニッケルクロム-タングステン合金であるハステロイを含む。最大67%の金属ニッケルおよび少量の鉄、マンガン、炭素、およびシリコンを有する、約30%の銅を含む合金群であるモネルを含む他の金属合金も好適である。いずれにしても、中間包囲体壁(2510、2511、および2513)は、好ましくは、ホットゾーンの動作温度において約25.0W/m²・K未満の熱伝導係数を有する金属合金から形成される。この、ホットゾーン包囲体壁の熱伝導率と比較してはるかに低い中間包囲体壁の熱伝導係数により、例えば少なくとも4倍の熱伝導係数を有する金属合金から形成されるホットゾーン包囲体壁のはるかに高い熱流量と比較して、中間包囲体壁の1つのエリアから別のエリアへの伝導熱流量はるかに遅くなる。したがって、本開示の一態様に従って、中間包囲体壁(2510、2511、および2513)は、より遅い熱伝達速度を有する第2の熱伝導経路として形成される。1つの他の実施形態では、中間包囲壁(2510、2511、および2513)は、本開示から逸脱することなく、約50.0W/m²・K未満の熱伝導係数を有し得る鋼または他の金属合金を含み得る。

【0035】

外側円筒形包囲体は、中間円筒形包囲体を取り囲む。外側包囲体は、ディスク型外側底壁(2518)および対向するディスク型外側上端壁(2516)と機械的に相互作用する端部が開放された外側円筒形側壁(2514)によって囲まれている。壁(2514、2518、および2516)の各々は、動作中に外側円筒形包囲体の実質的に均一な温度を提供するために、好ましくは、140W/m²・Kを超える熱伝導係数を有するアルミニウムまたはアルミニウム合金を含んで急速な熱エネルギー伝導を支援する。断熱層(2512)は、中間包囲体壁の外側表面と外側包囲体壁の内側表面との間に配設され、断熱層(2512)は、空隙(2155)にわたって放射される熱エネルギー、またはSOFCSシステムから出る排気ガスによって空隙を通して運ばれる熱エネルギーが、外側円筒形側壁(2514)およびディスク型外側底壁(2518)の表面に到達するのを抑制する。好ましくは、断熱層(2512)は、外側円筒形側壁(2514)およびディスク型外側

底壁（２５１８）の表面が動作パラメータ内に確実にとどまるように構成され、例えば、断熱層（２５１２）は、外側円筒形側壁（２５１４）およびディスク型外側底壁（２５１８）の温度が約１１０℃超に達しないように構成される。したがって、本開示の一態様に従って、外側包囲体壁（２５１４、２５１８、および２５１６）は、第３の熱伝導経路として形成される。

【００３６】

燃料ロッドまたはロッドとしても知られる複数の管状燃料電池（２０８０）は、ディスク型管上部支持壁（２０８２）と対向するディスク型管底部支持壁（２０８４）との間のカソードチャンバ（２０１０）の内側に長手方向に支持される。各管状燃料電池（２０８０）は、管の内径を形成する固体酸化物アノード電極支持構造を含む。固体セラミック電解質層は、固体酸化物アノード電極支持層の外径上に形成され、固体酸化物カソード電極層は、固体電解質層の外径上に形成される。各管状燃料電池（２０８０）は、その両端が開放されており、本明細書では改質燃料または合成ガスとも呼ばれるアノードガスが流れる円筒形流体導管を提供する。複数の管保持フランジ（２０８６）が任意選択で提供されて、管上部支持壁（２０８２）および底部管状支持壁（２０８４）に対して管端部を支持する。各管保持フランジ（２０８６）はまた、直流電力出力モジュール（１４０）に電氣的に相互作用する導電性端子を含む。

【００３７】

各管状燃料電池（２０８０）の支持層を形成するために使用される固体アノード電極は、ニッケルおよびドーブジルコニア、ニッケルおよびドーブセリア、または銅およびセリアなどのセルメット材料を含み得る。あるいは、固体アノード電極は、 $\text{Sr}_2\text{Mg}_{1-x}\text{Mn}_x\text{MoO}_{6-\delta}$ または $\text{La}_{0.75}\text{Sr}_{0.25}\text{Cr}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{O}_{3-\delta}$ などのペロフスキートを含み得る。いずれの場合も、管状燃料電池（２０８０）の各々の内側表面は、固体酸化物アノード電極を含み、アノードガス流（２１１５）は、各ディスク型管上部支持壁（２０８２）を通過するため、アノードガス流（２１１５）のみが燃料入口マニホールド（２０５５）を通過して管状燃料電池（２０８０）の各々に入り、固体アノード電極と反応する。

【００３８】

固体酸化物カソード電極は、ランタンストロンチウムコバルトオキシド（ＬＳＣ）、ランタンストロンチウムコバルトアイアンオキシド（ＬＳＣＦ）、またはランタンストロンチウムマンガナイト（ＬＳＭ）のうちのいずれか１つを含み得る。固体酸化物カソード電極は、各管状燃料電池（２０８０）の外側表面を形成する。カソードチャンバ（２０１０）が流入空気（２２００）（すなわち、カソードガス）で充填されると、カソードガスは、各管状燃料電池（２０８０）の外側表面上に形成された固体酸化物カソード電極と反応する。

【００３９】

電解質層は、アノード層とカソード層との間に配設される。好ましい電解質層は、イオン伝導性セラミック媒体を含み、好ましくは、イトリアンドーブジルコニアまたはガドリニウムドーブセリアなどの酸素イオン導体を含む。あるいは、電解質層は、セレートバリウムまたはジルコン酸バリウムなどのプロトン伝導セラミックである。理想的には、電解質層は、アノード電極とカソード電極との間に近気密バリアを提供して、アノードガスおよびカソードガスが電解質層を通過するのを防ぐように十分な厚さを伴って形成される。

【００４０】

改良されたＳＯＦＣ燃料電池スタックアセンブリ（２０００）は、任意選択で、コールドスタート燃焼チャンバ（２３００）を含む。コールドスタート燃焼チャンバ（２３００）は、中間チャンバ壁内に收容され、中間長手方向円筒形側壁（２５１０）、中間上端壁（２５１３）、およびカソードチャンバのディスク型上端壁（２０１７）によって囲まれる。コールドスタート燃焼チャンバ（２３００）は、燃料改質装置モジュール（２０２０）を部分的に取り囲む環状チャンバ容積を形成する。ＳＯＦＣシステムをコールドスタートから起動するとき、流入燃料空気混合物（２０２５）の一部は、燃料入口（２３０４）

を介してコールドスタートチャンバ（２３００）に逸れて流れ、点火器（２３０６）によって点火される。したがって、コールドスタート中、流入燃料空気混合物（２０２５）の一部は、コールドスタート燃焼チャンバ（２３００）内で燃焼される。コールドスタート燃焼チャンバ（２３００）内の燃焼によって発生した熱エネルギーは、熱エネルギーを急速に吸収するように設けられた銅芯で特別に構成されたディスク型上端壁（２０１７）を含むその周囲壁に放射される。さらに、ディスク型上端壁（２０１７）は、第１の熱伝導経路を形成するカソードチャンバ（２０１０）を取り囲むホットゾーン包囲体壁の一部である。ディスク型上端壁（２０１７）によって吸収されると、熱エネルギーは、全てが熱伝導性の高い材料を含むホットゾーン包囲体壁を通して急速に伝導される。コールドスタートチャンバ（２３００）内部で起こる燃焼からの排気は、排気ポート（２３０２）を通じてチャンバを出て、空隙（２１５５）を通過してシステム出口ポート（２１６５）に進む。空隙（２１５５）を通過する間、燃焼排気は、放射線および対流によって熱エネルギーをホットゾーン包囲体壁（２０１５）および（２０１６）に伝達して、ホットゾーン包囲体壁を所望の定常状態動作温度に加熱することをさらに補助する。

10

【００４１】

流入燃料空気混合物（２０２５）は、燃料改質装置モジュール（２０２０）を介して改良されたＳＯＦＣ燃料電池スタックアセンブリ（２０００）に入る。本好ましい実施形態において、燃料改質装置は、触媒部分酸化（ＣＰＯＸ）原子炉である。燃料改質装置モジュール（２０２０）は、燃料入力導管（２０４５）を通じて流入燃料空気混合物（２０２５）を受容し、流入燃料空気混合物（２０２５）を改質して、管状燃料電池（２０８０）の各々の内壁上に形成された固体酸化物アノード電極と反応するためにアノードガスとして使用される改質燃料または合成ガス（２０２７）を提供する。改質燃料または合成ガス（２０２７）は、燃料改質装置モジュール（２０２０）から出て、燃料入口マニホールド（２０５５）に入る。燃料入口マニホールド（２０５５）は、アノードガスを複数の管状燃料電池（２０８０）の各々の上端または入力端に分散するように構成される。各管状燃料電池（２０８０）の下端または出力端で、水素欠乏アノードガスを含む使用済み燃料（２０２８）は、管状燃料電池から燃焼チャンバ（２１３５）に出て、使用済みカソードガス（２０２６）または酸素欠乏空気と混合して燃焼する。

20

【００４２】

点線で示す流入空気（２２００）、またはカソードガスは、カソード供給管（２１４５）を介して改良されたＳＯＦＣ燃料電池スタックアセンブリ（２０００）に入り、それがその表面によって加熱される復熱装置チャンバ（２２１０）を通過し、次いで復熱装置出力ポート（２２３５）を介してカソード供給管に再入力する。次いで、加熱された空気は、カソード供給管（２１４５）を流れながら燃焼チャンバ（２１３５）を通過し、カソードチャンバ（２０１０）に入る前に、燃焼によって発生した熱エネルギーによって空気がさらに加熱され、カソード供給管（２１４５）の壁に伝達される。複数の空気出口ポート（２２４０）は、カソード供給管（２１４５）を通り、カソードチャンバ（２０１０）の内部を通過し、加熱された空気は、空気出口ポート（２２４０）を通過してカソードチャンバ（２０１０）に入る。カソードチャンバ内部に入ると、加熱された空気またはカソードガスは、各管状燃料電池（２０８０）の外側表面上に形成された固体酸化物カソード電極と反応する。使用済みカソードガス（２０２６）は、カソードチャンバ出口ポート（２２４５）を介してカソードチャンバから燃焼チャンバ（２１３５）に出て、そこで使用済みアノードガス（２０２８）と混合され燃焼される。排気ガスは、燃焼チャンバ（２１３５）から燃焼器出口ポート（２１５０）を通過して空隙（２１５５）に出口し、排気ガスがシステム出口ポート（２１６５）に向かって流れるにつれて復熱装置チャンバ（２２１０）の壁を加熱する。

30

40

【００４３】

固体酸化物燃料電池スタック上部の断面図

図２の概略図は、説明を簡略化するために２つの管状燃料電池（２０８０）のみを示す、改良されたＳＯＦＣ燃料電池スタックアセンブリ（２０００）の概略側面断面図を示す

50

。しかしながら、好ましいスタックは、空間の効率的な使用を提供し、効率的なガスフローパターンを促進し、所望の電圧で所望の出力を提供する様式で、カソードチャンバ（２００５）内に配置された燃料電池を有する２つ超の管状燃料電池（２０８０）を含む。

【００４４】

次に図５を参照すると、図は、本開示の１つの例の改良されたＳＯＦＣスタック（５０００）の非限定的に例示するカソードチャンバの、非限定的に例示する概略上部断面図を示す。カソードチャンバ（５００２）は、円周縁（５０１０）を画定する、端部が開放された長手方向円筒形側壁、例えば、図２に示される長手方向円筒形側壁（２０１５）によって囲まれている。内側遮光領域（５０１５）は、図２に示される長手方向中間円筒形側壁（２５１０）および空隙（２１５５）を表す。外側遮光領域（５０２０）は、図２に示す断熱層（２５１２）および外側円筒形側壁（２５１４）を表す。

10

【００４５】

カソード供給管（５０２５）は、カソードチャンバ（５００２）の中心に位置付けられ、カソードガスを、図２に示される複数の半径方向に配設された空気出口ポート、例えば（２２４０）を通じてカソードチャンバ内に分散する。長手方向中心軸（５０３０）は、カソード供給管（５０２５）および円周縁（５０１０）を中心合わせする。

【００４６】

改良されたＳＯＦＣスタック（５０００）は、各管状燃料電池（５０４０）の内径を構造的に形成し、各管状燃料電池（５０４０）の外径上に形成された固体酸化物カソード電極を有する固体酸化物アノード電極を各々含む、複数の実質的に一致する管状燃料電池（５０４０）を含む。第１の複数の管状燃料電池は、内側円形パターン（５０３５）に配置され、第１の複数の管状燃料電池の各々の中心は、内側円形パターン（５０３５）によって示されるように、長手方向中心軸（５０３０）から同じ半径方向の距離にある。内側円形パターン（５０３５）は、内側管状燃料電池が内側円形パターン（５０３５）の周りに等しく離間されている対称円形パターンであってもよく、または第１の複数の管状燃料電池が、不等角分布または角度分離を有する内側の円形パターン（５０３５）の周りに位置付けられてもよい。

20

【００４７】

第２の複数の管状燃料電池は、外側円形パターン（５０４５）によって示されるように、第２の複数の管状燃料電池の各々の中心が長手方向中心軸（５０３０）から同じ半径方向の距離にある、外側円形パターン（５０４５）に配置される。外側円形パターン（５０４５）は、第２の複数の燃料電池が外側円形パターン（５０４５）の周りに等しく離間されている対称円形パターンであってもよく、または第２の複数の燃料電池が、角度分離の不等角分布を有する外側円形パターン（５０４５）の周りに位置決めされてもよい。本例示の実施形態では、燃料電池の総数は２２個（２２個）である。他の総数の燃料電池との燃料電池分布の他のパターンが、本開示から逸脱することなく使用可能である。

30

【００４８】

改良されたＣＰＯＸ燃料改質装置

次に、図２～４を参照すると、本開示に従う燃料改質装置システム（３０００）は、図３の概略側面断面図に示されると共に、図４および４Ａの部分分解側面断面図に示される。燃料改質装置システム（３０００）は、燃料入口マニホールド（３０５５）の上に取り付けられた燃料改質装置モジュール（３０２０）を含む。燃料改質装置モジュール（３０２０）は、流入燃料空気混合物（３０２５）、すなわち、未成形燃料を、環状外周壁（３０１０）によって囲まれた円筒形燃料チャンバ（３００５）に、原子炉シールド基部壁（３０１５）によって、および燃料チャンバキャップ（３０１７）によって受容するように構成された燃料炉本体（３０４０）を含む。好ましい実施形態において、燃料チャンバキャップ（３０１７）は、環状側壁（３０１０）に溶接される。燃料改質装置システム（３０００）は、円筒形触媒体（３０３０）をさらに含む。燃料炉本体（３０４０）および円筒形触媒体（３０３０）の各々は、円筒形触媒体（３０３０）が燃料入口マニホールド（３０５５）のすぐ上に位置し、燃料炉本体（３０４０）が円筒形触媒体（３０３０）の

40

50

すぐ上に位置する円筒形触媒キャビティ（３０３５）に設置される。燃料炉本体（３０４０）および円筒形触媒体（３０３０）の各々は、円筒形燃料チャンバ（３００５）と燃料入口マニホールド（３０５５）との間で流体連通を提供するように構成される。

【００４９】

好ましい原子炉本体材料は、 $100\text{ W/m}^\circ\text{ K}$ よりも大きい熱伝導係数と、燃料炉本体（３０４０）と触媒体（３０３０）との間の界面から熱エネルギーを急速に伝導するのに十分な熱質量または材料体積を有する。好ましい触媒体材料は、 CPOX 反応の昇温および化学的に厳しい環境で信頼性の高い動作を提供するように構成されたセラミック基板を含む。典型的には、セラミック材料は、約 $40\text{ W/m}^\circ\text{ K}$ 未満であるが、しばしば約 $10\text{ W/m}^\circ\text{ K}$ 未満の熱伝導係数を有し、触媒体の１つの領域から別の領域への熱伝導率を低減する。

10

【００５０】

本非限定的な例示的实施形態において、円筒形触媒キャビティ（３０３５）は、図２に示されるように、長手方向中心軸（２０６０）と同軸の長手方向中心軸を伴って形成される環状包囲体壁（３０６０）の内径によって形成される側壁を有する。円筒形触媒キャビティ（３０３５）は、各々が外側包囲体のディスク型外側上端壁（２５１６）を通過する１つの円形開口部と、ホットゾーン包囲体のディスク型上端壁（２０１７）を通過する他方の円形開口部とを形成する２つの開口端を含む。

【００５１】

好ましい実施形態では、環状包囲体壁（３０６０）は、環状包囲体壁（３０６０）と燃料炉本体（３０４０）との間の熱伝導を阻止するために燃料炉本体（３０４０）より熱伝導率が低くなるように形成される。好ましい実施形態では、環状包囲体壁（３０６０）は、各々が酸化損傷に抵抗するために高いニッケル含有量を有し、かつ各々が例えば 400° C を超える好適なサービス温度定格を有し、かつ各々が約 $25.0\text{ W/m}^\circ\text{ K}$ 未満の熱伝導係数を有するハステロイまたはモネルを含む。加えて、環状包囲体壁（３０６０）は、例えば、 $0.02\sim 0.1$ インチの厚さの薄い壁であり、そこを通過してさらに熱伝導を開示する。

20

【００５２】

環状包囲体壁（３０６０）は、上記で第１の熱伝導経路として画定されたホットゾーン包囲体壁の一部であるその下側開放端においてディスク型上端壁（２０１７）に熱伝導的に接続される。環状包囲体壁は、上記で第３の熱伝導経路として画定される外側包囲体壁の一部である上部開放端でディスク型外側上端壁（２５１６）に熱伝導的に接続される。環状包囲体壁（３０６０）は、その上端部と下端部の開放端部との間の中間上端壁（２５１３）に熱伝導的に接続され、中間上端壁は、第２の熱伝導経路として上述された中間包囲体壁の一部である。したがって、本開示の一態様によれば、環状包囲体壁（３０６０）は、第１の熱伝導経路、第２の熱伝導経路および第３の熱伝導経路の各々と熱伝導的に接続される第４の熱伝導経路として形成される。

30

【００５３】

触媒体支持フランジ（３０６５）は、ディスク型上端壁（２０１７）から延在するか、またはそれによって形成される。触媒体支持フランジ（３０６５）は、円筒形触媒体（３０３０）が円形開口部（３０７０）を通過するのを防ぐのに十分小さい円形開口部（３０７０）の直径を画定するようにサイズ決めされる。第１の環状ワッシャ（３０７５）は、触媒体支持フランジ（３０６５）と円筒形触媒体（３０３０）の底面との間に配設される。第１の環状ワッシャ（３０７５）は、長手方向下向き圧力が円筒形触媒体（３０３０）に印加されるとき、円筒形触媒キャビティ（３０３５）との間にガスシールを提供する。加えて、第１の環状ワッシャ（３０７５）は、触媒体支持フランジ（３０６５）をディスク型上端壁（２０１７）から熱的に分離する断熱体として構成される。好ましくは、第１の環状ワッシャ（３０７５）は、所望のガスシールおよび断熱特性を提供するのに十分な厚さかつ適切な外縁直径寸法を伴って形成されたアルミナを含む。より一般的に、第１の環状ワッシャ（３０７５）は、好ましくは、非常に低い熱伝導率の非多孔質材料を含み、

40

50

例えば、ほとんどのセラミック材料を含む $40\text{ W/m}^\circ\text{K}$ 未満の熱伝導係数を有する。

【0054】

円筒形触媒キャビティ (3035) の直径は、円筒形触媒体 (3030) を取り囲む円筒形触媒キャビティ (3035) 内に環状断熱要素 (3080) を受容するようにサイズ決めされる。環状断熱要素 (3080) は、円筒形触媒体 (3030) を環状包囲体壁 (3060) から熱的に分離するように設けられる。加えて、環状絶縁要素 (3080) は、円筒形触媒キャビティ (3035) の長手方向中心軸に対して円筒形触媒体 (3030) を正確に中心に配置するように構成され、さらに、燃料炉本体 (3040) の1つ以上の特徴と正確な角度整列のために円筒形触媒体 (3030) を角度的に配向するように構成され得る。第1の環状ワッシャ (3075) および環状絶縁要素 (3080) の両方が、包囲体壁、例えば、環状包囲体壁 (3060) および上端壁 (2017) から好ましくは円筒形触媒体よりも高い温度で動作する触媒体 (3030) への熱伝導を防止するように設けられる。

【0055】

円筒形触媒体 (3030) は、円筒形触媒体 (3030) を各々完全に通過する複数の長手方向に配設された触媒燃料通路 (3085) を含むように形成された固体非多孔質セラミック基板を備える。各触媒燃料通路 (3085) は、円筒形触媒体 (3030) を長手方向に延びる個々の燃料導管を提供する。このように、各触媒燃料通路は、円筒形触媒キャビティ (3035) と燃料入口マニホールド (3055) との間の流体連通を提供する。加えて、触媒燃料通路 (3085) の各々の内側表面は、その上に被覆された触媒層 (3090) を伴って形成される。触媒層 (3090) は、燃料空気混合物 (3025) の部分燃焼を引き起こす放熱反応である触媒部分酸化によって、流入燃料空気混合物 (3025) を改質するために使用可能な触媒材料を含む。本非限定的な例示的实施形態において、好ましい触媒層 (3090) は、ロジウム (Rh) の金属相または酸化相を含む。触媒層 (3090) に使用可能な他の好適な触媒としては、Pt、Pd、Cu、Ni、Ru、およびCeを含む。円筒形触媒体 (3030) を形成するために使用される固体非多孔質セラミック基板は、好ましくは、燃料炉本体 (3040) の熱伝導係数と比較して、比較的低い熱伝導係数を有するアルミナまたは任意の他の非多孔質材料を含む。セラミック基板が使用される本非限定的な実施形態において、触媒体の熱伝導係数は、 $40\text{ W/m}^\circ\text{K}$ 未満である。

【0056】

以下にさらに説明されるように、流入燃料空気混合物 (3025) が円筒形燃料チャンバ (3005) に入り、原子炉シールド基部壁 (3015) を通過し、触媒燃料通路 (3085) の各々に入り、そこで触媒層 (3090) と反応し、次いでそれが管状燃料電池 (2080) の各々に分布する燃料入口マニホールド (3055) に入る。

【0057】

燃料炉本体

次に図2、図3、図4、および図4Aを参照すると、燃料炉本体 (3040) は、円筒形触媒キャビティ (3035) 内に部分的に配設され、ディスク型外側上端壁 (2516) を通ってコールドゾーン内に部分的に延び、その結果、燃料炉本体 (3040) の少なくとも一部分が外気に曝露される。環状外周壁 (3010) は、円筒形燃料チャンバ (3005) の円筒形側壁を提供する。燃料入力導管 (2025) は、環状外周壁 (3010) を通過して、流入空気燃料混合物 (2025/3025) を円筒形燃料チャンバ (3005) に送達する。認識されるように、他の幾何学的形状は、その横断面に矩形、長方形または他の断面を有することができる環状外周壁 (3010) および燃料チャンバ (3005) を形成するために使用可能である。

【0058】

原子炉シールド基部壁 (3015) は、一体的に環状外周壁 (3010) を伴って形成されることが好ましい円筒形燃料チャンバ (3005) の円形底壁を備える。しかしながら、原子炉シールド基部壁 (3015) および環状外周壁は、例えば溶接、はんだ付け、

10

20

30

40

50

機械的ファスナ、および他の好適な接合技術によって、別個の部品として形成され、共に接合されることができる。複数の基部壁燃料通路（３０９５）は、各々、例えば、長手方向中心軸（２０６０）と平行な各基部壁燃料通路を用いて、長手方向軸に沿って原子炉シールド基部壁（３０１５）を完全に通過する。各基部壁燃料通路（３０９５）は、原子炉シールド基部壁（３０１５）を介して長手方向に延びる燃料導管を提供する。さらに、各基部壁燃料通路（３０９５）は、円筒形触媒体（３０３０）を通過する複数の触媒燃料通路（３０８５）のうちの対応する１つと長手方向に整列され、かつ流体連通する。

【００５９】

図４および４Ａに示されるように、界面（３０３２）は、原子炉シールド基部壁（３０１５）の底面外面および円筒形触媒体（３０３０）の上面または入力面によって画定される。非限定的な例示的实施形態において、界面（３０３２）を形成する２つの表面のうちの１つまたは他方または両方は、隆起特徴部（３０３３）を含む。隆起特徴部は、２つの対向する表面の間の小さな隙間を提供するために、隆起特性を界面（３０３２）で対向する表面に接触させる位置にある原子炉シールド基部壁（３０１５）の底面から延在する１つ以上の位置に形成される円形のリングまたは複数、好ましくは３つの目立たない隆起した凸部を含み得る。より一般的に、界面（３０３２）は、原子炉シールド基部壁（３１１５）の底面と円筒形触媒体（３０３０）の上面との間の隙間を伴って形成される。全ての隙間は、触媒燃料通路の各々から出る放射性熱エネルギーが原子炉シールド基部壁（３０１５）の底面に衝突することを可能にし、原子炉シールド基部壁（３０１５）の底面の実質的に全てが、その上に衝突する熱放射線を吸収するために利用可能にするように提供される。

【００６０】

界面（３０３２）において、各基部壁燃料通路（３０９５）は、実質的に同軸の長手方向軸に沿って、その対応する触媒燃料通路（３０８５）と整列される。この構成では、円筒形燃料チャンバ（３００５）に送達される燃料空気混合物（２０２５）は、複数の基部壁燃料通路（３０９５）の各々を通して円筒形燃料チャンバ（３００５）から通過し、界面（３０３２）の表面の間に設けられた隙間を横断して流れ、対応する触媒燃料通路（３０８５）の各々に入る。触媒燃料通路（３０８５）内部に入ると、燃料空気混合物は、触媒被覆された側壁表面（３０９０）と反応し始め、燃料空気混合物は、燃料空気混合物を改質燃料または合成ガスに変換するために使用される触媒化部分酸化反応を開始する。本開示の一態様によれば、触媒燃料通路（３０８５）内部で起こるＣＰＯＸ反応によって発生した熱エネルギーは、それによって部分的に吸収されるために原子炉シールド基部壁（３１１５）の底面上に放射される。加えて、触媒燃料通路（３０８５）内部で起こるＣＰＯＸ反応によって発生した熱エネルギーを、それによって部分的に吸収するために基部壁燃料通路（３０９５）の内側表面上に放射する。

【００６１】

燃料炉本体（３０４０）は、円筒形触媒体（３０３０）を形成するために使用されるセラミック材料の熱伝導率と比較して比較的高い熱伝導性を有する材料から形成される。好ましい原子炉本体材料は、 $100\text{ W/m}^{\circ}\text{K}$ を超える熱伝導係数を有する。したがって、１つの非限定的な例示的实施形態では、燃料炉本体（３０４０）全体は、銅または銅合金の単位片から、ベリリウムまたはベリリウム合金の単位片から、アルミニウムまたはアルミニウム合金の単位片から、真鍮または真鍮合金の単位片から、タングステンまたはタングステン合金の単位片から形成され、合金は、モリブデン、ニッケル、クロム、真鍮、タングステンなどを含み得る。本実施例において、単位とは、燃料炉本体（３０４０）全体が、例えば鑄造または加工された単一の金属片から形成されることを意味する。代替の実施形態では、燃料炉本体（３０４０）は、一緒に組み立てられた複数の鑄造または加工された要素から形成することができ、例えば、連続的な熱伝導経路を提供する様式で溶接、ろう付け、または機械的に固定することができる。いずれの場合も、所望の材料は、 $300\text{ W/m}^{\circ}\text{K}$ を超える熱伝導係数を有する材料を使用して、いくつかの実施形態では、少なくとも $100\text{ W/m}^{\circ}\text{K}$ を超える熱伝導係数を有する。加えて、燃料炉本体（３０４０

）の壁厚および、または、熱質量は、界面（３０３２）に近接する原子炉本体（３０４０）の高温領域から原子炉本体（３０４０）の低温領域、例えば、高温ゾーンの外側に配設された領域への急速な熱伝導を促進し、界面（３０３２）とホットゾーンの外側に配設された原子炉本体の要素との間の温度勾配を最小限に抑えるのに十分である。原子炉本体材料のさらなる特徴は、好ましくは、少なくとも２００℃を超え、好ましくは１０００℃までの使用温度を有することである。

【００６２】

本非限定的な例示的实施形態において、燃料炉本体（３０４０）は、約１６７Ｗ／ｍ°Ｋの熱伝導係数を有するアルミニウム、好ましくはアルミニウム６０６１合金から形成される。アルミニウムおよびアルミニウム合金は、腐食性酸化損傷からバルク構造を保護する安定した酸化物層を自発的に形成し、追加の塗布された保護被覆なしで使用することができるため、好ましい。加えて、アルミニウムおよびアルミニウム合金は、表面の酸化を防止または低減するためにアノード酸化することができる。好ましい実施形態では、燃料炉本体（３０４０）全体は、アルミニウム６０６１合金の１個を含む固体要素を含み、しかしながら、燃料炉本体（３０４０）は、本開示から逸脱することなく、機械的ファスナを使用して複数の個々のサブアセンブリ要素を組み立てること、溶接もしくはろう付け、または連動機械的特徴などを使用することによって形成されるアセンブリを含み得る。

【００６３】

より具体的には、本開示の重要な態様によれば、円筒形触媒体（３０３０）、環状包囲体壁（３０６０）および燃料炉本体（３０４０）の各々の相対熱伝導率は、界面（３０３２）からホットゾーンの外側に配設された放熱フランジ（３１００）への熱伝導を促進し、かつ原子炉シールド基部壁（２０１５）の表面に衝突する熱放射線の吸収を促進するように選択される。これは、燃料炉本体（３０４０）を界面（３０３２）に局所的に最も熱伝導性の高い要素として構成し、燃料炉本体（３０４０）を、例えば、燃料炉本体の表面上を通過する空気を移動させるか、または受動的に冷却させるかのいずれかで、例えば、表面を燃料炉本体（３０４０）に外気に曝露させることによって、ホットゾーンの外側に延在するように構成することによって達成される。したがって、燃料炉本体（３０４０）の構成は、界面（３０３２）と外気との間に熱伝導経路と、燃料炉本体の一部分を外気に曝露することによって提供される燃料炉本体のより低温部分を提供することによって、界面（３０３２）とホットゾーンの外側の外気との間の温度勾配を確立し、維持する。外気に曝露される燃料炉本体の部分と、界面（３０３２）に近接する原子炉本体の部分との間で得られる温度勾配は、界面（３０３２）から外気に曝露される燃料炉本体の部分への燃料炉本体（３０４０）を通る実質的に連続した熱エネルギー伝導を促進する傾向がある。

【００６４】

燃料炉本体（３０４０）は、放熱フランジ（３１００）、例えば、環状外周壁（３０１０）から半径方向に延在するディスク型フランジを含む。放熱フランジ（３１００）は、ディスク型外側上端壁（２５１６）の上で外側包囲体の外部に支持され、外気に曝露される。好ましくは、放熱フランジ（３１００）は、一体的に環状外周壁（３０１０）を伴って形成されるが、放熱フランジ（３１００）は、溶接、はんだ付け、機械的ファスナ、または他の取り付け手段によって環状外周壁（３０１０）に取り付けられた別個の要素を含み得る。

【００６５】

環状シールプレート（３１０５）は、ディスク型外側上端壁（２５１６）と放熱フランジ（３１００）との間に配設され、ディスク型外側上端壁（２５１６）の上面と放熱フランジ（３１００）の底面との間に機械的界面を提供する。環状シールプレート（３１０５）は、そこを通過して環状外周壁（３０１０）を受容するようにサイズ決めされた中心貫通穴を含む。Ｏリングシール要素（３１１０）などは、環状シールプレート（３１０５）と放熱フランジ（３１００）との間に、例えばＯリング溝内に配設され、円筒形触媒キャビティ（３０３５）の上部部分をガスシールする役割を果たす。ディスク型外側上端壁（２５１６）の上面と環状シールプレート（３１０５）の底面との間に第２のＯリングシール

要素（３１１５）が設けられてもよい。

【００６６】

環状シールプレート（３１０５）および放熱フランジ（３１００）の両方は、界面（３０３２）における円筒形触媒体（３０３０）の上面、またはその上に形成された浮き上がった表面（３０３３）に対して原子炉シールド基部壁（３０１５）の底面を固定するために、また、さらにＯリングシール要素（３１１０）を圧縮するために、燃料炉本体（３０４０）に対して下向きの力を加える様式で、ファスナなどによってディスク型外側上端壁（２５１６）に取り付けられる。

【００６７】

次に図６を参照すると、燃料炉本体（３０４０）の概略上部断面図は、環状外周壁（３０１０）から半径方向に延在する放熱フランジ（３１００）を示す。ファスナ（３１２０）は、放熱フランジ（３１００）および環状シールプレート（３１０５）を通して延在し、ディスク型外側上端壁（２５１６）に放熱フランジ（３１００）および環状シールプレート（３１０５）を取り付ける。環状外周壁（３０１０）は、シールプレート（３１０５）が円筒形触媒キャビティ（３０３５）を密封するように、環状包囲体壁（３０６０）の外側に半径方向に延在する。基部壁燃料通路（３０９５）のアレイ（３１２５）が、原子炉シールド基部壁（３０１５）を通過することが示されている。

【００６８】

ここで図３を参照すると、燃料改質装置システム（３０００）は、電子制御器（１９０）によって読み取り可能な外部冷却および温度感知要素を含み得る。１つの非限定的な例示的实施形態では、電子制御器（１９０）によって動作可能な回転モータに取り付けられた回転ファンブレードなどの空気移動要素（３１３０）は、放熱フランジ（３１００）の上で空気の流れを誘導するように配設され、それによって、フランジ（３１００）から周囲の外気への対流熱エネルギー伝達を増加させる。加えて、放熱フランジ（３１００）の表面、または燃料炉本体（３０４０）の１つ以上の他の表面と接触する温度感知要素（３１３５）は、通信経路（３１４０）を介して電子制御器（１９０）に温度信号を送達するために使用可能である。空気移動要素（３１３０）の動作は一定であってもよく、または温度感知要素（３１３５）によって放出される温度信号の変化によって可変的にトリガされてもよい。１つの非限定動作モードでは、温度感知要素（３１３５）は所望の高温限界を超える温度、例えば５０℃を超える温度を報告するときに空気移動要素（３１３０）が作動し、温度感知要素（３１３５）が所望の高温限界を下回る温度、例えば４５℃を下回る温度を報告するときに空気移動要素（３１３０）は作動しない。

【００６９】

加えて、温度感知要素（３１３５）によって放出される温度信号は、放熱フランジ（３１００）の温度が所望の定常状態温度範囲に達したときに、コールドスタート燃焼チャンバ（２３００）への燃料の流れを停止するように、コールドスタート燃焼チャンバ（２３００）の動作を制御するために使用可能である。

【００７０】

一例の動作モードでは、電子制御器（１９０）は、通信経路（３１４０）を介して温度感知要素（３１３５）から温度信号を受信し、それに基づいて瞬間フランジ温度を判定する。次いで、電子制御器（１９０）は、フランジ温度が１つ以上の所望の温度範囲内であるかどうかを判定し、そうでない場合、温度感知要素（３１３５）によって示される瞬間温度が安全な動作限界を超えたときに、ガス流アクチュエータバルブなどを閉じるように燃料送達モジュール（１９７）に命令することによって、空気移動要素（３１３０）を動作させるか、またはコールドスタート燃焼チャンバ（２３００）への燃料の流れを開始または停止するか、または燃料改質装置システム（３０００）への燃料送達を停止するような様々なコマンドを実行する。１つの非限定動作モードでは、電子制御器（１９０）は、放熱フランジ（３１００）の温度が５０℃を超えるときに空気移動要素（３１３０）を作動させるように構成される。他の例示的实施形態では、空気移動要素（３１３０）は、異なる温度閾値に基づいて、必要に応じて多かれ少なかれ空気を移動するために使用可能な

10

20

30

40

50

複数の動作モードを有し得る。

【0071】

界面構成

ここで図4を参照すると、対応する対の基部壁燃料通路(3095)と触媒燃料通路(3085)との間の界面(3032)の分解側面断面図は、対応する対の原子炉シールド基部壁燃料通路(3095)と触媒燃料通路(3085)の各々が共通の長手方向軸に沿って整列されていることを示している。したがって、基部壁燃料通路および触媒燃料通路の各対応する対は、円筒形燃料チャンバ(3005)から燃料入口マニホールド(3055)に燃料空気混合物が通過する垂直流路を提供する。上述したように、界面(3032)の嵌合表面の間に隙間を設けて、原子炉シールド基部壁(3015)の表面をCPOX反応によって放出される熱放射線に曝露してもよいが、本開示を簡略化するために隙間は図4に示されていない。参照番号(3090)によって示されるように、触媒層は、各触媒燃料通路(3090)の側壁上に形成される。図4にさらに示されるように、図4Aを指す矢印は、図4Aが、触媒燃料通路(3085)の内部からその燃料入力端に向かって見たときの界面(3032)の概略図であることを示す。本非限定的な例示的实施形態では、円形基部壁燃料通路(3095)の各々の直径(D)は1.3mmであり、原子炉シールド基部壁の厚さは13mmであるので、各燃料通路(3095)が13mm長である。好ましい実施形態において、燃料通路の長手方向長さとその直径との比率は、少なくとも5、好ましくは10、最大20である。矩形触媒燃料通路(3085)の各々の側壁寸法は1.3mmであり、円筒形触媒体(3030)の厚さは約25.4mmであるので、各触媒燃料通路(3085)が25.4mm長である。好ましい実施形態において、触媒通路長手方向長さとその矩形側寸法との比率は、少なくとも10、好ましくは15~25、最大40である。

【0072】

円筒形触媒体(3030)は、円形断面を有し、直径25.4mm(1.0インチ)の円形領域にわたって、円形断面内に触媒燃料通路(3085)のアレイが形成される。アレイの触媒燃料通路の各々は、矩形の断面を有し、円筒形触媒体(3030)を完全に通過して延在する。本非限定的な例示的实施形態では、各矩形触媒燃料通路は、1.3mmの側面寸法および25.4mmの長さを有する。あるいは、触媒体(3030)および燃料通路のアレイは、本開示から逸脱することなく、他の非円形断面を有することができる。

【0073】

原子炉シールド基部壁(3015)は、円筒形触媒体(3030)の円形アレイ領域に対向する直径25.4mm(1.0インチ)の円形アレイ領域内に形成される円形基部壁燃料通路(3095)のアレイを伴って形成される。本非限定的な例示的实施形態では、各円形基部壁燃料通路(3095)は、直径1.3mmおよび長さ13.0mmを有する。あるいは、原子炉シールド基部壁(3015)およびその上に形成されるアレイ領域は、本開示から逸脱することなく、他の非円形断面を有することができる。上述のように、基部壁燃料通路のアレイ内の各円形基部壁燃料通路(3095)は、触媒燃料通路のアレイ内の矩形触媒燃料通路(3088)の1つと同軸であり、その結果、各基部壁燃料通路(3095)の長手方向中心軸は、対応する触媒燃料通路(3085)の長手方向中心軸と同軸である。

【0074】

原子炉シールド基部壁(3015)の固体材料は、各円形基部壁燃料通路を取り囲み、円筒形触媒体(3030)の固体材料は、各矩形触媒燃料通路を取り囲む。非限定的に例示するアレイパターンにおいて、全ての通路は、複数の平行な線形アレイに配置される。各線形アレイは、円形通路の直径の1.2倍の同じピッチ寸法で隣接する線形アレイからオフセットされる。本実施例では、ピッチ寸法は1.56mmである。直径25.4mmの円の上に配設されたこの非限定的に例示するアレイに基づいて、円形アレイ面積内の総数または円形通路(3095)は、約208である。

【0075】

10

20

30

40

50

各 1.3 mm の直径を有する 208 通路の組み合わせ面積は 276 mm² である。直径 25.4 mm のアレイ面積の合計面積は 507 mm² である。したがって、原子炉シールド基部壁 (3015) の底面が、その上に衝突する放射熱エネルギーを吸収するために利用可能な界面 (3032) に面した約 231 mm² の表面積を提供するように、円形アレイ面積内の固体材料の面積は、約 231 mm² である。本例示的实施形態において、固体表面積対穴径面積の比は、0.84 である。円形アレイの総面積の割合として、総面積の約 54% が円形通過面積であり、総面積の約 46% が固体材料面積である。当業者には理解されるように、円形基部壁燃料通路の直径を減少させることによって、表面積対穴径面積の比率を増加させることができる。界面 (3032) における表面積は、CPOX 反応によって放出される放射熱エネルギーが衝突するので、温度の変化なしに固体表面積を増加させれば、原子炉シールド基部壁 (3015) への熱エネルギー吸収が増加する。好ましい実施形態において、固体表面積対穴径面積の比率は 0.75 ~ 0.9 の範囲である。

【0076】

上述したように、CPOX 反応によって放出される放射性熱エネルギーはまた、円形基部壁燃料通路 (3095) に入り、放射性熱エネルギーの少なくとも一部がその内側表面に衝突する。円形基部壁燃料通路 (3095) の内側表面に衝突する放射熱エネルギーの入射角はほぼグレージング角であるが、通路の直径および反射エネルギーと比較して長く、グレージング角付近の入射で反射された場合でも、最終的には燃料通路を横断する際に多くの反射サイクルにわたって内側表面に衝突し、内側表面から反射する (3095)。全 208 個の円形通路の内側表面の総表面積は約 11043 mm² である。

【0077】

次に図 4A を参照すると、図は、燃料入口マニホールド (3055) から見た単一の円形燃料通路 (3095) および単一の矩形触媒燃料通路 (3085) の界面 (3032) を示す。さらに示されるように、本開示に従い、各基部壁通路 (3095) は、その長手方向全長に沿って直径 (D) を有する円形断面を有し、各触媒燃料通路 (3085) は、その長手方向全長に沿って側面寸法 (S) を有する矩形の断面を有する。図 4A の非限定的な例示的实施形態では、直径 (D) および側長 (S) は等しく、垂直線で充填された面積 (B) は、原子炉シールド基部壁 (3015) の底面の露出表面積である。表面積 (B) は、各触媒燃料通路 (3085) の入力端に近接した界面 (3032) に位置し、触媒面 (3090) から放射されている熱放射線を吸収するように特に設けられている。加えて、界面 (3032) の対向する表面の間の隙間が設けられると、表面積 (B) から反射することによって熱放射線が部分的に隙間に入る。

【0078】

以下の式 (1) は、表面積 (B) の面積を提供する。

$$A_s - A_c = S^2 - \pi (D/2)^2 \text{ 当量: } 1$$

【0079】

但し、 A_s は、側長 (S) を有する矩形 (3085) の面積である。

【0080】

A_c は、直径 (D) を有する円 (3095) の面積である。

【0081】

$S = D$ の場合、表面積 (B) の表面積 A_B は、以下である

$$(A_B) = S^2 (1 - \pi/4) = 0.2146 S^2 \text{ 当量: } 2$$

【0082】

言い換えれば、表面 (B) の面積は、矩形 (3085) の面積の約 21% である。認識されるように、面積 A_B を増加することによって、例えば、(S) から (S1) に角側寸法を増加させ、または円形通路 (3095) の直径 (D) を減少させて、触媒燃料通路内部で生成される熱放射線に対する表面 (B) の露出を増加させることができる。触媒燃料通路の側面寸法が (S) ~ (S1) に増加すると、面積 S_B は、 $S1/D$ 比が約 1.253 に等しい場合、寸法 (S1) の矩形の面積の 50% に増加することができる。

【0083】

表面積（B）は、矩形触媒燃料通路（3085）内部で起こるCPOX反応に直接曝露され、触媒燃料通路から放射される熱エネルギーを吸収するのに最適な位置にある。界面（3032）に隙間がない場合でも、本開示の非限定的な例示的实施形態では、表面（B）ならびに基部壁燃料通路（3095）の内側表面が、より低温の原子炉シールド基部壁（3015）の十分な表面積を提供して、CPOX反応によって放出される十分な放射熱エネルギーを吸収して触媒層の溶け落ちを防ぐ。しかしながら、当業者に理解されるように、隙間が提供されると、追加の放射性熱エネルギーが隙間に入り、多くのサイクルにわたって原子炉シールド基部壁（3015）のより冷却された固体材料表面積に衝突して反射されてCPOX反応によって放出される追加の熱エネルギーを吸収し得る。

【0084】

熱エネルギー伝達

理論に拘束されることを望まず、出願人は、燃料空気混合物（2025、3025）が好適な反応温度に加熱されるときに、界面（3032）に近接して触媒層（3090）に接触すると、すぐに発熱触媒化部分酸化反応が開始されると考える。さらに、出願人は、放熱触媒化部分酸化反応が界面（3032）に近い最大温度に達し、最高温度は約900～1000℃であると考えている。界面（3032）に近接する急速な加熱に応答して、触媒燃料通路（3085）に入る燃料空気混合物および触媒層（3090）の温度は、熱エネルギーが燃料空気混合物によって、ならびに触媒層（3090）によって吸収されるにつれて急速に上昇する。温度の上昇に応答して、燃料空気混合物は、体積が急速に膨張して触媒燃料通路（3085）を充填し、触媒燃料通路から出て円筒形触媒キャビティ（3035）および燃料入口マニホールド（3055）を充填する。ガスの膨張中、燃料空気混合物のより多くが、界面（3032）から遠位に触媒層（3090）と接触して放熱触媒化部分酸化反応に寄与し、それによって燃料／空気混合物をさらに加熱および膨張する。したがって、触媒化部分酸化反応によって発生した熱エネルギーのほとんどは、燃料／空気混合物によって吸収され、触媒燃料通路から燃料入口マニホールド（2055）へ搬送される。一例の動作モードでは、CPOX原子炉に送達される燃料／空気混合物の体積は、CPOX反応中に約300ワットを生成すると考えられる。

【0085】

触媒化部分酸化反応によって発生した熱エネルギーの一部は、触媒層（3090）によって吸収される。本実施例では、触媒層は金属（例えばRh）であり、熱伝導係数は約150W/m²・Kである。したがって、触媒層（3090）によって吸収された熱エネルギーは、触媒層厚を通じて熱伝導され、セラミック触媒体（3030）に到達し、さらに触媒層（3090）の長手方向長さに沿って行われる。しかしながら、触媒体（3030）は約45W/m²・Kの熱伝導係数を有するセラミック材料であるため、セラミック材料に入る熱束密度（W/m²）は低く、よって触媒層によって吸収された熱エネルギーは、セラミック材料の中に熱伝導される代わりに触媒燃料通路に再放出される。しかしながら、セラミック触媒体の半径方向軸に沿った低熱束密度は、熱エネルギーが触媒燃料通路から半径方向に伝導されることを、熱エネルギーが、a）燃料通路内部の燃料空気混合物に伝達されるか、またはb）燃料通路の端部から上述の燃料入口マニホールドまたは表面積（B）のいずれかに放射されるか、またはc）例えば界面に設けられた隙間に入ることによって、原子炉シールド基部壁の他の露光固体材料表面上に放射されるか、またはd）円形基部壁燃料通路に放射されて、対流熱伝達によって流入するガス空気混合物に伝達されるか、またはe）それによって吸収される基部壁燃料通路（3095）の内側表面に放射される程度まで防止するため、この結果が望ましい。

【0086】

したがって、触媒層によって吸収された熱エネルギーは、セラミック触媒体（3030）に容易に消散されない。代わりに、熱エネルギーは触媒燃料通路内に再放出され、燃料空気混合物をさらに加熱する。加えて、触媒層によって放出または反射される熱エネルギーは、触媒層の他の表面に衝突し、それによって部分的に吸収され、部分的に反射される。しかしながら、触媒燃料通路を出るための熱放射線のための少なくとも1つの出口がな

10

20

30

40

50

ければ、触媒層（３０９０）のエネルギー吸収率は、エネルギー再放出率を上回り得、それによって触媒層の温度が触媒体燃料通路に永久的な損傷を引き起こすように燃え尽きるまで増加し続ける。

【００８７】

上述したように、出願人らは、ＣＰＯＸ反応によって生成される総電力は３００Ｗであると考え、以下に式３として列挙されるステファン・ボルツマン方程式を使用して、図４Ａに示される集合表面積（Ｂ）によって吸収され得る総電力、すなわち、２０８本の基部壁通路（３０９５）に基づいて、表面積および温度を考慮して推定することができる。

【００８８】

$$P = e \sigma A S_f (T_c^4 - T_b^4) \text{ 当量 } 3$$

10

【００８９】

但し、 P ＝正味吸収電力（ワット）、 e ＝表面放射率、 $\sigma = 5.6703 \times 10^{-8}$ ($W/m^2 K^4$) ステファン・ボルツマン定数、 A ＝放射線が放射される面積 (m^2)、 S_f ＝放射線が表面積 A に衝突する入射角に関連する形態係数、 T_c ＝放射線源の温度 ($^{\circ}K$)、および T_b ＝表面積 A ($^{\circ}K$) の温度である。

【００９０】

特に重要なのは、 T_c と T_b がいつ等しくなるかである。式３は、原子炉シールド基部壁（３０１５）によって吸収されるネット放射電力が０であることを示す。したがって、原子炉シールド基部壁（３０１５）によって提供されるより冷却された表面積なしでは、触媒燃料通路内部の表面温度は、触媒層が過熱し、燃え尽きるまで増加し続ける可能性がある。

20

【００９１】

非限定的な例示的实施形態では、各矩形触媒燃料通路（３０８５）は、 1.3 mm (0.0013 m) に等しい側面寸法 (S) を有し、各円形基部壁通路（３０９５）は、 1.3 mm の直径を有する非限定的な実施形態では、２０８通路のアレイについて示される全ての表面積 (B) の集合面積は、 $7.38 \times 10 \sim 5 \text{ m}^2$ である。ＣＰＯＸ反応温度が $1000^{\circ}C$ ($1273^{\circ}K$)、各表面積 AB の温度は $100^{\circ}C$ ($373^{\circ}K$) とし、発光率 $e = 1.0$ である簡略化されたケースを用いると、式３は、合わせた表面積 AB_t が、ＣＰＯＸ反応によって生成される電力の約 11 W または約 3.6% を吸収することができることを予測する。

30

【００９２】

熱エネルギーを吸収するために、 AS で示される原子炉シールド基部壁（３０１５）の底面の固体表面積全体が潜在的に利用可能であるように、界面（３０３２）に隙間が設けられている場合、利用可能な固体材料表面積 AS は $2.31 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ であり、式３は、面積 AS がＣＰＯＸ反応によって生成される電力の約 34 W または約 11.3% を吸収することができることを予測する。

【００９３】

加えて、２０８個全ての円形燃料通路（３０９５）の内側表面の表面積が熱エネルギーを吸収するために、潜在的に利用可能である場合、 AP で示される全ての円形燃料通路の利用可能表面積は $1.1043 \times 10^2 \text{ m}^2$ であり、式３は、表面積 AP がＣＰＯＸ反応によって生成される電力の約 1632 W または約 211% を吸収できると予測している。

40

【００９４】

実用的な事項として、上記に列挙された熱エネルギー吸収力値は、通常の入射で熱放射線が表面に衝突する場合の形態係数 $S_f = 1$ を用いて算出される。表面積 AB_t の場合もそうであるが、表面積 AS および AP の場合、 $S_f = 1$ の値は現実的ではない。さらに、実用的な事項として、激しく酸化したアルミニウム表面の表面放射率 (e) は、 1.0 ではなく、代わりに約 0.25 以下である。したがって、エネルギー吸収値は、式３を、３つの表面積全ての AB_t 、 AS 、および AP について表面放射率 $e = 0.25$ 、ならびに表面積 AB_t について形態係数 $S_f = 1$ 、および表面積 AS および AP について $S_f = 0$

50

・ 1 で使用すると、より現実的に表すことができる。この場合、式 3 は、表面積 A_{Bt} が潜在的に約 2.75 W を吸収し、表面積 A_S が潜在的に約 0.85 W を吸収し、表面積 A_P が潜在的に約 44.6 W を吸収することを予測している。したがって、約 100℃ に維持されると、原子炉シールド基部壁 (3015) は、CPOX 反応によって放出される総電力の約 16% を潜在的に吸収する。

【0095】

当業者であれば、利用可能な表面積を増加させることによって、または原子炉シールド基部壁 (3015) の温度を下げることによって、追加の熱エネルギーが吸収され得ることを認識するであろう。本開示に従って上述したように、放熱フランジ (3100) の表面温度は、好ましくは 50～100℃ の範囲で維持される。これは、燃料炉本体 (3040) の高い熱伝導性のために、原子炉シールド本体 (3040) 全体の温度をほぼ同じ温度で維持する可能性が高いが、燃料炉基部壁 (3015) と放熱フランジ (3100) との間の温度勾配を提供する。上述したように、これは、CPOX 反応から熱エネルギーを吸収することを可能にし、燃料炉本体 (3040) を通過する未処理燃料が、どの燃料が使用されているかに応じて、その自動点火温度 295～580℃ に達することを防止する。

【0096】

したがって、動作中に上記の原子炉シールド基部壁 (3015) を 100℃ の温度に維持することと、界面 (3032) に例えば約 1mm の小さな隙間を提供することは、約 43 W の熱エネルギー、または 1000℃ の温度での CPOX 反応によって放射される総エネルギーの約 14% を吸収する可能性を有する。しかしながら、当業者であれば、形態係数を増加させ、表面積を増加させ、燃料炉本体 (3040) の温度を低下させることで、触媒燃料通路 (3085) の各々から追加の熱エネルギーを除去することができることを認識するであろう。

【0097】

動作モード

コールドスタート

図 1～図 3 を参照すると、燃料入力モジュール (197) は、コールドスタートから電子制御器 (190) によって動作し、燃料入力入口 (2304) を介して燃料空気混合物をコールドスタート燃焼チャンバ (2300) に送達し、電子制御器 (190) によって動作可能な電気点火器 (2306) を用いてコールドスタート燃焼チャンバ (2300) 内部の燃料空気混合物に点火する。同時にまたは直後に、燃料入力モジュール (197) はまた、燃料入力導管 (2045) を介して燃料／空気混合物を燃料改質装置モジュール (3020) に送達するように動作し、燃料空気混合物は燃料改質装置モジュール (3020) を介して燃料入力マニホールド (2055) に通過する。好ましくは、燃料改質装置モジュールを通じて送達される燃料空気混合物の初期流量は非常に低く、ほぼ固定体積の燃料空気混合物を SOFC システムに充填することだけを意図している。

【0098】

コールドスタート燃焼チャンバ (2300) 内部の点火燃料は、コールドスタート燃焼チャンバ (2300) の壁を加熱するが、上端壁 (2017) は、コールドスタート燃焼チャンバの他の壁よりも多くの熱エネルギーを吸収するように構成される。上端壁 (2017) の温度が上昇するにつれて、熱エネルギーは、上端壁 (2017) からホットゾーン包囲体壁 (115) の他の領域に熱伝導される。加えて、上端壁 (2017) およびホットゾーン包囲体 (115) の他の壁は、その中に含まれる燃料空気混合物によって吸収される燃料入口モジュール (2055) に熱放射線を放出し始め、その温度を上昇させる。コールドスタート燃焼チャンバ (2300) 内部の燃料空気混合物を燃焼することによって発生する排気ガスは、コールドスタート燃焼チャンバ (2300) からコールドスタート出口ポート (2302) を通って出口し、空隙 (2155) を通ってシステム出口ポート (2165) に流れる。熱排気ガスが空隙 (2010) を流れるにつれて、温度が上昇する長手方向円筒形側壁 (2015) の外側表面に熱エネルギーを放射する。

【0099】

上端壁（２０１７）は、ディスク型管底部支持壁（２０８４）およびディスク型隔離壁（２２１４）にさらに取り付けられた長手方向円筒形側壁（２０１５）に取り付けられる。上端壁（２０１７）、長手方向円筒形側壁（２０１５）、ディスク型管底部支持壁（２０８４）、およびディスク型隔離壁（２１１４）の各々は、まとめて、ホットゾーン包囲体壁（１１５）を形成する。上述したように、ホットゾーン包囲体壁の各々は、銅、モリブデン、アルミニウム銅、銅ニッケル合金、またはそれらの組み合わせのうちの１つ以上から製作され、その結果、ホットゾーン包囲体壁構造体（１１５）全体が、約１００～３００Ｗ／ｍ°Ｋ、好ましくは２００Ｗ／ｍ°Ｋ超の熱伝導係数を有する連続した熱伝導経路を形成する。さらに、ホットゾーン包囲体壁のいずれかの表面が酸素豊富な環境に曝露される場合、好ましくは、酸化を防ぐために壁表面はニッケルで被覆される。

10

【０１００】

３つのディスク型の壁（２０１７、２０８４、および２２１４）の場合、これらの壁の各々は、熱伝導によって、および、燃料入口マニホールド（２０５５）、カソードチャンバ（２０１０）、燃焼チャンバ（２１３５）、復熱装置チャンバ（２２１０）内などの各ディスク型の壁の周囲の冷却域に再排出することによって、熱エネルギーを吸収し、吸収された熱エネルギーをホットゾーン包囲体壁の他の領域に再配分することができる熱質量を提供するように構成される。したがって、上端壁（２０１７）がコールドスタート燃焼チャンバ（２３００）内部の燃焼によって加熱されると、熱エネルギーは、上端壁によって吸収され、ホットゾーン包囲体壁（２０１７）、２０１５、２０８４、および２２１４）の全ての領域に、ホットゾーン包囲体壁アセンブリ全体が平衡温度に達するまで急速に伝導される。さらに、熱エネルギーがホットゾーン包囲体壁によって吸収または放出されると、その高い熱伝導率のために、その平衡温度はホットゾーン包囲体壁の全ての領域にわたって実質的に均一に変化する。

20

【０１０１】

したがって、始動期間中、コールドスタート燃焼チャンバ（２３００）内の燃料の燃焼によって発生した熱エネルギーの少なくとも一部は、上端壁（２０１７）によって吸収される。さらなる部分は、熱排気ガスが空隙（２１５５）を通過してシステム出口ポート（２１６５）に流れるにつれて、長手方向円筒形側壁（２０１５）によって吸収される。上端壁（２０１７）の温度が上昇するにつれて、上端壁（２０１７）は、より低温の燃料入口マニホールド（２０５５）内に熱エネルギーを再放出し始め、燃料空気混合物が含まれ、かつ、または内部を流れるものは何であれ、その温度を上昇させる役割を果たす。

30

【０１０２】

最終的に、燃料入口マニホールド（２０５５）内部の燃料空気混合物の温度は、ＣＰＯＸ反応を開始するのに好適な反応温度に達する。初期ＣＰＯＸ反応は、反応温度に加熱された燃料空気混合物が、触媒体入力または触媒体が燃料改質装置モジュール（３０２０）の後端または底面と界面（３０３２）に位置する上面に近接した触媒層（３０９０）と接触するときに生じる。ＣＰＯＸ反応が触媒燃料通路（３０８５）の一部または全ての出力端で開始されると、各触媒燃料通路（３０８５）内部の温度は、界面（３０３２）にＣＰＯＸ反応を広げるその長手方向長さに沿って急速に増加し、ＣＰＯＸ反応は自己持続する。

【０１０３】

40

自己持続ＣＰＯＸ反応が達成されると、燃料入力モジュール（１９７）は、コールドスタート燃焼チャンバ（２３００）への燃料空気混合物の流れを中止し、自己持続ＣＰＯＸ反応を維持し、電力を生成するために必要に応じて燃料改質装置モジュール（３０２０）を通じて送達される燃料空気混合物の入力速度を調整するように動作される。しかしながら、コールドスタート燃焼チャンバ（２３００）内部の燃焼は、フルパワーの直流電力出力も自己持続可能であるまで継続されてもよい。電子制御器（１９０）は、ホットゾーン包囲体の壁上に設けられた温度センサを含む様々なセンサによって、放熱フランジ（３１００）上に設けられた温度センサ（３１３５）によって、システム排気ポート（２１６５）に近接して設けられた温度センサによって、直流電力出力モジュール（１４０）における直流電力信号を検出することによって、および様々な他の検知手段によって、自己持続

50

C P O X 反応を認識することができる。

【0104】

カソードガスを加熱するために、電子制御器（190）は、空気入力モジュール（198）を操作して、空気／カソードガスの流れを空気入力ポート（2205）に送達する。この工程は、コールドスタートチャンバの点火と同時に、またはコールドスタートチャンバの点火前にも行うことができるが、また、自己持続C P O X 反応が達成されるまで遅延させることもできる。好ましくは、復熱装置チャンバ（2210）を通じて送達される流入空気の初期流量は非常に低く、S O F C システムにほぼ固定体積の空気を充填することを意図している。

【0105】

流入空気の流れは、復熱装置入力ポート（2235）を介してカソード供給管（2145）から出て、復熱装置チャンバ（2210）を介して復熱装置出力ポート（2235）に通過し、カソード供給管（2145）を複数の空気出口ポート（2240）を介してカソードチャンバ（2010）に出る。各管状燃料電池（2080）の外側表面上に形成された固体酸化物カソード電極と反応した後、空気／カソードガスは燃焼チャンバ（2135）から出て、カソードチャンバ出口ポート（2245）を通過して燃焼チャンバ（2135）に通り、そこで使用済み燃料空気混合物と混合し、燃焼する。その後、燃焼副生成物は、燃焼器出口ポート（2150）を介して燃焼チャンバから空隙（2155）に出て、システム出口ポート（2165）を介してシステムから出る。

【0106】

主たる空気加熱要素は、復熱装置チャンバ（2210）内部に設けられたディスク型隔離壁（2214）である。上述のように、ディスク型隔離壁（2214）は、ホットゾーン包囲体の一部であり、したがって、コールドスタート燃焼チャンバ（2300）の基部壁を形成するディスク型上端壁（2017）の温度の上昇とほぼ同時に、起動段階中の温度の上昇を開始する。加えて、ディスク型隔離壁（2214）は、ディスク型管底部支持壁（2084）に熱伝導的に結合され、両方の壁は、燃焼チャンバ（2135）内部の使用済み燃料と使用済み空気の混合物を燃焼することによって加熱される。したがって、ディスク型上端壁（2017）が燃料入力マニホールド（2055）内に十分な熱エネルギーを放射して燃料温度を上げ始めるのとほぼ同時に、ディスク型隔離壁（2214）が復熱装置チャンバ（2210）内に十分な熱エネルギーを放射して、流入空気の温度を上げ始める。同時に、ホットゾーン包囲体壁は、内部に含まれる空気を加熱し、燃料電池スタック（2005）の管状の燃料電池の壁を加熱する役割を果たすカソードチャンバ（2010）に熱エネルギーを放射している。C P O X 反応が自己持続されるようになると、流入空気および燃料空気混合物の両方の流量は、自己持続C P O X 反応を維持し、所望の電力出力振幅で電力を生成するために必要に応じて調整され得る。

【0107】

8. 8. 2 S O F C 反応の開始

上述のように、燃料空気混合物および流入空気／カソードガスは、コールドスタート燃焼チャンバ（2300）内部で起こる燃焼によって加熱されるホットゾーン包囲体壁によって加熱される。最終的には、触媒燃料通路（3085）の内部で自己持続C P O X 反応が開始され、これにより燃料空気混合物がより高い温度に加熱され、燃料は、管状燃料電池（2080）の各々の内側表面上に形成された固体酸化物アノード電極と反応することができる合成ガスに改質される。より高い温度の合成ガスは、また、管状燃料電池（2080）を通過するときに、アノード電極電極に熱エネルギーを放射する。アノード電極の温度が上昇するにつれて、カソード電極は、長手方向円筒形側壁（2015）によってカソードチャンバ（2010）に放射される熱エネルギーと、復熱装置チャンバ（2210）からカソードチャンバ（2010）に入る加熱空気／カソードガスによって加熱される。

【0108】

最終的に、アノードおよびカソード電極、合成ガス、ならびにカソードチャンバ内部の空気／カソードガスは、反応温度に到達して直流電力が生成され始め、直流電力端子に出

10

20

30

40

50

力する。やがて、燃焼チャンバ（２１３５）内部のガス温度は燃焼温度に達し、燃焼チャンバ内部で発生する燃焼によって発生した熱エネルギーは、流入空気温度を定常状態の動作温度に増加させる。１つの非限定的な例の動作モードでは、合成ガス、流入空気、および管状燃料電池（２０８０）は、３５０～１２００℃の定常状態の動作温度を有し、好ましい動作温度範囲は８００～１０００℃である。一方、ホットゾーン包囲体壁（１１５）は、定常状態の動作温度に達し、次いで維持されるまで、ホットゾーン包囲体壁温度がその全ての領域にわたって実質的に均一に上昇し、低下するように、熱伝導によって常に熱エネルギーを再分布させる。

【０１０９】

燃料改質装置動作モード

ここで図３～図４Ａを参照すると、上述したように、燃料改質装置モジュール（３０２０）は、燃料チャンバ（３００５）内部の燃料空気混合物が、円筒形触媒体（３０３０）に入る前に、その自動点火温度に達することを防止するために、少なくとも部分的にコールドスタート燃焼チャンバ（２３００）およびホットゾーン包囲体壁から熱的に隔離される。より具体的には、使用する燃料に応じて、燃料自動点火温度範囲は約２９５～５８０℃である。ＳＯＦＣシステムの動作温度範囲を比較すると、燃料や電極層の材料にもよるが、３５０～１２００℃である。加えて、上記のようにＣＰＯＸ反応温度範囲は９００～１０００℃と推定される。

【０１１０】

コールドスタート中、燃料空気混合物（３０２０）は円筒形燃料チャンバ（３００５）に入り、原子炉シールド基部壁（３０１５）を通過し、次いで円筒形触媒体（３０３２）を通過して燃料入力マニホールド（３０５５）に到達する。次いで、燃料空気混合物は、管状燃料電池を通過し、最終的にシステムから流出する。上述したように、本開示は、他のコールドスタート燃焼チャンバ壁（２５１０および２５１１）および（２５１３）に伝達されるよりも、熱エネルギーのホットゾーン包囲体のディスク型上端壁（２０１７）への伝達を容易にする様式で、コールドスタート燃焼チャンバ（２３００）内部で燃焼によって発生した熱エネルギーを管理する。これは、ディスク型上端壁（２０１７）を、他の壁（２５１０および２５１３）の組み合わせ熱質量よりも大きな熱質量で構成することによって管理される。

【０１１１】

より具体的には、熱エネルギー伝達（Ｑ）は次式４で決まる。

$$Q = C_{th} \Delta T \quad \text{式 4}$$

【０１１２】

式中、Ｑ＝熱エネルギー伝達（Ｊ）、 C_{th} ＝壁の熱質量（Ｊ／℃）、および ΔT ＝高温ガスと壁との間の温度差。

【０１１３】

本実施例では ΔT は壁ごとにほぼ同じであるが、壁ごとの熱質量は異なる。熱質量 C_{th} は、構成要素材料の単位（ｇ）の構成要素材料質量（ｍ）と、単位（Ｊ／ｇ℃）の比熱容量（ μ ）との積として定義され、ここで、質量（ｍ）は、単位（ cm^3 ）の構成要素材料体積Ｖと、単位（ g/cm^3 ）の材料密度（ ρ ）との積である。

$$C_{th} = \rho V \mu \quad \text{式 5}$$

【０１１４】

式中、 ρ ＝材料密度（ g/cm^3 ）、 V ＝材料体積（ cm^3 ）、および μ ＝材料の材料比熱容量（Ｊ／ｇ℃）。

【０１１５】

非限定的な例示的实施形態では、ホットゾーン包囲体のディスク型上端壁（２０１７）は、大部分が銅を含み、かつコールドスタート燃焼チャンバ（２３００）を取り囲む中間包囲体の他の壁（２５１０）、（２５１１）、および（２５１３）を含み、各々は大部分がハステロイを含むホットゾーン包囲体をさらに取り囲む。銅については、比熱容量（ μ ）は０．３８５Ｊ／ｇ℃である。２０００°F（１０９５℃）までの優れた高温強度と非

10

20

30

40

50

常に良好な酸化環境に対する耐性を組み合わせたコバルト－ニッケル－クロム－タングステン合金であるハステロイについては、比熱容量 (μ) は $0.450 \text{ J/g}^\circ\text{C}$ である。銅については、密度 (ρ) は 8.96 g/cm^3 であり、ハステロイについては、密度 (ρ) は 8.22 g/cm^3 である。端壁 (2017) が、コールドスタートチャンバ (2300) に近接する、結合した他の壁より、確実に多くの熱エネルギーを吸収するようになるのは、ディスク型上端壁 (2017) の (Q_t) が、結合した他の壁の全ての (Q_o) よりも大きいときであり、これは、項 ΔT が各壁に対して同じであるときに式 4 に関して表すと、以下のように簡略化される。

$$C_{tht} > C_{tho} \text{ または } (\rho_c V_t \mu_c) > (\rho_h V_o \mu_h)$$

【0116】

式中、 C_{tht} = 上端壁の熱質量、 C_{tho} = 他の壁の熱質量を合わせたもの、 V_t = 上端壁の体積、 V_o = 他の壁の体積を合わせたもの、 ρ_c = 銅の密度、 ρ_h = ハステロイの密度、および μ_c = 銅の比熱、 μ_h = 比熱ハステロイである。

【0117】

本実施例の結果として、

$$V_t > 1.07 V_o \text{ となる。}$$

【0118】

言い換えれば、ディスク型上端壁 (2017) の体積 (V_t) が他の壁 (2510 および 2513) の組み合わせ体積 (V_o) の 1.07 倍を超えると、上部ディスク型上端壁 (2017) の熱質量は、他のコールドスタート燃焼チャンバ壁 (2510 および 2513) の熱質量を上回る。したがって、本開示によれば、上部ディスク型上端壁 (2017) の熱質量は、中間包囲体壁 (2510 および 2513) の熱質量を上回り、好ましくは 100% 以上上回る。上述の (V_o) を計算するには、より実際にコールドスタートチャンバ (2300) を包囲する壁のみを考慮する。上記の例では、(V_o) は、壁 (2513) の体積全体と、実際にコールドスタートチャンバ (2300) を包囲する壁 (2510) の部分のみを含む。このモデルを使用すると、ディスク型上端壁 (2017) (V_t) の体積が 2.14 倍 (V_o) であるとき、壁 (2513) と壁 (2510) のコールドスタートチャンバを包囲する部分の熱質量が 100% 超える。

【0119】

その結果、他の全てのコールドスタート燃焼チャンバ壁によって吸収されるよりも多くの熱エネルギーが上端壁 (2017) によって吸収される。この実施形態の主な利点は、コールドスタート燃焼チャンバ (2300) 内部で燃焼される燃料空気混合物によって発生した熱エネルギーの大部分を上端壁 (2017) に吸収することである。上端壁および他のホットゾーン包囲体壁は、壁 (2510 および 2513) よりも熱伝導性であるため、上端壁によって吸収された熱エネルギーは、ホットゾーン包囲体壁によって形成される熱伝導経路によって急速に伝導される。これは、中間包囲体壁 (2510、2511、および 2513) および環状包囲体壁 (7060) をハステロイ、または、ホットゾーン包囲体壁を通るよりも、ホットゾーン包囲体壁から離れた方がはるかに遅い伝導熱流量を引き起こす、約 $25.0 \text{ W/m}^\circ\text{K}$ 未満の熱伝導係数を有する別の高ニッケル含有金属から形成することによってさらに容易になる。

【0120】

コールドスタートプロセス中、コールドスタートチャンバからの燃焼エネルギーは、主に上端壁 (2017) によって吸収され、燃料入口マニホールド (2055) に再放出されて、その中に含まれる燃料空気混合物を、触媒燃料通路 (3085) の出力端 (3034) で CPOX 反応を開始するのに十分に高い温度になるように、十分に加熱する。本実施形態の副次的な利点は、コールドスタート燃焼チャンバ (2300) 内部で燃焼される燃料空気混合物によって発生した熱エネルギーの大部分が、代わりに、ディスク型上端壁 (2017) から他のホットゾーン包囲体壁 (2015 および 2511)、ならびにディスク型隔離壁 (2214) およびディスク型管底部支持壁 (2084) により高い伝導熱流量を提供することによって燃料改質装置モジュール (3020) から逸れて流れること

10

20

30

40

50

である。

【0121】

CPOX反応が開始され、自己持続すると、燃料炉本体(3040)は、熱伝導経路および原子炉シールド基部壁(3015)から放熱フランジ(3100)に熱エネルギーを急速に伝導するのに十分な熱質量を提供する。特に、界面(3032)は、900～1000℃の温度を有するCPOX反応に近接するため、熱エネルギーは、放射線、熱伝導、および対流によって様々な量で原子炉シールド基部壁(3015)に到達し、露光面(b)および原子炉シールド基部壁(3015)の底面の残りの固体材料、ならびに図4および4Aに示される円形基部壁燃料通路(3095)の内面によって吸収される。その結果、界面(3032)に近接する初期CPOX反応は、効果的に急冷され、流入燃料空気混合物の自動点火が防止される。ABで表す組み合わせられた表面積(B)は、全ての触媒燃料通路(3085)から放出される総熱放射線の約1%を潜在的に吸収し、上記ASで表す界面における原子炉シールド基部壁の固体表面積は、全ての触媒燃料通路(3085)から放出される総熱放射線の約0.2%を潜在的に吸収し、基部壁燃料通路(3095)の内面は、総合計約15%の約13.6%を潜在的に吸収する。

【0122】

本開示によれば、原子炉シールド基部壁(3015)の熱質量、すなわち、その材料体積(上記の式5を参照)は、触媒燃料通路(3085)から十分なエネルギー伝達を提供し、原子炉シールド基部壁が100℃以下に維持され得るときに、その中で過剰な加熱を防止できるように、十分に大きく形成される。加えて、本開示によれば、燃料炉本体(3040)の熱質量、すなわちその材料体積は、原子炉シールド基部壁(3015)から放熱フランジ(3100)への熱伝導によって十分なエネルギー伝達を提供するように、十分に大きく形成されているので、燃料炉本体(3040)全体が、より高い温度の原子炉シールド基部壁と放熱フランジ(3100)との間で小さな温度勾配に維持されて、ほぼ均一な温度に維持されることができるようになる。さらに、本開示によれば、放熱フランジ(3100)の表面積は、十分な大きさであるので、上述したように約44Wである原子炉シールド基部壁(3015)によって吸収された熱エネルギーの速度に等しい速度で、そこから熱エネルギーが放散される。さらに、本開示によれば、燃料炉本体(3040)は、円筒形燃料チャンバ(3005)を通過する燃料空気混合物がその自動点火温度を超えないように、そこから十分な熱を放散するように構成される。より具体的には、放熱フランジ(3100)は、予想される燃料空気混合物の最も低い自動点火温度に等しく、好ましくは燃料炉本体(3040)全体の温度を全動作モードの間、約100～250℃の間を維持するように、外気に十分な熱エネルギーを放散して燃料炉本体(3040)の温度を約295℃未満に維持するように構成される。また、本意図によると、放熱フランジ(3100)の温度は、全ての動作段階中に監視され、放熱フランジの温度が所望の高温制限を超えると、100～250℃の範囲で、流入燃料空気混合物は、燃料入力モジュール(197)の動作可能な要素によって停止されて、燃料がさらなる動作まで改質方法器(167)に入らないようにしてもよく、または空気移動要素(3130)は、放熱フランジ(3100)の温度を安全な動作温度に低下させてもよい。

【0123】

代替の燃料改質装置および外側包囲体の実施形態

次に図2～図4および図7を参照すると、SOFCSシステム(7000)の例示的で非限定的で代替的な実施形態は、燃料改質装置モジュール(7020)および関連要素の代替的な実施形態を含む。SOFCSシステム(7000)は、図2～4に示されるシステム(2000および3000)と比較すると、システム(7000)の追加の特徴および異なる動作モードが以下に概説される内容を除き、実質的に同一の構築および類似の動作モードを有する。システム間の類似性および相違性を明確にするために、以下のSOFCSシステムの実施形態(2000、3000、および7000)では、参照項目がシステム(2000、3000、および7000)の各々において実質的に同じ構造を有する場合は、同様の参照番号を使用する。

【0124】

図7を参照すると、代替燃料改質装置モジュール(7020)は、原子炉シールド基部壁(7015)に取り付けられた、または一体的にそれを伴って形成された環状外周壁(7010)を含む燃料炉本体(7040)を含む。燃料炉本体(7040)は、環状外周壁(7010)、原子炉シールド基部壁(7015)、およびディスク型外側包囲体上端フランジ(7102)によって囲まれた円筒形燃料チャンバ(7005)を提供するように形成されている。燃料入口導管(7045)は、ディスク型外側包囲体上端フランジ(7102)を通して燃料チャンバ(7005)に通過するように配設されている。

【0125】

燃料改質装置モジュール(7020)は、上述の円筒形触媒体(3030)をさらに含む。燃料炉本体(7040)および円筒形触媒体(3030)の各々は、円筒形触媒体(3030)が燃料入口マニホールド(3055)のすぐ上に位置し、燃料炉本体(7040)が円筒形触媒体(3030)のすぐ上に位置する円筒形触媒キャビティ(7035)に設置される。燃料炉本体(7040)および円筒形触媒体(3030)の各々は、図4および4Aに示され、かつ上述されるように、円筒形燃料チャンバ(7005)と燃料入口マニホールド(3055)との間で流体連通を提供するように構成される。燃料炉本体(7040)は、 $100\text{ W/m}^\circ\text{ K}$ よりも大きい熱伝導係数を有し、原子炉シールド基部壁(7015)と触媒体(3030)との間の界面から熱エネルギーを急速に伝導するのに十分な熱質量を有する材料を使用して形成される。

【0126】

S O F Cシステム(7000)の本非限定的代替実施形態では、円筒形触媒キャビティ(7035)は、環状包囲体壁(7060)の内径によって形成される側壁を有する。環状包囲体壁(7060)の内径は、長手方向中心軸(2060)と同軸に配設された長手方向中心軸を伴って形成される。円筒形触媒キャビティ(7035)は、各々、上部円形開口部をディスク型外側包囲体上端フランジ(7102)に向け、底部円形開口部を燃料入口マニホールド(3055)に向けた状態で円形開口部を形成する、2つの開放端を含む。環状包囲体壁(7060)は、ディスク型外側包囲体上端フランジ(7102)と機械的に相互作用する、上部円形開口部を包囲する環状シールプレート(7105)を含み、環状シールプレート(7105)は、図示せずに機械的ファスナなどによってディスク型外側包囲体上端フランジ(7102)に取り付けられる。リングシール要素(7110)などは、環状シールプレート(7105)とディスク型外側包囲体上端フランジ(7102)との間、例えばリング溝内に配設され、円筒形触媒キャビティ(7035)の上部部分をガスシールする役割を果たす。

【0127】

ディスク型外側包囲体上端フランジ(7102)は、外側円筒形側壁(2514)に取り付けられ、2つの要素間のジョイントが、連続的な熱伝導経路を提供する。燃料炉本体(7040)および他の外側包囲体壁(2514)および(2518)と同様に、外側包囲体上端フランジ(7102)は、 $100\text{ W/m}^\circ\text{ K}$ よりも大きい熱伝導係数を有し、原子炉シールド基部壁(7015)と触媒体(3030)との間の界面から熱エネルギーを急速に伝導するのに十分な熱質量を有する材料から形成される。上述したように、外側包囲体上端フランジ(7102)によって吸収された熱エネルギーは、外側包囲体の1つの領域から別の領域への温度勾配を最小化するために、外部円筒壁(2514)に急速に伝導される。ディスク型外側包囲体上端フランジ(7102)は、溶接、はんだ付けなどによる機械的ファスナ(図示せず)によって外側円筒壁(2514)に取り付けられる。いずれにせよ、上端フランジ(7102)と外側円筒壁(2514)との間に形成されるジョイントは、ガスシールされており、実質的に連続的な熱伝導経路を提供する。

【0128】

上述のように、原子炉シールド基部壁(7015)は、円筒形触媒体(3030)内で発生した熱エネルギーを吸収するように構成される。燃料炉本体(7040)全体は、円筒形触媒体(3030)内で発生した熱エネルギーをディスク型外側包囲体上端フランジ

(7102)に急速に伝導し、それから円筒形側壁(2514)および外側底壁(2518)に伝導するために、ディスク型上端フランジ(7102)に連続的な熱伝導経路を提供するように構成される。したがって、原子炉シールド基部壁(7015)の瞬間温度が変化するとそれに続いて、外側包囲体全体の温度が対応して急速に変化する。

【0129】

8.10 ホットゾーン包囲体から外側包囲体への熱エネルギー伝達

上に詳述されるように、外側包囲体(2514)、(2518)、(7102)の各壁は、例えば $100\sim300\text{ W/m}^\circ\text{K}$ の間、好ましくは $140\text{ W/m}^\circ\text{K}$ を超える高い熱伝導係数を有する材料を含む。したがって、外側円筒形側壁(2514)、ディスク型外側底壁(2518)、およびディスク型外側包囲体上端フランジ(7102)は、銅、モリブデン、アルミニウム銅、銅ニッケル合金、またはそれらの組み合わせのうちの1つ以上から製作される。壁(2514)、(2518)、および(7102)の各々は、好ましくは、 $140\text{ W/m}^\circ\text{K}$ を超える熱伝導係数を有し、各々が、その体積全体、および1つの隣接する壁から別の壁へ熱エネルギーを急速に伝導するのに十分な熱質量、すなわち厚さを有するアルミニウムまたはアルミニウム合金を含む。本非限定的な例示的实施形態において、外側円筒壁(2514)およびディスク型外側底壁(2518)は $0.5\sim6.5\text{ mm}$ ($0.20\sim0.25$ インチ)の範囲の材料の厚さを有し、外側包囲体上端フランジ(7102)は $4.0\sim10.0\text{ mm}$ ($0.16\sim0.39$ インチ)の範囲の材料厚を有するが、他の厚さの範囲が本開示から逸脱することなく使用可能である。

【0130】

具体的には、外側包囲体壁(2514、2518、7102)の各々は、外側包囲体のある領域間の温度勾配をより急速に減少させるために、外側包囲体のある領域から別の領域への熱伝導によって熱エネルギーを急速に伝達するための実質的に連続的な熱伝導経路を提供して、外側包囲体壁構造体全体が全体を通して実質的に同じ均一な温度にとどまるように構成される。

【0131】

さらに上述したように、ホットゾーン包囲体壁(2015、2016、および2017)および(2214および2080)は、ホットゾーン包囲体壁間の温度勾配をより急速に減少させ、ホットゾーン包囲体壁構造体全体を実質的に同じ温度に維持するために、ホットゾーン包囲体壁のある領域から別の領域への急速な熱伝導に好適な連続的な熱伝導経路を形成する。中間包囲体壁(2510、2511、および2513)は、ディスク型端壁(2017)によってホットゾーン包囲体壁と熱伝導的に結合される。上記に詳述されるように、中間包囲体壁の各々は、 $100\text{ W/m}^\circ\text{K}$ 以上のホットゾーン包囲体壁の熱伝導係数と比較して、約 $25.0\text{ W/m}^\circ\text{K}$ 未満の熱伝導率を有する材料を含む。加えて、ディスク型壁(2017、2084、および2214)は、中間包囲体壁が提供するより少ない熱質量と比較して、より大きな熱質量を提供する。その結果、ホットゾーン包囲体壁は、中間包囲体壁よりも速い速度で熱エネルギーを吸収し、伝導する。ホットゾーン包囲体壁は、ディスク型壁(2017)によって中間包囲体壁に熱伝導的に接続されるが、壁(2017)によって形成される熱伝導経路にわたる伝導熱流量を遅らせるために、接続の熱質量を意図的に小さくする。これは、ホットゾーン包囲体壁と中間包囲体壁との間の温度勾配を提供する。ホットゾーン包囲体壁と中間包囲体壁との間に設けられた温度勾配の利点は、ホットゾーン包囲体壁から放出される熱放射線の増加により、復熱装置チャンバ(2210)内への流入カソード空気およびカソードチャンバ(2010)内に存在する空気をより急速に加熱することである。

【0132】

外側包囲体(2514、2518、および7102)の各壁の上にさらに詳細に記載されるように、例えば $100\sim300\text{ W/m}^\circ\text{K}$ 、好ましくは $140\text{ W/m}^\circ\text{K}$ を超える高い熱伝導係数を有する材料を含む。したがって、外側円筒形側壁(2514)、ディスク型外側底壁(2518)、およびディスク型外側包囲体上端フランジ(7102)は、銅、モリブデン、アルミニウム、ニッケル、またはそれらの合金のうちの1つ以上から製作

される。1つの非限定的な実施形態では、壁（2514、2518、2516、および7102）は、好ましくは $140\text{ W/m}^\circ\text{K}$ を超える熱伝導係数を有するアルミニウムまたはアルミニウム合金を含む。さらに、壁（2514、2518、2516、および7102）の各々は、十分な熱質量、すなわち厚さまたは総体積を伴って形成され、その体積全体を通じて、例えば、1つの隣接する外側包囲体壁から別の壁へ熱エネルギーを急速に伝導する。図3および図7に示される本非限定的な例示的实施形態において、外側包囲体壁（2514および2518）は $0.5\sim 6.5\text{ mm}$ （ $0.02\sim 0.25$ インチ）の範囲の材料の厚さを有し、壁（7102）は $4.0\sim 10.0\text{ mm}$ （ $0.16\sim 0.39$ インチ）の範囲の材料の厚さを有するが、他の厚さの範囲が本開示から逸脱することなく使用可能である。図2および7に示される本非限定的な例示的实施形態において、ホットゾーン壁（2015）および（2016）は、 $0.5\sim 13\text{ mm}$ （ $0.02\sim 0.5$ インチ）の範囲の材料の厚さを有するが、他の厚さの範囲が本開示から逸脱することなく使用可能である。

10

【0133】

断熱材（2512）の層が、中間包囲体壁の外側表面と外側包囲体壁の内側表面の間に配設される。好ましくは、断熱層（2512）は、外側円筒形側壁（2514）、ディスク型外側底壁（2518）、およびディスク型外側包囲体上端フランジ（7102）の表面が、例えば $95\sim 110^\circ\text{C}$ の所望の動作温度範囲内に確実にとどまるように構築される。

【0134】

環状包囲体壁（7060）は、各々が酸化損傷に耐えるために高いニッケル含有量を有し、各々が例えば 400°C を超える好適な使用温度定格を有するハステロイまたはモネルなどの高温耐性材料を含む。しかしながら、ハステロイとモネルの両方の熱伝導係数は、約 $25.0\text{ W/m}^\circ\text{K}$ 未満である。加えて、環状包囲体壁（7060）は、 $0.02\sim 0.1$ インチの範囲の壁厚を伴って形成されるが、いずれにしても、環状包囲体壁（7060）の厚さは、環状包囲体壁（7060）の相対的な熱質量を低減するために、ホットゾーン包囲体壁および中間包囲体壁の熱質量と比較した場合、ホットゾーン包囲体壁の熱伝導性壁の熱質量よりも低い熱質量を提供するように選択される。したがって、その低い熱伝導率および低減された熱質量のため、環状包囲体壁（7060）は、ホットゾーン包囲体壁と外側包囲体壁との間の導電熱エネルギー伝達に抵抗して、ホットゾーン包囲体壁と外側包囲体壁との間の温度勾配を維持する。しかしながら、環状包囲体壁（7060）による導電熱エネルギー伝達に対するこの抵抗は、高温のホットゾーン包囲体壁から低温の外側包囲体壁への熱伝導率または熱流量を低減するに過ぎない。より具体的には、環状包囲体壁（7060）の構成は、ホットゾーン包囲体壁とホットゾーン包囲体壁との間の温度勾配を提供する。

20

30

【0135】

過温度保護システム

S O F C システム（7000）内の様々な位置での過剰な発熱により、潜在的に危険かつ有害な過温度状態になる可能性がある。動作中に、過温度状態は、セルスタック（2005）内、円筒形触媒体（7030）内、および燃焼チャンバ（2135）の内側またはそれに近接する箇所、コールドスタート燃焼チャンバ（2300）の内側またはそれに近接する箇所、および、または空隙（2155）内側などの他の位置で生じ得る。

40

【0136】

過温度状態は急速にエスカレートし、S O F C 燃料電池の破壊や爆発または火災などの大災害につながる可能性がある。過温度状態により、金属壁が部分的に溶融、あるいは損傷され、絶縁層（2512）が破壊されるか、または永久的に有効性が低くなる、溶け落ちにつながる人が多い。災害的な故障は、燃料燃焼が意図されていない円筒形燃料チャンバ（3005）内での燃料燃焼を含み得る。したがって、S O F C システムの任意の位置で過温度状態が発生した場合、過温度状態が災害的な故障につながるか、S O F C システムに損傷を与える前に、できるだけ早く燃料がS O F C システム（7000）に入るの

50

を止めることが望ましい。

【0137】

従来のSOFCシステムは、内部温度センサを使用して内部温度を監視する。温度センサは、SOFCシステム内部の、過熱または低温状態がSOFCシステムの性能に悪影響を及ぼす可能性のある重要なエリアに近接して位置している。各内部温度センサは、有線通信インターフェースを介して電子制御器と通信している。電子制御器は、内部温度センサから受信された温度信号を解釈し、ソフトウェアまたは他の論理プロセス工程を実行して、温度センサ入力を監視し、記録する。一般に、電子制御器（190）は、温度制限範囲を、各温度制限範囲は、異なる動作モードおよび、または異なる内部センサ位置に関するメモリモジュールに格納する。内部温度センサの1つの問題は、故障すると簡単に交換することができないことである。さらに、SOFCシステムの内部温度センサは、センサの耐用年数を短縮する可能性のある、高温で、しばしば汚染された環境にある。当該技術分野では、外部温度センサを使用してSOFC温度レベルを決定し、好ましくは、単一の外部温度センサに、様々なSOFCシステムプロセス制御をトリガするために使用することができる、単一の瞬間SOFC表面温度を決定する必要がある。

10

【0138】

本開示によれば、プロセス制御は、単一の外部温度センサによって監視される温度の変化によってトリガされ得る。上述の一例示的实施形態では、図3に示される空気移動装置（3130）の動作は、SOFCシステム（3000）の外面の温度の変化に応答する。特に、外部温度センサ（3135）からの温度センサ信号を使用する電子制御器（190）は、外部温度センサ（3135）によって示される瞬間温度変化に応じて、空気移動装置（3130）をオンまたはオフに切り替える。

20

【0139】

図7を参照すると、SOFCシステム（7000）は、ディスク型外側包囲体上端フランジ（7102）の外面と接触して取り付けられた外部温度センサ（7135）を含む。あるいは、外部温度センサ（7135）は、外側包囲体壁の任意の外面と接触して取り付けられ得る。外部温度感知要素（7135）は、電子制御器（190）と通信し、通信経路（7140）を介して電子制御器（190）に温度信号を送達する。様々な実施形態では、SOFCシステム（7000）はまた、図3に示され、かつ、上述された、空気移動要素（3130）を備えてもよく、これは、電子制御器（190）によって動作可能で、その温度を低減するために、ディスク型外側包囲体上端フランジ（7102）の上で空気を移動させる。

30

【0140】

例示的な動作モードでは、電子制御器（190）は、通信経路（7140）を介して外部温度感知要素（7135）から温度信号を受信し、外部温度感知要素が取り付けられる外面の瞬間温度を判定する。瞬間温度が予想温度範囲内でない場合、電子制御器は、範囲外の瞬間温度値に応じて、ソフトウェアおよび他の論理演算子を使用して様々な操作手順を行うようにプログラムされる。

【0141】

第1の例では、SOFCシステムは、直流出力電力を生成する通常の動作モードで動作しており、図1に示されるように、燃料入力モジュール（197）から燃料チャンバ（7005）に入る流入燃料空気混合物の安定した均一な流れで動作している。

40

【0142】

燃料入力モジュール（197）は、動作可能な燃料供給バルブ（7610）を含む。動作可能な燃料供給バルブは、燃料入力導管（7045）に沿って燃料源と燃料改質装置（7020）との間に配設される。動作可能な燃料供給バルブは、通信チャンネル（7666）を介して電子制御器（190）と、図示せずに電力導管（7830）を介して電気電源と通信する。動作可能な燃料供給バルブ（7610）は、バルブが閉鎖される、例えばバネ力などによって閉鎖状態に保たれるデフォルト状態を有する。バルブは、電子制御器（190）によって動作し、バルブ内にまたはバルブ内に組み込まれた、あるいはバルブと

50

関連付けられたアクチュエータに電力信号が印加されると、バネ力を克服することによって開放される。

【0143】

1つの非限定的な実施形態では、電子制御器(190)は、バルブアクチュエータに電力信号を印加して、バネ力を克服し、燃料供給バルブ(7610)を開く。電力信号の振幅に応じて、バルブは、わずかに開放されてもよく、例えば閾値電力信号振幅で開放されてもよく、またはバルブが完全に開放されてもよく、例えば最大電力信号振幅で開放されてもよい。動作中、電子制御器(190)は、バルブアクチュエータに送達される電力信号の振幅の変化に応じて、バルブアクチュエータを、わずかにまたは部分的に開いた状態と完全に開いた状態の範囲の様々な開放位置に移動させる様式で電力信号振幅を変化させるように動作可能である。電子制御器(190)は、電力導管(7830)上の電力信号の振幅を変化させることによって、入力導管(7045)を円筒形燃料チャンバ(7005)に通過している燃料空気混合物(3025)の質量または体積流量を調節するように動作する。

10

【0144】

本開示の動作モードにおいて、電子制御器(190)は、外部温度感知要素(7102)を監視して、ディスク型上端フランジ(7102)の瞬間温度を判定する。電子制御器(190)上で動作するソフトウェアプログラムまたは他の論理演算子は、上端フランジの測定された瞬間温度と、S O F Cシステムの現在の動作モードに関連付けられた温度範囲とを比較する。異なる動作モードの温度範囲は、電子制御器(190)に関連付けられたメモリに格納される。非限定的な例の動作モードとしては、コールドスタート燃焼チャンバ(2300)が使用されているときの起動動作モード、コールドスタート燃焼チャンバが使用されていない定常状態動作モード、および燃料スタックから出力される直流電力を多かれ少なかれ提供するために流入燃料の流量が調節される他のものが挙げられる。

20

【0145】

いずれの場合でも、外部温度感知要素(7102)によって感知される瞬間温度が予想される温度範囲内にある場合は、電子制御器は動作しない。しかしながら、外部温度感知要素(7102)によって検知される瞬間温度、すなわち、上端フランジ(7102)の温度が、予想される温度範囲内ではない場合、電子制御器(190)が動作する。

【0146】

安全性の特徴として、動作モードのいずれかに対する予想温度範囲は、「制御器のフェイルセーフ温度」と呼ばれる上限を有する。本非限定例の動作モードでは、制御器のフェイルセーフ温度は140℃である。特に、外部センサ(7135)によって測定された瞬間温度が140℃以上である場合、電子制御器は、動作可能な燃料供給バルブ(7610)アクチュエータの電源を切断することを含むよりも安全停止手順を開始して、少なくとも、S O F Cシステムへさらに燃料が流れ込まないように防止する。

30

【0147】

制御器のフェイルセーフ温度が検知されると、電子制御器は、燃料供給モジュール(197)に電力を切断することによって燃料供給バルブ(7610)を閉じるように命令することを含む、ソフトウェアまたは論理的に制御されたシャットダウン処理を開始する。加えて、制御シャットダウンプロセスは、S O F Cシステムがそのように装備されている場合、および空気移動装置がすでに動作していない場合、コールドスタート燃焼チャンバ(2300)への燃料送達を停止すること、空気入力モジュール(198)による空気入力を停止すること、および空気移動装置(3210)を作動させることを含み得る。

40

【0148】

より一般的に、熱伝導経路および本開示の改良された外側包囲体によって提供される比較的高い熱伝導性のために、外側包囲体の任意の表面上に位置決めされた単一の外部温度感知要素(7135)は、外側包囲体壁(132)全体の瞬間温度を偏心的に感知する。

【0149】

本開示のさらなる態様では、溶融可能なリンクを含む温度ヒューズ(7860)は、デ

50

イスク型外側包囲体上端フランジ（７１０２）の外面と接触して、または外側包囲体の任意の外側表面と接触して配設される。温度ヒューズ（７８６０）は、燃料供給電力導管（７８３０）に沿って、供給源の電源と動作可能な燃料供給バルブ（７６１０）との間に配設される。温度ヒューズ（７８６０）は、受動装置であり、電子制御器（１９０）から独立している。温度ヒューズは、供給バルブ電源から動作可能な燃料供給バルブ（７６１０）に伝わる電力を図示せず、溶融可能なリンクが溶融し、温度ヒューズ（７８６０）の内部に短絡を生じさせるときに中断するように構成される。溶融可能なリンクは、システムのフェイルセーフ温度に等しい特定の溶融温度を有する。本非限定的な例示的实施形態では、システムのフェイルセーフ温度は、制御器のフェイルセーフ温度よりも高い温度に等しい。１つの非限定的に例示する動作モードでは、システムのフェイルセーフ温度は１８０℃である。特に、溶融可能なリンクの温度がシステムのフェイルセーフ温度１８０℃に達した場合、溶融可能なリンクが溶け、これにより温度ヒューズ（７８６０）全体に短絡が生じる。短絡は、閉じる動作可能なバルブ（７６１０）で電力振幅をゼロにする。したがって、燃料チャンバ（７００５）への燃料の流れが防止される。例示的で非限定的な実施形態において、温度ヒューズ（７８６０）は、市販の温度ヒューズ、例えば、タムラＬＥシリーズ、ＮＥＣセヒューズＳＦシリーズ、マイクロテンプＧ４Ａシリーズ、およびホショエルムウッドＤシリーズのいずれか１つを含み、ここで選択されたヒューズは、所望のシステムのフェイルセーフ温度で溶融する溶融可能なリンクで構成される。

【０１５０】

上述のように、システム（７０００）は、単一の外部温度センサ（７１３５）が制御器のフェイルセーフ温度と同等の瞬間温度を報告するときに、ソフトウェアまたは論理シャットダウン手順を実行するように動作可能な電子制御器（１９０）を含む。ソフトウェアまたは論理シャットダウン手順は、少なくとも、論理コマンドを使用して動作可能な燃料供給バルブ（７６１０）を閉じることを含む。一方、温度ヒューズ（７８６０）の溶融可能なリンクがシステムのフェイルセーフ温度に達した場合、温度ヒューズは、電力が、動作可能な燃料供給バルブ（７６１０）に到達することを阻止するので、ソフトウェアまたは論理シャットダウン手順によって前に燃料の流れが停止されなかった場合には、燃料チャンバへの燃料の流れが停止される。

【０１５１】

外側包囲体壁（２５１４、２５１８、および７１０２）の各々が、高い熱伝導係数を有する熱伝導経路を提供するように構成されているため、上述したように、外側包囲体壁構造体全体が実質的に同じ瞬間温度で熱平衡に急速に到達する。したがって、温度感知要素（７１３５）および温度ヒューズ（７８６０）は、外側包囲体の異なる外側表面上を含む外側包囲体の任意の外面上に位置させることができる。さらに、上述のように、環状包囲体壁（７０６０）上で熱伝導的に接続されるホットゾーン包囲体壁の温度の上昇および低下に応答して、外側包囲体の瞬間温度が上昇および低下する。したがって、ＳＯＦＣシステム（７０００）内の任意の位置での瞬間温度の任意の長時間の上昇により、電子制御器（１９０）によって監視される外側包囲体壁の温度が上昇し、最終的には、外部温度感知要素（７１３５）によって検出される。

【０１５２】

燃料／酸化剤の入力制御モジュール

ここで図８を参照すると、本開示に従う固体酸化物燃料電池（ＳＯＦＣ）システム（８０００）のさらなる非限定的な、例示的な実施形態の概略表現が示されている。ＳＯＦＣシステム（８０００）は、図１において燃料入力モジュール（１９７）としても示される燃料／酸化剤の入力制御モジュール（８００５）を含む。燃料／酸化剤の入力制御モジュール（８００５）は、酸化剤供給源（８０１０）および炭化水素燃料供給源（８０２０）の各々を含むか、または各々と流体的に結合される。酸化剤供給源（８０１０）は、接続酸化剤入力導管（８０１７）によって混合チャンバ（８０１５）、例えばらせん混合チャンバと流体連通する。燃料供給源（８０２０）は、接続燃料入力導管（８０２２）によって混合チャンバ（８０１５）と流体連通する。酸化剤流量モジュレータ（８０２５）は、

10

20

30

40

50

酸化剤供給源（８０１０）と混合チャンバ（８０１５）との間に酸化剤入力導管（８０１７）に沿って配設される。炭化水素燃料流量モジュレータ（８０３５）は、炭化水素燃料供給源（８０２０）と混合チャンバ（８０１５）との間の燃料入力導管（８０２２）に沿って配設される。各フローモジュレータ（８０２５、８０３５）は、図示せず、電子制御器（１９０）によって制御される少なくとも１つの電気機械式アクチュエータを含む。電子制御器（１９０）は、入力酸化剤の流量および入力炭化水素燃料の流量を混合チャンバ（８０１５）に独立して調節するように構成される。入力酸化剤の流量および入力炭化水素燃料の流量の各々は、実質的にゼロの入力流量と最大入力流量との間で調節され得る。代替の実施形態では、混合チャンバ（８０１５）は排除され、酸化剤入力導管（８０１７）および燃料入力導管（８０２２）の各々は、図３、図４、図４Ａおよび図７に示される燃料原子炉システム（３０００）の内部に形成される対応する供給源と燃料チャンバ（３００５）との間に接続される。

【０１５３】

圧縮ガス容器

１つの非限定的な、例示的な実施形態において、酸化剤供給源（８０１０）および炭化水素燃料供給源（８０２０）のうちの１つまたは両方は、圧縮ガス容器、例えば、加圧酸素または空気容器、または加圧炭化水素燃料容器である。いずれの場合も、加圧容器は、図示しない受動圧力レギュレータを含む。受動圧力レギュレータは、圧縮ガス容器と混合チャンバ（８０１５）との間に配設され、圧縮ガス容器から出る高圧ガスの流れを圧力調節または調整するように動作する。低圧ガスの流れは、圧力レギュレータによって、対応する入力導管（８０１７、８０２２）に放出され、低圧ガスは、圧縮ガス容器内部に格納された高圧ガスと比較してはるかに低いガス圧力で放出される。受動圧力レギュレータはまた、受動ガス流モジュレータとして機能する。これは、対応する入力導管（８０１７、８０２２）から混合チャンバ（８０１５）に出る低圧ガスにより、対応する導管内部のガス圧力が低下したときに生じる。ガス圧力の低下に応答して、対応する導管内部で、受動圧力レギュレータが、対応する導管内のガス圧力が受動ガスレギュレータの設定圧力に復元されるまで、加圧されたガス容器から対応する導管内部にガスを放出する。したがって、入力導管（８０１７、８０２２）のいずれか１つから、例えば混合チャンバ（８０１５）に出るガス流量は、対応する受動圧力レギュレータによって放出される対応するガス流量によって置き換えられる。したがって、各ガスレギュレータは、対応する入力導管（８０１７、８０２２）内部で一定のガス圧力を維持するように動作する。

【０１５４】

空気ポンプ／ファン

別の非限定的な、例示的な実施形態では、酸化剤源（８０１０）は、周囲環境または空気入口から酸化剤入力導管（８０１７）に空気を引き込む空気ポンプまたはファンなどである。１つの非限定的な、例示的な実施形態において、空気ポンプまたはファンはまた、空気ポンプまたはファンが電子制御器（１９０）と通信する制御可能な電気機械式アクチュエータを含むとき、酸化剤流量モジュレータ（８０２５）として動作する。図示せずに制御可能な電気機械式アクチュエータは、制御可能な空気移動装置、例えば、ポンプベーン、ファンブレードなどを回転させるか、あるいは空気ポンプまたはファンと関連付けられるように動作する。空気移動装置の移動は、酸化剤入力導管（８０１７）に酸化剤を誘導または引き込み、酸化剤の燃料流量は、空気移動装置の速度を変化させることによって、例えば、回転ポンプベーンまたはファンブレードの角速度を変化させることによって変化する。空気移動装置の速度の変化は、電子制御器（１９０）から受信した制御信号およびコマンド信号によって駆動される。空気移動装置によって受信されるコマンドおよび制御信号は、酸化剤入力導管（８０１７）を通過する空気の混合チャンバ（８０１５）への流量の調節に対応する空気移動装置の速度を調節する。空気ポンプまたはファンは、酸化剤流量モジュレータ（８０２５）として動作するとき、電子制御器（１９０）によって制御され、酸化剤入力導管（８０１７）を通過して混合チャンバ（８０１５）に流れる空気の流体流量を、実質的にゼロの酸化剤の流量と、最大の酸化剤の流量との間で調節するよ

うに動作する。

【0155】

さらなる非限定的な実施形態では、酸化剤源（8010）は、実質的に一定の空気流量で周囲環境からまたは空気入口などから酸化剤入力導管（8017）に空気を引き込む空気ポンプまたはファンであり、空気流量変調は、以下に記載されるガス制御バルブによって行われる。

【0156】

液体燃料供給

別の非限定的な、例示的な実施形態において、炭化水素燃料供給源（8020）は、液体炭化水素燃料、例えば灯油、ガソリンなどを含む。本実施形態では、炭化水素燃料供給源（8020）は、加圧され得る液体燃料容器と、液体燃料容器と混合チャンバ（8105）との間に配設された気化器または噴霧器モジュールとを含む。液体燃料は、液体燃料を炭化水素ガス蒸気または液体燃料液滴を含むミストに変換するように構成された気化器または噴霧器に送達される。炭化水素ガスの蒸気またはミストは、混合チャンバ（8015）に送達するために炭化水素燃料入力導管（8022）に送達される。本実施形態では、気化器または噴霧器が電子制御器（190）と通信して制御可能な電気機械式アクチュエータなどを含むときに、気化器または噴霧器を炭化水素燃料流量モジュレータ（8035）として動作させてもよい。制御可能な電気機械式アクチュエータは、液体燃料供給を気化または霧化することに関連付けられた要素を移動またはそれ以外の方法で操作して、炭化水素燃料の流量を混合チャンバ（8015）に調節するように動作する。

【0157】

さらなる非限定的な実施形態では、気化器または噴霧器は、液体燃料源から液体炭化水素燃料入力導管（8022）に液体炭化水素燃料ミストまたは蒸気を実質的に一定の炭化水素燃料の流量で送達し、炭化水素燃料の流量の調整は、以下に記載されるガス流量制御バルブによって実行される。

【0158】

ガス流量制御バルブ

さらなる非限定的な、例示的な実施形態において、酸化剤流量モジュレータ（8025）および炭化水素燃料流量モジュレータ（8035）のうちの1つまたは両方は、対応する入力導管（8017、8022）に沿って、対応する酸化剤供給源（8010）または炭化水素燃料供給源（8020）と混合チャンバ（8015）との間に配設されるガス流量制御バルブを含む。各ガス流量バルブは、電子制御器（190）と通信する電気機械式アクチュエータを含む。電気機械式アクチュエータは、可動ゲートなどを回転させる、あるいは移動させるように動作し、可動ゲートは、ガス流量制御バルブの内側、または対応する入力導管の内側に配設される（8017、8022）。可動ゲートは、電子制御器（190）から受信された制御信号およびコマンド信号に応答して移動され、ガス制御バルブを通過して混合チャンバ（8015）に入る、酸化剤および炭化水素燃料の各々の流量を独立して調節する。したがって、酸化剤流量モジュレータ（8025）または燃料流量モジュレータ（8035）のいずれかとして動作するガス流量バルブの各々は、電子制御器（190）によって動作し、電子制御器は、可動ゲートを通過する流体流量を調節するように構成され、流体流量は、実質的にゼロの酸化剤または炭化水素燃料の流量と、最大の酸化剤または炭化水素燃料の流量との間の範囲となる。好ましくは、ガス流量バルブは、流量範囲にわたって複数の目立たない増分体積流量レベルを提供するように動作可能であり、各増分体積流量レベルは、約0.1～1.0標準立方センチメートル／分（SCCM）の流量を変化させる。

【0159】

カソード空気ポンプ

燃料電池スタックは、図2に示される、カソードチャンバ（2010）に通じるカソード空気入力ポート（2205）を含む。カソード空気または他の酸化剤源（8045）は、カソード空気流または他の酸化剤流を、空気入力ポート（2205）に導くカソード空

気入力導管（８０５５）に送達するように配設されている。カソード空気流量モジュレータ（８０５０）は、カソード空気源（８０４５）とカソード空気入力ポート（２２０５）との間のカソード空気入力導管（８０５５）に沿って配設される。カソード空気流量モジュレータ（８０５０）は、電子制御器（１９０）によって制御される、少なくとも１つの制御可能な、図示しない電気機械式アクチュエータを含む。一例示的な実施形態において、カソード空気源（８０４５）は、カソード流量モジュレータ（８０５０）としても動作する空気ポンプまたはファンである。この例では、空気ポンプまたはファンは、電子制御器（１９０）と通信する制御可能な電気機械式アクチュエータを含む。制御可能な電気機械式アクチュエータは、制御可能な空気移動装置、例えば、空気ポンプまたはファンと関連付けられたポンプベーン、ファンブレードなどを異なる速度で回転、あるいは移動させるように動作する。空気移動装置の移動は、カソード空気をカソード空気入力導管（８０５５）に誘導または引き込み、カソード空気の体積流量は、空気移動装置の速度を変化させることによって、例えば、ポンプベーンまたはファンブレードの角速度を変化させることによって変化する。空気移動装置の速度の変化は、電子制御器（１９０）から受信した制御信号およびコマンド信号によって駆動される。コマンドおよび制御信号は、カソード空気入力導管（８０５５）を通過するカソード空気の体積流量をカソード空気入力ポート（２２０５）に調節するために、空気移動装置の速度を変化させる。したがって、カソード流量モジュレータ（８０５０）として動作する空気ポンプまたはファンは、電子制御器（１９０）によって動作され、電子制御器は、実質的にゼロのカソード空気流量と最大のカソード空気流量との間で、カソード空気入力導管（８０５５）を通過するカソード空気の体積流体流量をカソード空気入力ポート（２２０５）に調節するように構成される。好ましくは、カソード空気の体積流量を調節するために使用される空気移動装置は、体積流量範囲にわたって複数の目立たない増分体積流量レベルを提供し、各増分体積流量レベルは、約０．５～２．０標準立方センチメートル／分の流量を変化させる（ＳＣＣＭ）。

【０１６０】

上述のように、酸化剤供給源（８０１０）に関して、カソード空気供給源（８０４５）は、受動圧力調節器を含む圧縮ガス容器、例えば、加圧酸素または空気タンクを含み得る。あるいは、カソード供給源（８０４５）は、周囲環境からまたは換気導管などからカソード空気入力導管（８０５５）に空気を吸い込む空気ポンプまたはファンなどを含み得る。しかしながら、空気ポンプまたはファンは、カソード空気流量モジュレータ（８０５０）として動作しない。代わりに、空気ポンプまたはファンによってカソード空気導管（８０５５）に送達されるカソード空気の流量は、空気ポンプまたはファン速度が電子制御器によって調節されないときに実質的に一定である。本実施形態では、燃料の流れの調節は、上述のように、燃料入力導管（８０２２）に沿って配設されたガス流量制御バルブによって行われる。

【０１６１】

燃料空気混合物

混合チャンバ（８０１５）は、好ましくは、炭化水素燃料流と酸化剤流とを混合して燃料空気混合物（２０２５、３０２５）を生成するために使用されるらせんチャンバである。燃料空気混合物は、好ましくは、酸素対炭素（Ｏ：Ｃ）比を１．０～２．２の範囲で有し、Ｏ：Ｃ比は、モル比、例えば、酸素原子対炭素原子比に対応する。

【０１６２】

燃料空気混合物（２０２５、３０２５）は、混合チャンバ（８０１５）からガス流量導管（２０４５、７０４５）に出口し、ガス流導管（２０４５、７０４５）は、燃料／酸化剤の入力制御モジュール（８００５）から燃料チャンバ（３００５）に延び、図３、図４、図４Ａおよび図７に示され、上述されている燃料チャンバシステム（３０００）の内部に形成される。本開示の好ましい炭化水素燃料はメタン（ CH_4 ）であるが、エタン（ C_2H_6 ）プロパン（ C_3H_8 ）、ブタン（ C_4H_{10} ）などを含む他のより長い炭化水素分子鎖を使用することができる。加えて、 C_5H_{12} ～ $\text{C}_{18}\text{H}_{32}$ の範囲の炭化水素鎖を有する液体炭化水素燃料は、本開示のシステムおよび方法によって改質され得る。

【0163】

CPOX反応

燃料炉システム（3000）は、触媒部分酸化（CPOX）によって燃料空気混合物（2025、3025）を改質するように構成される。CPOX反応は、燃料空気混合物を合成ガス（2027）に変換する放熱反応（無炎燃焼）である。合成ガス（2027）は、SOFCSタック（135、2005）の各管状燃料電池（2080）の内側表面上に形成された固体酸化物アノード電極表面と反応するために使用されるアノードガスを含む改質物である。両方の反応物質は、固体酸化物アノード電極表面上で利用可能な酸素原子と結合することができるため、アノードガス反応物質は、 H_2 およびCOである。アノード電極表面上で利用可能な酸素原子またはイオンと H_2 反応体との結合により H_2O を形成し、CO反応体との結合により CO_2 を形成することにより、管状燃料電池（2080）の各々から図1に示される直流電力モジュール（140）に出力される直流電流を生成する。代替の実施形態において、本開示のCPOX原子炉および燃料改質方法は、本開示から逸脱することなく平面固体酸化物アノード電極表面に合成ガスを送達するために使用可能である。

10

【0164】

固体酸化物アノード電極表面上で利用可能な酸素原子またはイオンは、カソードチャンバ（2010）内に圧送されるカソード空気から入手可能な酸素ガス O_2 から受け取る。カソード空気の入力体積流量は、固体アノード電極表面上の酸素原子またはイオンの需要に追いつくように調節される。カソード空気からの酸素ガスは、固体酸化物カソード電極表面（155）と反応し、各管状燃料電池（2080）の外側表面上に形成されるか、または平坦な固体酸化物カソード電極表面上に形成される。酸素ガス O_2 は、固体酸化物カソード電極を通過する個々の酸素原子またはイオンに分離され、カソード電極とアノード電極との間に配設された電解質層を通過し、アノードガスに曝露される固体酸化物アノード電極を通過する。

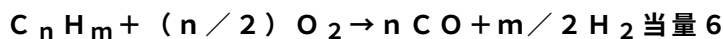
20

【0165】

以下に示す式6は、燃料空気混合物を合成ガスに変換することに関連付けられたCPOX化学反応を詳細に表す（2027）。式6のCPOX化学反応は、燃料空気混合物が触媒燃料通路の内側表面上に被覆された触媒層（3090）に接触するときを開始される。触媒層（3090）は、CPOX反応温度 $600 \sim 900^\circ C$ でCPOX化学反応を開始する。触媒層（3090）がなければ、CPOX反応温度は $1000 \sim 1200^\circ C$ であろう。

30

【0166】



【0167】

式6に基づいて、炭化水素燃料がメタンであるとき、 (CH_4) 、燃料空気混合物は、1.0に等しいO:C比および0.5のCO: H_2 の出力比を有する。炭化水素燃料がエタン (C_2H_6) であるとき、燃料空気混合物は、1.0に等しいO:C比、および0.66のCO: H_2 の出力比を有する。炭化水素燃料がプロパン (C_3H_8) であるとき、燃料空気混合物は、1.0に等しいO:C比、および0.75のCO: H_2 の出力比を有する。

40

【0168】

しかしながら、式6では、純粋な酸素の代わりに、または異なる鎖長の炭化水素分子の混合物、および／または他の汚染物質を含む非均質炭化水素燃料源を使用するために、空気を酸化剤質として使用することを一切説明していない。さらに、式6は、反応物質の正確なモル比を想定しており、これは実際には実現することが困難である。燃料空気混合物の正確なモル比がなければ、合成ガス反応は不完全となり得る。一例では、燃料空気混合物が低O:C比、例えば1.0未満を有する場合、すなわち、反応する利用可能な酸素分子よりも炭化水素燃料分子が多い場合、合成ガスは、未反応の炭化水素燃料分子 C_nH_m を含み得る。これが発生すると、未反応炭化水素燃料は、電力を一切発生させずに燃料電池から流される。他方の場合、燃料空気混合物が1.0を超える高いO:C比を有すると

50

き、すなわち炭化水素燃料分子よりも酸素分子が多いとき、合成ガスは、合成ガスの H_2 および CO 成分と結合することができる過剰な酸素ガス(O_2)を含むため、生成される電力に寄与するために利用可能なアノードガス反応物質が減る。したがって、本開示の重要な態様は、式6の燃料空気混合物の成分を均衡させて、反応してメタンを形成することができる合成ガスから未反応炭化水素燃料、例えば遊離炭素原子および過剰酸素ガスを排除する $O:C$ 比を提供することである(CH_4)。以下に説明するように、本開示は、所望の $O:C$ 比を確立するための制御指標として、 $CPOX$ 反応によって形成される合成ガスからの除去メタンを使用する。

【0169】

$CPOX$ 化学反応に関連付けられる他の既知の問題としては、コークス形成、および燃料汚染による望ましくない反応が挙げられる。 $CPOX$ 反応中に炭素分子が触媒層(3090)の表面と結合すると、コークス形成が生じる。合成ガス出力に含まれる炭素分子はまた、固体酸化物アノード電極層(150)の表面を汚染する可能性があり、アノード電極層の効率を低下させる。両方の事例では、コークス形成は、 $SOFCS$ システムの全体的な効率を低下させる傾向がある。また、上述のように、 $O:C$ 比が低いことは、コークス形成の一因となり得る未反応炭化水素原子および／または遊離炭素原子にさらに寄与し得る。

【0170】

コークス形成は温度依存であり、約 $800^\circ C$ 未満の $CPOX$ 反応温度ではより熱力学的に好ましい傾向がある。したがって、コークス形成を避けるためには、最低 $CPOX$ 反応温度を約 $800^\circ C$ 、好ましくは約 $850\sim 950^\circ C$ 超維持することが重要である。上述のように、最大 $CPOX$ 反応温度は、流入燃料空気混合物が触媒層と初期接触する界面(3032)に近接して発生する。しかしながら、燃料空気混合物の一部は、界面層(3032)からより遠位で触媒層と初期接触し、界面における $CPOX$ 反応温度よりも低い $CPOX$ 反応温度で反応する可能性が高い。したがって、界面(3032)に近接して約 $800^\circ C$ の最低 $CPOX$ 反応温度を維持することで、必ずしも、反応温度が $800^\circ C$ 未満であり得る界面(3032)から遠位におけるコークス形成を排除できるとは限らない。コークス形成はまた、例えば1.0未満などの低い $O:C$ 比によって刺激を受けるが、酸化剤が空気であるとき、混合チャンバから出る燃料／空気混合物の実際の $O:C$ 比は、やや不確実であるため、例えば、所望の $O:C$ 比が提供されていることを示すものとして、合成ガス中のメタンの不足または最小化などの別の指標を提供することが望ましい。

【0171】

$CPOX$ 反応制御方法は、原子炉制御方法と題するRoychoubhuryらによる米国特許第8,337,757号で論じられ、取り組んでいる。Roychoubhuryらは、 $CPOX$ 原子炉の3つの別個の位置で $CPOX$ 反応温度を定期的に測定することを含む $CPOX$ 原子炉制御方法を開示している。原子炉制御方法は、定常状態動作温度および最高安全動作温度を選択することを含む。3つの別個の位置の各々で測定された $CPOX$ 反応温度に基づいて、原子炉制御方法は、最高温度、最低温度、および最高および最低温度の差を決定する。その後、原子炉制御方法は、最高と最低温度との差を最小限に抑えながら、最高温度が最高安全動作温度を超えることを防ぐ様式で、流入燃料空気混合物の $O:C$ 比を変更するために3つの制御パラメータを変更する。 $O:C$ 比を効果的に変更するために変更される3つの制御パラメータは、燃料入力流量のみを変更すること、空気入力流量のみを変更すること、および燃料入力流量の変更と空気入力流量の変更を交互に行うことを含む。

【0172】

Roychoubhuryらは、 $CPOX$ 原子炉の3つの別個の位置の最高と最低温度との差を最小限に抑えるために $O:C$ 比を変更する必要性に対処する $CPOX$ 原子炉制御方法を開示するが、Roychoubhuryらによって開示される制御方法の1つの問題は、3つの異なる熱センサを、原子炉内の3つの別個の位置の各々に1つ配置する必要があるということである。Roychoubhuryらによって開示される $CPOX$ 原子

10

20

30

40

50

炉制御方法の別の問題は、CPOX反応温度を変更するために使用されるO:C比の変更が、SOF C反応温度に対し、SOF Cシステムの全体的な電力変換効率が損なわれ得る程度の悪影響を及ぼす可能性があることを考慮していないことである。具体的には、所望のO:C比の指標としてCPOX反応温度だけを使用すると、システム電力変換が損なわれる可能性がある。タール(C₁₀H₈)などの燃料汚染物質、および他の長鎖炭化水素分子は、コークス形成に寄与することができる。硫黄は、燃料／空気混合物または合成ガス内のいずれかに硫化物を形成する燃料汚染物である。二硫化炭素(CS₂)、硫化水素(H₂S)、二酸化硫黄(SO₂)などを含む硫化物は、CPOX原子炉中の触媒層に毒素を与える可能性があると共に、SOF Cスタック中の固体酸化物アノード電極層(150)において酸素部位を奪い合う可能性がある。したがって、炭化水素燃料源は、低硫黄含有量、例えば、100万分の約50未満(PPM)を有することが望ましい。CPOX変換効率を低下させる別の問題は、過剰な反応温度への長時間の曝露によって部分または触媒層が永久的に損傷される場合に生じる触媒層の溶け落ちである。このため、CPOX反応温度が溶け落ち温度を超えないことが重要である。

【0173】

合成ガスの発生は複雑性があるにもかかわらず、空気を酸化剤として使用する場合、合成ガスは、少量の割合のCO₂と共に、主に様々な割合の主要部分N₂、H₂、およびCOを含む。しかしながら、反応物質H₂およびCOの重量パーセントを含む合成ガス成分の各々の重量パーセントは、O:C比の変化、CPOX反応温度の変化、炭化水素燃料のタイプの変化、ならびに炭化水素燃料の均質性および汚染物質含有量の変化に応じて変化する。したがって、合成ガスは、未反応炭化水素、酸素ガス、硫化物、水などの他の成分を少量の割合で含み得、合成ガス成分の各主要な割合の重量パーセントは、燃料空気混合物のO:C比の変化、ならびにCPOX反応温度の変化と共に変化する。

【0174】

したがって、本開示の一態様の目的は、アノードガス反応物質H₂およびCOの重量パーセントを最大化することによって、CPOX反応の変換効率を最大化することであり、一方で、CPOX反応によって生成される合成ガス中の未反応炭化水素(例えば、メタン(CH₄)および酸素ガス(O₂)の重量パーセントも最小化することである。

【0175】

8. 12. 8 第1の熱センサと熱伝導的結合

次に図9～図12、図13A、図13Bおよび図14を参照すると、熱伝導要素(9005、10005、11005、12005、13005)に取り付けられた第1の熱センサ(8030)の複数の異なる非限定的な例示的实施形態が示されている。非限定的な例示的实施形態の各々において、対応する熱伝導要素は、円筒形触媒体(3030)の長手方向表面との嵌合接触において支持され、50W/m²・K以上の熱伝導係数、好ましくは100W/m²・K以上の熱伝導係数を有する材料から形成される。これは、約2～7W/m²・Kのセラミック触媒体の熱伝導率と比較する。さらに、熱伝導要素の各々は、接触域にわたって触媒体(3030)から熱伝導要素への高い導電熱エネルギー伝達率を促進するのに十分な、熱伝導要素と触媒体との間の接触域を伴って形成される。触媒体と熱伝導要素との間の温度差が大きい場合、例えば、初期起動時は、接触域をわたる熱伝導率が大きい。しかしながら、温度差がゼロに近づくにつれて、触媒体と熱伝導要素との間の熱伝導率に対する最大の影響は、熱伝導要素の熱伝導率、熱伝導要素と触媒体との間の接触域および熱伝導要素の熱質量である(上記式5参照)。しかしながら、主に金属である銅、アルミニウムなどの高い熱伝導係数を有する材料については、より単純に熱質量の差を材料体積の差で表す。したがって、高い熱伝導係数を有する材料を選択することを除いて、本開示の熱伝導要素は、触媒体と熱伝導要素との間に十分な接触域を伴って形成されると共に、触媒体(3030)から熱伝導要素に熱エネルギーを急速に伝導するための材料体積を伴って形成される。好ましくは、接触表面積は、触媒体と熱伝導要素との間の、十分に高い熱伝導率を促進して、接触域表面の温度を熱伝導要素の温度によって実質的に一致させるようにサイズ決めされる。

【0176】

各熱伝導要素は、円筒形触媒体（3030）の外部長手方向表面または内部長手方向表面のいずれかと嵌合接触して支持される。触媒体と熱伝導要素との間の接触域は、円周接触域と長手方向接触域の積として画定され、長手方向接触域は、触媒体の長手方向軸に沿って延在し、円周方向接触域は、長手方向軸と直交する触媒体の円周面に沿って延在する。他の接触域の形状および方位は、本開示から逸脱することなく使用可能である。

【0177】

十分な熱質量および接触域を伴って形成されるとき、熱伝導要素は、熱伝導要素の温度が接触表面積にわたって触媒体の平均表面温度またはバルク表面温度に実質的に等しくなるまで、接触域にわたって熱エネルギーを急速に伝達するように構成される。さらに、接触表面積にわたって提供される高い熱伝導率に基づいて、触媒体の接触表面積のバルクまたは平均温度の変化の後に、急速に、熱伝導要素の温度の同様の変化が続く。したがって、第1の熱センサ（8030）によって感知される温度は、接触域にわたる触媒体の平均またはバルク表面温度の、信頼性の高い反復可能な指標を提供する。

【0178】

第1の熱センサ（8030）は、第1の熱センサが取り付けられた熱伝導要素の表面としての瞬間温度に各々対応する第1の温度信号値の連続ストリームを生成するサンプリング周波数で電子制御器によってサンプリングされる第1の温度信号（8031）を生成する。第1の熱センサ（8030）によって感知される温度は、接触域にわたる触媒体の平均またはバルク表面温度の、信頼性の高い反復可能な指標を提供するため、第1の温度信号（8031）の変化は、例えば、流入燃料のO：C比が変化するときのCPOX反応温度の比例変化に対応する。別の方法で見ると、第1の温度信号（8031）の変化は、接触域にわたって熱的に行われる熱束密度（ W/m^2 ）の変化に比例する。

【0179】

上述したように、CPOX反応の温度は、円筒形触媒体の長手方向長さに沿って変化する可能性が高い。Roychoudhuryらによって開示された、従来の原子炉制御方法によれば、3つの温度センサは、触媒体の長手方向長さに沿って3つの異なる温度を感知するために、3つの別個の長手方向位置に配設される。アルゴリズムは、3つのセンサによって出力される温度に対応する最高および最低温度を決定し、温度分布に基づいて、流入燃料空気混合物のO：C比は、3つの温度センサによって感知される最高および最低温度の差を最小限に抑える様式で変化する。しかしながら、本開示は、触媒体の長手方向寸法の一部に沿って延在する、接触域の上で触媒体と接触して支持される、熱伝導要素と結合された1つの温度センサのみを使用する。本開示は、第1の温度信号（8031）のみを感知することによって、センサの数を減少させ、温度拡散を計算するためのアルゴリズムを排除することによって、複雑性を低減し、信頼性を向上させる。図9～12および13Aおよび13Bに示される実施形態のいずれかの熱伝導要素は、銅、アルミニウム、ニッケル、真鍮、ベリリウム、イリジウム、マグネシウム、モリブデン、タングステンおよび亜鉛ならびにまたはそれらの合金のうちのいずれか1つから形成される。加えて、約400℃超の動作温度で酸化損傷を受けやすい材料については、熱伝導要素の外面に、例えばニッケルメッキなどの酸化に強い材料を被覆する。

【0180】

第1の例示的で非限定的な実施形態における図9を参照すると、第1の熱伝導要素は、触媒体（3030）の外表面（9010）と嵌合接触して配設されたプリズムロッド（9005）を含む。プリズムロッド（9005）の長手方向軸（9015）は、触媒体（3030）の長手方向軸（9020）と実質的に平行に配向される。触媒体（3030）は、直径25.4mmおよび長手方向長さ25.4mmのセラミック基板を含む円筒形要素である。触媒体（3030）は、円筒形触媒キャビティ（3035）に設置されると、図7に示されるように、界面（3032）に入口端と、合成ガス（2027）を燃料入口マニホールド（3055）に送達する出力端（3034）を有する。

【0181】

第1の熱伝導要素のプリズムロッド(9005)は、触媒体(3030)の直径の約8分の1($1/8$)である3.2mmの直径を有する。プリズムロッド(9005)は、6.3~12.7mmの長手方向長さを有し、これは触媒体(3030)の長手方向長さの約4分の1($1/4$)~2分の1($1/2$)である。プリズムロッド(9005)は、入力端または界面端部(3032)と出力端(3034)との間の、任意の長手方向位置で、触媒体(3030)の外表面(9010)に接触するように長手方向に位置決めされ得る。プリズムロッド(9005)の最適な長手方向接触位置は、例えばシステム較正中に実験によって決定されてもよく、または接触面との嵌合接触においてプリズムロッド(9005)を支持するように設けられた支持構造などによって決定されてもよい。異なる長手方向寸法および外径寸法を有する他のプリズムロッド(9005)が、本開示から逸脱することなく使用可能である。

10

【0182】

第1の熱センサ(8030)は、プリズムロッド(9005)に取り付けられ、あるいは、それによって支持されて、プリズムロッド(9005)の少なくとも1つの表面と第1の熱センサ(8030)との間に熱伝導的結合を提供する。図9の例示的实施形態では、プリズムロッド(9005)は、貫通穴またはプリズムロッドの長手方向軸(9015)に沿って延在する止まり穴(9025)を含む。第1の熱センサ(8030)は、貫通または止まり穴(9025)に設置され、所定の位置に保持される。あるいは、第1の熱センサ(8030)は、1つ以上の機械的ファスナまたはクランプなどによって、熱伝導性接着剤によってろう付けすることによって、プリズムロッド(9005)の任意の外部または内部表面に熱伝導的に結合される。

20

【0183】

プリズムロッド(9005)は、触媒キャビティ(3035)の内側に配設された断熱要素(3080)によって加えられる半径方向内圧力によって触媒体(3030)の外表面(9010)に取り付けられ、あるいは、それと嵌合接触して支持される。図3に最もよく示されるように、断熱要素(3080)は、環状包囲体壁(3060)と円筒形触媒体(3030)との間の触媒キャビティ(3035)の内側に配設された環状リングとして形成される。断熱要素(3080)と触媒体(3030)の外側表面との間の触媒キャビティ(3035)に、プリズムロッド(9005)および第1の熱センサ(8030)を取り付けることによって、断熱要素(3080)は、円筒形触媒体(3030)と嵌合接触してプリズムロッド(9005)を支持するのに十分な放射状指向圧縮力を提供する。圧縮力は、プリズムロッドを円筒形触媒体(3030)と接触域にわたって熱伝導的に結合するのに十分である。あるいは、プリズムロッド(9005)は、ろう付け、熱伝導性接着剤料、1つ以上のファスナまたはクランプなどによって触媒体(3030)の外側表面に連結される。好ましくは、プリズムロッド(9005)の構成、第1の熱センサ(8030)の構成、界面(3032)と出力端(3034)との間の長手方向位置、ならびに触媒体の外側表面に対してプリズムロッド(9005)を固定するために使用される接触方法は、主に混合チャンバ(8015)に送達される酸化剤の流量の変化に関連する接触域のバルク、または平均温度の温度変化に対し、反復可能かつ十分に応答する第1の熱センサ(8030)から出力される第1の温度信号を提供する。

30

40

【0184】

ここで図10を参照すると、第2の熱伝導要素の実施形態(10010)は、円筒形セグメント(10005)を含む。円筒形セグメント(10005)は、円筒形触媒体(3030)の外周面の曲率半径と一致する曲率半径を伴って形成される接触表面積(10008)を含む。円筒形セグメント(10005)は、円筒形触媒体(3030)の長手方向軸(10020)と平行に配向される長手方向軸(10015)を含む。円筒形セグメント(10005)は、円筒形触媒体(3030)の直径の約4分の1($1/4$)である約6.4mmの直径を有するプリズムロッドから形成される。円筒形セグメント(10005)は、6.3~12.7mmの長手方向長さを有し、これは触媒体(3030)の長手方向長さ寸法の約4分の1($1/4$)~2分の1($1/2$)である。円筒形セグメント

50

(10005)は、入力端または界面端部(3032)と出力端(3034)との間の任意の長手方向位置で触媒体(3030)の外表面(10010)に接触するように長手方向に位置決めされ得る。他のロッド径および長手方向長さ寸法を有する他の円筒形セグメント(10005)が、本開示から逸脱することなく使用可能である。

【0185】

第1の熱センサ(8030)は、円筒形セグメント(10005)に取り付けられ、あるいは、それによって支持され、それと接触する表面に近接した円筒形セグメント(10005)の温度に対応する第1の温度信号(8031)を提供する。図10の例示的实施形態では、円筒形セグメント(10005)は、その長手方向軸(10015)に沿って延びる貫通穴または止まり穴(10025)を含み、第1の熱センサ(8030)は、貫通穴または止まり穴(10025)に設置される。あるいは、第1の熱センサ(8030)は、円筒形セグメント(10005)の任意の外部または内側表面に、熱伝導性接着剤によって、クランプの1つ以上のファスナなどによってろう付けすることによって熱伝導的に結合される。

【0186】

円筒形セグメント(10005)は、触媒キャビティ(3035)内側に配設された断熱要素(3080)によって加えられる半径方向内圧力によって触媒体(3030)の外表面(10010)に取り付けられ、あるいは、それと嵌合接触して支持される。図3に最もよく示されるように、断熱要素(3080)は、環状包囲体壁(3060)と円筒形触媒体(3030)との間の触媒キャビティ(3035)の内側に配設された環状リングとして形成される。触媒キャビティ(3035)に円筒形セグメント(10005)および第1の熱センサ(8030)を取り付けることによって、断熱要素(3080)と触媒体(3030)の外側表面との間において、断熱要素(3080)は、円筒形触媒体(3030)と嵌合接触して円筒形セグメント(10005)を支持するのに十分な半径方向圧縮力を提供する。圧縮力は、円筒形セグメント(10005)を円筒形触媒体(3030)と表面接触域全体(10008)の上で熱伝導的に結合するのに十分である。あるいは、円筒形セグメント(10005)は、触媒体(3030)の外側表面に、ろう付け、熱伝導性接着剤料、1つ以上のファスナまたはクランプなどによって連結される。好ましくは、円筒形セグメント(10005)の構成、第1の熱センサ(8030)の構成、界面(3032)と出力端(3034)との間の長手方向位置、ならびに触媒体の外側表面に対して円筒形セグメント(10005)を固定するために使用される接触方法は、主に混合チャンバ(8015)に送達される酸化剤の流量の変化に関連する接触域のバルク、または平均温度の温度変化に対し、反復可能かつ十分に応答する第1の熱センサ(8030)から出力される第1の温度信号を提供する。

【0187】

次に図11を参照すると、第3の例示的で非限定的な実施形態では、第3の熱伝導要素は、触媒体(3030)の外径と嵌合接触を提供するようにサイズ決めされた内径を有し、中空シリンダ(11005)によって形成される環状壁の所望の厚さまたは材料体積を提供するようにサイズ決めされた外径を有する中空シリンダ(11005)を含む。中空シリンダ(11005)は、触媒体(3030)の長手方向軸(11020)と実質的に同軸に配向される長手方向軸(11015)を有する。中空シリンダ(11005)と触媒体(3030)との間の接触域は、中空シリンダ(11005)の内径の表面の上に延在する。

【0188】

中空シリンダ(11005)は、約1.6mmの環状壁厚と、触媒体(3030)の長手方向長さの約4分の1(1/4)~2分の1(1/2)である長手方向長さ6.3~12.7mmを伴って形成される。中空シリンダ(11005)は、界面端部(3032)の入力と出力端(3034)との間の任意の長手方向位置で触媒体(3030)の外表面(10010)に接触するように長手方向に位置決めされてもよい。中空シリンダ(11005)は、はんだ付けによって、熱伝導性接着剤によって、圧着によって、ファスナまた

はクランプによって、干渉嵌合によってなどで、触媒体（３０３０）の外面（１１０１０）と嵌合接触して保持される。異なる長手方向長さまたは材料の厚さを有する他の中空シリンダ（１１００５）が、本開示から逸脱することなく使用可能である。

【０１８９】

第１の熱センサ（８０３０）は、中空シリンダ（１１００５）の外面と第１の熱センサ（８０３０）との間に熱伝導的結合を提供するために、中空シリンダ（１１００５）の外面に取り付けられるか、あるいは、それとの嵌合接触において支持される。図１１の例示的实施形態では、第１の熱センサ（８０３０）は、上記図３に示すと共に上述するように、触媒キャビティ（３０３５）の内側に配設された断熱要素（３０８０）によって印加される内向きの半径方向圧力によって、ろう付けによって、熱伝導性接着剤料によって、１つ以上のファスナもしくはクランプによって、などのうちの１つによって中空シリンダ（１１００５）の外面との嵌合接触において熱伝導的に結合されるか、あるいは支持される。

10

【０１９０】

ここで図１２を参照すると、第４の例示的で非限定的な導電性要素の実施形態は、中空シリンダのらせん部分（１２００５）を含む。らせん部分（１２００５）は、触媒体（３０３０）の外面（１２０１０）との嵌合接触を提供するようにサイズ決めされた内側半径と、（１２００５）のらせん部分の所望の厚さを提供するようにサイズ決めされた外側半径とを有する。らせん部分は、触媒体（３０３０）の長手方向軸（１２０２０）と実質的に同軸に配向される長手方向軸（１２０１５）を有する。

20

【０１９１】

らせん部分（１２００５）は、約１．６mmの環状壁厚および１２．７～２５．４mmの長手方向長さ、すなわち触媒体（３０３０）の全長手方向長の約２分の１（１／２）を伴って形成される。らせん部分（１２００５）は、触媒体（３０３０）の外面（１１０１０）に、界面端部（３０３２）と出力端（３０３４）との間の任意の長手方向位置で接触するように、長手方向に位置決めされ得る。異なる長手方向長さおよび厚さの寸法を有する他のらせん部分（１２００５）が、本開示から逸脱することなく使用可能である。

【０１９２】

第１の熱センサ（８０３０）は、らせん部分（１２００５）の外面に取り付けられ、あるいは、それと嵌合接触して支持され、らせん部分の外面と第１の熱センサ（８０３０）との間に熱伝導的結合を提供する。図１２の例示的实施形態では、第１の熱センサ（８０３０）は、上記図３に示すと共に上述するように、触媒キャビティ（３０３５）の内側に配設された断熱要素（３０８０）によって印加される内向きの半径方向圧力によって、ろう付けによって、熱伝導性接着剤料、１つ以上のファスナもしくはクランプによって、などのうちの１つによってらせん部分（１２００５）の外面との嵌合接触において熱伝導的に結合されるか、あるいは支持される。

30

【０１９３】

次に図１３Ａおよび図１３Ｂを参照すると、円筒形触媒体（１３０３０）は、各々円筒形触媒体（１３０３０）を縦方向に延びる個々の導管を提供する複数の触媒燃料通路（３０８５）を含む。中央キャビティ（１３００７）は、その長手方向軸（１３０２０）に沿って円筒形触媒体（１３０３０）を完全に貫通または部分的に貫通して延びる貫通穴または止まり穴によって形成される。図１３Ｂの断面図に示されるように、第５の例示的で非限定的な導電性要素の実施形態は、中央キャビティ（１３００７）の内側に配設された固体シリンダ（１３００５）を含む。固体シリンダ（１３００５）は、中央キャビティ（１３００７）の内径と嵌合接触してその内部に支持される。固体シリンダ（１３００５）は、触媒体（１３０３０）の長手方向軸（１３０２０）と実質的に同軸に延在する長手方向軸を有する。

40

【０１９４】

固体シリンダ（１３００５）は、中央キャビティ（１３００７）の内径と等しい、わずかに大きく、またはわずかに小さくサイズ決めされた外径を伴って形成される。固体シリンダ（１３００５）の非限定的に例示する直径は、６．３～１２．７mmの長手方向長さ

50

を有する直径1.5～6.4mmであり、これは触媒体(13030)の長手方向長さの約4分の1(1/4)～2分の1(1/2)である。固体シリンダ(13005)は、入力端または界面端部(3032)と出力端(3034)との間の任意の長手方向位置で中央キャビティ(13007)に接触するように長手方向に位置決めされ得る。異なる長手方向長さおよび外部シリンダ径寸法を有する他の固体シリンダ(13005)の実施形態が、本開示から逸脱することなく使用可能である。

【0195】

第1の熱センサ(8030)は、固体シリンダ(13005)に取り付けられ、あるいは、固体シリンダ(13005)の少なくとも1つの表面と第1の熱センサ(8030)との間の熱伝導的結合を提供する。図13Bの例示的实施形態では、固体シリンダ(13005)は、固体シリンダ(13005)の長手方向軸(13020)に沿ってまたはそれと平行に延在する貫通穴または止まり穴(13025)を含む。第1の熱センサ(8030)は、貫通または止まり穴(13025)に設置され、所定の位置に保持される。あるいは、第1の熱センサ(8030)は、熱伝導性接着剤料によって、1つ以上の機械的ファスナまたはクランプなどによってろう付けすることによって、固体シリンダ(13005)の任意の外部または内部表面に熱伝導的に結合される。

【0196】

第6の例示的で非限定的な実施形態における図14を参照すると、固体セラミック発泡体構造を通じて分布する複数の相互接続オープンセルを伴って形成された固体で、非多孔質の、セラミック発泡体材料を含む、オープンセル固体発泡体構造として形成された円筒形触媒体(14030)を備える。オープンセルは、入力端または界面端部(3032)と出力端(3034)との間に延在している。しかしながら、いくつかのオープンセルは、入力端または界面端部(3032)から円筒形触媒体(14030)の側壁に延在し得る。複数のオープンセル(14031)の各々は、触媒層(3090)で被覆されたその内側表面を含む。オープンセル固体発泡体構造は、円周径25.4mm、長手方向長さ25.4mmの円筒形触媒体(14030)として形成される。円筒形触媒キャビティ(3035)に設置されると、円筒形触媒体(14030)の入力端(14032)が挿入されて、界面(3032)で原子炉シールド基部壁(3015)に接触し、原子炉シールド基部壁(3015)から出る燃料空気混合物(2025、3025)が、そのオープンセル(14031)を通じて固体発泡構造の入力端に入り、オープンセルを通して出力端(14034)または円周外面(14010)を通過するオープンセル開口部を通過する。オープンセルを通過する間、燃料空気混合物(2025、3025)は触媒層(3090)に接触してCPOX反応を開始する。オープンセルから出た後、改質燃料または合成ガス(2027)は触媒キャビティから燃料入口マニホールド(3055)に通過する。

【0197】

プリズムロッド(9005)は、熱伝導要素として使用可能である。上述のように、プリズムロッド(9005)は、円筒形触媒体(14030)の直径の約8分の1(1/8)である、3.2mmの直径と、円筒形触媒体(14030)の長手方向長さの約4分の1(1/4)～2分の1(1/2)である、6.3～12.7mmの長手方向長さとを有する。プリズムロッド(9005)は、界面端部(13032)と出力端(13034)との間の任意の長手方向位置で円周外面(14010)に接触するように長手方向に位置決めされ得る。同様に、上述の熱伝導要素(10005、11005、12005、13005)のいずれかは、触媒体(14030)の開放細胞固体発泡体構造と組み合わせて使用可能である。

【0198】

第1の熱センサ(8030)は、プリズムロッド(9005)に取り付けられ、あるいは、それによって支持されて、プリズムロッド(9005)の少なくとも1つの表面と第1の熱センサ(8030)との間に熱伝導的結合を提供する。図14の例示的实施形態では、プリズムロッド(9005)は、その長手方向軸(9015)に沿って延びる貫通穴または止まり穴(9025)を含み、第1の熱センサ(8030)は、貫通穴または止ま

り穴（９０２５）に設置される。あるいは、第１の熱センサ（８０３０）は、プリズムロッド（９００５）の任意の外部または内側表面に、ろう付けによって、熱伝導性接着剤によって、１つ以上のクランプのファスナなどによって、熱伝導的に結合される。

【０１９９】

プリズムロッド（９００５）は、図３に示すと共に上述するように、触媒キャビティ（３０３５）の内側に配設された断熱要素（３０８０）によって印加される半径方向圧力によって、またはろう付けによって、熱伝導性接着剤料によって、１つ以上のファスナもしくはクランプなどのうちの１つによって、円筒形触媒体（１４０３０）の円周外面（１４０１０）と嵌合接触することによって取り付けられるか、あるいは支持される。

【０２００】

【０２０１】

第２の熱センサ

次に図８を参照すると、第２の熱センサ（８０４０）は、ホットゾーン包囲体壁（１１５）のうちの１つの外面、例えば、図２に示される長手方向円筒形側壁（２０１５）の外側表面に熱伝導的に結合される。あるいは、第２の熱センサ（８０４０）は、第１の熱伝導経路を形成するホットゾーン包囲体壁のいずれか１つの内側または外側表面上に位置決めすることができる。第２の熱センサ（８０４０）は、電子制御器によってサンプリングされた第２の温度信号をサンプリング周波数で生成し、ホットゾーン包囲体壁（１１５）のうちの１つの表面の瞬間温度に各々対応する第２の温度信号値の連続ストリームを生成する。しかしながら、ホットゾーン包囲体壁（１１５）は、ＳＯＦＣスタックの各管状燃料電池（２０８０）の対向する端部を支持するディスク型支持壁（２０８２、２０８４）と熱伝導的に結合されるため、第２の温度信号の変化によって表される温度の変化は、例えば、流入燃料のＯ：Ｃ比が変化するとき、ＳＯＦＣ反応温度の変化に対応するか、またはそれに比例する。あるいは、他の非限定的な実施形態では、第２の熱センサ（８０４０）は、第２の温度信号の変化によって表される温度の変化が、例えば、流入燃料のＯ：Ｃ比が変化するとき、ＳＯＦＣ反応温度の変化に対応するか、またはそれに比例する限り、第２の熱伝導経路を形成する中間包囲体（２５１０）の任意の表面、または第３の熱伝導経路を本開示から逸脱することなく形成する外側包囲体壁（２５１４、２５１６、２５１８）のいずれか１つに熱伝導的に結合される。

【０２０２】

第３の熱センサ：

ここで図３を参照すると、第３の熱センサ（３１３５）は、図３に示される放熱フランジ３１００の表面に熱伝導的に結合される。あるいは、第３の熱センサ（３１３５）は、第３の熱伝導経路を形成する外側包囲体壁（２５１４、２５１６、２５１８）の外側に延在する燃料炉本体（３０４０）の任意の表面上に位置決めすることができる。第３の熱センサ（３１３５）は、燃料炉本体（３０４０）の表面に関連付けられた第３の熱伝導経路の表面に対応する瞬間温度に各々対応する第３の温度信号値の連続ストリームを生成するサンプリング周波数で電子制御器によってサンプリングされる第３の温度信号を生成する。しかしながら、第３の熱伝導経路はまた、環状外周壁（３０１０）および原子炉シールド基部壁（３０１５）など、外側包囲体壁の外側に延在しない要素にも延在するため、第３の温度信号の変化は、例えば、炭化水素燃料のタイプに応じて、燃料チャンバ内部の温度が２９５～５８０℃の範囲の燃料自動点火温度に近づくときに燃料炉本体の温度変化に理想的に対応するか、またはそれに比例する。

代替動作モード

ＣＰＯＸ反応温度

【０２０３】

ここで図８を参照すると、非限定的に例示する動作モードにおいて、第１の温度信号（８０３１）が、電子制御器（１９０）によって第１の熱センサ（８０３０）から受信される。第１の温度信号（８０３０）は、電圧または電流振幅、正規化された電圧または電流振幅などに対応するアナログまたはデジタル信号を含んでもよく、第１の温度信号（８０

10

20

30

40

50

31) の各々の異なる電圧または電流振幅値は、実際の瞬間温度または第1の熱センサ(8030)によって感知される相対瞬間温度に対応する。電子制御器(190)は、複数の第1の温度設定点値を格納する。複数の第1の温度設定点値は、SOFCシステムによって使用される炭化水素燃料のタイプごとに異なる第1の温度設定点値、例えば、プロパンに関する第1の温度設定点値(C_3H_8) および天然ガスまたはメタン(CH_4)に関する異なる第1の温度設定点値などを含み得る。複数の第1の温度設定点値は、SOFCシステムの動作モードごとに異なる第1の温度設定点値、例えば、燃料がプロパンであるときの起動モードに関連付けられた第1の温度設定点値、および燃料がプロパンであるときの定常状態動作モードに関連付けられた異なる第1の温度設定点値などを含んでもよい。複数の第1の温度設定点値はまた、例えば燃料がメタンなどであるときに、最高安全動作温度に関連付けられた第1の温度設定点値を含んでもよい。加えて、各第1の温度設定点値は、例えば、最大および最小第1の温度設定点値によって定義される、プラスまたはマイナス範囲などを有する中央値によって定義されるなどの値の範囲を含み得る。

【0204】

以下に記載される較正プロセスに基づいて、各第1の温度設定点値または第1の設定点値の範囲は、例えば、例えば、合成ガス組成物が、未反応炭化水素燃料および、または水素および炭素系の、CPOX反応の副生成物を含まない、または実質的に含まない場合は、所望の合成ガス組成物に対応する。一例として、使用される炭化水素燃料がメタンである場合、所望の第1の温度設定点値は、メタン(CH_4) およびCPOX反応の他の副生成物、例えば、 C_2H_x タール($C_{10}H_8$)、および他の長鎖炭化水素分子、特に、コークス形成に寄与することができるもの、硫化物、例えば、二硫化炭素(CS_2)、硫化水素(H_2S)、二酸化硫黄(SO_2) など、SOFCスタック内の固体酸化物アノード電極層(150)の酸素部位を奪い合って、および、または固体酸化物アノード電極層(150)を損傷する可能性があるものを含まない、または実質的に含まない合成ガス組成物を生成する。別の例では、使用される炭化水素燃料がプロパン(C_3H_8) である場合、所望の第1の温度設定点値は、プロパン、メタン、および上記のCPOX反応の他の副生成物を実質的に含まない合成ガス組成物を生成する。

【0205】

図15Aは、図15bの表(1505)に列挙される較正データをグラフィック表現(1500)したものである。データは、流入する炭化水素燃料空気混合物(2025、3025)のO:Cまたは酸素対炭素比、 T_{CPOX} 、または重量パーセントに基づく摂氏で表す第1の温度、 $\%CH_4$ および $\%C_2H_x$ を含む。図15Aを参照すると、O:C比は、1.2~1.5の範囲にわたって水平軸に沿って示され、O:C比は、摂氏608~630度の範囲にわたって図15Aの左垂直軸上に示される $T_{CPOX}(c)$ または第1の温度に対してプロットされる。データは、0.0~0.3パーセントの範囲にわたって示される、メタン(CH_4) および(C_2H_x)などの望ましくない炭化水素成分の重量パーセント、または図15Aの右垂直軸をさらに含む。このように、右軸は、CPOX反応の様々な望ましくない副生成物、例えば、 C_2H_x タール($C_{10}H_8$)、および他の長鎖炭化水素分子、特に、コークス形成に寄与する可能性があるもの、硫化物、例えば、二硫化炭素(CS_2)、硫化水素(H_2S)、酸化硫黄(SO_2) など、SOFCスタック内の固体酸化物アノード電極層(150)において酸素部位を奪い合い、かつまたは固体酸化物アノード電極層(150)を損傷する可能性があるものの測定値を表す。

【0206】

図15Aで最もよく見られるように、O:C比対 $T_{CPOX}(^{\circ}C)$ のプロット(1510)は直線的である。プロット(1510)は、第1の熱センサ(8030)によって感知される瞬間温度に対応する温度 $T_{CPOX}(^{\circ}C)$ が、O:C比の増加と共に直線的に増加することを示す。言い換えれば、炭化水素燃料空気混合物(2025、3025)に空気が添加されるにつれて、温度 $T_{CPOX}(^{\circ}C)$ が増加する。

【0207】

また、図15Aにおいて、O:C比対 $\%CH_4$ のプロット(1515)は非線形である

。プロット（１５１５）は、合成ガス組成物中に残っているメタンの割合が、 $O : C$ 比の増加と共に非線形に減少することを示す。したがって、未反応メタンの割合が実質的にゼロであるときは、 $O : C$ 比が１．４以上に達するまで、 $O : C$ 比が増加すると T_CPOX が増加するにつれて、未反応メタンの割合が減少する。図１５Ａにさらに示されるように、 $O : C$ 比１．４は、 $628^{\circ}C$ の T_CPOX 温度に対応する。また、図１５Ａにおいて、 $O : C$ 比対 $\%C_2H_X$ のプロット（１５２０）は、明らかに非線形ではない。プロット（１５２０）は、合成ガス組成物中に残っている $\%C_2H_X$ の割合が検出できないことを示す。

【０２０８】

したがって、図１５Ａは、第１の温度信号（８０３１）に対応する温度 T_CPOX を検出することによって、 $O : C$ 比と合成ガス組成は、 T_CPOX 値だけに基づいて、少なくとも T_CPOX 温度設定点値または設定点値の範囲（１５３０）が、メタン（ CH_4 ）（ C_2H_X ）などの望ましくない炭化水素成分、および生成される合成ガスからの他の長鎖炭化水素分子を排除することに対応するものとして選択され得る程度に特徴付けられることを、明確に示している。より具体的には、 T_CPOX 温度が図１５Ａに示される設定点値（１５３０）の範囲内の設定点値に維持されている間に担持される $CPOX$ 反応は、望ましくない炭化水素成分を含まない。さらに、 T_CPOX 温度は、単に酸化剤の流量を変化させることによって制御することができる。したがって、図１５Ａに示されるプロットと、図１５Ｂに列挙されるデータに基づいて、第１の温度設定点範囲（１５３０）は、約１．３８～１．４２の $O : C$ 比範囲に対応する約 $618 \sim 623^{\circ}C$ の設定点温度 T_CPOX （ $^{\circ}C$ ）に対応する。定常状態動作中、電子制御器（１９０）は、サンプリング周波数で第１の温度信号（８０３１）をサンプリングして、第１の温度信号値（８０３１）の連続ストリームを生成し、各々は、上記図９～１４のいずれか１つに示される触媒体との嵌合接触において支持される熱伝導要素の瞬間温度に対応する。電子制御器は、各第１の温度信号値（８０３１）を、適切な設定点温度値、または適切な設定点値の範囲と比較する。設定点値は電子制御器によって格納され、異なる設定点値または設定点値範囲は、異なる炭化水素燃料タイプ、異なる $SOFC$ システム構成、異なる熱伝導要素タイプ、および動作モード、酸化剤タイプ、燃料空気混合物温度、 $SOFC$ システムの直流電力出力などの他の動作パラメータに対応し得る。サンプリングされた第１の温度信号値（８０３１）が適切な第１の温度設定点値に等しいとき、または適切な第１の温度設定点値の範囲内であるとき、電子制御器は動作しない。サンプリングされた第１の温度信号値が適切な第１の温度設定点値に等しくないか、または適切な第１の温度設定点値の範囲内でないとき、電子制御器は、混合チャンバ（８０１５）に送達される酸化剤を増加させるか、または減少させるかのいずれかの論理的結論を出し、次いで、１つ以上のコマンドおよび制御信号を酸化剤流量モジュレータ（８０２５）に送信し、コマンドおよび制御信号は、その論理的結論によって要求される酸化剤の流量の増加または減少のいずれかに対応する。

【０２０９】

１つの非限定的に例示する動作モードでは、サンプリングされた第１の温度信号値（８０３１）が最小許容される第１の信号値未満であるとき、電子制御器（１９０）は、酸化剤流量モジュレータ（８０２５）に命令して、混合チャンバ（８０１５）に入る酸化剤の質量または体積流量を増加させ、それによって $O : C$ 比を増加させ、その結果、 $CPOX$ 反応温度の増加および温度 T_CPOX （ $^{\circ}C$ ）および対応する第１の温度信号値（８０３１）がそれに対応して増加する。あるいは、サンプリングされた第１の温度信号が最大許容される第１の温度信号値（８０３１）よりも大きいとき、電子制御器（１９０）は、酸化剤流量モジュレータ（８０２５）に命令して、混合チャンバ（８０１５）に入る酸化剤の質量または体積流量を減少させることで、 $CPOX$ 反応温度が低下する。各場合において、 $CPOX$ 反応温度の上昇または低下により、触媒体（９００５、１０００５、１１００５、１２００５、１３００５）と第１の熱センサ（８０３０）との間に熱伝導的に結合された熱伝導要素の温度がそれに対応して比例的に上昇または低下する。非限定的な例示の実施形態において、第１の信号のサンプリングレートは、約 $5\text{ Hz} \sim 100\text{ KHz}$ の範

10

20

30

40

50

図である。非限定的な例示的实施形態において、酸化剤の体積流量の最小増分変化は、0.1～2.0標準立方センチメートル／分（SCCM）の範囲である。

【0210】

8.12.11.2 SOFC反応温度

例示的な動作モードでは、第2の温度信号（8041）は、電子制御器（190）によって第2の熱センサ（8040）から受信される。第2の温度信号（8041）は、電圧または電流振幅、正規化された電圧または電流振幅などに対応するアナログ信号またはデジタル信号を含んでもよく、第2の温度信号（8041）の各々の異なる電圧または電流振幅値は、第2の熱センサ（8040）によって感知される異なる温度に対応する。電子制御器（190）は、1つ以上の第2の温度設定値を格納する。各第2の温度設定値は、所望の結果を生じるSOFC反応温度に対応する第2の温度信号値または値の範囲に対応する。

10

【0211】

所望の結果は、SOFC燃料電池スタックによる直流電力または電流生成の閾値、または中央値、最大値、または他の直流電力または電流振幅出力に対応する直流電力または電流出力値のうちのいずれか1つを含み得る。他の所望の結果判定基準は、例えば、排気ガス組成物が実質的に未反応のアノードガス成分、H₂およびCOを含まない場合、および／またはアノードガスの電力への不完全な変換を示し得る副生成物を含まない場合に、システム排気ポート（2165）から出ている排気ガス、またはSOFC管から燃焼チャンバ（2135）に出ている排気ガスの組成物である。さらに他の所望の結果判定基準は、燃料電池の効率の様々な測定可能な特性、例えば炭化水素燃料入力単位体積当たりの電気エネルギー出力などである。

20

【0212】

第1の設定点温度値に関して上述したように、SOFCシステムの各燃料タイプおよび各動作モードは、1つの炭化水素燃料タイプのみまたは1つの動作モードのみに対応する異なる第2の温度設定値を有し得るので、電子制御器（190）は、好ましくは、複数の異なる炭化水素燃料タイプの各々について、各動作モードについて異なる第2の温度設定値などを格納する。したがって、電子制御器（190）はまた、SOFCシステムによって使用されている炭化水素燃料タイプを検知してもよく、またはユーザは、SOFCシステムの炭化水素燃料タイプおよび他のパラメータを入力してもよい。いずれにせよ、電子制御器は、燃料のタイプや動作モードに対応する適切な第2の温度設定値を選択する。

30

【0213】

電子制御器（190）によって格納される第2の温度設定値は、第2の温度設定点に対応する1つの第2の温度信号値または第2の温度信号値の範囲を含み得る。所望の直流電力と第2の温度設定値または第2の温度信号値の範囲との相関は、以下に記載されるシステム較正によって決定される。異なる炭化水素燃料タイプに対応する複数の第2の設定値または範囲を格納することに加えて、電子制御器は、安全な最大動作温度、直流電力のための最小または閾値温度などの他の所望の動作条件に対応する他の温度信号値をさらに格納し得る。

40

【0214】

電子制御器（190）は、それによって受信された第2の温度信号（8041）を周期的にサンプリングし、サンプリングされた第2の温度信号値を、適切な第2の温度設定値または第2の温度設定値の範囲と比較する。サンプリングされた第2の温度信号が第2の温度設定値に等しい場合、または第2の設定値範囲内である場合、電子制御器は動作しない。サンプリングされた第2の温度信号が第2の温度設定値に等しくないか、または第2の設定値範囲内にない場合、電子制御器は、混合チャンバ（8015）に送達される炭化水素燃料の流量を増加または減少させ、次いで、1つ以上の制御信号およびコマンド信号を炭化水素燃料流量モジュレータ（8035）に送信する論理的結論を出す。ここで、制御信号は、混合チャンバ（8015）への炭化水素燃料の流量を増加または減少

50

させるかのいずれかに対応する。

【0215】

1つの非限定的に例示する動作モードでは、第2の温度信号値が最小許容される第2の温度信号値未満であるとき、電子制御器(190)は、炭化水素流量モジュレータ(8035)に、混合チャンバ(8015)に入る炭化水素燃料の質量または体積流量を増加させるように命令する。あるいは、サンプリングされた第2の温度信号が最大許容される第2の温度信号値よりも大きいとき、電子制御器(190)は、炭化水素燃料流量モジュレータ(8035)に命令して、混合チャンバ(8015)に入る炭化水素燃料の質量または体積流量を減少させる。第1の例では、混合チャンバ(8015)に入る炭化水素燃料の流量の増加が、合成ガスに変換される炭化水素燃料の体積を増加させ、最終的には合成ガスおよび管状SOFCロッドの温度を増加させ、この温度の増加は、最終的には、第2の熱センサ(8040)によって感知される外側包囲体壁の温度を増加させる。第2の例では、混合チャンバ(8015)に入る炭化水素燃料の流量の減少が、合成ガスに変換される炭化水素燃料の体積を減少させ、最終的には合成ガスおよび管状SOFCロッドの温度を減少させ、この温度の減少は、最終的には、第2の熱センサ(8040)によって感知される外側包囲体壁の温度を減少させる。

10

【0216】

このように、電子制御器(190)は、第2の熱センサ(8040)によって生成される第2の信号(8041)を第2の信号サンプリング速度で定期的にサンプリングし、混合チャンバ(8015)に入る炭化水素燃料の質量または体積流量を増加または減少させることによって、第2の熱センサ(8040)によって感知される温度を増加または減少させるように適切な調整を行う。第2の信号サンプリングレートは、約5Hz~100KHzの範囲である。炭化水素燃料の体積流量の最小増分変化は、0.1~2.0標準立方センチメートル/分(SCCM)の範囲である。

20

【0217】

当業者に理解されるように、炭化水素燃料の流量も変化させずに混合チャンバ(8015)への酸化剤の流量を変化させると、O:C比が変化する。同様に、混合チャンバ(8015)への炭化水素燃料の流量が酸化剤の流量も変化せずに変化するとき、O:C比も変化する。図15Aのプロットによって実証されるように、O:C比の変化は、酸化剤の流量のみを変更することに起因するか、炭化水素燃料の流量のみを変更することに起因するかにかかわらず、第1の熱センサ(8030)によって感知される温度に変化をもたらす。同様に、O:C比の変化は、酸化剤の流量を変更することのみに起因するか、炭化水素燃料の流量を変更することのみに起因するかにかかわらず、合成ガスの組成の変化をもたらす。O:C比が約1.35未満になるにつれてメタン含有量の増加が生じる。

30

【0218】

本開示の1つの非限定的に例示する操作方法によれば、第1の制御ループは、電子制御器(190)によって動作する。第1の制御ループにおいて、第1の熱センサ(8030)は、第1のサンプリング速度、例えば、50Hzでサンプリングされ、各サンプルは、第1の熱センサ(8030)に対応する第1の温度信号値を提供する。加えて、酸化剤流量モジュレータ(8025)は、必要に応じて酸化剤の流量を増加または減少させるために酸化剤の流量を調整するように制御されて、第1の温度信号値を設定値に維持するか、または電子制御器によって格納される第1の温度信号に対応する設定値の範囲内に維持する。酸化剤流量モジュレータ(8025)は、第1のサンプリングレート50Hzと同じレートで調整することができるが、第1の温度信号値の第1のサンプリングレートおよび酸化剤流量モジュレータ(8025)の調整レートは異なってもよい。好ましくは、第1の制御ループは、以下に記載される第2の制御ループとは独立して動作する。

40

【0219】

非限定的に例示する操作方法是、電子制御器(190)による第2の制御ループを操作することをさらに含む。第2の制御ループにおいて、第2の熱センサ(8040)は、第2のサンプリング速度、例えば、50Hzでサンプリングされ、各サンプルは、第2の熱

50

センサ（８０４０）に対応する第２の温度信号値を提供する。加えて、炭化水素燃料流量モジュレータ（８０３５）は、炭化水素燃料の流量を調整して、必要に応じて炭化水素燃料の流量を増加または減少させるように制御されて、第２の温度信号値を設定点値に維持するか、または電子制御器によって格納される第２の温度信号に対応する設定点値の範囲内に維持する。炭化水素燃料流量モジュレータ（８０３５）は、第２のサンプリングレート５０Ｈｚと同じレートで調整することができるが、第２の温度信号値のサンプリングレートおよび炭化水素燃料流量モジュレータ（８０３５）の調整レートは異なってもよい。好ましくは、第２の制御ループは、上述の第１の制御ループから独立して動作する。

【０２２０】

非限定的に例示する操作方法は、電子制御器（１９０）による第３の制御ループを操作することをさらに含む。第３の制御ループでは、第２の熱センサ（８０４０）に対応する各第２の温度信号値を、電子制御器（１９０）によって格納される第２の熱センサの位置に対応する制御フェイルセーフ温度と比較する。第２の熱センサの位置に対応する制御フェイルセーフ温度は、第２の熱センサ（８０４０）の位置に関する最高安全動作温度であり、本例示の実施形態では、ホットゾーン包囲体壁の表面、または第１の熱伝導経路の任意の他の表面である。第２の熱センサの位置に対応する制御フェイルセーフ温度が電子制御器によって検出されると、電子制御器は、炭化水素燃料流量モジュレータ（８０３５）を閉じて、混合チャンバ（８０１５）へのさらなる燃料の流れを停止するように構成される。炭化水素燃料流量モジュレータが閉鎖されている間、電子制御器は、酸化剤およびカソードガス流量モジュレータ（８０２５、８０５０）を完全に開いて冷却のためにＳＯＦＣシステムを通じて酸化剤を圧送するように構成される。

【０２２１】

非限定的に例示する操作方法は、電子制御器（１９０）による第４の制御ループを操作することをさらに含む。第４の制御ループにおいて、ＳＯＦＣシステムは、図１５Ａのプロット（１５１０）に示されるように、例えば、第１の昇温熱センサ値 T_{CPOX} に対応して意図的に高い $O:C$ 比で動作する。第４の制御ループに対して選択された昇温熱センサ値 T_{CPOX} は、通常動作中に使用される設定値 T_{CPOX} またはセンサ値 T_{CPOX} （１５３０）の範囲よりも大きい。第４の制御ループは、起動モード中に使用して、例えば、ＳＯＦＣシステムを例えば、第２の熱センサ（８０４０）によって感知されるＳＯＦＣ反応温度に、より急速に加熱してもよい。また、第４の制御ループを使用して、触媒層（３０９０）および固体酸化物アノード電極層（１５０）を洗浄するための手段として、ＳＯＦＣシステムを意図的に過熱させて、例えば、タール堆積物を焼き尽くすなどしてもよい。

【０２２２】

第４の制御ループは、第１の昇温熱センサ信号 T_{CPOX} に対応する $O:C$ 比でＳＯＦＣシステムを動作させるように開始される。図１５Ａの較正チャートの例では、第１の昇温熱センサ信号 T_{CPOX} は、少なくとも約１．４を超える $O:C$ 比に対応する。１つの非限定的な実施形態では、第４の制御ループは、所定の期間、または第１の昇温熱センサ信号 T_{CPOX} が最大第１の熱センサ信号 T_{CPOX} に対応する上部設定値に達するまで、 $O:C$ 比１．５以上でＳＯＦＣシステムを実行するように構成される。

【０２２３】

第４の制御ループは、上昇した、第１の昇温熱センサ信号 T_{CPOX} に関連付けられた値または値の範囲を含む。 T_{CPOX} 上昇値は、通常の動作に使用される設定値温度または設定値温度範囲（１５３０）に対応する $O:C$ 比よりも大きい、対応する昇温 $O:C$ 比を提供する。好ましくは、昇温 $O:C$ 比は、２．０～２．２の範囲である。あるいは、上昇した昇温 T_{CPOX} は、約２．０～２．２の間の $O:C$ 比を提供する第１の温度信号（８０３１）に対応する温度値の範囲である。

【０２２４】

第４の制御ループの１つの非限定的に例示する実施態様は、通常動作に使用される第１の熱センサ信号に対応する設定点値または値の範囲（１５３０）を所望の昇温 $O:C$ 比に

10

20

30

40

50

対応する、上昇した T_CPOX の設定点値または値の範囲に変更し、次いで第 4 の制御ループが、炭化水素燃料の流量を変更することなく、必要に応じて酸化剤の流量を調節して、第 1 の温度信号値を上昇させて T_CPOX の昇温設定点値または値の範囲に収めることができるようにすることである。昇温または $O : C$ 比で所望の期間経過後、第 4 の制御ループは、その動作を終了し、上昇した、 T_CPOX 昇温設定点値または値の範囲を、通常の動作に使用される第 1 の熱センサ信号に対応する設定点値または値の範囲（1530）に戻し、制御を第 1 および第 2 の制御ループに戻す。第 4 の制御ループの動作を終了するために使用可能な他のパラメータとしては、第 2 の温度信号（8041）を監視したり、SOFC スタックが許容可能な動作温度に達したときの判定手段として SOFC スタックによって生成される直流電力または電流振幅を監視したりすることが挙げられる。
【0225】

10

較正手順

本開示によれば、合成ガスのアノードガス成分 H_2 および CO の重量パーセントを最大化する一方で、未反応炭化水素（例えば、 CH_4 、 C_2H_x およびエタン（ C_2H_6 ）プロパン（ C_3H_8 ）、ブタン（ C_4H_{10} ）などを含む他の長い炭化水素分子鎖の重量パーセントを最小化するために最適化プロセスが行われる。いくつかの較正手順において、最適化プロセスはまた、酸素ガス、水、窒素ガス、一酸化炭素、二酸化炭素、タール（ $C_{10}H_8$ ）、および二硫化炭素（ CS_2 ）、硫化水素（ H_2S ）、二酸化硫黄（ SO_2 ）などの合成ガス（2027）の他の成分の重量パーセントを特徴付けることを含む。より一般的に、最適化処理は、第 1 の温度信号（8031）に対応する一次設定点値または設定点値の範囲を識別するために行われる。一次設定点値または設定点値の範囲は、第 1 の熱センサ（8030）によって生成された値に対応し、 $CPOX$ 反応の特徴に関連する、反復可能な所望の結果に対応する。上述したように、所望の結果は所望の合成ガス組成物であるが、異なるより単純な所望の結果は、0.01%未満のメタンの重量パーセントなどである。
【0226】

20

最適化プロセスは、特定の炭化水素燃料タイプに基づいてシステム設計を適格化するために行われる。システム設計は、熱伝導要素の構成および位置、（9005、10005、11005、12005、13005）、熱伝導要素に対する第 1 の熱センサ（8031）の構成および位置、触媒体（3030）の構成および物理的寸法、第 2 の熱センサ（8040）の構成および位置、ならびに $CPOX$ 反応を特徴付けるように選択された反復可能な所望の結果を含む。

30

【0227】

第 1 の較正工程では、SOFC システムは、例えば、直流出力電力、および、または SOFC システム酸化剤および炭化水素燃料の流量によって、例えば、導管（8017）および（8022）中に生成される電流、例えば、導管（8055）中のカソードガス流量、例えば、入力マニホールド（3055）中の合成ガス組成物、ならびに SOFC スタックの出口、例えば、燃焼チャンバ（2135）中の排気ガス組成物のような、SOFC システムの様々な動作パラメータを測定するために提供される要素を含む、較正ツールまたは器具内に設置される。

【0228】

較正ツールまたは備品は、触媒体（3030）から出るサンプル合成ガスに位置付けられた少なくとも 1 つのガスクロマトグラフプローブと、所望の合成ガス組成物分析を行うように構成されたガスクロマトグラフとを含む。任意選択で、第 2 のガスクロマトグラフプローブは、SOFC スタックから出る排気ガスをサンプリングするように位置決めされ、例えば、燃焼チャンバ（2135）の内部に配置され、第 2 のガスクロマトグラフは、所望の排気ガス組成物分析を行うように構成される。較正ツールまたは備品は、酸化剤流量モジュレータ（8025）および炭化水素燃料モジュレータ（8035）の各々、ならびに任意選択で、適切なガス流量を測定するためのカソード流量モジュレータ（8050）と関連付けられた体積流量計の質量も提供する。較正ツールまたは備品は、例えば、試料熱センサ信号（8031）および（8040）、直流電力値（例えば、電流および／ま

40

50

たは電力振幅)をサンプリングするため、酸化剤、炭化水素燃料、およびカソード空気流量を調節するため、流量計をサンプリングするため、設定点値を格納するため、ガス組成データを分析および格納するため、熱センサ信号(8031)および(8040)の各々についての設定点値または値範囲を決定および選択するためなどにS O F Cシステムを動作させるように構成された較正制御器を含む。較正制御器は、ガスクロマトグラフ試料データ、流量計データ、および第1および第2の熱センサデータを収集し、C P O X反応の特性に関する1つ以上の反復可能な所望の結果を達成することに関連付けられた、および、またはS O F C反応の特性に関連する反復可能な所望の結果を達成することに関連付けられたデータを分析することによって、較正プロセスを実行することに関連する論理動作を実行するように構成される。

10

【0229】

第2の較正工程では、S O F Cシステムは、S O F C反応が開始され、S O F Cシステムが直流電力を生成している定常状態動作モードに持ち込まれる。その後、S O F Cシステムの動作パラメータは、S O F C反応の特性に関連する繰り返し可能な所望の結果を達成するために必要に応じて較正制御器によって変更される。上述したように、S O F C反応の特性に関連する所望の結果は、直流電力または電流出力の特性に関連付けられ得る。一例では、第2の熱センサ(8040)によって出力される第2の信号値は、酸化剤の流量が一定である間、炭化水素燃料の流量の範囲にわたって監視され、O : C比の範囲にわたって出力される直流電力をプロットする。1つの非限定的な例示的实施形態では、較正システムは、直流電力出力の開始に対応する設定点、最大取得可能な直流電力出力に対応する設定点、および中央直流電力出力に対応する設定点などの直流電力出力特性に対応する第2の温度信号設定点値または第2の温度信号設定点値の範囲を選択し得る。

20

【0230】

別の非限定的な例示的实施形態では、較正システムは、第2の温度信号設定点値、または排気ガスが実質的にアノードガス成分を含まないことを実証するS O F Cスタックから出る排気ガスの組成物に対応する第2の温度信号設定点値の範囲を選択し得る。さらに別の非限定的な例示的实施形態において、較正システムは、第2の温度信号設定点値、または第2の温度信号設定点値の範囲、または炭化水素燃料の流量の直流電流出力に対する比率などを選択し得る。第2の熱センサ(8040)によって出力される第2の信号値を決定するために、S O F Cシステムのどの所望の出力を評価しているかにかかわらず、第2の熱センサ(8040)によって出力される第2の信号値は、酸化剤の流量が一定である間に炭化水素燃料の流量の任意の範囲にわたって監視され、S O F Cシステムの所望の出力対O : C比をプロットする。加えて、これらのプロットは、最適なO : C比および対応する最適な第2の信号値またはS O F Cシステムの所望の出力に対応する値の範囲を見つけるために、1つ以上の異なる酸化剤の流量について繰り返され得る。

30

【0231】

第3の較正工程では、複数の異なるO : C比にわたるガスクロマトグラフによって合成ガスの試料を分析することによって、各合成ガス成分または選択された合成ガス成分の重量パーセントを決定する。O : C比は、較正制御器によって行われるプロセスである酸化剤の流量のみを修正することによって変化する。第3の較正工程中、炭化水素燃料の流量は変更されない。較正制御器はまた、複数の異なるO : C比にわたって第1の温度信号(8031)および酸化剤の流量計データをサンプリングし、第1の信号値および酸化剤の流量値を格納する。較正制御器は、各O : C比について合成ガス成分重量パーセントを分析し、第1の温度信号値および酸化剤の流量値を各O : C比に関連付けるように構成される。加えて、第3の較正工程中、較正制御器は、S O F Cシステムの所望の出力に関連付けられたデータを監視し、記録するように構成される。S O F Cシステムの所望の出力に関連するデータは、少なくとも、各O : C比での第2の温度信号(8041)と、炭化水素燃料およびカソード空気流量、S O F Cスタックの直流出力電力特性、ガスクロマトグラフデータから判定されるS O F Cスタックから出る排気ガスの組成などのうちの1つ以上を含む。

40

50

【0232】

第4の較正工程において、第3の較正工程によって生成される複数の異なるO：C比の各々に対応する各合成ガス成分の重量パーセントを分析して、どのO：C比が所望の合成ガス組成物を常に生成するか、例えば、メタンの重量パーセントが0.01%未満であるかなどを判定する。第4の較正工程は、較正制御器によって、所望の合成ガス組成物を提供することに関連付けられた第1の熱センサ（8030）によって変性した第1の温度信号値または第1の温度信号値の範囲を判定することをさらに含む。図15Aのプロット（1510）によって示されるように、第1の設定点値または値の範囲（1530）は、所望の合成ガス組成物を満たす第1の温度信号値T_{CPOX}の最低温度に対応する。しかしながら、本開示から逸脱することなく、他のより高い温度値を選択することができる。第1の設定点値または設定点値の範囲（1530）が選択されると、第2の熱センサ（8040）に対応する第2の設定点値または値の範囲に対応する固定炭化水素燃料の流量を使用して、第1および第2の設定点値の各々に小さな変更を加えることによって、SOF Cシステム動作の精細化を行うために、他の固定炭化水素燃料の流量を使用して、第4の較正プロセスを再実行することができる。

10

【0233】

較正備品を使用する場合、較正手順は、所与の炭化水素燃料タイプを使用して所与のSOF Cシステム構成に対して1回だけ実行され、第1の熱センサ（8030）と関連付けられたCPOX反応温度設定点および第2の熱センサ（8040）と関連付けられたSOF Cスタック温度設定点を決定する必要がある。

20

【0234】

較正備品は、任意選択で、複数の異なる炭化水素燃料タイプの各々についてSOF Cシステムを較正するために、各々異なる炭化水素燃料タイプに対応する複数の異なる炭化水素燃料源も含む。したがって、第5の較正工程は、複数の異なる炭化水素燃料タイプの各々について2～4回較正工程を繰り返すことを含み、これにより、異なる炭化水素燃料タイプの各々について異なるCPOX反応温度設定点および異なるSOF Cスタック温度設定点を選択することができるようになる。

【0235】

本発明を好ましい実施形態に関して上で説明してきたが、それに限定されないことも当業者には理解されるであろう。上述の発明の様々な特徴および態様は、個別にまたは一緒に使用することができる。さらに、本発明は、特定の環境における、および特定の用途（例えば、放熱反応を行う燃料改質装置モジュールを含む固体酸化物燃料システム）具現化の文脈で記載されてきたが、当業者は、その有用性がそれに限定されず、かつ本発明が、可燃性の材料を処理する、高温腐食環境にある熱エネルギーを管理することが望ましいあらゆる数の環境や具現化に有益に利用され得ることを認識するであろう。したがって、以下に記載の特許請求の範囲は、本明細書に開示されている本発明の全範囲および趣旨を考慮して解釈されるべきである。

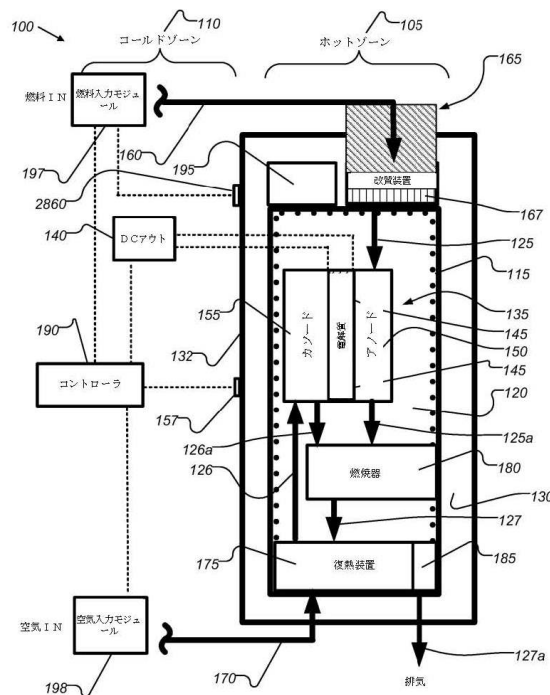
30

40

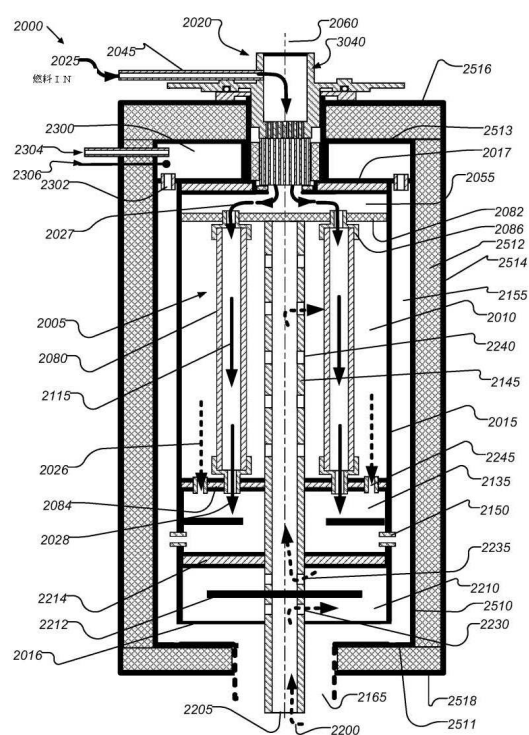
50

【図面】

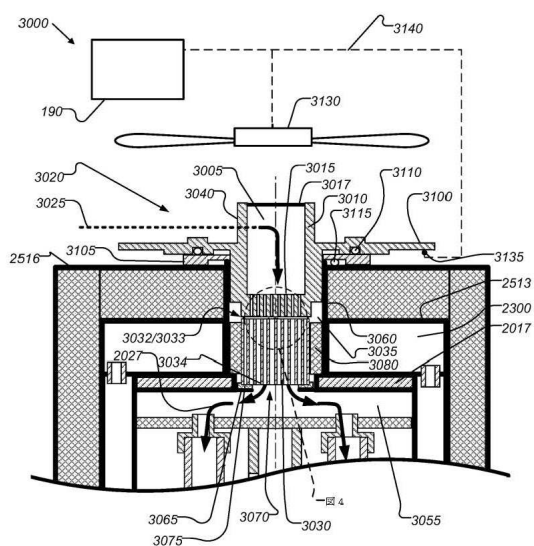
【図 1】



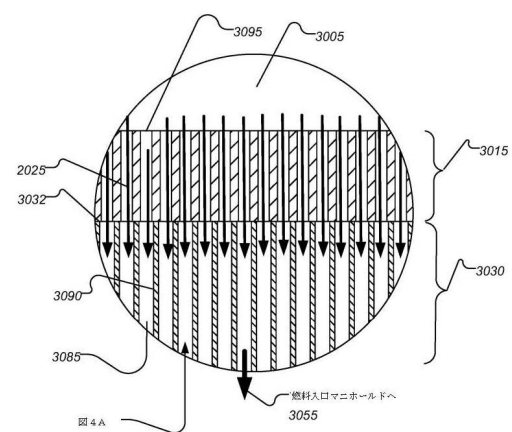
【図 2】



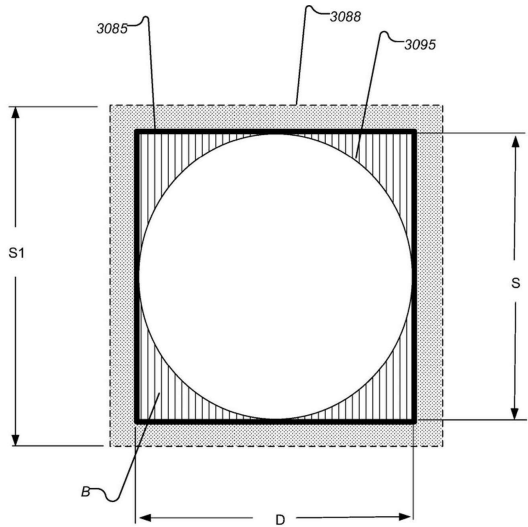
【図 3】



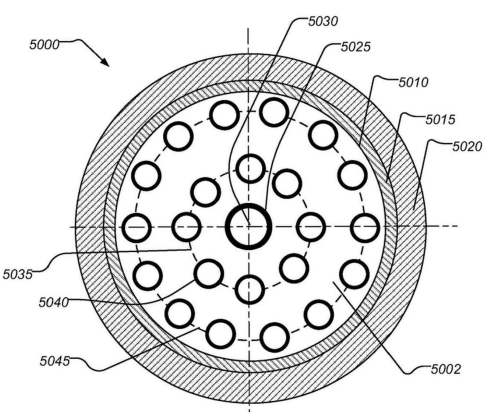
【図 4】



【図 4 A】

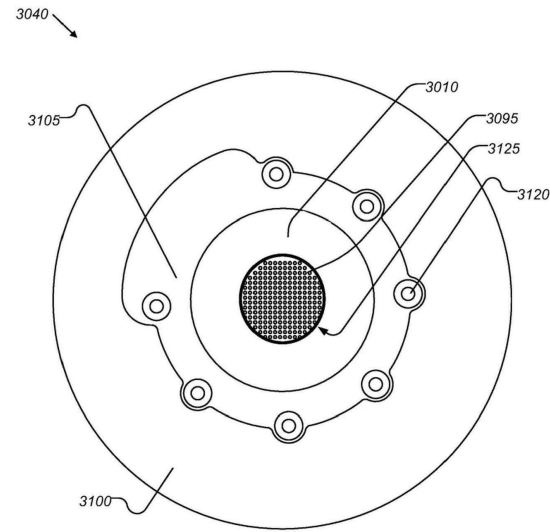


【図 5】

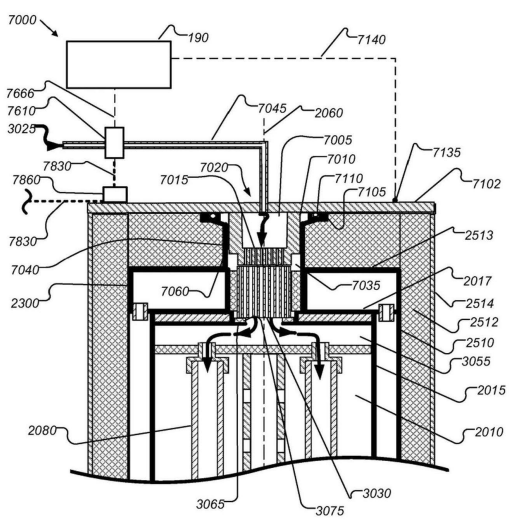


10

【図 6】



【図 7】



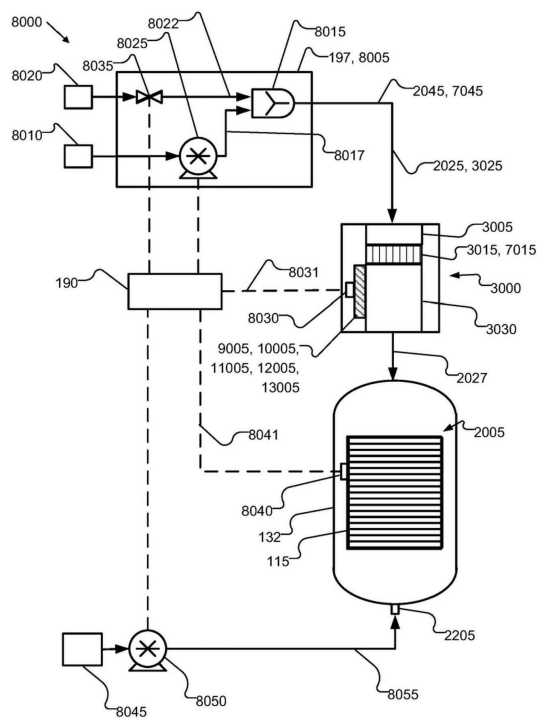
20

30

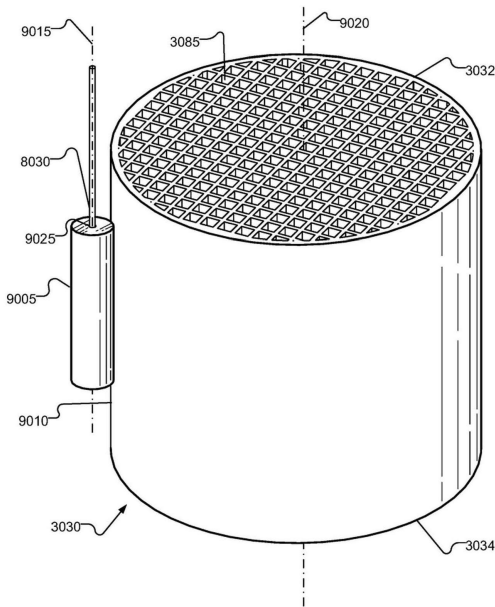
40

50

【図 8】



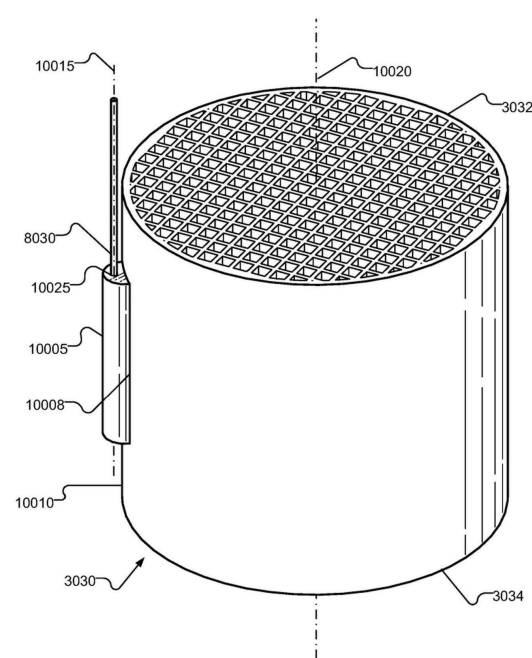
【図 9】



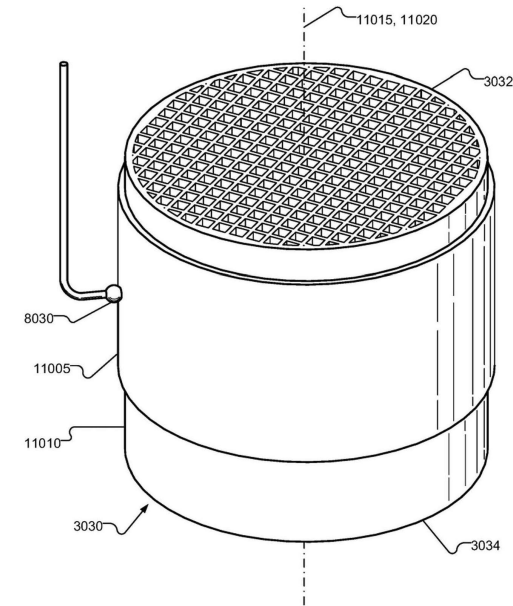
10

20

【図 10】



【図 11】

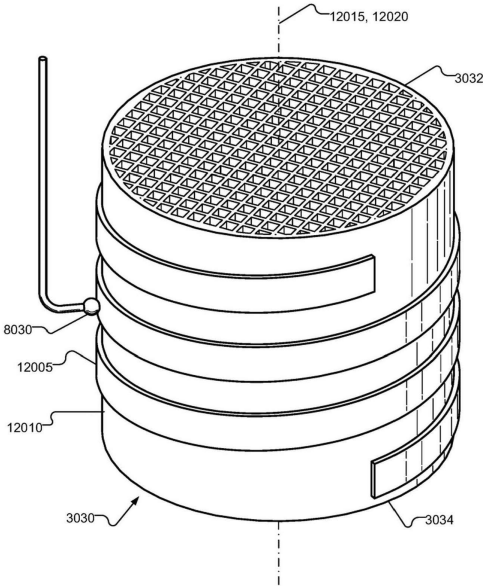


30

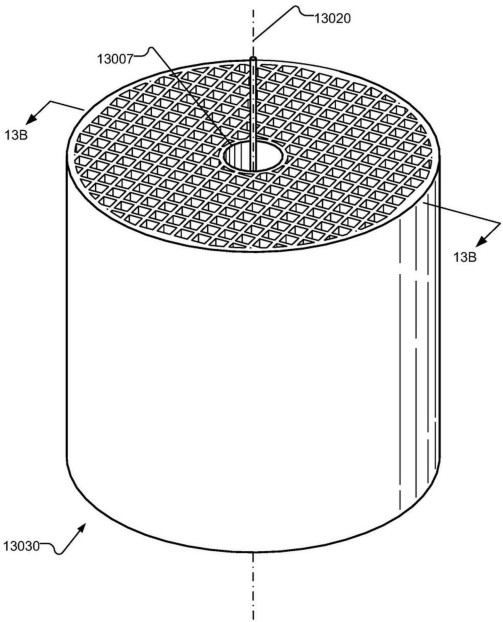
40

50

【図 1 2】



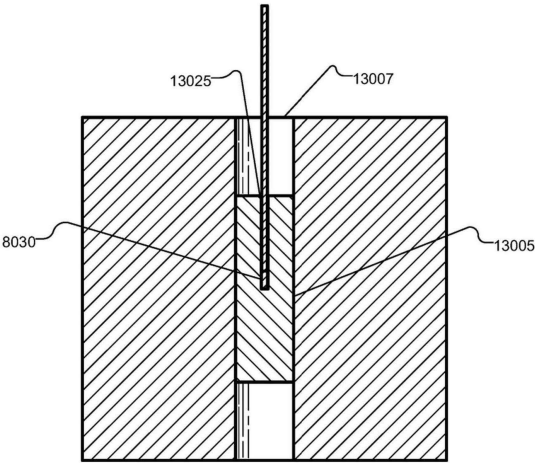
【図 1 3 A】



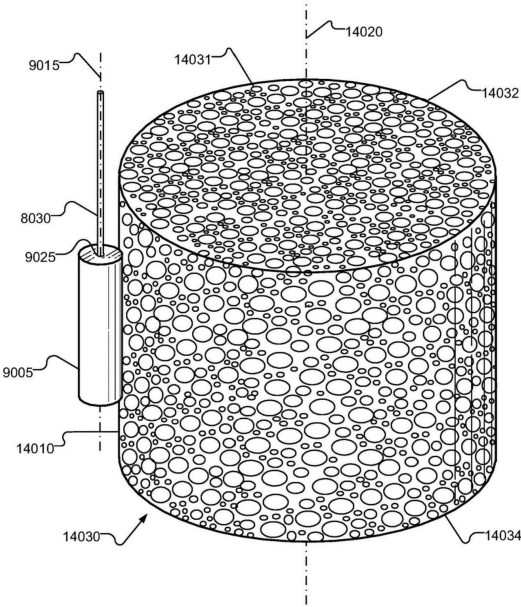
10

20

【図 1 3 B】



【図 1 4】

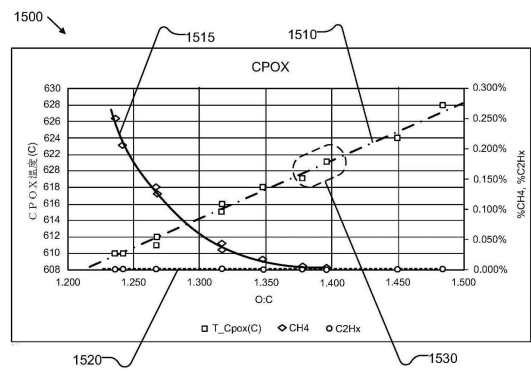


30

40

50

【図 15 A】



【図 15 B】

1505

O:C	T_CPOX (C)	%CH4	%C2Hx
1.237	610	0.25%	0%
1.243	610	0.21%	0%
1.268	611	0.14%	0%
1.269	612	0.13%	0%
1.318	616	0.04%	0%
1.318	615	0.03%	0%
1.349	618	0.02%	0%
1.379	619	0.00%	0%
1.397	621	0.00%	0%
1.451	624	0.00%	0%
1.485	628	0.00%	0%

10

20

30

40

50

フロントページの続き

(51)国際特許分類

H 0 1 M 8/12 (2016.01)
H 0 1 M 8/2465(2016.01)

F I

H 0 1 M 8/12 1 0 1
H 0 1 M 8/2465

レークショアテラス 2 2

(72)発明者 マシュー オティス

アメリカ合衆国 0 2 1 3 4 マサチューセッツ州 オールストン アーデンストリート 2エー

(72)発明者 テイラー サムエル コート

アメリカ合衆国 0 1 8 2 4 マサチューセッツ州 ケルムスフォード レークサイドアベニュー 1 6

(72)発明者 リチャード フラザース

アメリカ合衆国 0 1 7 7 2 マサチューセッツ州 サウスボロ オーバールックドライブ 3

(72)発明者 ポール オセナー

アメリカ合衆国 0 1 7 1 9 マサチューセッツ州 ボックスボロ バローズロード 1 0 5 7

審査官 森坂 英昭

(56)参考文献 米国特許出願公開第 2 0 1 7 / 0 1 1 0 7 4 8 (U S , A 1)

特表 2 0 1 7 - 5 0 1 5 5 6 (J P , A)

特表 2 0 1 7 - 5 3 6 6 5 6 (J P , A)

特表平 1 0 - 5 0 3 4 6 2 (J P , A)

(58)調査した分野 (Int.Cl., D B 名)

C 0 1 B 3 / 0 0 - 3 / 5 8

B 0 1 J 2 1 / 0 0 - 3 8 / 7 4

H 0 1 M 8 / 0 4 3 2

H 0 1 M 8 / 0 4 7 4 6

H 0 1 M 8 / 0 6 1 2

H 0 1 M 8 / 1 2

H 0 1 M 8 / 2 4 6 5