

「資源循環・エネルギーミニマム型システム技術」
平成11年度採択研究代表者

鈴木 健二郎

(京都大学大学院工学研究科 教授)

「超小型ガスタービン・高度分散エネルギーシステム」

1. 研究実施の概要

今後、我が国の社会はますます個性化する傾向にあると考えられる。それゆえ、それを支えるエネルギーシステムが必要となる。高度分散エネルギーシステムは、エネルギー使用量の空間的・時間的变化を受容できる点で、個性化社会に適する。また、このシステムは自然災害時のライフライン確保を容易にし、インフラ整備に困難度が高い離島や、国外の過疎地、開発途上国での受容が見込まれる。このシステムを高効率化し、広く導入できれば、家庭にインフラを含むエネルギー利用に対するコスト感を与えることができ、現在難しいとされる民生用エネルギーコントロールの困難度を軽減できる。また、大容量発電システムをベースロード供給に特化でき、資源的な無駄も排し得る。本研究は、超小型ガスタービンと固体酸化物形燃料電池のハイブリッドシステムを、高度分散エネルギーシステムとして実現するための、フィージビリティの検討や、システムの最適化指針の確立、システム設計に必要なモノグラフやデータベース構築のための基礎研究の推進、を行うものである。

2. 研究実施内容

本研究は9つの研究テーマグループから構成されており、そのそれぞれのグループに関する本年度の研究成果を以下順次報告する。

(1) 小容積燃焼グループ

・マルチ噴流型燃焼器

ガスタービンの超小型化に付随する乱流伝熱や乱流物質混合の抑制効果、とりわけ超小型燃焼器内で生じるであろう燃料 - 空気の混合の劣化は、信頼性とクリーンな排気が必須の燃焼器にとって致命的であり、その対策に従来型大型ガスタービン技術をそのまま適用するだけでは不十分であると考えられる。そこで、その回復と火災安定・完全燃焼をマイクロ噴流の活用によって図る。しかし、従来の管内噴流ではクラヤ - クルター数に依存して循環流領域の大きさが規定されてしまい、短い距離での混合は十分でない。ここでは、複数の空気噴孔が同心円状に開けられたバッフル板と中央部にある燃料噴流ノズルから構成されるマルチ

噴流型燃焼器（図 1 - 1 参照）を提案した。流量条件として、5 kW 級超小型ガスタービン（MGT）を燃料電池（SOFC）とのハイブリッド利用に充てる場合も想定した検討を行い、その結果、本燃焼器の火炎安定領域はこれまでの管内同軸拡散火炎のそれに比べて、燃料希薄側に大きく広がるとともに、燃料 - 空気の混合が促進され希薄予混合的な火炎の形成されることが分かった（図 1 - 2 参照）。今後、燃焼器の燃料ノズルと空気噴孔の径や相対位置の変化のみならず、SOFC とのハイブリッド運転時の MGT 用燃料として、一酸化炭素や未燃炭化水素など、SOFC からの排気ガス利用についても、火炎形状、火炎安定性、燃焼ガス温度、排出特性がどのように変化するかを調べる必要がある。

- ・等温膨張燃焼過程導入による GT サイクルの高効率化

等温膨張燃焼の基礎実験を行うため、高温高速を実現する風洞を設計製作し、試運転を行った。

- ・3次元渦生成保炎器を兼ねたマイクロノズルと混合制御システムによる火炎安定化

ここでは第一段階として、10mm 径の半円型保炎器の背面に燃料吹き出し口を設けた保炎兼用ノズルを作成し、基礎的検討に着手した。

- ・燃焼器用触媒材料の開発と反応挙動

ガスタービンなどへの応用を目的として燃焼触媒の開発を行った。メタン燃焼触媒としては低温で活性を示す着火触媒と高温耐熱性触媒について検討した。低温燃焼活性に優れる Pd 触媒の反応成績は Pd を担持する酸化物担体に大きな影響を受ける。通常使用される γ - Al_2O_3 担体は $130 \text{ m}^2/\text{g}$ 程度の高表面積を有し、低表面積担体に担持した Pd 触媒よりも多くの場合、高い燃焼活性を示す。しかし Pd/ Al_2O_3 触媒に比較して Pd/ NiO - $18\text{Al}_2\text{O}_3$ 、Pd/ SnO_2 に担持することによって大幅に活性は向上した。触媒の比表面積はこれらの担体では小さく特に SnO_2 は γ - Al_2O_3 より 2 桁程度低いにもかかわらず、高い低温着火活性を示した。触媒の電子顕微鏡観察により活性な Pd/ SnO_2 触媒では SnO_2 担体の回りを非晶質の Pd 層が覆った特殊な微構造を有していることが明らかになった。このため触媒の表面積は小さくても Pd の高分散状態が達成されと考えられる。Pd ではこのような特殊な微構造は見られなかったがやはり Pd/ SnO_2 に比較して高分散状態が達成されている。このように担体の種類によって Pd との強い相互作用が起こり、活性種である PdO の表面積が異なり、活性が変化する。高温燃焼触媒については以前我々が見出したヘキサアルミネート系について他の触媒系と活性を比較した。Mn を含有するヘキサアルミネート触媒 ($\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{MnAl}_{11}\text{O}_{19-\alpha}$ 、 $\text{BaMnAl}_{11}\text{O}_{19-\alpha}$) は含有しないもの ($\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Al}_{12}\text{O}_{19-\alpha}$ 、 γ - Al_2O_3) よりも燃焼開始の活性は高い。これは Mn の酸化還元により反応が進行するためである。しかし高温領域において

は Mn を含まない触媒では気相ラジカル反応が進行して急激に反応率は向上するため、触媒上の表面反応が進行する Mn を含む系よりも100%燃焼にいたる温度は低くなった。

・ 旋回噴流型燃焼器

ここでは、マイクロガスタービンの開発・高性能化のキーとなる燃焼器における火炎安定と完全燃焼の確保、低 NO_x 生成を実現する火炎構成の研究を行い、その目標にあった燃焼手法と火炎構造を明確にしようとする。マイクロガスタービン燃焼器のコンセプトは、スワローを用いた旋回流により循環流を形成することによって、火炎安定と完全燃焼の実現を確保すること、また、燃焼器入口部の燃料・空気合流部において交差流的に流すことにより高速混合させることにより、拡散混合型の希薄予混合燃焼構造火炎を形成し低 NO_x 生成と逆火の防止を実現することである。これまでは、設計・製作した燃焼器を用い、燃料ノズル等の燃焼器入口条件を様々に与えた場合の火炎の観察、火炎の直接撮影、火炎安定範囲の確定、NO, NO_x, CO の排出濃度の測定を行った。また、スワローの上流で予混合させた場合についても同様の実験を行った。得られた結果は以下のとおりである。

拡散混合型予混合燃焼の場合、流量条件によって火炎構造が変化し、NO_x 生成はその火炎構造に支配的に影響され、NO_x 生成が少ない条件では排出濃度は約 20ppm(O₂= 0 %換算)となった。CO の排出は低 NO_x 生成を実現できる火炎構造で増加する傾向が見られるが、NO_x, CO 共に低減できる燃焼条件が存在することを示した。燃料と空気をスワローの上流で混ぜた場合、NO_x 排出濃度は 5 ppm 以下で CO の排出濃度が低い燃焼が可能であることを示した。このことから、拡散混合型予混合燃焼において更なる NO_x 低減を目指す必要があり、その目標が明らかになった。

(2) マイクロ伝熱グループ

・ 再生熱交換器の小型・高効率化に関する研究

5 kW 級 MGT 用再生器の研究に先立ち、熱交換器仕様に関するデータを得る目的で、最も基本的なプライマリサーフェス型熱交換器であるプレート（平板）型熱交換器と代表的なプレートフィン型熱交換器とを仮に採用した場合の熱交換器の仕様を概算した。具体的にはサイクル計算の結果得られた再生器に対する要求仕様をもとに、 ϵ -NTU 法を用いて 5 kW 級 MGT 用レキュペレータの試設計を行い、再生器のサイズや空気側、ガス側流路におけるレイノルズ数等の仕様を試算した。その結果、多段に積層されたプレート（または、プレートフィン）で構成される再生器内のひとつの流路についてレイノルズ数は数百程度であることなどがわかった。この結果をもとに、下記に示す熱交換器に対する個別の研究を進

めた。

(i) プライマリサーフェス型熱交換器

有効な幾何形状を選定するための指針を得ることを目的として、プレート幾何形状が熱流動場に与える影響について数値解析による詳細な検討を行った。

図2-1は波型プレートを使用したプライマリサーフェス型熱交換器内熱流動場について2次元数値解析を行った結果の一例である。この解析により、レイノルズ数の増加に伴い熱流動場が非定常化すると圧力損失が増大するが、それ以上に壁面熱伝達が良好となり、許容される圧力損失の範囲で流れを非定常化させることが有効であること、流れが非定常化する臨界レイノルズ数は上下壁面の波型の位相差の影響を受けることなどがわかった。

図2-2は矩形に折りたたまれたプレートを使用した場合について2次元数値解析を行った結果の一例である。この数値解析では、プレート内部の熱伝導も同時に解いている。凹凸の高さおよび流れ方向ピッチを変更して検討を行ったところ、凹凸を高くすることは温度効率を上げるのに有利であること、凹み領域内に著しく熱伝達が不良となる領域が存在することなどがわかった。

(ii) プレートフィン型（金属マトリックス挿入型）熱交換器

MGT用高性能小型熱交換器を実現するためのアイデアとして、たわし状の金属メッシュをフィンとして利用するプレートフィン型熱交換器の有効性を検討している。金属メッシュを多孔質体とみなした数値解析による検討（図2-3参照）とともに、金属メッシュのフィン効率を実験的に測定することを試みている。実験においては非定常法と定常実験を併用し、メッシュの種類・充填率、流量の影響を検討する。これまでに、非定常法（改良シングルブロー法）を用いて4種類の金属メッシュについて NTU と圧力損失の関係を測定した。

・フィン面との衝突噴流伝熱を利用したプレートフィン型熱交換器の伝熱特性
従来のプレートフィン型熱交換器のフィン面に穴を開け、従来の流動方向と比べると90度向きを変えたように流動する対向流型熱交換器を試作し、圧力損失と伝熱促進について実験的に調べた。

・再生熱交換器用マイクロチューブの伝熱特性

再生熱交換器の開発のための研究としては、本年度は熱交換要素の一つとして内径48.44マイクロメートルのチューブを取りあげ、窒素を層流状態で流す場合のチューブ内面側平均熱伝達率の測定を行った（テスト部は図2-4参照）。その結果、図2-5に示されるように、マイクロスケールにおいては平均ヌッセルト数

がレイノルズ数の増加とともに増大する傾向が認められ、通常のスケールで得られるような一定値とは異なる挙動を示すことが分かった。また、具体的な熱交換器要素についての実験データを得ることを目指して直行流型熱交換器の実験装置を製作した。まだ実験結果は得られていないが、要素として多孔質媒体、金属片が再生用熱交換器要素として有効となるかどうかのデータを取る予定である。

・圧力損失ペナルティ最小かつ熱伝達率向上に資する最適設計技術の開発

近年、計算機の著しい発達により、CFD を用いた最適設計が身近なものとなつつある。しかし、3次元非定常である乱流の計算負荷は非常に重く、直接数値シミュレーション(DNS)は非常に困難である。また、熱交換器では熱伝達、圧力損失特性向上のため、非常に複雑な流路形状を用いるが、複雑な流路形状での乱流モデルの予測精度は不十分である。その一因として、複雑な流路形状では壁垂直方向があいまいとなる問題(問題1)がある。本研究では、

- (i) 正方形、菱形ダクトのDNSを行った。熱交換器設計に際しては、鈍角の角を持つ管が適していることを示した。また、乱流モデル改良のためのデータとして、レイノルズ応力、乱流熱流束を得た。
- (ii) 問題1の克服のため、レイノルズ応力の主軸から成る一般座標系を提案し、主軸の方向、レイノルズ応力と平均歪みテンソルの関係について調べた。その結果、菱形などの比較的複雑な流路形状においても、主軸方向決定の容易性と乱流モデルの単純化の可能性が示された。
- (iii) 乱流熱流束の方向に注目した。菱形などの比較的複雑な流路形状においても、乱流熱流束の方向が最大乱れエネルギーの方向とほぼ一致し、それらの比がほぼ一定であることから、レイノルズ応力の正確な予測があれば、乱流熱流束の予測が容易であることを示した。

今後、これらの考えを発展させ、乱流モデルの提案、予測精度向上を行う。更に、そのモデルを用いて流路形状の最適化を行う予定である。また、層流での形状最適化についても今後検討する予定である。

(3) 複雑系熱流動グループ

・壁面スライドを伴うチャンネル乱流の直接数値シミュレーション(DNS)

MGTに使われる圧縮機(あるいはタービン)はラジアル型であると考えられ、その場合に動翼部を流れる流体は、湾曲した2枚のブレード間を流れる。この状況は、動翼側に座標を固定し、幾何形状を単純化すると、上壁面が主流方向と垂直にスライドする矩形チャンネル内の流れと見ることができる。このような状況下の流れ場を実験的に測定することは困難であり、動翼の最適形状の決定などには数値解析による検討が有用である。しかしながら上述のような複雑乱流現象についての知見は少ない。乱流モデル等を用いた動翼内流れ場の効果的な数値予測に

資するために、ここではそこで起こる基礎的乱流現象を把握し、かつそのデータベースを得ることを目的とし、壁面スライドを伴うチャンネル乱流の直接数値シミュレーションを行った。図3 - 1に結果の一例を示す。本計算により、壁面のスパン方向スライドにより壁近傍のストリーク構造がスパン方向に傾くこと、乱流構造が微細化する可能性があることなどがわかった。今後、動翼の回転、および側壁による影響の検討も行う予定である。

・高速回転と大きな曲率を有する翼列内流れの数値解析

レイノルズ数や回転数の変化によるターボ機械内等の流れを明らかにする第一歩として、まず単純な流路で数値シミュレーションを行った。その目的は一般的な系の回転が流れ場、温度場に与える影響を調べることである。従来の研究ではスパン方向に軸を持つ回転だけを扱っていたのに対し、ここでは3つの方向軸(主流方向、壁垂直方向、スパン方向)を扱った。また回転数についても従来の研究より広い範囲を扱った。

これら3つの方向軸の周りの回転で共通して見られたのは、熱伝達促進と壁面摩擦の増加である。壁面摩擦の増加傾向は熱伝達促進傾向より弱かった。また、平均量、乱流強度、熱流束、輸送方程式の各項の収支、高次モーメント等の統計量が得られた(図3 - 2および3 - 4参照)。現在はこのような回転系に適用できる乱流モデルの構築に役立つであろう、精度が良く信頼性の高いデータベースの構築をこれらの3つの基本的なケースについて行っている。流れの可視化からは、特に主流方向及び壁垂直方向の軸のケースで、壁近傍の低速・高速縞構造が傾くなど、興味深い構造が観察された(図3 - 3参照)。それらのケースでは、より組織だった運動をする準秩序構造がみられた。主流方向の軸のケースでは他の2つよりも複雑な3次元的な構造が見られた。また、壁垂直方向の軸の場合が一番回転に敏感であることが分かった。この場合、他のケースより2桁低いオーダーの回転数で同様の変化が見られた。

・回転チャンネル乱流熱流動のモデリング

現存の非線形 $k-\varepsilon$ 乱流モデルを DNS データを援用し、回転チャンネル乱流場において、散逸方程式、レイノルズ応力表現、様々な回転数に対するモデルの予測性能を系統的に評価した。これらの評価から、

- (i) 散逸方程式に対して回転の効果を影響させるモデリングをしなければならない、
- (ii) レイノルズ応力のモデル表現について、回転チャンネル乱流場では壁面漸近挙動と乱れの再分配を含めたモデルの改良が必要である、
- (iii) 全ての既存モデルの回転数依存性が実際の約 1 / 3 程度で極めて低い、
- (iv) 高回転時での Suction 側での層流化の現象が捉えられない、

という結果を得た。この評価結果を考慮して、回転チャンネル乱流に適したモデルを新たに提案した。

図3 - 5 ~ 3 - 7は提案したモデルによる回転チャンネル乱流を予測した結果である。図3 - 5には、乱れの漸近挙動を示した。ベースモデル(NLAKNモデル)がすべての垂直応力について同じ漸近値を与えるのに対し、改良した本モデルは壁面垂直方向応力 v^2 が y^4 に漸近する現象を定性的かつ定量的に予測する。次に、本モデルの回転数に対する依存性の評価結果を、図3 - 6に平均速度分布を例にとり、対応するDNSデータ(Kristoffersen and Andersson, 1993)($Re_r=194$, $Ro_r=0 \sim 7.63$)と共に示した。本モデルによる予測値は、適切に与えられた回転数でDNSデータと一致している。最後に、より高回転時における回転チャンネル乱流場の予測を試みた。計算結果は、 $Ro=1.5$ であるLamballaisら(1996)によるDNSの結果と比較した。図3 - 7に示したように、本モデルによる予測値はより高回転な場でも良好な値を与えることが分かる。以上の結果より、ここで提案したモデルは様々な回転数における回転チャンネル乱流場で適切な予測値を与えることが示された。

(4) 高温・高速マイクロ流動グループ

・層流剥離による翼性能低下現象の解明

マイクロガスタービンでは、小型化に伴いレイノルズ数が低下して、剥離や渦の発生により翼列の性能が悪化するが、低レイノルズ数域で最適な翼形状の設計指針は確立されていない。そこで、翼列の空力性能の改善方法を検討するため、環状翼列風洞を用いてタービン翼列特性の実験解析に取り組んでいる。本年度は、レーザードップラ流速計(LDV)によって動翼内部の流れを測定し、レイノルズ数の変化が流れ場に与える影響を把握した。レイノルズ数が低下するほど翼後縁のウェークが増大し、翼負圧面側の剥離位置(SP)が上流側に移動した(図4 - 1参照)。

(5) 包括コードグループ

・ガスタービン熱流動現象の包括予測コードの開発

他の研究テーマグループから得られる知見に基づいて、タービン内の熱流動現象に関する包括的な予測コードの開発を行いつつある。

(6) マイクロ計測・制御グループ

・マイクロ計測・制御用薄膜材料に関する研究

マイクロバルブやマイクロアクチュエータの作成に使用する薄膜は、カンチレバーやダイヤフラムといった構造の中で変形することによりその機能を果たす。したがって、マイクロデバイスの機械的設計には、薄膜材料の評価、制御が重要である。薄膜材料は、作製方法の違いや成膜条件によって密度分布が生じ、さら

に、薄膜の多くは多結晶材料であり、結晶配向や粒径に違いが生じたり、介在物や不純物の存在により組成が変化するなどの内部構造の変化も視野に入れる必要がある。よってこれらの影響により通常の金属材料と異なった機械的特性を有すると考えられる。そこで、マイクロアクチュエータに使用する薄膜材料の材料特性を測定し、前年度の研究成果である、圧電薄膜の特性制御を実現する設計を可能にするために、本年度は、直接的に弾性定数や破断応力を測定することができ、薄膜内部での機械的特性の変化を捉えることが可能であると考えられる引張試験方法を考案し、薄膜の機械的特性、特に弾性定数の測定を行った（図6 - 1および6 - 2参照）。

薄膜の特性評価に関する研究内容および成果として、

- (i) 非接触、非破壊の方法で、高精度に微小変位量の測定が可能なレーザースペックルを用いた2光束照射法を用い、ひずみ計測装置を開発した。
- (ii) 引張試験装置内に、薄膜試験片に掛かる荷重を直接測定できる治具を開発した。
- (iii) 基板上に薄膜を成膜した後、基板ごとに引張試験を行い、基板のみの試験片での引張試験と比較することにより弾性定数を求めた。

この結果、ここで採用した引張試験手法により、薄膜材料の弾性定数の測定が可能であることを示した。また、薄膜材料はその作製プロセスによる違いや同一プロセスにおいても膜厚の違いによって、弾性定数に違いが見られることを求めた。

・はく離防止に関する研究

本年度はまず、はく離と再付着を伴う流れ場のうち、最も幾何的形狀が単純な3次元後ろ向きステップ流れの実験装置を製作し（図6 - 3参照）流れを制御しない場合についての基礎的な熱流動構造について調べた。具体的には、ステップ下流の壁面に感温液晶を塗布した伝熱面を作製し、局所熱伝達率分布を調べるとともに、流れの可視化を行った。その結果、図6 - 4に示されるような局所熱伝達率分布が得られ、はく離した渦がその下流側の壁面に及ぼす熱的影響について基礎資料を得ることができた。次年度には、ステップ上壁面に可動式フラップを付設し、これをある特定の周波数でばたつかせて、はく離を制御する効果があるかどうか、あるとすれば熱伝達は如何なる変化を示すか等の実験データを取る予定である。

・予混合・燃焼過程のマイクロ制御

ここでは、フラップ型マイクロアクチュエータ群を同軸二重円筒ノズルに配置し、噴流乱流燃焼場での物質、運動量、熱の輸送を柔軟に制御することにより、マイクロガスタービンの小型燃焼器で予想される低レイノルズ数燃焼での、窒素酸化物などの大気汚染物質排出減少と燃焼場の安定化の実現を目的としている。

第一段階として、アクチュエータ群による、等温同軸噴流の混合制御効果を LIF により定量的に評価し、制御噴流のポテンシャルコーンが自然噴流の約半分程度になり、混合が著しく促進されることを明らかにした(図 6 - 5 参照)。また混合に最適な駆動周波数が、プリファード周波数とほぼ一致することが示された。さらに、空気 - メタンバーナ火炎の制御を試験的に試み、自然噴流に比べて浮上り火炎基部が安定化することと、高流速比での保炎が可能であることが確認された。現在、制御された燃焼場の排ガス分析と PLIF 解析のための実験システムを構築している。

(7) 衝撃損傷解析グループ

・異物衝撃損傷 (FOD) 特性の研究

昨年度は 2 次元楔形状に対して粒子衝撃シミュレーションを行った。本年度は 3 次元 300kW 級セラミックタービンブレードに対する粒子衝撃シミュレーションを行い、ブレード前縁に衝撃を加えた場合の最大応力発生部位を明らかにした。シミュレーションの予測部位は実験結果と定性的に一致することがわかった。さらに、セラミック試験片に対して準静的押し込み試験を行い、接触応力と接触面積との関係を調べた(図 7 - 1 および 7 - 2 参照)。

(8) 燃料電池グループ

・円筒型内部改質 SOFC の熱流動場に関する数値解析

低公害高効率を実現する次世代のエネルギー供給システムとして注目されている SOFC(固体酸化物形燃料電池: Solid Oxide Fuel Cell) の、およそ 1000℃ で高温作動するという特徴を最大限に生かすべく、マイクロガスタービンとのハイブリッドシステムを形成することによって、さらに低公害高効率なシステムが構築できる。SOFC は複数の「セル」と呼ばれる構成単位要素を並列あるいは直列に接続して構成されている。ここでは熱応力分布に強いとされる円筒型セルを計算対象とする(図 8 - 1 参照)。円筒は三層構造であり、円筒の内部に燃料が、外部に空気が流れ、中間層の電解質中で酸化物イオンが輸送されることにより起電力を発生する仕組みである。一方で、SOFC が高温で作動することは、内部改質という利点ももたらす。一般的に燃料電池に用いる燃料は水素が好ましい。内部改質とは、自然界で得られやすい水素以外の燃料(メタン、一酸化炭素など)を燃料電池の内部で水素に改質することを指すが、この改質反応は高温環境において活発であるため、SOFC は内部改質への期待も大きい。そこで円筒型セルの内外を流れる燃料、空気の流動に着目して SOFC の特性を数値解析により予測する。現在までに、セル内外の熱流動場、濃度場、起電力、電流密度などのデータが得られている(図 8 - 2 および 8 - 3 参照)。なお、これらは、円筒内部に空気を、外部に燃料を流した場合の結果である。今後さらに、現在のコードに内部改質反

応を組み込み、内部改質による SOFC の特性への影響を調べる。

・粉体成形による SOFC モジュール製法に関する研究

ここでは、特に円筒縦縞方式の SOFC の単セルを製造について検討を加える。SOFC 用の電解質 / 空気極の二層パイプの代表的な製法には薄膜成形技術を応用した種々の方法があるが、これらの方法では成形プロセスが複雑でコストが高いなどの難点がある。そこで、多層押し出し法を用いて、SOFC 用二層複合パイプの押し出し成形を試みる。多層押し出し法とは、異なる素材を同時に押し出して、素材同士を接合させ、ひとつの品物をつくる方法である。多層押し出し法は装置も安価であり、一回の押し出しで健全な二層パイプを成形できる可能性を持っており、SOFC 用複合パイプの成形に適用が可能になると考えられる。そこでその第一歩として、 LaSrMnO_3 の空気極を内層とし、YSZ の電解質を外層とする二層中空円筒セラミックス、特に外層の電解質層を $40\mu\text{m}$ という非常に薄い層として押し出し成形をするために、その素材を二層中空円筒状に一体押し出し成形を試み、その成形可能性について検討することを目的とする。

(i) 空気極 / 電解質の材料

内層の空気極素材として平均粒径 - 300M 、純度99.9%の La_2O_3 、 $\text{Mn(IV)}\text{O}_2$ 、 SrCO_3 の粉末 (フルウチ化学) をモル比で $\text{La} : \text{Sr} : \text{Mn} = 0.8 : 0.2 : 1$ となるように混合した粉末 (以下 LSM と表記) を使用した。一方、外層の電解質素材として平均粒径 $0.2\mu\text{m}$ 、純度99.9%の YSZ ($8\text{ mol}\% \text{Y}_2\text{O}_3 + \text{ZrO}_2$) 粉末 (フルウチ化学) を用いた。これらの原料粉体に可塑性を付与し、且つ粉末粒子間に保形可能な接着強度を与えるため、バインダ (結合剤) を添加した。バインダとしては、ヒドロキシプロピルセルロース (2% 、 20 で粘度 $1000 \sim 4000\text{cp}$ 、以下 HPS と記述、東京化成) に水を加えたものを用いた。粉末 - バインダ混合体 (以下、ビレットと呼ぶ) は次のように作製した。まず、原料粉体に HPC 粉末を加えて、均一に混合した後、所定量の水を加えてよく混練し、その後混合体を 10 以下で24時間熟成させビレットとした。

(ii) 押し出し装置

外層被覆パイプの厚さ $40\mu\text{m}$ (押し出し比は15.7)、内層厚 1.2mm (押し出し比は22.4)となるように押し出し装置を設計し、試作した。これを用いて上記ビレットの押し出しを行った。

その結果、目視の範囲では、外層の押し出し速度に関係なく、外層は、内層パイプの外表面を覆っていることが確認されたが、その厚さは不均一であった。また、外層の押し出し速度が高くなるにつれ、外層による被覆厚さが大きくなっていった。また、パイプの表面から縞模様が観察された。ビレットについては、バインダ中の HPC や水の量を調節することによる、粘性や可塑性といった性質の変化機構

を明らかにする必要があると考えられた。焼結については今後の課題である。次に、押出しに用いる工具については、工具表面の摩擦が押出し成形品の寸法形状に大きく影響を及ぼすため、工具の表面処理を改善する必要があると思われる。

- ・固体酸化物燃料電池における燃料適応性

固体酸化物燃料電池の発電特性における H₂、CO、炭化水素など各種燃料の適応性について検討した。H₂、CO を燃料として同じ供給濃度で比較した場合、開回路電圧はほぼ同じになるのに対し、常に H₂ の場合より CO の方が性能が低くなった。高温ほどその傾向が顕著となったことから、燃料の活性化の影響よりむしろ濃度過電圧の影響が大きいと考えられる。すなわち分子量の大きい CO では酸化により生成した CO₂ の移動が遅く電極細孔内に留まるため大きな電圧降下の原因となる。メタンをはじめとする炭化水素の燃料極上における内部改質反応は固体酸化物燃料電池の燃料適応性について重要である。天然ガスの主成分であるメタンを燃料とした発電では、水蒸気を添加し炭素析出の起こらない条件下において直接内部改質による発電が可能であった。ここでも濃度過電圧の効果が大きく現れ、高濃度の燃料では低電流密度領域の電圧降下が顕著となった。また燃料ガス中の水蒸気濃度が高い条件下ではかえって性能が低下し、Ni 燃料極の酸化による劣化が進行していることが示唆された。改質前のガスを供給した場合は同じ平衡組成の改質ガスを供給した場合よりも性能が低下し、改質反応が発電の速度過程に関与していることが示された。エタン、エチレンなど C₂ 燃料による内部改質による発電では、発電は可能なものの平衡論的には炭素が析出しない領域で運転しても炭素析出にともなう細孔の閉塞により徐々に反応成績は低下した。

- ・高温固体電解質燃料電池発電システムの高効率化

SOFC 発電システムのカソード（空気極）におけるエネルギー損失を低減させることを目的とし、分極の小さい新たなペロブスカイト型酸化物カソード材料の開発を行なった。昨年度の結果から、La_{0.6}Sr_{0.4}Fe_xM_{1-x}O_{3-δ} (M=Mn, Co, Cr) の中では遷移金属 M として Mn の場合が最も良い分極特性を持つことが分かったため、本年度は、Fe の組成を x=0.2, 0.4, 0.6, 0.8 と変化させて分極特性を調べた。実験手法としては、作用極に上述のペロブスカイト型酸化物、電解質に 8YSZ、参照極および対極に Pt ディスクを用いて、電気化学インピーダンス測定を行った。実験温度は 800 - 900 ℃、周波数範囲は 0.1Hz - 100kHz とした。得られたデータを複素平面にプロットし、適当な等価回路を用いて解析した結果、x=0.8 の組成の電極が最も良い分極特性を持つことが明らかになった。

- ・熔融塩電気化学プロセスによるマイクロガスタービン用材料の形成

また、マイクロガスタービン用材料の開発を目的とし、熔融塩電気化学プロセスによる金属窒化物の形成について検討した。本年度は、摺動部材のハードコー

ティング材として有望な窒化クロムの形成を行った。溶融 LiCl-KCl 中に Li₃N を添加した系において、Cr 板を作用極として浴中のナイトライドイオン (N³⁻) を電気化学的に酸化させると電極表面に窒素原子が生成し、これが基板の Cr と反応・拡散することでクロム窒化物が形成する。ここでは、電解電位を 1.0V (vs. Li⁺/Li) とすると主に Cr₂N が形成し、1.5V とすると主に CrN が形成することから、電位による組成の制御が可能であることが分かった。

(9) LCA グループ

・マイクロガスタービンの概念設計

(i) サイクル計算の精度向上と現状のマイクロガスタービンの性能確認 (HYSYS)

昨年度におこなったサイクル計算を、化学プラントなどにおいて汎用的に使われているプログラム (HYSYS) を用いてより詳細に検討をおこなった。このプログラムは作動ガスの成分および物性をより精密に扱うことができるものである。まずこのプログラムの計算精度を確認するために、マイクロガスタービン用に開発されたプログラムとの比較をおこなった。その結果両者は、圧力・温度などの状態量ならびに出力・効率などの性能パラメーターが 0.2% 以内で一致することが分かり、十分使用に耐えうることを確認した。つぎに現在市場に出ている全体性能は明らかになっているマイクロガスタービンの構成機器の性能がどの程度であるかを推定した。

(ii) 5 kW マイクロガスタービン概念設計 (HYSYS)

5 kW マイクロガスタービンについて 2 機種概念設計をおこなった。ひとつは現状のガスタービンあるいは過給機の技術によって達成可能と思われるもの (II-A)、いまひとつは現状技術にこだわらず高い目標を設定 (II-B) しどの程度のフェージビリティがあるかを調べるものである。その結果の一部を表 9 - 1 に示す。

(iii) 5 kW 圧縮機、タービンの設計

上記 2 機種 (II-A および II-B) の設定に基づいて、それぞれの機種について圧縮機とタービンの概略の主要寸法を決めた。両者ともラジアルストレートの羽根車とした。ただし、翼負荷分布の最適化、ロスモデルの適正化は今後の課題である。またより高効率期待できるバックワードベーンについても今後検討する予定である。

・MGT/SOFC 複合発電システムのサイクル解析

昨年度の研究に引き続き、要素効率や燃料電池における過電圧を考慮したサイクル解析を進展させた。

・マイクロガスタービンの概念設計とハイブリッドシステムへの適用

分散型エネルギーシステムシステムの中核を担う要素としてマイクロガスタービン (μ GT) に大きな期待が寄せられている。さらに高効率なシステムとしてガスタービンと固体酸化物形燃料電池 (SOFC) との複合化について研究・開発が展開されている。ここでは、分散電源として利用することを前提とした μ GT-SOFC ハイブリッドシステムを対象とし、サイクル解析ならびに概念設計について検討を行った。

図9 - 1 に示す μ GT-SOFC ハイブリッドシステムについてサイクル解析を行い、ハイブリッドシステムではエクセルギーの燃焼損失、排気損失が小さく、従来の μ GT よりも有利であることを確認した。また、各サイクルパラメーターがサイクル性能に及ぼす影響を評価し、再生器温度効率を高くするとともに、燃焼器から新たに投入される燃料を削減することが高効率化につながるようになった。さらに、S/C 比を大きく取ると、サイクル各部の温度を下げることができ、材料の耐熱条件が緩和されることが分かった。

ハイブリッドシステムのフィージビリティを評価するため、30kW のシステムの概念設計を行った(図9 - 2 参照)。その結果、システム全体の大きさは家庭用冷蔵庫程度の大きさであることが分かった。大きさは普及の妨げにはならないと考えられる。

・最適システムの提案とライフサイクルアセスメント (LCA) による評価

ここでは、高効率分散型システムとして、再生を伴う蒸気噴射型ガスタービンシステムおよび燃料電池・ガスタービン複合システムを提案し、熱効率やエクセルギー損失評価等の評価手法により性能を定量的に評価した。

再生サイクルと蒸気噴射システムを融合した小型ガスタービンシステムについては、既存のチェン・サイクルとの性能比較を行った。また、蒸気噴射型システムには熱と電力を併給することができる利点があることから、蒸気噴射型熱電可変システムについても、熱電比や総合効率を評価した。再生を伴う蒸気噴射型システムは、既存のチェン・サイクルに比べ、より少ない噴射蒸気量、低圧力比でより高効率を達成できる。また、蒸気噴射を行うことにより、再生のみのシステムに比べて比出力が大幅に増大する。また、蒸気噴射システムが熱電併給に適していることに着目して、熱電可変システムとしての総合熱効率 (HHV 基準) は、全量蒸気噴射の場合は42.4%、全量プロセス蒸気として用いた場合は72.8%(熱36.6%、電力36.2%) を達成できることが分かった。

燃料電池・ガスタービン複合システムについては、高効率・高温型の固体酸化物形燃料電池 (SOFC) を用いるものとし、高性能化のための複合方式として、燃料電池を直列に並べる多段型や、燃料電池内部で電池の排熱を回収する内部熱回収型を提案した。燃料電池・ガスタービン複合システムは、多段型や内部熱回

収型のような複合方式に改善することにより、燃料電池全体の燃料利用率やシステム全体の空気利用率が向上する。そのため、エクセルギー損失の大きい燃焼過程において、燃焼に用いる燃料の割合を少なくすることができ、その結果、電力のみの熱効率で70%(HHV) を達成することが可能であることを示した。

3 . 研究成果の発表 (論文発表)

吉田博夫、「ガスタービンにおけるモニタリング技術- センサ技術」、日本ガスタービン学会誌、Vol. 29 No. 2, pp. 12-15, 2001年3月.

吉田博夫、「衝撃と応力波の干渉と破壊」、機会研 NEWS、2000年No. 12, pp. 7-9.

K. Sekizawa, H. Widjaja, S. Maeda, Y. Ozawa and K. Eguchi, Catalysis Today, Low temperature Oxidation of Methane over Pd Catalyst Supported on Metal Oxide 59, 69-74 (2000)

K. Sekizawa, H. Widjaja, S. Maeda, Y. Ozawa and K. Eguchi, Low temperature Oxidation of Methane over Pd/SnO₂ Catalyst, Appl. Catal., 200, 211-217 (2000)

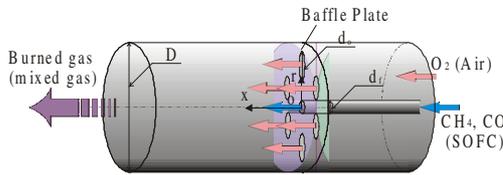


図 1 - 1 マルチ噴流型燃焼器

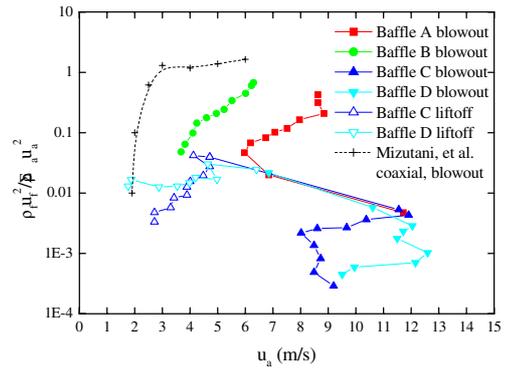


図 1 - 2 マルチ噴流型燃焼器の燃焼特性

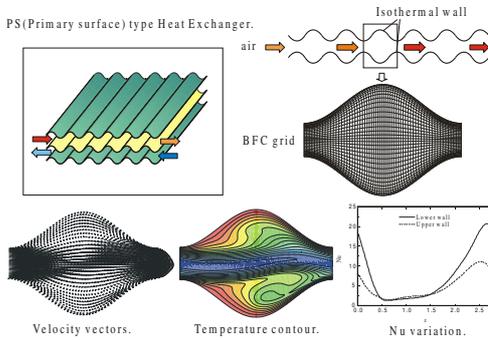


図 2 - 1 プライマリサーフェス型熱交換器内熱流動場の数値解析(1)

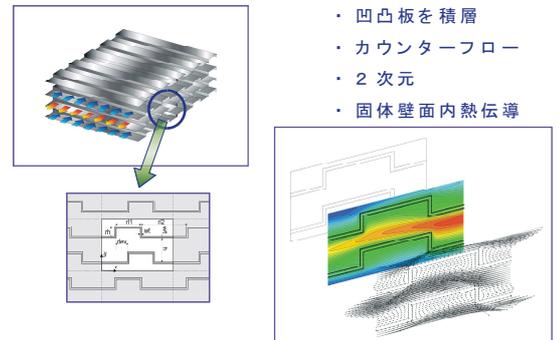


図 2 - 2 プライマリサーフェス型熱交換器内熱流動場の数値解析(2)

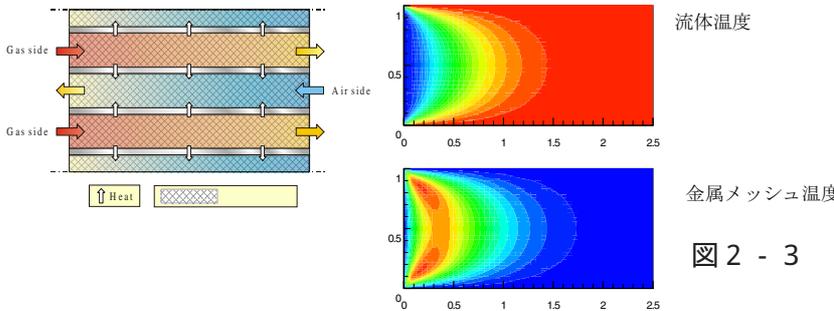


図 2 - 3 プレートフィン型 (金属マトリックス挿入型) 熱交換器の検討

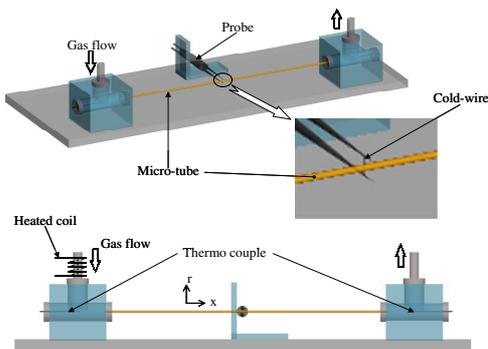


図 2 - 4 マイクロチューブの伝熱実験装置の概要

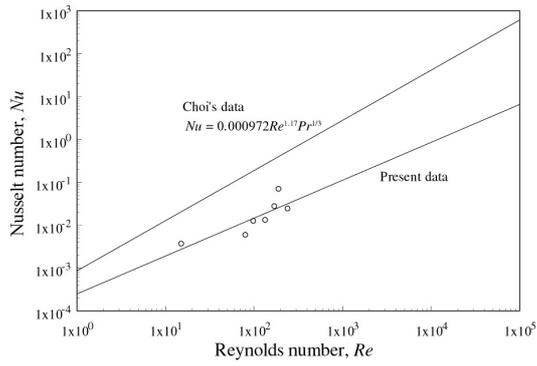


図 2 - 5 平均熱伝達率のレイノルズ数に対する変化

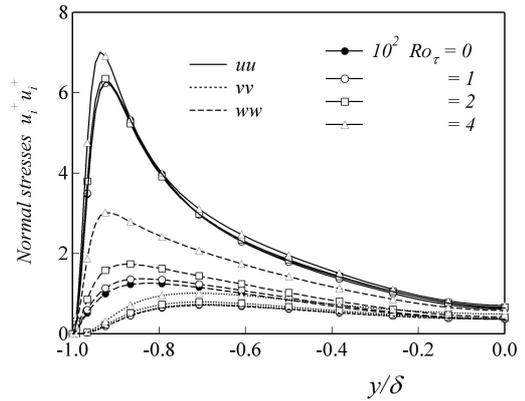


図 3 - 2 レイノルズ応力（壁垂直方向回転）

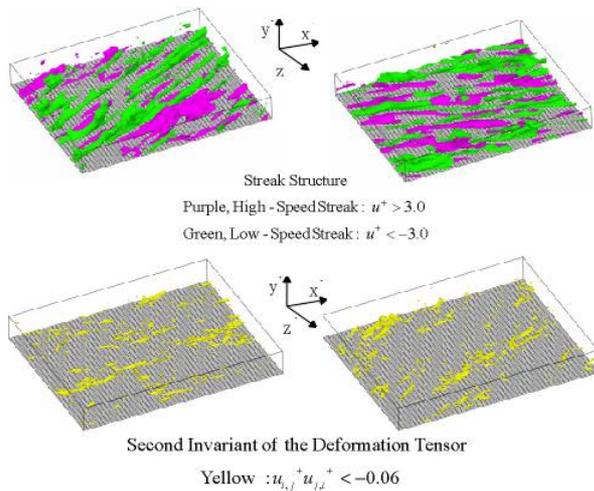


図 3 - 1 壁面スライドを伴うチャンネル乱流のDNS（流れ場可視化の例）

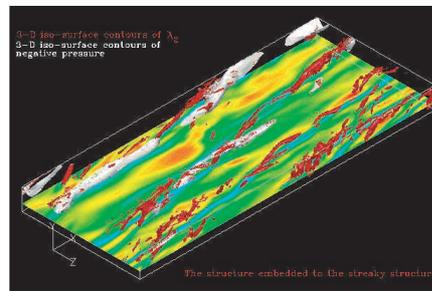


図 3 - 3 流れの渦構造の可視化（主流方向回転 $Ro = 15$ ）

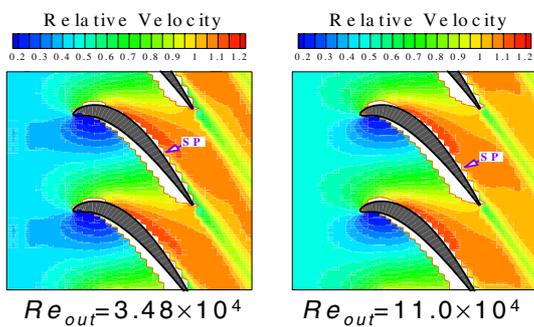


図 4 - 1 動翼まわりの相対速度分布

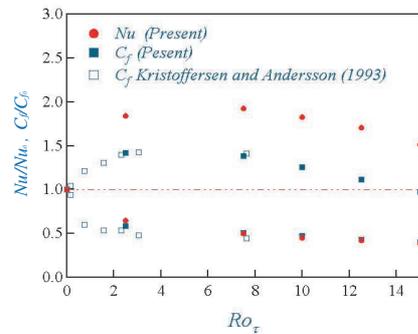


図 3 - 4 ヌッセルト数と摩擦係数（スパン方向回転）

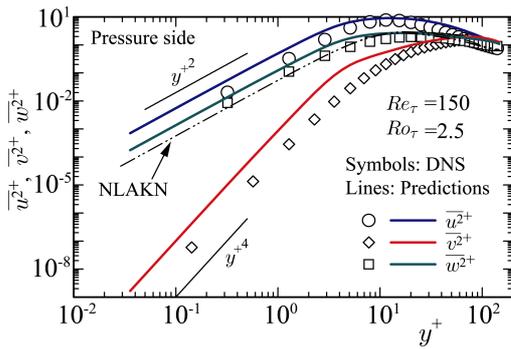


Fig.3-5 Wall-limiting behaviour of normal stress components in rotating channel flow ($Ro_\tau=2.5$)

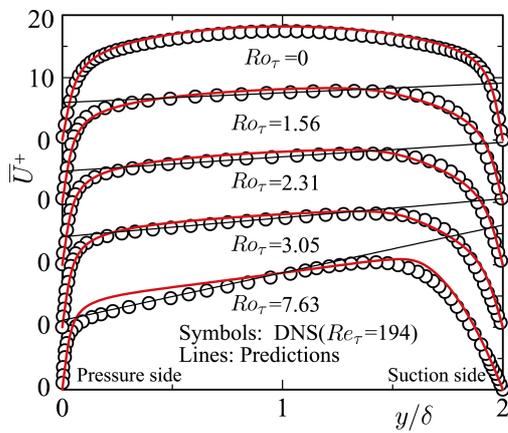


Fig.3-6 Mean velocity profiles in various rotation number flows.

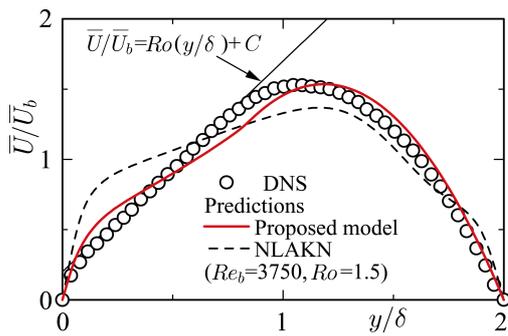


Fig.3-7 Mean velocity profiles in high rotation number flow ($Ro=1.5$)

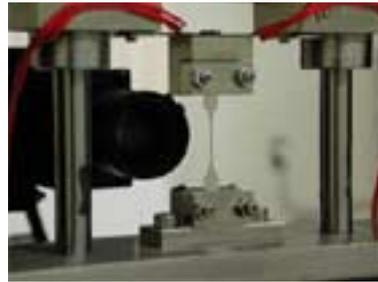


図 6 - 1 引張試験



図 6 - 2 変位測定装置

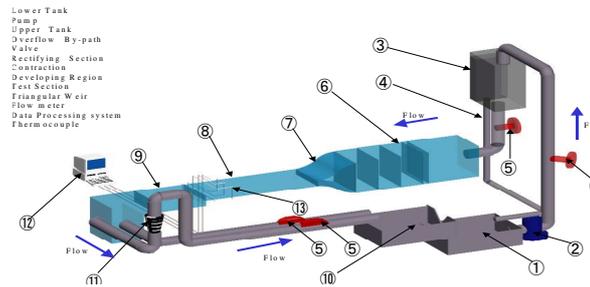


図 6 - 3 3次元後ろ向きステップ流れの実験装置

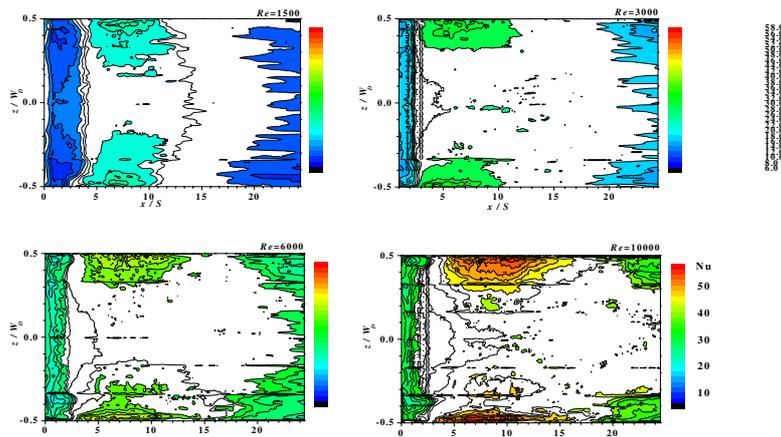
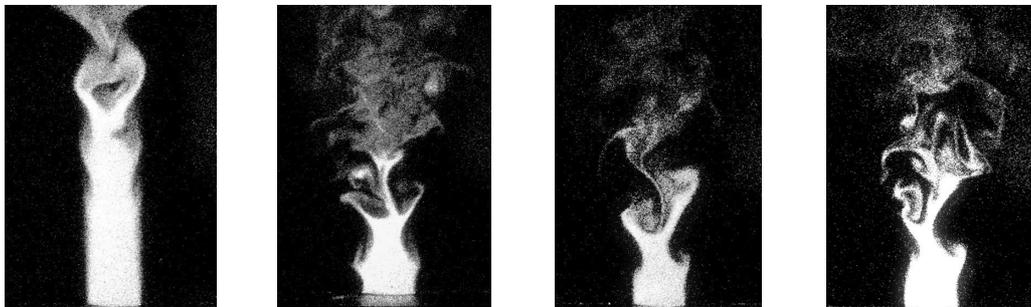


図6 - 4 局所ヌッセルト数分布(流れ方向は左から右)



(a) Natural jet (b) Axisymmetric Mode (c) Alternate Mode (d) Helical Mode

図6 - 5 制御噴流の可視化

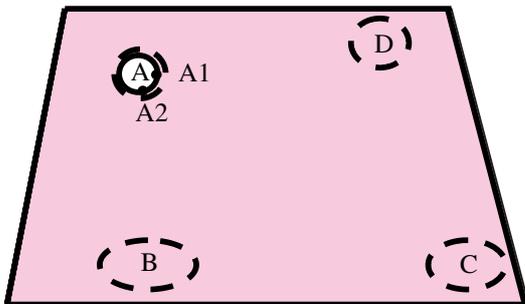


図7 - 1 Suction surface における主応力の最大値の発生部位

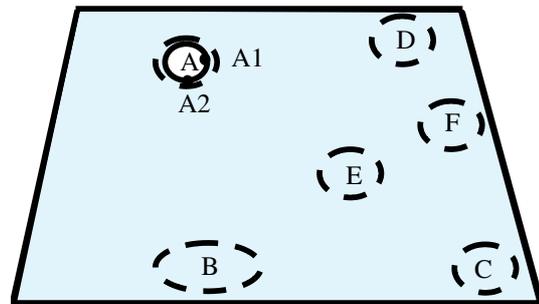


図7 - 2 Pressure surface における主応力の最大値の発生部位

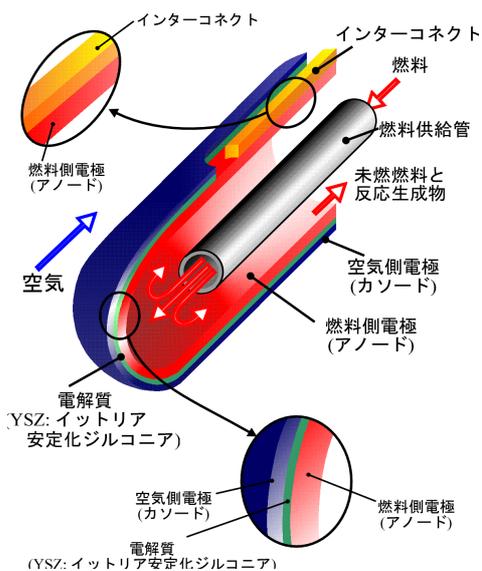


図 8 - 1 円筒型セルの概略図

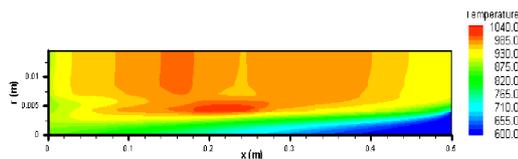


図 8 - 2 セル内外の等温線図

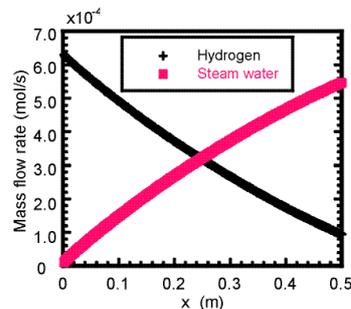


図 8 - 3 水素、水蒸気のモル流量

表 9 - 1 サイクル計算のまとめ

	II-A	II-B
サイクル効率	0.241	0.343
比出力	81.097	111.79
圧力比	2.8	2.6
タービン入口温度 K	1000	1100
圧縮機効率	0.73	0.73
タービン効率	0.74	0.80
再生器温度効率	0.90	0.95

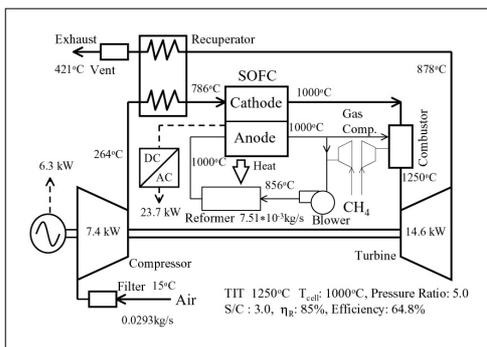


図 9 - 1 μGT-SOFC ハイブリッドシステム構成図

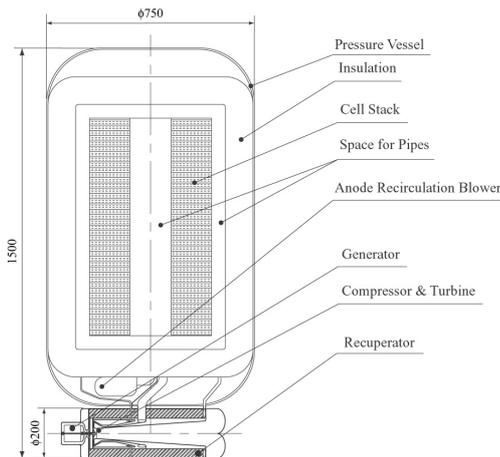


図 9 - 2 30kW ハイブリッドシステム概念設計図