

芝浦工業大学
エネルギーフロー研究センター
センター長

鈴木 健二郎

「超小型ガスタービン・
高度分散エネルギーシステム」

研究期間：平成11年11月1日～平成17年3月31日

1. 研究実施の概要

京都プロトコルに約定された地球温暖化ガスの排出基準を達成することは容易ではなく、その実現に向かって有効なエネルギーフローの再構築が求められている。持続型地球社会における究極のエネルギーシステムは、太陽エネルギーなどの利用により造られる水素を燃料として活用する水素社会であるが、その実現は容易ではない。現在我々が生活する社会は、そこに至る過渡的社会である。そこでは、無駄なエネルギー消費を排するとともに、天然ガスの利用、コジェネの導入、発電効率の向上によってエネルギー総合利用率を高め、排出二酸化炭素の回収・貯留・循環利用を行うことが必要である。とくに電気エネルギーが利便性に富み、電気エネルギーの使用割合が増大する一方で、消費末端における電気エネルギーの利用効率が40%には届いていないことを考えると、発電効率の向上は重要であり、発電効率を高め、電気エネルギーの利用効率の引き上げは、今後のエネルギー事情の改善と二酸化炭素排出量の低減に有効である。

数十kWから数千kW容量の小規模発電設備を居住区やオフィス街、工場地区に分散配置する分散電源には多数の利点がある。小規模であるが故に1基あたりの建設費用は小さく、建設に要する期間は短く、地域開発に整合する電力供給が確保しやすく、自立システムであれば、系統電力から孤絶した地域でも使用でき、都市災害時にはライフライン切断に伴う被害を軽減することが出来る。分散電源は、大停電の発生確率を低減すると同時に、それが発生した場合の被害を軽減する上でも有効であり、今後分散電源の導入は格段に増大するものと見込まれる。本研究では、発電効率の観点から分散電源ユニットとして最も有望視される固体酸化物形燃料電池(SOFC)とマイクロガスタービン(MGT)を複合化したSOFC-MGTハイブリッドシステムに着目し、①その分散電源ユニットとしてのフィージビリティを明らかにすること、また将来において必要とされる②設計指針用のデータベースを構築すること、を目的とした基礎研究を行った。

本研究では、まず研究対象(ターゲット)とすべきSOFC-MGTハイブリッドシステムの発電容量を、まだ現在技術では達成できていない超小型化を目指す視点から30kWと定め、その概念設計を行った。ついで、このシステムのフィージビリティを明確にする目的から、発電効率および総合エネルギー利用効率の検討を行うとともに、このシステムを構成する各要素(SOFC、マイクロ燃焼器、ガスタービン、再生熱交換器)と、総合エネルギー利用効率を高める観点からボトムングに接続する吸収式冷凍機に関して、要素研究を行った。この目的を達成するため、研究チーム内に当初7グループを構成し、2年次以降にSOFC研究グループと吸収式冷凍機研究グループを加えて研究陣を強化し、最終的に9グループによって研究を推進した。

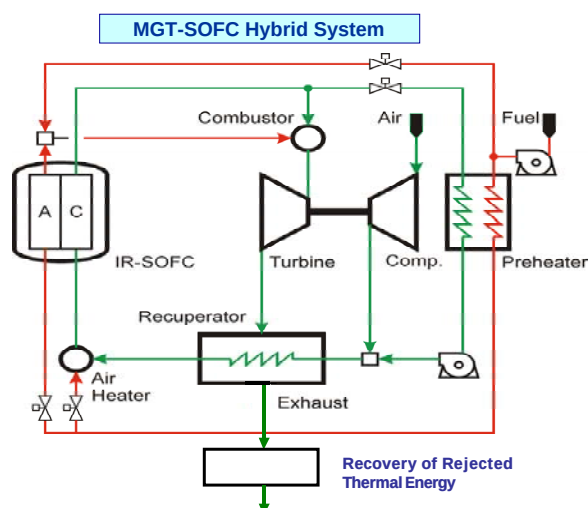


図1 MGT-SOFC ハイブリッドシステム

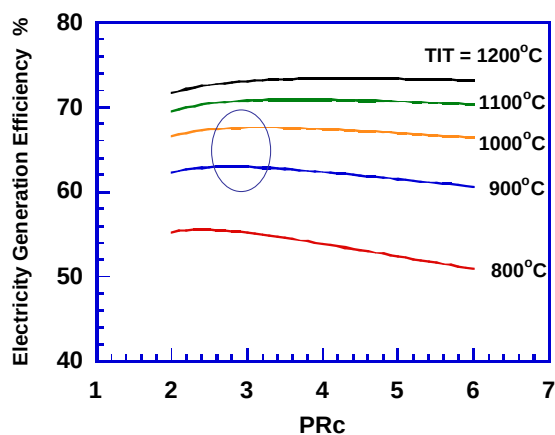


図2 タービン入口温度 (TIT) と圧力比の発電効率への影響

その成果の概要を纏めると以下のようなものである。

図1は、本研究で対象としたハイブリッドシステムのフローチャートを示したものであり、図2は、化学的に最も安定なYSZを電解質材料とし、燃料にメタンを用いて内部改質を行って運転した場合のシステムの発電効率を示した。横軸は、システムの作動圧力、パラメータはタービン入り口温度 TIT である。発電比率は、ガスタービンの1に対してSOFCが8程度であるので、発電割合からするとシステムの主たる要素はSOFCであるが、ガスタービンは発電以外に燃料及び空気の圧縮動力を提供しており、システムを自立起動可能なシステムとしている点で重要である。ガスタービンは、小型化すると熱自立のマージンが縮小するので、30kW 級のシステムを開発する上では、ガスタービンの効率向上が重要である。図2から、発電効率は圧力比に大きくは依存しないこと、システムを高温化

すると効率が向上すること、しかしメタルタービンが使用できる上限温度である $TIT=900^{\circ}\text{C}$ においても、効率の上で、このシステムが系統電力と競合できることが分かる。なお、SOFC の長寿命化、またその結果としての低コスト化を図るために、作動温度を 800°C 以下に低温化することが、最近の最大の課題になって来た。このことは、ガスタービンをメタルタービンと出来る利点にも繋がる。検討の結果によると、例えば電解質材料を YSZ に据え置いても、電解質を $10\mu\text{m}$ まで薄膜化できれば、 $TIT=800^{\circ}\text{C}$ としても図 2 の $TIT=900^{\circ}\text{C}$ の場合の結果に近い効率が得られること、また Ceria 系材料などの新材料を用いると、さらに高効率が得られることが分かった。このことから、このシステムが分散電源ユニットとして実用的フィージビリティを有することが明らかにできた。また、そのほか、より高効率化を図るためのシステム構成に関する提案も行った。

SOFC は、炭化水素の内部改質が可能で、それを除熱の一手段として利用でき、燃料適応性にもきわめて優れており、電気化学反応用触媒を必要としない高温作動燃料電池であるが、構成材料の耐熱性や化学的安定性、単セル形状あるいはセルモジュール構造の最適化など課題も多い。本研究では、 CH_4 や天然ガスなどの炭化水素を燃料極上で内部改質するための炭素析出の起らない燃料極の開発、作動温度を $800^{\circ}\text{C}\sim 900^{\circ}\text{C}$ とする場合にも、分極が小さい値に留まるカソード材料の開発、単セルおよびセルモジュールの熱管理ツールの開発と、それを応用したセル内の温度場に関する知見の獲得を目指した。この結果、Ni-FCT、Ru-YSZ などが、メタンを燃料とする場合にも出力電圧が比較的高く、炭素析出程度が低いことにより、時間経過による発電性能の低下も小さく、アノード材料として有効であることが確認できた。また、 $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{Fe}_{0.8}\text{Mn}_{0.2}\text{O}_{3-\delta}$ の粉末を 10–15 時間焼結した材料の分極抵抗が、従来の報告値に比べて 3 分の 1 程度に減少し、カソード材料として有望であることが見出された。その他、カソード支持タイプの円筒型 SOFC、間接内部改質タイプ円筒型 SOFC およびディスク型 SOFC それぞれの単セル、カソード支持タイプの円筒型 SOFC モジュール、に対する有効なシミュレータの開発が出来た。これらのシミュレータは最適設計用ツール、熱管理用ツールとして有用である。なお、研究の過程で熔融塩形燃料電池 (MCFC) とのハイブリッド化についても検討を行い、その有望性も明らかに出来たが、この研究の副産物として材料表面の電気化学的手法による窒化技術の開発に成功した。

燃焼器については、超希薄条件で $TIT=900^{\circ}\text{C}$ 以下で作動する超小型タービンで生じるレイノルズ数の低下にあっても迅速な混合が可能で、安定な火炎と完全燃焼が達成できるペン型マイクロ燃焼器と燃料ノズルのアクティブ制御による混合促進法を提案し、さらにこの場合に応用できる触媒燃焼実現のための触媒の開発を行い、その有効性を実証した。 TIT を 1000°C 以上とする場合に問題となる NO_x の排出低減にも着目し、その低減法を提案し、有効性を実証した。また、新しい発想の火炎保持器の提案を行い、その有効性を明

らかにした。

5kW 出力超小型タービンの概念設計を提示し、この場合に必要となる 20 万 rpm 程度の超高速軸受けとしてハイブリッド軸受けを提案し、その試作と性能解析を行った。超小型タービン翼間流れの特性を直接数値シミュレーションにより明らかにし、その特性をシミュレートできる乱流モデルを開発し、これを用いた超小型タービン内熱流動総合予測ツールを開発した。さらに、TIT を 900℃以上とするにはセラミックスタービンが必要であることから、セラミックス翼での最大課題である異物衝突の際の衝撃破壊強度を測定し、破壊現象の解明を行った。

外径 60mm 程度の 5kW 級超小型ラジアルタービンでは冷却翼の導入は不可能であるので、熱自立マージンを拡大するためには、再生熱交換器の高効率化が必須である。この目的に適する Primary Surface 伝熱モジュールとして、波形チャネル、斜流コルゲート伝熱面、ディンプル凹凸伝熱面に着目し、またマイクロフィン伝熱モジュールとしてスプリングフィンを提案し、それぞれについて検討を加えて、その有用性と特性を明らかにした。

本研究では、図 1 に示したハイブリッドサイクルのボトミング位置熱回収機器として、単効用吸収式冷凍機を用いると、効率にして 10%強のエネルギー回収が実現でき、結果として総合エネルギー利用率 80%超が実現できることを示した。3 重効用吸収式冷凍機が実現できれば、さらに高効率化が達成できる。さらに、吸収式冷凍機 COP の向上のための邪魔板挿入による不凝縮ガス拡散制御法を提案し、その実効性を明らかにした。また高性能吸収伝熱面を提案し、その有効性を実証し、メニスカス界面における濃度差起源マランゴニ対流の解明を行っている。

本研究では、基礎研究課題グループとして①小容積高負荷均質燃焼の研究、②マイクロスケール伝熱技術の開発、③複雑系熱流動科学の展開、④高温・高速マイクロ流動科学の究明、⑤包括コンピュータ解析法の開発、⑥インプロセス計測とマイクロ制御システムの構築、⑦異物衝撃損傷特性の研究、⑧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、⑨SOFC とマイクロガスタービンの多様なハイブリッドオプション運転の熱効率、エクセルギー効率の検討、の 9 グループを構成して研究を遂行した。一方、この縦糸に相当する基礎研究課題グループに対して、前記のように目標とするターゲットであるシステムとそれを構成する要素毎のグループも構成し、研究活動の毎年の Plan-Do-Review は、この横糸グループ毎に行った。以下では、この横糸グループを基準にした研究成果の取り纏めを述べる。

2. 研究構想

京都プロトコルに約定された地球温暖化ガスの排出基準の達成に向けて有効なエネルギーフローの再構築が求められている。持続型地球社会における究極のエネルギーシステムは、真の意味の「水素社会」であるが、その実現は容易ではない。そこに至る過渡的社会にいる我々は、無駄なエネルギー消費を排するとともに、天然ガスの利用、コジェネの導入、発電効率の向上によってエネルギー総合利用率を高めて二酸化炭素排出量を低減し、その回収・貯留・循環利用を行うことが必要である。本研究では、電気エネルギーの使用割合が増大する一方で、消費末端における電気エネルギーの利用効率が 40%には届いていない現状を考えて、発電効率を高めて二酸化炭素排出量の低減に貢献することを意図した。

小規模発電設備を居住区やオフィス街、工場地区に分散配置する分散電源には多数の利点がある。1 基あたりの建設費用が小さく、建設に要する期間が短く、地域開発に整合する電力供給が確保しやすく、自立システムとすれば、系統電力から孤絶した地域で使用でき、都市災害時にはライフライン切断に伴う被害を軽減することが出来る。また、大停電の発生確率を低減すると同時に、それが発生した場合の被害を軽減する上でも有効である。それ故、今後分散電源の導入は格段に増大するものと見込まれる。そこで本研究では、発電効率の観点から固体酸化物形燃料電池 (SOFC) にマイクロガスタービン (MGT) を複合化して自立システムとし、高度分散電源として活用することを構想し、目的として、①この SOFC-MGT ハイブリッドシステムの分散電源ユニットとしてのフィージビリティを明らかにすること、また将来において必要とされる②このシステムの設計指針用データベースを構築すること、を掲げた基礎研究を行った。

研究課題を最初に構想し始めた 1997 年時点では、作動温度を 1000℃とする SOFC の実用化に向けての技術展開が芽生え始め、米国において 200kW 級 SOFC-MGT ハイブリッドシステムのフィールドテスト構想も見聞された。このことを踏まえて、作動温度を 1000℃とする SOFC と超小型ガスタービンとを複合化して、米国の構想より一回り小さくし、個性化が強まる 21 世紀社会に適合する高度分散電源として活用できるハイブリッドシステムの構築を目指すための基礎研究を行うこととした。このため、ガスタービンをセラミックタービンとすることを前提にタービン入口温度 TIT を 1000℃あるいはそれ以上とし、発電容量が 25kW 程度となるシステムのフィージビリティと、このシステム構築に必要な基礎研究を行うこととした。しかし、研究を開始した 2000 年時点では、SOFC の長寿命化を目的として、作動温度の低温化が大きなトピックスとして浮上した。このことに対応するため、TIT を 900℃以下とし、発電容量が 30~50kW 程度となるシステムについて着目することとし、研究期間の後半ではこれを主たるターゲットとする研究を展開した。

本研究チームは、研究課題が大きな広がりを持つことから、研究グループの数が多く、

それぞれのグループの発想を尊重しつつも、全体を統括する必要性から、まず研究代表者の下でターゲットである 25kW 級 SOFC-MGT ハイブリッドシステムの概念設計を行った。ついで、このシステムのフィージビリティを明確にする目的から、発電効率および総合エネルギー利用効率の検討を行うとともに、このシステムを構成する各要素(SOFC、マイクロ燃焼器、ガスタービン、再生熱交換器)と、総合エネルギー利用効率を高める観点からボトムングに接続する吸収式冷凍機に関して、要素研究を行った。この目的を達成するため、研究チーム内に当初 7 グループを構成し、2 年次以降に SOFC 研究に 1 グループと吸収式冷凍機研究に 1 グループを加えて研究陣を強化し、最終的に 9 グループによって研究を推進した。

システムの発電効率の検討は、鈴木(京大・芝浦工大)、笠木(東大)、高城(阪大)の 3 グループで展開した。鈴木グループは低温 SOFC に基盤を置くシステムを取り扱い、SOFC モジュールシミュレータを開発するとともに、それを用いた高レベルの効率解析を目指した。他の 2 グループでは高温 SOFC を用いるシステムに注目し、笠木グループはオフデザイン効率の解析、高城グループはシステムの高度化による効率向上の可能性とエクセルギー解析に注力した。

SOFC に関しては、当初からの伊藤(京大)、鈴木(京大)の 2 グループに第 2 年度から江口(京大)グループを加えて 3 グループで研究を展開した。いずれのグループも、低温化を念頭に置いて検討を行った。伊藤グループでは、カソード材料の分極抵抗の低減、江口グループでは高性能アノード材料の開発と燃料を多様化するための検討を主課題として取り組んだ。伊藤グループでは、MCFC に関する検討とその副産物課題としての材料表面の窒化についての検討も行った。鈴木グループでは、単セルならびにモジュールの最適設計・熱管理ツールを提供する目的で、それぞれについて数値解析モデルとマルチ・ステージモデルを開発した。また、研究代表者が芝浦工業大学に異動して後に、同大学内に 100W 級 SOFC を設置し、その動特性について検討を行った。

燃焼器については、鈴木、笠木、高城、吉田(京大)、江口グループ総計 5 グループで研究を展開した。ハイブリッドシステムから排出されるガスは超希薄状態にあり、その上 20kW 級ハイブリッドシステムのガス流レイノルズ数が 10,000 以下となることが予想され、迅速な混合が実現できない懸念がある。高度分散エネルギーシステムには、火炎の絶対安定と毒性ガスのゼロエミッションが要求される。鈴木グループでは、このことからペン型マイクロ燃焼器を提案し、混合過程、3 次元循環流の発生、高空燃比における火炎の安定性について検討し、笠木グループでは、燃料ノズルのアクティブ制御による混合過程の加速に取り組んだ。高城グループでは、中大型タービン用燃焼器の NOx 排出量の低減法について検討し、吉田グループでは燃料注入を伴う新形式の火炎ホルダーを提案し、その有効性を検討した。江口グループでは、触媒燃焼の応用を目論み、ハイブリッドシステ

ムに適する触媒の開発を行った。

ガスタービンについては、筒井・濱（産総研つくば研）、長野（名工大）、笠木、吉田、鈴木との5グループが取り組んだ。筒井・濱グループでは、セラミックス翼の異物衝突による衝撃破壊強度の測定と、破壊現象の解明に取り組み、また超小型タービンの翼間流れの計測法の開発を行った。笠木、長野、鈴木各グループでは、DNSを応用して超高速回転下にある乱流構造の解明に取り組み、また長野グループでは、翼間熱流動現象のCFDコードに必要となる乱れモデルの開発を行った。吉田グループでは、翼内の全温一定膨張によりタービンの高効率化が可能であることを見出し、その実現を目指す検討を行った。また、超高速回転軸受けとして低速回転状態で液膜軸受けであり、高速回転時に気化して気体軸受けになるハイブリッド軸受けを考案し、その実効性を検討した。

再生熱交換器の高効率化に関しては、鈴木、笠木、吉田の3グループが取り組んだ。鈴木グループではプライマリーサーフェス型モジュールとして波形チャネル、ディンプル凹凸伝熱面、斜めコルゲート伝熱面に着目し、またフィン設置伝熱面に低コスト化が見込めるスプリングフィンの応用を提案し、その流動伝熱特性を検討した。笠木グループでは、異形断面チャネルおよび斜めコルゲート伝熱面について、また吉田グループでは穴あきコルゲートフィンについて、それぞれ流動伝熱特性の検討を行った。

排熱回収熱機関として吸収式冷凍機に注目し、薄井・鈴木（神大）グループと吉田グループが検討を行った。薄井・鈴木グループは吸収式冷凍機の多重効用化と高性能化の検討を行い、吉田グループは吸収式冷凍機をハイブリッドシステムのボトムに接続する場合のシステム効率の検討を行った。

以上のように、9グループがターゲットとしたハイブリッドシステムを、高度分散エネルギーシステムユニットとして展開する上で必要となる重要項目について、それぞれ独自の発想により取り組んだ。年2回のチーム内研究会を行い、それぞれのグループが獲得した新しい知見を共有化するとともに、相互の吟味により、研究成果の高度化を図り、顕著な成果を提示した。

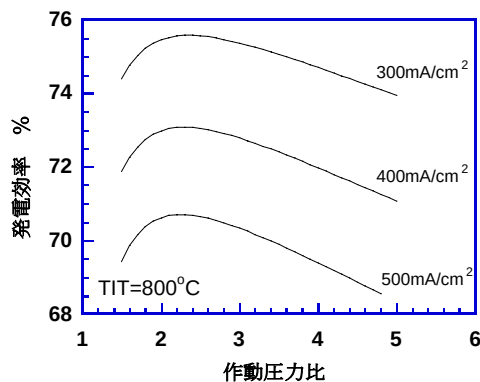


図2 低温作動型ハイブリッドシステムの性能
(セリア系電解質の適用を想定して試算)

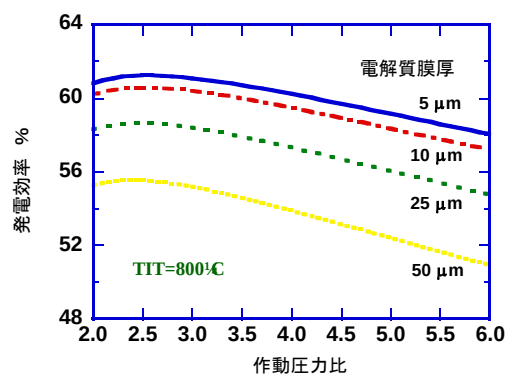


図3 電解質膜厚が発電効率に及ぼす影響

図1に示すような、 μ GTの高圧ラインにSOFCを配置するような構成を基本的な検討対象としている(図1の30kWシステム中の数値は、サイクル解析の結果の一例である)。ジルコニア電解質を用いたSOFCの場合に1000℃の作動が可能であれば、理想的には65%(LHV)の発電効率が得られる(1)。

現在、SOFCに関する技術開発の方向の一つとして、低温作動化に関する取り組みが活発化している。その背景には、SOFC作動温度の低温化が、SOFCとくに平板形SOFCの焼成に伴う歪みとそれに関連する漏れ、締め付けに伴う割れなどを軽減する上で、またタービンや再生熱交換器における高価な難加工性材料の使用が不要となるなど、材料・生産コストを低減する上でも有効である。

3. 低温作動SOFCを用いたハイブリッドシステムの性能解析(京都大学・芝浦工業大学)

3.1 低温作動SOFCを用いたシステムの効率解析

図2は、メタンを燃料としてセリア系電解質を用いて低温作動させた場合に、いかなる発電効率(LHV基準)が期待できるかを示したものである。タービン入り口温度が800℃であるので、SOFC内部は620～740℃程度である。セリア系材料では電流の漏洩があるが、この計算では考慮されていない。そのことを割り引いても、低温作動で、ジルコニア電解質を用いた高温作動型ハイブリッドシステムに比肩する発電効率が得られると期待できる。

ジルコニア電解質を用いるSOFCにおいても、電解質の薄膜化を図ればそのイオン伝導抵抗を低減できるので、低温作動でもある程度の発電効率の達成が可能となる。図3は、タービン入口温度を800℃とし、ハイブリッドのシステムの発電効率(LHV基準)を、電解質の膜厚を媒変数として整理したものである。ジルコニア電解質でも、膜厚が薄い場合にはTITが800℃(SOFC温度は入口で620℃、出口で740℃程度)の条件下で、60%近い発電効率が見られる。

3.2 SOFC マルチステージモデルを用いたサイクル解析

システムの効率解析を行う場合に、熱力学的サイクルとしての見通しを得るため、あるいは過大な計算負荷を回避するために、構成要素内部の温度分布等のパラメータを単一の集中定数として仮定する場合が多い。しかし、例えば、図4に示す前置室を改質器とする間接内部改質形 SOFC⁽²⁾を考えると要素内の複雑な分布の効果を無視して、その状態を唯一の温度や圧力で代表させることは、重大な誤差を生む可能性もある。従って、解析の目的と計算負荷のバランスから、複数レベルでの解析法を確立しておく必要がある。

本研究では、SOFC をまず予備室、改質部、燃料電池スタック部に分けた上で、さらにそれを N 個に輪切りにして、総計 3N 個のブロックを設け、各ブロック相互の熱の授受を考慮しつつ、それぞれの

ブロック内の温度、成分濃度の下で生じる改質・シフト反応、電気化学反応、発生電流、発熱などを計算して全体の発電効率を求める手法（マルチステージモデル）を開発した。

図5は、マルチステージモデルを組み込んだサイクル解析により予測される性能として比出力と発電効率を電流密度との関係で整理したものである⁽³⁾。この結果からわかるように、電流密度を大きくとると比出力、発電効率の双方が低下する。電流密度が大きいとセルの内部抵抗による損失が大きくなることが主たる要因である。この他、スチーム・カーボン比や燃料利用率、ガスタービンの要素効率等の影響についても検討している。

4. μ GT-SOFC ハイブリッドシステムのサイクル解析に基づく部分負荷特性の評価⁽⁴⁾ (東京大学・芝浦工業大学)

ハイブリッドシステムを分散電源として利用することを想定すると、エネルギー需要の変動に応じた柔軟な運転が求められ、定格点から外れた運転条件下での性能評価が不可欠となる。ハイブリッドシステムの部分負荷特性の解析に関しては、幾つかの報告例が見られるが、部分負荷特性の詳細を考察している例は少なく、部分負荷運転時の制御方法等に関する十分な検討例は見られない。

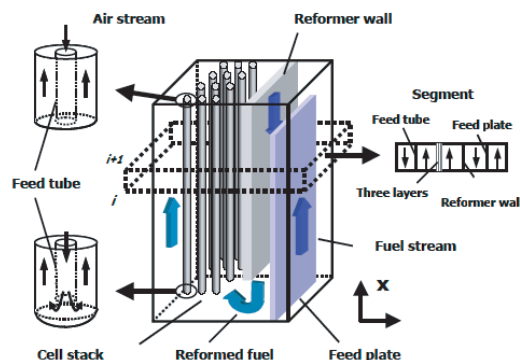


図4 SOFC のマルチステージモデル

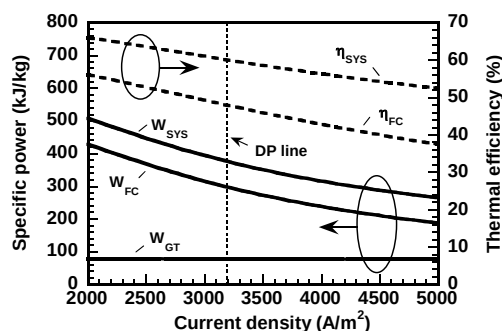
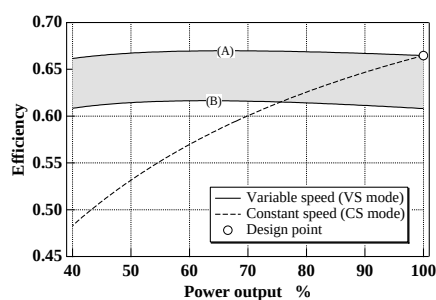
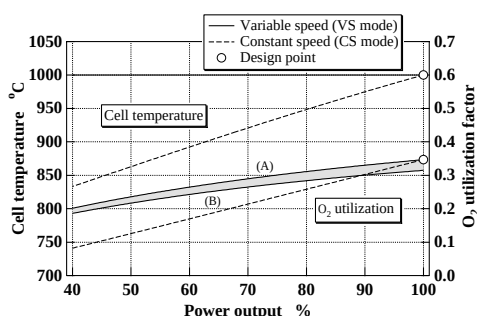


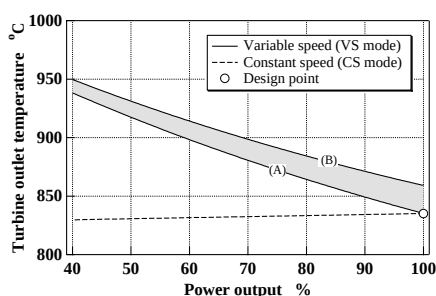
図5 電流密度とシステム性能の関係



(a) 発電効率



(b) SOFC 作動温度と酸素利用率



(c) タービン出口温度

図6 ハイブリッドシステムの部分負荷特性

本研究では、図1に示した出力30kWの μ GT-SOFCハイブリッドシステムを対象として、部分負荷特性の予測を試みた。運転方法として μ GTの定速運転(CS)と変速運転(VS)の二種類のモードを取り上げ、出力を40%~100%の範囲でのシステムの特性について考察を行っている。

4.1 ハイブリッドシステムの運転モード

ハイブリッドシステムの運転形態として、 μ GTの運転方法に着目し以下の二通りの運転モードを対象とする。

(1) μ GT出力一定(定速運転, CSモード)

総出力を制御する際に μ GTの回転数、出力を一定に維持する。この場合には、タービンの熱落差(圧力比)と空気流量が一定となり μ GTの要素効率は低下しない。SOFCについては、そのエネルギー収支を満足するように作動温度の操作が必要である。

(2) SOFC作動温度一定(変速運転, VSモード)

μ GTの部分負荷運転を許容し、総出力を制御する場合にもSOFCの作動温度を定格値に保つ。この場合には、SOFC作動温度を一定に維持するための空気流量の条件下で

μ GTが作動することから、その回転数を操作することが必要となり、圧力比も変化する。 μ GTの部分負荷運転時には、回転数の操作に伴う圧力比や流量の変化により圧縮機ならびにタービンの断熱効率も変化することが予想される。しかし、断熱効率の変化を厳密に予測することは困難である。そこで、本研究では、定格から40%部分負荷運転までに最大10%の断熱効率低下を想定した評価を試みる。すなわち、設計条件の断熱効率と各々設計条件から10%低下した場合の二通りについて計算を行い、負荷率に対する特性を二本の曲線で表す。負荷の変化に伴う断熱効率の変化を考慮すると、部分負荷運転時の動作点は、二本の曲線に挟まれた領域に存在することになる。このように運転特性をある幅を持った領域として捉えることにより部分負荷時の断熱効率の変化を考慮する。

4.2 ハイブリッドシステムの部分負荷特性の評価

定格条件として図 1 に示されている数値を用いて部分負荷特性の計算を行った結果の一例を図 6 に示す。

図 6(a)は発電効率を示したものである。VS で断熱効率を一定とすると、100%～65%までの範囲で負荷の低下に伴って発電効率が若干上昇する。この傾向は、SOFC の特性に依るものである。すなわち、SOFC では負荷の低下に伴う電流密度の減少によりセル電圧が高くなるためである。運転モードを比較すると、CS に対して VS の方が部分負荷運転時の発電効率が高くなる。負荷減少に伴う μ GT の圧縮機およびタービンの断熱効率の低下を最大 10%としても、40%～75%の負荷範囲で VS の方が発電効率は高くなる。CS では、回転数維持のために燃焼器への投入燃料が大きくなり、SOFC に比して発電効率の低い μ GT の出力の割合が増加するため、発電効率が低くなる。

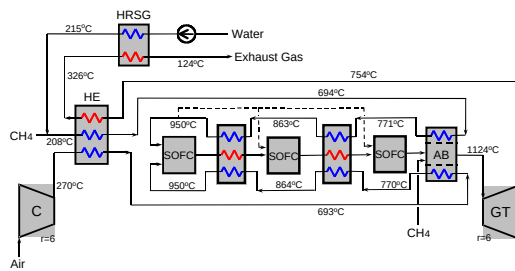
図 6(b)は、部分負荷運転時の SOFC 作動温度とカソードでの酸素利用率を示したものである。VS では、SOFC 作動温度を 1000℃にて一定に維持することが可能であるのに対して、CS では負荷の減少に伴って SOFC 作動温度が低下し、60%の負荷で 900℃を下回る温度となる。VS では、SOFC 出力に応じて μ GT 回転数により空気流量を操作することで SOFC 作動温度を一定に維持することができる。CS では、空気流量が一定となり、セル発熱に対する冷却効果が大きくなることから、SOFC 動作温度が低い条件で全体のエネルギー収支が満足される。カソードでの酸素利用率が VS に比較して低負荷ほど、小さくなる傾向からも、CS では過剰の空気が供給されていると言える。

図 6(c)はタービン出口温度 (TOT) を示している。CS では、タービンの圧力比および TIT が負荷に依らずほぼ一定であることから、TOT もおおむね一定となる。VS では、負荷の減少に伴って圧力比が低下することから、TOT は上昇する。本システムでは、設計点での TOT が材料の耐熱限界 (ステンレス鋼で 840℃程度) に近いことから、部分負荷運転では、再生器入口温度が耐熱温度を超える。よって、TOT を下げなければ、部分負荷運転時に SOFC 作動温度を一定にすることができず、安全な運転を行うこともできない。

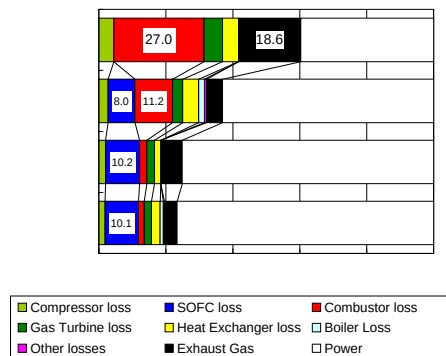
5. 多段ハイブリッドシステムのサイクル解析 (大阪大学)

図 7(a) に多段型 SOFC/GT 複合システムの系統図を示す。多段型システムでは、複数の SOFC を直列に並べることにより、空気利用率を高め、システム全体の空気比を下げる効果がある。また、一段目の SOFC の未反応燃料の一部が後段の電池で用いられるため、SOFC 群全体の燃料利用率は、単体の場合に比べて高めることができる⁵⁾。

図 7(b) は再生型ガスタービンおよび SOFC/GT 複合システムのエクセルギー損失を示したものである。ガスタービンは燃焼器での損失が大きいのにに対し、SOFC/GT 複合システムでは大幅に燃焼器での損失を低減でき、多段型システムでは一層のエクセルギー損失低減が可能である。



(a) システム構成

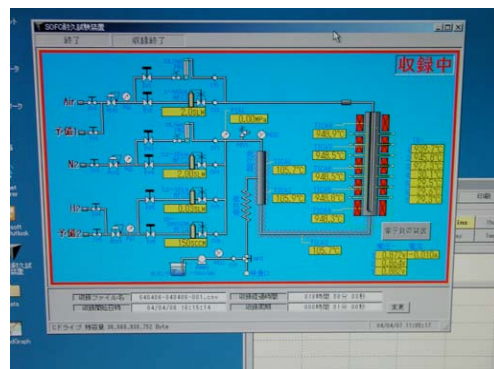


(b) エクセルギー解析



(a) 試験装置の外観（電気炉＋計測制御部）

(b)



(b) 試験装置の構成（データ収録画面）

図 7 多段型 SOFC/GT 複合システム（3 段）

図 8 SOFC 動特性実験装置

6. SOFC の動特性実験（芝浦工業大学）

ハイブリッドシステムの実用化に向けては、燃料・空気流量の変動等に対する SOFC の非定常特性の解明、ならびに動特性を予測しうるシミュレータの開発が課題となる。システム全体の動特性解析の手法が確立すれば、適正な制御系を構築し、負荷変動に対する追従性を確保して分散電源ユニットとしての適性を付与することが可能になると考えられる。このような観点から、現在、100W 級 SOFC 単セルの非定常特性計測実験に着手している。図 8 は実験装置を示したものである。供試セルは外径 16mm 長さ 600mm の円筒型であり、外壁がアノード、内壁がカソードである。燃料として窒素で希釈した水素を用いており、微量の水蒸気を添加してアノード側に供給している。作動温度を 950℃としていることから、未反応の水素はセル出口付近で燃焼する。出力端には電子負荷装置を設置している。現在は、セルの基本特性として温度別ならびに燃料利用率別の IV 特性の計測を済ませており、非定常実験を開始した段階である。

参考文献

(1) 上地英之・君島真仁・笠木伸英，マイクロガスタービン・固体酸化物形燃料電池ハイブリッドシステムのサイクル解析，日本機械学会論文集（B 編），68-666 (2002)，626-635。

- (2) T.W. Song, J.H. Kim, S.T. Ro and K. Suzuki, 2003, Quasi-2D Model of IIR-SOFC Stack for SOFC/MGT Hybrid System, Proc. ICOPE-3.
- (3) T.W. Song, J.L. Sohn, J.H. Kim, T.S. Kim, S.T. Ro and K. Suzuki, 2004, Parametric Studies for a performance analysis of a SOFC/MGT Hybrid Power System based on a Quasi-2D Model, ASME Paper GT2004-53304.
- (4) 君島真仁・笠木伸英, マイクロガスタービン・固体酸化物形燃料電池ハイブリッドシステムの部分負荷特性の評価, 日本機械学会論文集 (B編), 70-692 (2004), 1020-1027.
- (5) K. Nishida, T. Takagi, S. Kinoshita and T. Tsuji, Performance Evaluation of Multi-Stage SOFC and Gas Turbine Combined Systems, ASME Paper GT-2002-30109 (2002).

(2) 研究成果の今後期待される効果

本研究プロジェクトでは、SOFC 内部の電気化学反応の平衡計算とガスタービンサイクルの熱力学計算とを組み合わせたシステム解析の方法を確立し、部分負荷運転を含むハイブリッドシステムの効率評価や多段システムの可能性を中心とした研究を展開した。また、低温作動 SOFC と MGT のハイブリッドシステムのフィージビリティを確認し、各要素 (SOFC, タービン, 燃焼器, 再生器) の低温化も図れて有利であることを示すことで実用化を促進する契機を創出した。

開発したコードにより、例えば、要素技術の開発目標値の設定や、最適な設計パラメータの決定等の検討が可能となっている。また、他の熱機関や燃料電池によるハイブリッドシステムや燃料改質システムとの組み合わせの評価ができ、広範な可能性を検討する解析が可能である。さらに、エネルギー需要のデータとの組み合わせにより、分散電源としてハイブリッドシステムを導入する場合の省エネルギー効果の試算が可能である。一方、分散電源としてのハイブリッドシステムの適性を向上するためには、システム全体の負荷変動追従性を明らかにし適切な制御方法を確立することが不可欠であることから、SOFC の動特性実験に着手している。燃料流量変動時等の非定常特性の計測データが蓄積され、SOFC の動特性が明らかとなれば、SOFC の温度管理のためのシミュレータ開発や起動・停止を含むハイブリッドシステム全体の動特性シミュレータの開発、制御系設計などの実用化を視野に入れた研究開発の進展が期待できる。

3. 2 SOFC の低温化に向けての検討と熱管理ツールの開発

(1) 研究内容および成果

1. 緒言

固体酸化物形燃料電池 (SOFC) は化石燃料を使用する発電システムの中で、最も高い効率が達成可能であるといわれ、将来の発電システムとしての実現に向け活発な研究がなされている。一般に燃料電池の理論効率は温度上昇とともに低下するが、高温では熱利用や熱機関との組み合わせが可能のため、実際のシステムとしての効率は高温作動の燃料電池の方が高くなる。SOFC とガスタービンを組み合わせたハイブリッドシステムによる高効率発電の実現は、将来のエネルギー問題に関連した重要な課題である。SOFC のもうひとつの大きな特徴は燃料に対する適応性に優れる点である。低温では電極の被毒物質となる CO も SOFC では燃料として利用できるため、石炭ガス化ガスの発電が可能で、天然ガスの直接導入による内部改質型の動作も検討されている。高効率燃料電池発電の観点からは 900℃～1000℃ の高温動作が大きな目標であるが、高温耐熱性の材料の選択が容易でない点も事実である。一方、起動停止を容易にし、安価で加工など取り扱いが容易な耐熱金属が使用可能な温度である 700℃～800℃ 程度の低温作動化が可能になれば、小規模な使用目的や補助電源などの新たな使用分野への拡大が期待でき、新規な電解質、電極材料の使用による、よりいっそうの高効率化の可能性も期待できる。本研究ではマイクロガスタービンとのハイブリッドを最終的な目標に掲げ、それに必要な燃料電池部材の検討と、燃料電池単セル及びスタックの最適設計、熱管理ツールの開発を行った。さらに低温作動化をとおして SOFC の適応性を拡大することを検討するため、低温作動かに適した電極材料の検討や、新規電解質を使用した効率のシミュレーションなども行った。

2. SOFC の高性能化

まず、SOFC-MGT ハイブリッドシステムの最も基本的な構成要素である。固体酸化物形燃料電池 (SOFC) に関する研究の一部について述べる。SOFC は、炭化水素の内部改質が可能で、それを除熱の一手段として利用でき、燃料適応性にもきわめて優れており、電気化学反应用触媒を必要としない高温作動燃料電池であるが、構成材料については開発の必要性を依然残している。とくに、構成材料の耐熱性や化学的安定性の制約を強く受けるなど小規模エネルギー変換機器として捉えた場合に課題も多い。本研究では SOFC の材料開発とシステム評価の両面から検討を行うこととし、CH₄ や天然ガスなどの炭化水素を燃料極上で内部改質するための炭素析出の起らない燃料極の開発、作動温度を 800℃～900℃ とする場合にも、分極が小さい値に留まるカソード材料の開発、セルの熱管

理ツールとしての、様々な形状の SOFC を対象とした数値解析モデルの開発と、それを応用したセル内の温度場に関する知見の獲得を目指して来た。

2. 1 新規燃料極を用いた SOFC の発電特性

Ni-Ca(Fe)TiO₃ 燃料極(Ni-FCT)は NiO、Ca(Fe)TiO₃ の重量比が 4 : 1 となるように混合し、ペースト状にしたものを YSZ 板に塗布し、空气中 1200、1300 および 1400°C で 5 h 焼成した。比較として Ni-YSZ 燃料極を同様に調製した。Ru-YSZ は RuO₂ と YSZ の重量

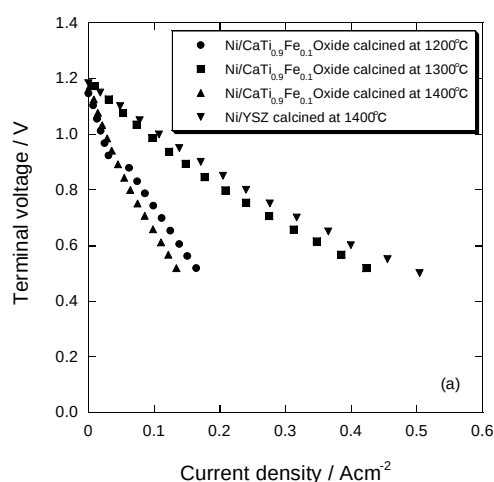


Fig. 1 I-V characteristics of H₂-fueled SOFC with Ni-FCT and Ni-YSZ as anode at 1000°C.

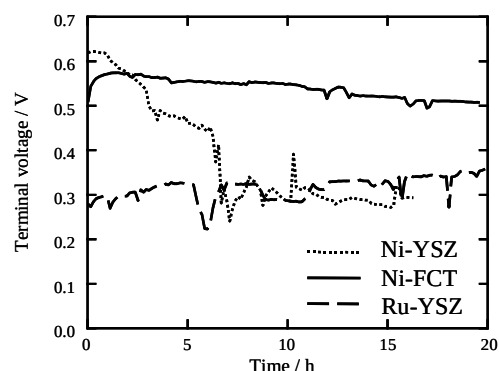


Fig. 2 Time-voltage characteristics of SOFCs at S/C = 1.6 and 1000°C under a constant current load of 200 mA/cm².

比が 4 : 1 となるように混合し、空气中にて 950°C で焼成した粉末を同様の手順で YSZ 板に塗布し、H₂還元雰囲気中で 1100、1400°C で 5h 焼成した。空気極は LSM を 1150°C で 5 h 焼成した。H₂、CH₄ を燃料に、カソード側ガスには O₂ を使用し、I-V 測定、交流インピーダンス測定を行った。

Fig. 1 に H₂ を燃料とした場合の Ni-FCT 燃料極の電流-電圧曲線を示す。H₂ 燃料は 0°C のバブラーで加湿、150 ml(STP)/min で供給した。Ni-FCT 燃料極の焼成温度が 1200°C および 1400°C の場合の発電特性は、1300°C で焼成したセルの性能と比較して著しく低い。1300°C 焼成の Ni-FCT 燃料極セルの発電性能は、Ni-YSZ 燃料極セルとほとんど同じである。インピーダンス測定の結果では、1400°C 焼成セルにおいては、1300°C 焼成セルと比較すると、特に低周波側の円弧が拡大していることから、発電性能の低下は焼結が進んだためと考えられる。また 1200°C 焼成のセルの性能の低下は、焼成温度が低かったため、電極と電解質の焼結が不十分だったことによると考えられる。Ru-YSZ は焼成温度が 1400°C で発電性能が最も高くなったが、Ni-FCT と比較すると発電性能は低い。

Fig. 2 に 200 mA/cm² の一定負荷で発電を行ったときの端子電圧の経時変化を示す。燃料はメタンを用い、H₂O/CH₄ は 1.6 と低い値に保った。発電開始時は、Ni-YSZ 燃料極が

もっとも高い発電性能を示すが、時間の経過とともに端子電圧が低下し、5 時間後には発電開始時の約半分の値となった。Ni-FCT 燃料極では、緩やかな端子電圧の低下は見られるものの、20 時間にわたり安定な発電性能を示した。Ru-YSZ 燃料

極は全体的に性能は低いものの、時間の経過とともに端子電圧はむしろ上昇した。Ru-YSZ 燃料極に関しては、発電前の処理が大きく性能を向上させる可能性がある。Table 1 は、ドライメタンを用いて 1000℃で炭素析出速度を測定した結果である。Ni-FCT, Ru-YSZ では炭素析出速度が小さかった。Ni-YSZ と比較して発電性能低下が小さいのは、これらの電極で炭素析出が起こりにくいからである。

2. 2 カソード材料の開発と評価

ペロブスカイト型酸化物である $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{Fe}_x\text{M}_{1-x}\text{O}_{3-\delta}$ ($M=\text{Mn, Co, Cr}$) の粉末を上部が円錐状の円柱となるように冷間等方圧成形し、1150–1250℃で 10–15 時間焼結した。その後、円錐の先端部分を研磨し作用極とした。電解質には 8YSZ、対極および参照極には Pt 板を用いた。実験温度は 800–1000℃とし、雰囲気は空気もしくは酸素・アルゴン混合ガスとした。インピーダンス測定を周波数 10mHz から 500kHz まで行い、適当な等価回路により解析した。

まず、 $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{Fe}_{0.8}\text{M}_{0.2}\text{O}_{3-\delta}$ ($M=\text{Mn, Co, Cr}$) の組成をもつ電極材料について、850℃、種々の酸素分圧下において測定を行った。その結果、遷移金属 M として Mn を含むものが最も良い分極特性を示すことが明らかになった。次に、 $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{Fe}_x\text{Mn}_{1-x}\text{O}_{3-\delta}$ における 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結果、 $x=0.8$ の組成の電極が最も良い分極特性を示すことが明らかになった。

以上の結果に基づき、 $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{Fe}_{0.8}\text{Mn}_{0.2}\text{O}_{3-\delta}$ に関して詳細に検討を行った。空気雰囲気中、温度を 800℃から 900℃まで変化させて測定を行い、得られた電極界面導電率 $1/(R_p \cdot A)$ の対数を温度の逆数に対してプロット(Arrhenius プロット)すると Fig.3 のようになる。ただし、 R_p は分極抵抗、 A は電極面積である。ここで、●印は実験開始後 200 時間、○印は実験開始後 700 時間における結果である。この結果、活性化エネルギーは約 1.8 eV であることが分かった。さらに、800–900℃の温度範囲で昇温・降温サイクルを行った結果、

Table 1 Comparison of carbon deposition rate over Ni-FCT, Ru-YSZ, and Ni-YSZ.

Cermet	Weight ratio	Carbon deposition rate (C - g / cermet - g min)
Ni-YSZ	4.0:1.0 (NiO:YSZ)	0.199
Ni-FCT	4.0:1.0 (NiO:FCT)	0.089
Ru-YSZ	2.0:1.0 (RuO ₂ :YSZ)	0.048
Ru-YSZ	4.0:1.0 (RuO ₂ :YSZ)	0.062

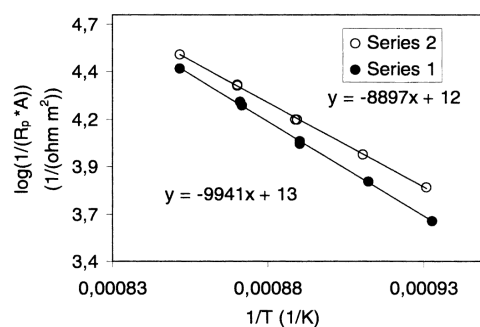


Fig. 3 Arrhenius plot of interface conductivity for the cathode material in air atmosphere.

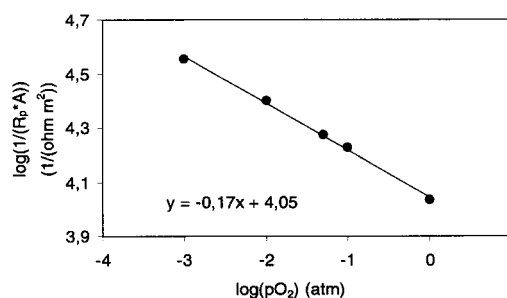


Fig. 4 Effect of partial pressure of oxygen on interface conductivity at 850°C

分極抵抗は可逆的に変化することが分かった。本研究で得られた分極抵抗の値 $416 \text{ } \Omega \text{ cm}$ (800°C)は、Baker ら[1]による報告値 $1585 \text{ } \Omega \text{ cm}$ ($\text{La}_{0.9}\text{Sr}_{0.1}\text{MnO}_3$, 800°C)や、Siebert ら[2]による報告値 $1450 \text{ } \Omega \text{ cm}$ ($\text{La}_{0.9}\text{Sr}_{0.1}\text{MnO}_3$, 800°C) の約 $1/3$ であり、大きな改善が図られたと言える。

酸素分圧を 10^{-3} から 1 atm まで変化させたときの界面導電率の変化を Fig. 4 に示す。酸素分圧の低下により界面導電率が増加(分極抵抗は減少)しているが、これは、電極内の酸素空孔が増大したためと考えられる。すなわち、この電極材料は、酸素イオン導電性と電子伝導性を持つ、混合導電体であることが分かった。

電解質である YSZ との反応性についても調べた。 900°C で 900 時間保持した後にインピーダンス測定を行った結果、分極抵抗に変化は見られなかったことから、この温度での反応性はないと考えられる。一方、 1000°C で 4 時間保持した後は、分極抵抗がかなり増大した。これは、YSZ との反応により電極／電解質界面に絶縁性の SrZrO_3 が形成したためと推察される。

2. 3 SOFC の最適設計・熱管理ツールの開発

円筒型、平板型、ディスク型各形状の SOFC セル単体に対して最適設計・熱管理ツールとしての数値解析モデルの開発を行った。ここでは内部改質—円筒型 SOFC セルに対する結果を例示する。燃料は触媒を充填した燃料供給管の内側で改質され、セル管の先端で折り返してその内部を流れる間に電極部での電気化学反応によって消費され、外部へ流出し、いっぽう空気はセル管の外側を流れる。モデルでは双方の流れを、ともに軸対称で、定常な層流であるとして取り扱った。セル内外の熱・物質移動現象を記述する連続の式、運動方程式、エネルギー式（固体領域では熱伝導方程式）及び物質輸送方程式は、有限体積法を用いて差分化し、数値的に解いた。なお、気体の物性値については局所の温度依存性と濃度依存性を考慮し、触媒充填層は多孔質体として取り扱い、触媒密度は可変とした。電気化学反応に伴って発生する局所電流については、電解質中ではセル半径方向に、電極中ではセル周方

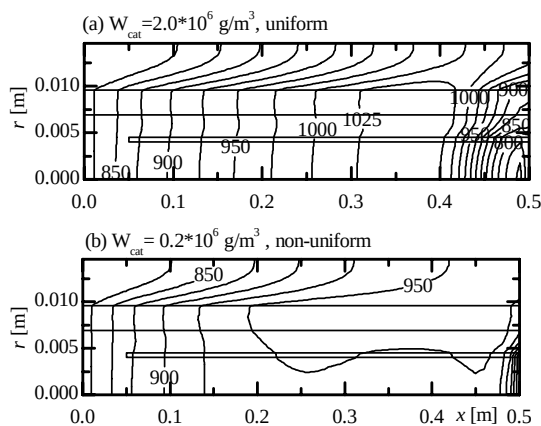


Fig. 5 Temperature field in and around the cell.

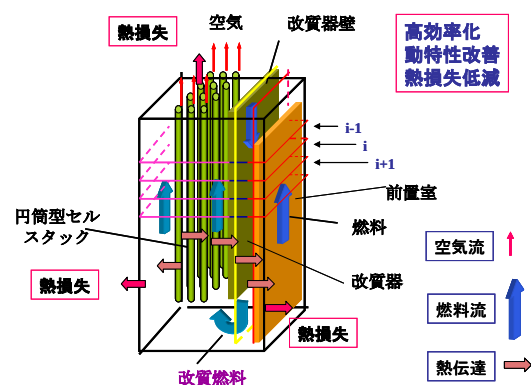


Fig. 6 Internal reforming SOFC module simulator

向に流れると仮定し、Ohm の法則と Kirchhoff の法則を用いて計算した。局所の起電力は Nernst の式に電極表面での各化学種の分圧を代入して求め、電極と電解質のオーム抵抗には温度依存性を考慮した。活性化過電圧については、温度依存性を考慮したモデル式を用いた。

本数値シミュレーションでは、セル入口における燃料と空気の状態（温度、流速など）及びセルの端子電圧を条件として与えることで、セルの様々な運転状態を詳細に予測することが可能である。その一例として、燃料と空気の入口温度が 800℃、燃料の入口流速が 0.923m/s、空気の入口流速が 2.0m/s、平均電流密度が約 4000A/m²である場合の温度場の結果を Fig. 5 に示す。ただし Fig.5(a)と(b)とでは、燃料供給管内の触媒の密度と分布が異なる。すなわち(a)では、電流密度が低い場合でも供給管内で改質が終了するだけの十分な触媒を一様に分布させているのに対し、(b)では平均触媒密度が(a)の 0.1 倍となる量の触媒を非一様に（供給管入口から出口へ向かって線形に増えるように）分布させた。

一般に、内部改質 SOFC のセルの温度場に影響を及ぼす大きな要因は、電気化学反応に伴う発熱、内部改質反応に伴う吸熱、空気流による冷却の三つであり、これらのバランスによって温度場の特徴が決まる。Fig.5(a)に示したセルの場合、セル管の閉端側が空気流によって冷却され、開端側も燃料入口付近で著しく進行する内部改質反応の影響で冷却される。その結果、温度の高い領域がセル管中央付近で発生し、また燃料入口部で温度勾配が大きくなる。これらは、熱応力によるセルの破壊につながり、セルの寿命という観点から大きな問題である。一方 Fig.5(b)では(a)に比して温度場の一様性が改善するとともに最高温度も低下しており、改質用触媒の分布を制御することでこれらの問題が緩和される可能性を示している。

実際の SOFC は、多数のセルと内部改質装置がモジュールの中に組み込まれる。セルでは発電以外に熱発生があり、その一部は内部改質部に伝達され、吸熱反応である改質反応が進行する上で必要な熱を供給することになるので、セルと内部改質部の配置の位置や姿勢などがモジュールの機能、効率に影響する。そこで、モジュールの最適設計や熱管理

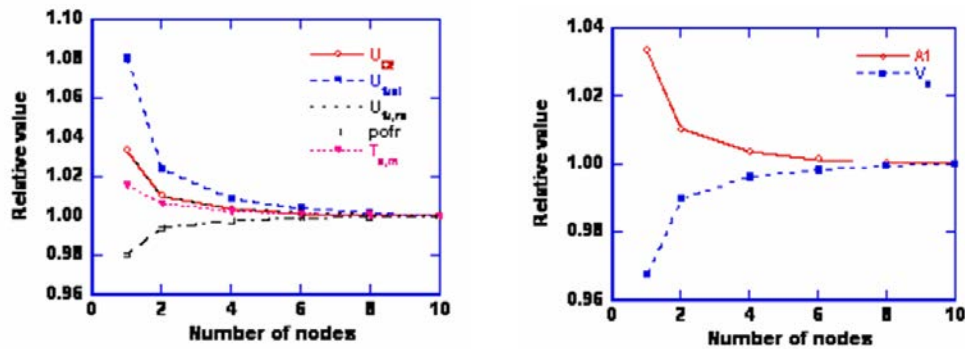


Fig. 7 Dependence of fuel and air utilizations, rate of fuel recirculation, average temperature (left), effective area, and cell voltage (right) on number of node.

用のツールとして、モジュールシミュレータを開発した。Fig. 6 に、円筒形 SOFC バンドルを設置したセルスタック上流に燃料の内部改質室を持つ形式の IR-SOFC モジュールの概要を示した。

燃料 CH_4 は、前置室を通して改質部に入り、改質された燃料はセルスタック部を通過し、その部分の各セルで生じる電気化学的反応によって発電され、それに加えて一部発熱を伴った後に、モジュール上部より排出される。場合によっては排出ガスが一部循環される。その効果は入口部の燃料の流入条件で考慮できるが、この図には書き込まれていない。発生電流はインターコネクトで集電され、またセルの直列接続で適正な電圧にされて外部回路に流される。発生熱は大部分冷却剤である空気によって除去されるが、一部改質器壁を通して改質部、さらには隔壁を通過して前置室に輸送され、吸熱反応に必要な熱を供給し、その部分の温度を適切に保つことに使われる。モジュールの断熱が不十分であれば、セルスタック部などの壁を通過して熱損失も生じる。モジュールのシミュレータとしては、以上の全ての現象を取り扱うことが必要である。

まずモジュール全体を、機能の異なる前置室、改質部、セルスタックの 3 室に分け、ついで、それぞれを N 個に輪切りにする。セルスタックのセグメントは、さらに燃料流路部、セル固体部の電極と電解質の 3 層、空気流路部に分けるので、全体で $9N$ 個のセグメントに分けられる。それぞれのセグメントに計算に必要となる温度、関与する化学分子分圧などの変量の値を一つずつ割り当てて、燃料が入口からどのように改質されるか、セルスタック部で改質燃料の電気化学的反応の進行によって、どのような発電が期待できるかを、それぞれの量を支配する保存式を離散化したうえで計算機で計算する。以上が、モジュールシミュレータの概要である。

セグメントにスライスする個数 N への計算結果の感度を見るとこの図のような結果になっていて、10 個にスライスすると、個数への依存性は極めて小さくなる。

Fig8 は、開発されたシミュレータにより得られる結果を、Siemens-Westinghouse 型モジュールを加圧運転して得た実験結果と比較したもので、かなり良い一致が得られている。

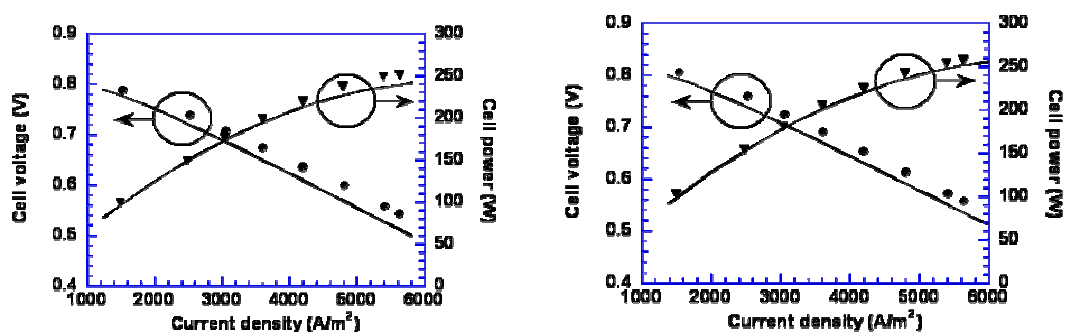


Fig. 8 Generation characteristics obtained from multi-stage model. Left: 3 atm, right: 5 atm.

Plotted values were cited from Singhal et al.[11]

このシミュレータをツールとして用いることにより、モジュールの最適設計、熱管理などが可能となる。

3. 結 論

SOFC の低温作動化ならびに燃料適応性の拡大を目的として、燃料極及び酸素極材料ならびにセル単体及びスタック、モジュールの評価のための熱管理ツールを開発した。燃料極材料の検討により、炭素析出のおこり難い内部改質に適したサーメットが得られた、低温作動を可能にする空気極としてペロブスカイト組成の最適化が有効であった。また種々の単セルの熱分布、組成分布を評価するための熱管理ツール、さらにモジュールの最適設計に有用なツールを開発し、SOFC の今後の技術展開に貢献する評価方法を発展させた。

参考文献

- [1] A. J. Baker, J. Guindet, M. Kleitz, *J. Electrochem. Soc.*, **144**, 2427(1997).
- [2] E. Siebert, A. Hammouche and M. Kleitz, *Electrochimica Acta*, **40**, 1741(1995).
- [3] P.W. Li and K. Suzuki, 2004, Numerical Modeling and Performance Study of a Tubular Solid Oxide Fuel Cell, *Journal of Electrochemical Society*, 151-4.
- [4] K. Suzuki, H. Iwai and T. Nishino, 2004, Electrochemical and thermo-fluid modeling of an internal reforming type tubular solid oxide fuel cell, in *Transport Phenomena in Fuel Cells* (ed.B. Sunden and M. Faghri), WIT Press. (to be published)
- [5] T. Nishino, H. Komori, H. Iwai, K. Suzuki, Development of a Comprehensive Numerical Model for Analyzing a Tubular-Type Indirect Internal Reforming SOFC, *Proc. 1st International Conference on Fuel Cell Science, Engineering and Technology*, Rochester, NY, pp.521-528, 2003.
- [6] K. Suzuki, T.W. Song and H. Iwai, 2002, Micro Gas Turbine – Solid Oxide Fuel Cell Hybrid System for Distributed Energy Generation, Int. Symposium on Distributed Energy Systems in the 21st Century, September 24-25, Tokyo.
- [7] T.W. Song, J.H. Kim, S.T. Ro and K. Suzuki, 2003, Quasi-2D Model of IIR-SOFC Stack for SOFC/MGT Hybrid System, *Proc. ICOPE-3*, Kobe.

- [8] 鈴木健二郎、2001、CREST 研究課題「超小型ガスタービン・高度分散エネルギーシステム」第1回公開発表会報告書.
- [9] 鈴木健二郎、2003、CREST 研究課題「超小型ガスタービン・高度分散エネルギーシステム」第2回公開発表会報告書.
- [10] Singhal, S. C., 1997, "Progress in Tubular Solid Oxide Fuel Cell Technology," *Electrochemical Society Proceedings*, Vol.99-19, pp.39~51.
- [11] Singhal, S. C., 2000, "Advances in Solid Oxide Fuel Cell Technology," *Solid State Ionics*, Vol.135, pp.305~313.

（２）研究成果の今後期待される効果

ハイブリッドシステムにおいて発電の主役となる固体酸化物形燃料電池の高性能化を目指し、新しい燃料極、空気極の開発とその性能評価を行った。またシステム化する際に重要となるモジュールの熱管理ツールの開発を行うとともに、セル単体の詳細な数値解析モデルを開発した。電解質や電極およびインターコネクタの材料、セルの形状など未だ種々の可能性を模索中である SOFC ではあるが、作動温度の中低温化という方向性は有力であると考えられ、本プロジェクトで行った上記の検討はいずれもこれに貢献するものである。

3. 3 超希薄マイクロ高安定性燃焼器の研究

(1) 研究内容および成果

1. 緒 論

固体酸化物型燃料電池 (SOFC) – マイクロガスタービン (MGT) ハイブリッドシステムを家庭に設置することを想定すると、その MGT 燃焼器においては、安全性や住環境の面から、確実に保炎される安定な燃焼を実現すること、 NO_x ならびに未燃成分の排出抑止を実現することが重要な課題であるとともに、タービンなどの重要部材の熱損傷に繋がるような燃焼も避けねばならない。さらに、エネルギー・環境問題の重要性に鑑みて、一層の熱効率の向上を計ることも必要である。また、触媒燃焼などの可能性にも目を向けておく必要がある。

本プロジェクトの中で、マイクロガスタービン燃焼に関わる部分については、上記の観点から種々の研究が行われており、以下においては、その主要な成果を紹介する。

2. マルチ噴流超小型燃焼器

家庭に設置することを想定する SOFC–MGT ハイブリッドシステムでは、数 kW 級の小さい発電容量ゆえに燃焼器が小さくなり、燃焼器内の流れのレイノルズ数も低下するために、混合の悪化が懸念される。そのような条件下であっても、上述の確実な保炎および大気汚染物質の排出抑止は必須の命題であり、そのほかにも、熱効率の低下を防ぐための圧力損失の低減、タービンの熱損傷を防ぐための燃焼器出口における温度の均一化、出力変化する燃焼量変化への対応のし易さなどが求められる。

そこで、層流領域を含む低いレイノルズ数流れにおいても、燃料と空気の良い混合を実現するために、図 1 の下部に示すような、燃焼器中心の燃料噴流ノズルを取り囲むように空気噴流用の噴孔を配するバッフル板を有するマルチ噴流超小型燃焼器を考案した。図 1 の上部は、そのようなマルチ噴流超小型燃焼を円周上に複数配置し、再生型ガスタービンを構成する場合の概念図である。今回は単一のマルチ噴流超小型燃焼について、燃焼実験ならびに数値解析を実施した。

まず、迅速な燃料–空気の混合ならびに強い循環流の形成が、バッフル板によってどの

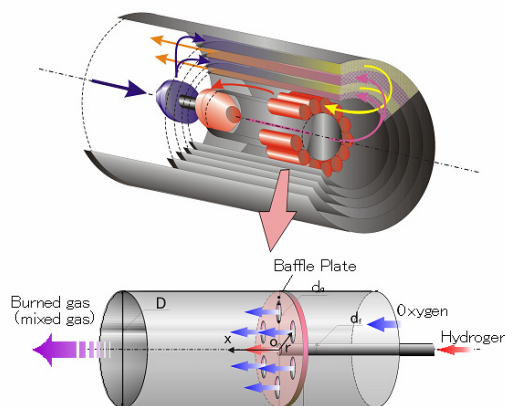


図 1 超小型燃焼器の概念図

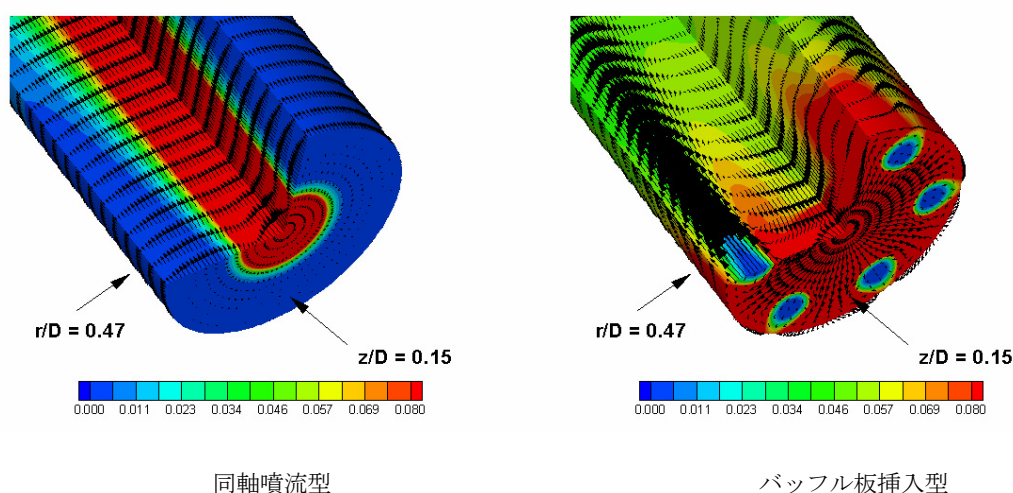


図2 バッフル板の有無による差異

程度達成できるかを、非構造格子系に有限体積法を適用した数値解析で予測した。図2にその結果を示す。この数値予測結果によれば、レイノルズ数が数100程度と同軸噴流型では燃焼器入口部直後において燃料-空気の混合がほとんど見られないが、バッフル板挿入型では大規模な循環を伴う複雑な3次元的流動によって混合が促進されることが分かる。

次に、バッフル板形状による火炎温度分布の違いを見るために、バッフル板中央に配する内径2~4mmの燃料噴流ノズルに対して、空気噴孔の径および個数を変化させ、そのそれぞれの場合に対する火炎形状の撮影ならび燃焼器出口における温度分布の測定を行った結果を図3に示す。AおよびBの場合に比して相対的に燃料噴流の速度が遅く、空気噴流の速度が速いCおよびDの場合、温度分布は低くなるが火炎長の短い、青炎が得られた。後者の場合にはバッフル板のすぐ下流において、燃料-空気の混合が著しく促進されることも数値シミュレーションによって明らかになった。また、前者の場合は後者の場合に比べ、燃焼管への燃料および空気の供給流量比が当量比にして0.2以下の超希薄な条件においても、安定な燃焼が実現している。このことから、バッフル板がSOFC-MGT運転条件に応じて、最適な燃焼状態を実現するのに効果的であると考えられる。

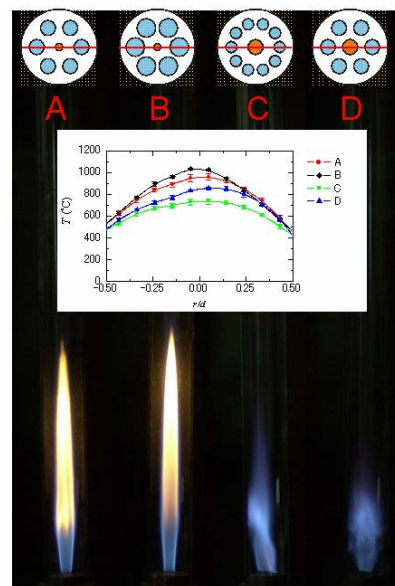


図3 バッフル板形状による温度分布の違い
($Re=1.583$, 当量比=0.33, 空気温度=298K)

バッフル板を挿入した場合の混合促進に噴流相互の干渉が効果的であることを定量的に

調べるために、図 4 に示すように、複数の噴流軸を含む面内で時間平均流速の測定を行った。その結果、数 L/min 程度の流量で複数の噴流を組み合わせて同時に吹く場合、その速度分布（▲印）はノズル内径の 30～40 倍下流で速度分布のピークが一つになり、単独噴流の速度分布を加算的に重ね合わせた場合の結果（■印）に比べて、はるか上流側で噴流どうしが十分に混合することが明らかになった。

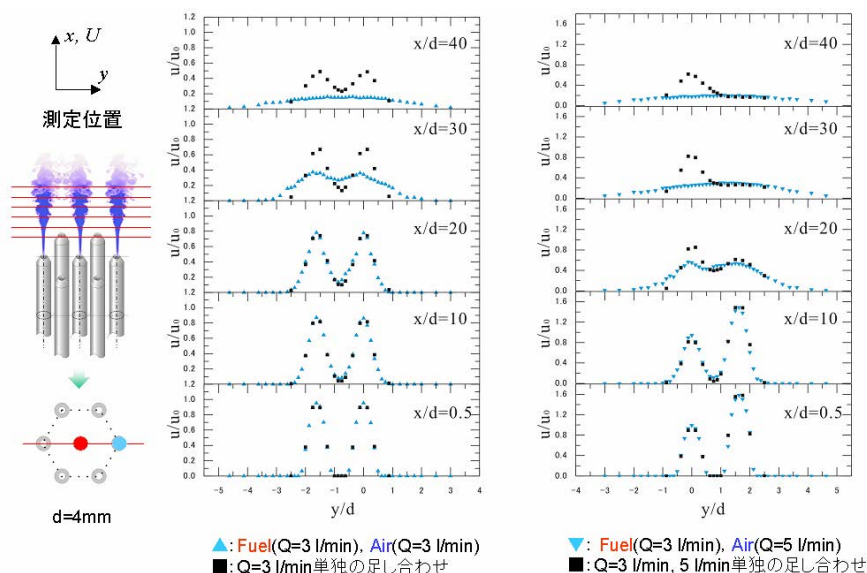


図 4 マルチ噴流間の干渉（時間平均流速分布）

3. マイクロ電磁アクチュエータによる混合促進

1kW クラスの希薄予混合燃焼ノズルを想定し、ノズル内壁に 18 枚のフラップ型マイクロ電磁アクチュエータ群を配備した混合制御用同軸ノズルを開発した。その写真を図 5 に示す。

環状・中心噴流はそれぞれ空気、およびメタンであり、レイノルズ数は $Re = U_{m,0} D_0 / \nu_0 = 2.2 \times 10^3$ である。また、フラップの変位は約 0.4mm であり、全てのフラップを位相を揃えて軸対称に駆動する。

混合の定量評価にはアセトントレーサとしたレーザ有機蛍光法を用いた。フラップを作動させない自然噴流の場合と、フラップを 90Hz で作動させた制御噴流の場合のメタン・空気混合可視化像を図 6 に示す。自然噴流では、緩やかに内外混合層が発達するのに対し、制御噴流では、ノズル

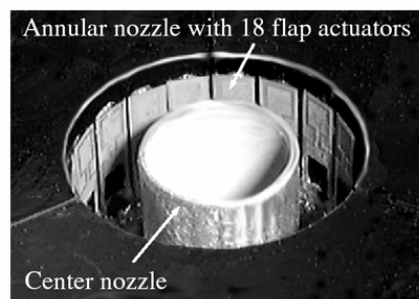
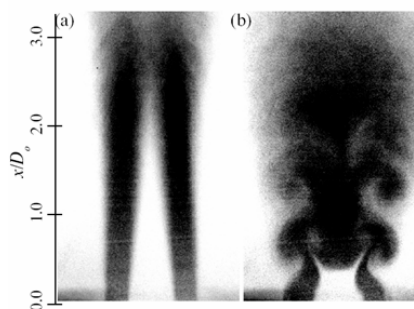


図 5 マイクロ電磁アクチュエータ付き同軸ノズル
(フラップ変位 約 0.4 mm)



フラップ非作動 フラップ作動 (90Hz)

図 6 メタン・空気混合可視化像
($Re = U_{m,0} D_0 / \nu_0 = 2.2 \times 10^3$)

近傍でフラップと同期して連続的に巻き上がる大規模渦の作用により、中心噴流がノズル極近傍で縮流され、混合が著しく促進される。

流れ場の定量評価には、2成分粒子画像流速計を用いた。図7に示す最も著しい混合促進効果が得られた制御噴流では、環状噴流内側せん断層に発達する渦輪が、中心流体を連続的に下流へ伸張・輸送した後、ポテンシャルコア下流で崩壊し、内外流体の混合を促進する。これらの混合過程により、濃度変動の小さい均一な混合気が下流に供給される。

4. 触媒燃焼

触媒燃焼は、燃料の完全酸化を触媒上で安定に進行させる燃焼方法で、燃焼可能な燃料／空気比の範囲が広く、燃焼温度の制御が可能であるため、窒素酸化物や未燃の燃料の発生が非常に少ない燃焼方法である。高温燃焼用触媒とし

ては、これまでに層状化合物のヘキサアルミネート化合物が1600℃の高温においても高い表面積を維持し、メタンの燃焼活性が高いことを見いだしている。ヘキサアルミネート化合物は、図8に示すように、マグネトブラムバイトもしくはベータアルミナ型の結晶構造を持ち、 Al^{3+} と O^{2-} からなるスピネル層と Ba^{2+} などの大型カチオンを含む鏡映面層が交互に並んだ層状構造となる。この層状構造に垂直な方向への成長速度が著しく遅いため、高温における焼結の進行が抑制され、高温焼成後も高い表面積が維持される。

図9の左側に示したTEM像は、バリウムヘキサアルミネートの層状構造を示し、 Al^{3+} と O^{2-} からなるスピネル層が見えている。図9の右側図は焼成温度とアルミナおよび2通りの調製法で調製した $BaAl_{12}O_{19}$ のBET表面積の関係を示している。焼成温度の上昇に伴う表面積の減少は、アルミナにおいて著しく、1400℃以上では $1\text{ m}^2/\text{g}$ 以下となる。 $BaCO_3$ と Al_2O_3 の粉末混合により調製した $BaO-Al_2O_3$ 系では、1300℃以上で表面積低下の抑制が大きく、アルミナ単独に比べて3～4倍高い表面積が維持された。アルコキシド法で調製した試料でも同様の傾向が見られるが、固相法で調製した試料よりもさらに高表面積を維持し、1600℃焼成後も約 $20\text{ m}^2/\text{g}$ の表面積を維持した。X線回折により、固相法では中間相として $BaAl_2O_4$ が一旦形成され、その後ヘキサアルミネート相が形成されることが明らかになった。この中間層を経由する過程で表面積の低下が大きくなったものと考え

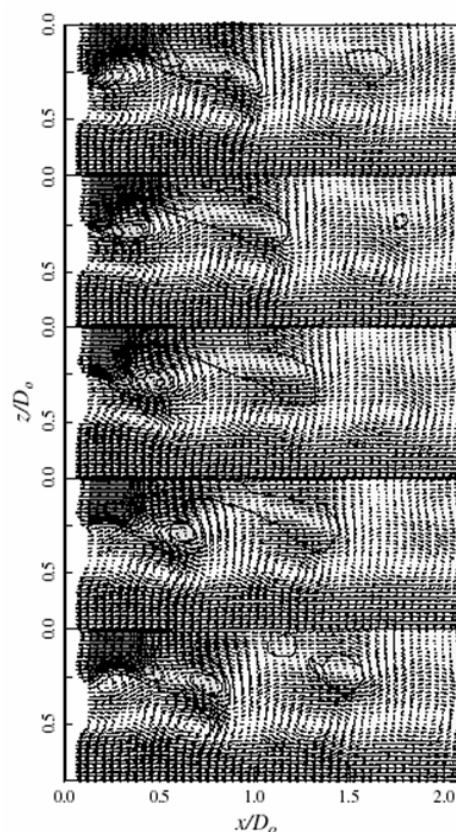


図7 速度・メタン濃度時系列変化

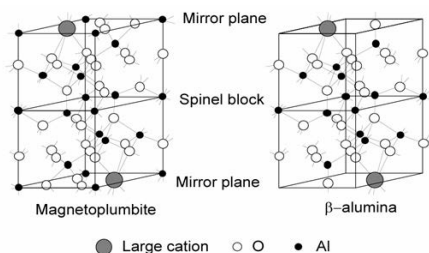


図8 ヘキサアルミネート化合物の結晶構造

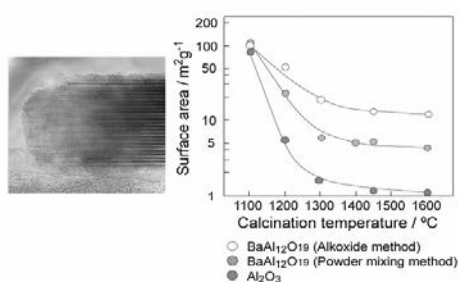


図9 TEM像および表面積と焼成温度の関係

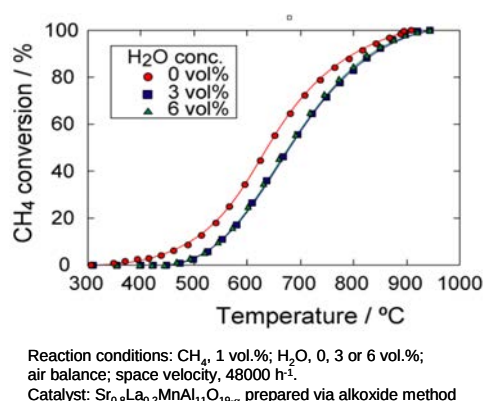


図10 メタン燃焼活性への水蒸気の影響

えられる。これに対してアルコキシド法では、原子レベルで均一に各成分が混合し、1200℃の熱処理で直接ヘキサアルミネート相が形成されたため、表面積の低下が少なかったと考えられる。

次に、固体酸化物形燃料電池から排出ガス中の燃料の完全酸化への触媒燃焼の応用を検討した。排出ガスの燃料は希薄で、水蒸気が存在するため、水蒸気の燃焼活性への影響を調べた。水蒸気の影響で、低温では触媒活性を低下することが予想される。図10は水蒸気濃度を3、6vol%と増加したときのメタン燃焼プロファイルを示す。水蒸気の添加により活性が低下し、メタン燃焼転化率は低下、燃焼開始温度が高温側に約100℃上昇している。水蒸気濃度の影響はほぼみられず、水蒸気濃度が3または6vol%いずれの場合でも、同様の活性低下となった。温度が上昇すると水蒸気による活性の低下は小さくなり、800℃以上ではメタン転化率に水蒸気の影響がほとんど見られなかった。

5. マイクロフレイムホルダー

マイクロガスタービンでの燃焼器のコンパクト化や等温膨張燃焼過程を実現するために重要な問題の一つが、高速流中で実現するための保炎と高速混合技術の開発である。本研究では、燃料噴射ノズルと保炎器とを一体化

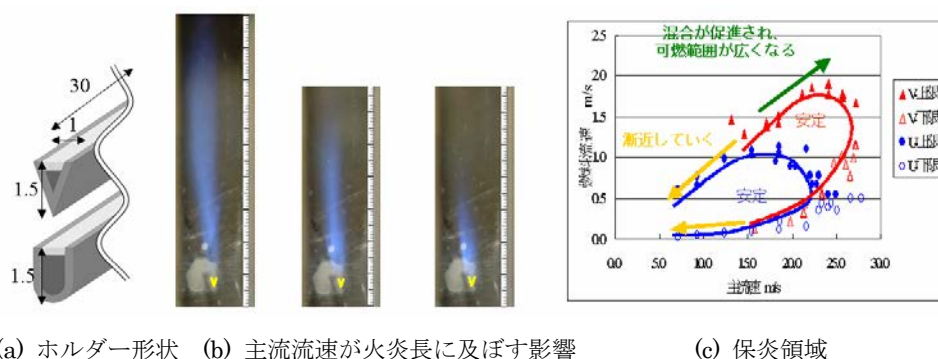


図11 フューエルインジェクターを兼ねたマイクロフレイムホルダー

させる方法を提案する。図 11(a)のように、圧縮後あるいは部分燃焼後の比較的高温の気流中に、断面がエンジェルフィッシュ形の微小物体を挿入し、その最後尾から燃料を噴出させる。燃料噴出部を挟んで対面する逆回転の渦が強烈な剪断混合層を形成させる。このように 3 次元性が極めて強く、かつスケールも小さい効果により、従来の保炎器とは桁違いの混合性能が期待される。実験では、究極の目標よりは 2~3 倍大きい幅 1mm 長さ 1.5mm の V 字形および U 字型のマイクロフレームホルダーを用い、背面の多孔質部分からメタンを一様に噴出させた。吹出し速度と主流速度を種々に変化させて火炎の状態を観察・測定するとともに、火炎が安定に保持される可燃範囲を明らかにした。図 11(b)に示すように、流速を大きくするにつれ、火炎長が短くなることから、空気・燃料の混合が十分に促進されている。また、図 11(c)に示すように、V 字型の方が U 字型よりも保炎領域が大きく、このことはエンジェルフィッシュ形保炎器の上流部形状の妥当性を裏付ける。

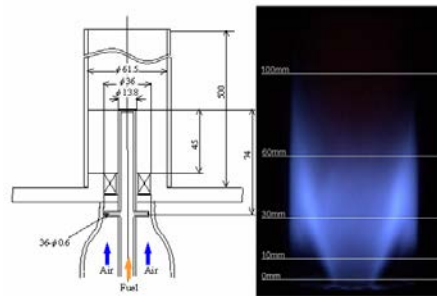


図 12 燃焼器構成

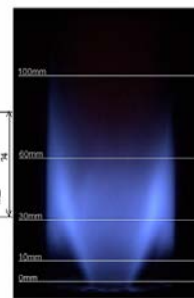
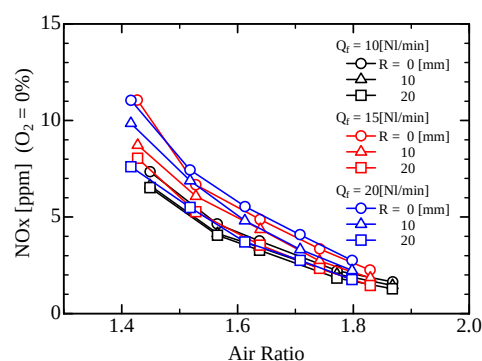
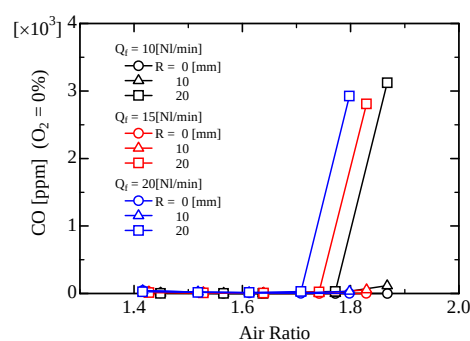


図 13 火炎直接写真



(a) NOx



(b) CO

図 14 汚染物質排出に対する空気比、燃料流量の影響

6. 低 NOx 燃焼

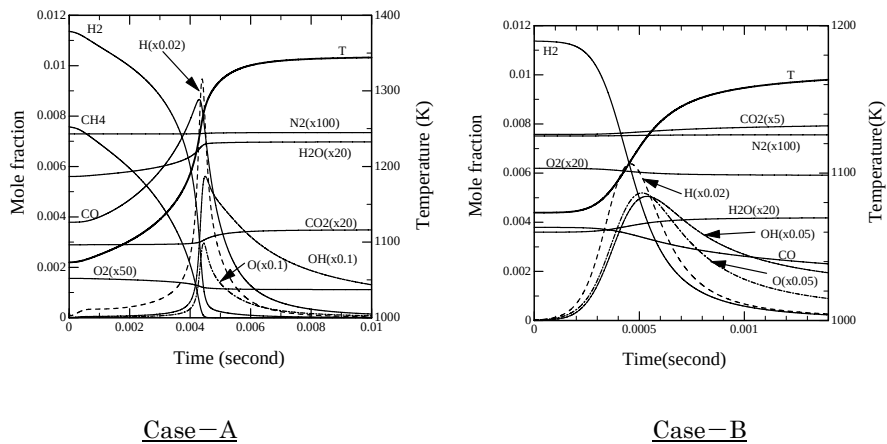
マイクロガスタービン燃焼器の研究につ

いて、火炎構成の改善を進めた結果、図 12 のように燃料をスワラ手前で混合し、スワラ後流に若干の混合区間を設ける方式の燃焼器において、火炎の安定性が良く、完全燃焼を確保しつつ、NOx 排出濃度が低い燃焼を実現した。図 14 に示すように、CO 排出が認められずに 3ppm (O₂ 0%換算) という NOx 排出濃度が得られているが、この NOx 排出濃度は、同流量条件においては、完全予混合燃焼を行った場合に達成できる濃度とほぼ同じレベルの濃度であり、上述の火炎構成方式は NOx 排出の下限をほぼ達成したといえる。

また、数値シミュレーションによる検討の結果、NOx 低減時には prompt NOx が支配

的であることが判明した。さらに、空気圧や温度の影響を数値シミュレーションで検討した結果、燃焼ガス温度が 1800K 以下であれば、プロンプト NO_x が支配的であり、NO_x 排出濃度も低い値に収まることや、5atm までの圧力上昇であれば、大気圧条件下と比べて NO_x 増加量はわずかであることが分かった。

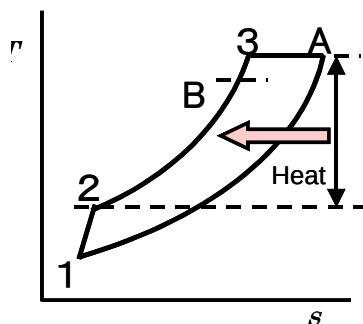
低温型 SOFC の燃料側と酸化剤側の排出ガスを混合したことを想定した場合と、そこにメタン燃料を追加した場合の反応を実績のある素反応スキームに基づいて数値シミュレーションした結果を図 16 に示す。流動・混合の過程を含まない反応のみのシミュレーションであるが、当方で提案している燃焼器では実質的には予混合燃焼が行われるので、そこでの反応はシミュレートできている。前者の場合には化学反応は十分に早いため保炎面の問題はなく、混合律速型の燃焼となることがわかる。メタン燃料を追加すると、反応に要する時間は 10 倍程度に長くなる。



入口状態

	T	CH ₄	CO	H ₂	O ₂	N ₂	CO ₂	H ₂ O	H	O	OH
Case-A	800 °C	—	0.003791	0.01137	0.12393	0.7511	0.03787	0.07194	8.170×10^{-12}	6.832×10^{-9}	2.052×10^{-6}
Case-B	800 °C	0.007582	0.003791	0.01137	0.07816	0.7292	0.05790	0.112	1.100×10^{-9}	1.195×10^{-7}	1.758×10^{-5}

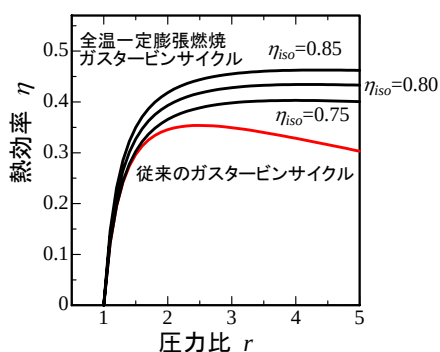
図 15 低温型 SOFC 排出ガス燃焼過程



(a) T-S 線図

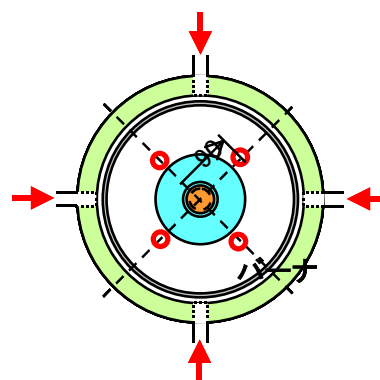


(a) タービン内燃焼の様子

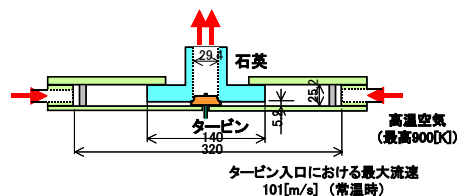


(b) 熱効率の圧力比依存性

図 16 等温膨張燃焼



(b) 上面図



(c) 側面図

図 17 等温膨張燃焼

7. タービン翼内における全温一定膨張燃焼

図 16 に示すように、マイクロガスタービンに全温一定過程を導入することにより、最高温度を上昇させることなく、熱効率の向上および圧力比の自由度の拡大を実現しうる。本研究では全温一定過程の実現を目指し、自動車用のターボチャージャーを用いて実験を行っている。内部が可視化できるように、図 17(b)、(c) に示すような石英ケーシングを自作した。空気は最高 900K まで加熱してタービンに導かれる。その際、全周流入となるように外周に 4 本の空気取り入れ口と整流用多孔体を設置している。バーナは石英ケーシング外側に部分予混合バーナを 4 箇所設け、火炎の先端がタービン内に取り込まれるような系で実験を行っている。図 17(a)はタービン内燃焼の様子を写真撮影したものである。なお、ターボチャージャーのコンプレッサ側は負荷吸収機としてそのまま利用している。

(2) 研究成果の今後期待される効果

本研究で主たるターゲットに掲げた 30-50kW 級の低温固体酸化物型燃料電池(SOFC)－マイクロガスタービン(MGT)ハイブリットシステムに組み込むべき燃焼器は、通常のガスタービン用燃焼器とは使用条件が大きく異なっており、満たすべき要求項目にも大きな違いがある。その第 1 の点は、定常運転時に着目すると、燃焼器入口温度が 650-850℃ と高いものの、空燃比が理論空燃比の約 30 倍となり、燃料が超希薄となる燃焼であること、第 2 は発電容量 5kW 級のガスタービンでは、タービンの小寸法化に整合する小寸法を維持する場合には、燃料の燃焼器内滞留時間が減少する上に、レイノルズ数が大きく低下して混合が不良となること、第 3 にこのシステムが居住区に分散電源として導入設置され、専門技術者の常時監視が期待できないことを考えると、火災の絶対安全性が確保されねばならず、かつ刺激性・毒性ガスのゼロエミッションを達成する必要があること、第 4 に分散電源としては、起動・立ち下げを含めて定常運転時と大きく異なる使用状況に曝されるため、入口温度ならびに出力負荷の変動にも堪えて、安定・高効率・毒性ガスの無排出を達成する必要があることなどである。本研究では、この要求を満足する燃焼器としてペン型マイクロ燃焼器を提案し、燃料の超希薄条件下における保炎、混合促進、完全燃焼の点で、その有効性を明らかにしてきた。この成果は、ターゲットとしたシステムの実用化に向けて、燃焼器の今後の技術展開に大いに貢献するものと考えられる。また、同じく触媒燃焼に関する研究成果は、入口温度ならびに出力負荷の変動にも堪えて、安定・高効率・毒性ガスの無排出を達成できる燃焼器構築のオプションとして、有望なものであることを強く示唆している。さらに、マイクロアクチュエータによる燃料流の動的加振による混合促進も、今後導入が期待できる新技術として成熟が期待されるものである。

また、等温燃焼を実現するための研究の一環として、タービン翼内全温一定燃焼とマイクロフレイムホルダーの開発を加速する有意義な研究成果を上げて来た。また、本研究ではこの他に、高温型大容量ガスタービン用の燃焼器に関する基礎研究でも目覚ましい成果を挙げて来た。上記のターゲットシステムでは、タービン入口温度が 900℃ 以下であるため NOx の排出については大きな問題がないが、タービン入口温度を 1000℃ 以上とする高温型システムでは、NOx の排出を抑制することが重要である。高温型大容量ガスタービン用燃焼器に関する基礎研究では、この点で有効な成果を提出した。

3. 4 超小型ガスタービンの研究

(1) 研究内容および成果

1. はじめに

本研究プロジェクトで対象とするマイクロガスタービンは、出力が 5kW 級である。これは、現在マイクロガスタービンの標準機的存在である Capstone Model 330 の 28kW と比べても数分の 1 に過ぎない。

このような出力範囲では、圧縮機やタービン部のローターは数 cm オーダーとなるため相対的にクリアランスが増大し、圧縮機効率やタービン効率が不可避免的に低下して、熱自立のマージンが減少する。また代表長さが小さくなって流れのレイノルズ数が低下するとともに曲率が強くなるため、従来から蓄積されてきた翼および流路に関する設計指針に基づいては十分な空気力学的性能が得られないということも予想される。さらに、超小型ガスタービンに課せられる制約は、このような小寸法に起因するものだけではなく、低温 SOFC を用いるハイブリッドシステムでは、タービン入口温度が低下するので、熱自立のマージンがより縮小してしまう。したがって、超小型ガスタービンでは効率向上が一層重要となり、信頼性の高い数値シミュレーションコードを開発し、厳しく精度を追求した設計計算を行えるようにすることが不可欠である。

こうした流体力学的な検討とともに、タービンを構成する諸要素に新技術を導入して、小型化に伴う性能低下を抑制することも重要である。すなわち、熱力学的見地からはタービン入口温度 (TIT) の高温化が必須条件であるが、マイクロガスタービンでは、構造的に複雑な膜冷却の導入は現実的でないので、タービン翼のセラミック化が考えられる選択肢の一つとなる。

また、現在のマイクロガスタービンでも既に 10 万 rpm のオーダーに達している軸回転数が、さらに高回転化することも考えられ、高性能かつメンテナンスフリーの軸受を開発する必要性は高い。

このような理由から、本研究プロジェクトでは以下に列挙した課題を設定し、それらを得意とするチームで分担した。

- ・マイクロガスタービン全体のイメージを具体化するための概念設計 (京都大学鈴木チーム)
- ・乱流モデル開発の第一段階として予測精度検証用基礎データを準備する DNS、小型化に伴う種々の影響を考慮した新しい乱流モデルの提案と精度検討、開発した乱流モデルによる実際のマイクロガスタービン内流れの計算 (名古屋工業大学長野チーム、東京大学笠木チーム、京都大学鈴木チーム)

- ・レイノルズ数低下による層流剥離の実験的解明（産業総合研究所筒井・濱チーム）
- ・層流剥離防止のための制御技術に関する基礎研究（同志社大学稲岡チーム）
- ・セラミックス製ブレード上への異物衝突による損傷試験（産業総合研究所筒井・濱チーム）
- ・超微細多孔体からの水蒸発を用いたハイブリッド軸受（京都大学吉田チーム）

以下では、これらの研究チームの研究概要を説明する。詳細は個々の研究成果報告書を参照されたい。

2. 概念設計

厳密な研究展開という意味では、タービンの各要素技術が確定した後に、タービン全体を設計する手順をとるべきとも考えられるが、最初におおよその具体的イメージを作り上げることも重要であるので、一部に従来知見

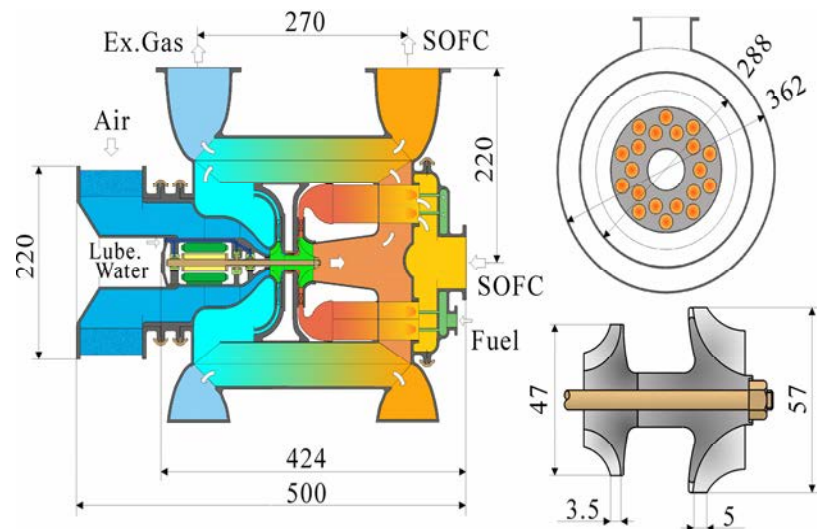


Fig. 1 Conceptual design of micro gas turbine

から外挿した情報も援用して概念設計を行った。Fig. 1 に示すマイクロガスタービンは、発電端出力 5.8 kW、回転数 160,000 rpm、圧力比 2.8、タービン入口温度 1000℃、再生器出口ガス温度 230℃である。圧縮機ローター直径は 47 mm、タービンローター直径は 57 mm である。燃焼器、再生熱交換器、軸受に、本プロジェクトで提案され研究進行中の新要素を組み込んでいるのが特徴である。

3. DNS・乱流モデルによる CFD・CHT

一般の圧縮機やタービン内の流れは、乱流状態であると考えられるが、Fig. 1 に示したように代表寸法が小さい場合、レイノルズ数が低下するため、粘性の影響が強くなって現象が層流的になる点に注意が必要である。

乱流あるいは乱流から層流に遷移する流れの予測は、時間平均した乱流モデルにより行うのが現実的であるが、本研究で対象とするようなマイクロガスタービンにおいて、従来の乱流モデルでは正確な予測が困難となる要因として、以下の 4 項目が挙げられる。

- 回転（遠心力・コリオリ力）の影響 : Fig. 2 (a)
- 大きな曲率の影響 : Fig. 2 (b)
- ローターとケーシングとの間のクリアランスや壁面の周方向運動の影響 : Fig. 2 (c)

(d) 圧縮性（圧縮・膨張）の影響

圧力比が 3 前後のマイクロガスタービンでは(d)の圧縮性の影響が非常に顕著であるが、入手し得る DNS データとの比較により乱流モデルの予測精度を着実に上げていく必然性から、現状では(a)～(c)の因子から着手している。これらは、ガスタービンに限らず今後のマイクロ化した流体機器全般の基礎研究としても重要で、かつ乗り越えるべきハードルも高いことから、3大学のチームで協力しながら研究を進めている。

回転が乱流に及ぼす影響について、基本的には、流れ方向と回転軸の組み合わせについて Fig. 3 中に示すような 3 通りがあり、実際の圧縮機やタービン内の流れでは、これらが合わさったものと考えることができる。そこでこれらの 3 通りの場合について、DNS データとの比較検討に基づき新たな乱流モデルの開発を進めている。Fig. 4 は長野チームによる結果の一例であり、DNS の結果と良好な一致が得られている。

このような基礎的検討を経て確立された高精度乱流モデルを、実際のガスタービン翼内流れの 3 次元流動解析に適用する試みも並行して進めている。現存の 75kW 級タービン翼に対して Fig. 5 に示す計算条件を行った結果、Fig. 6 から Fig. 8 に示すような結果が得られている。

本研究での最終目標は、開発した乱流モデルにより、流路形状を種々変化させた場合のコンプレッサ効率やタービン効率を明らかにし、設計条件に見合う流路形状の最適化を図ることである。

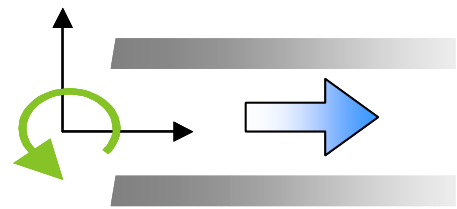


Fig. 2 (a) Effect of rotation

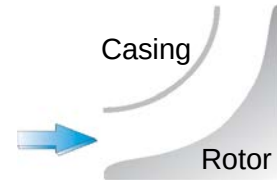


Fig. 2 (b) Effect of curvature

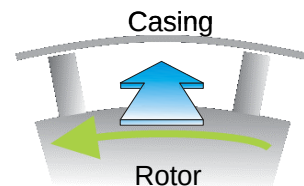


Fig. 2 (c) Effects of clearance and sliding motion of wall

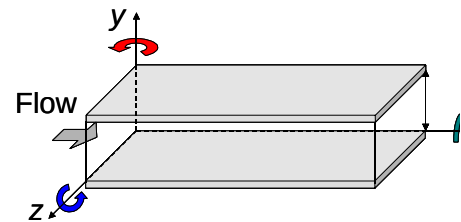


Fig. 3 Relationship between flow direction and rotating axis

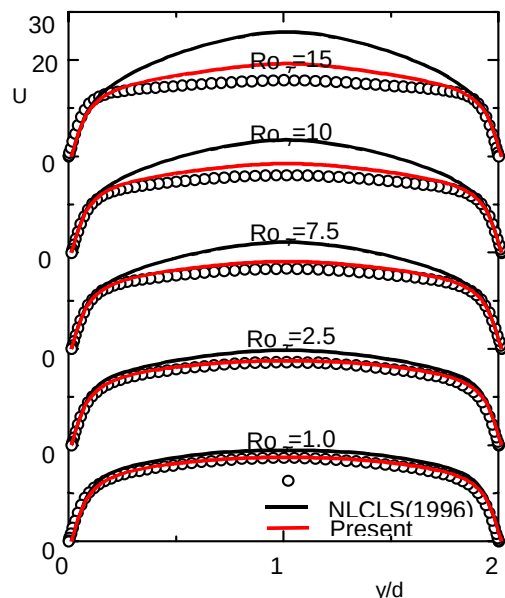


Fig. 4 Comparison of mean velocity by DNS and turbulence model under various rotating conditions

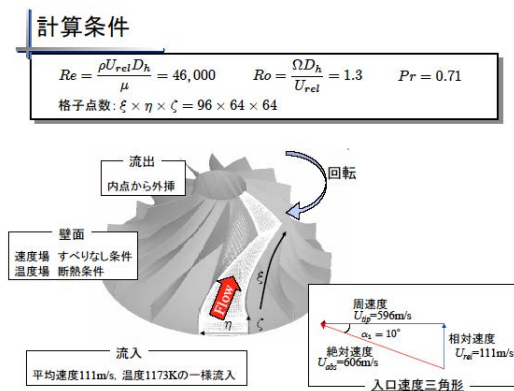


Fig. 5 Actual turbine rotor

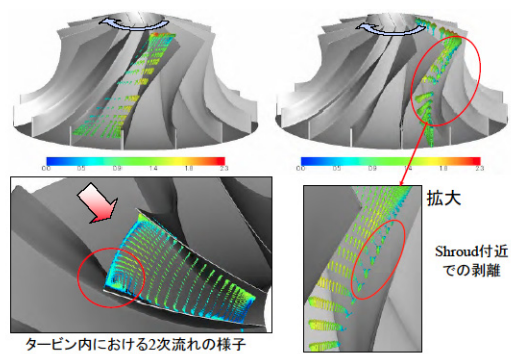


Fig. 6 Velocity vector

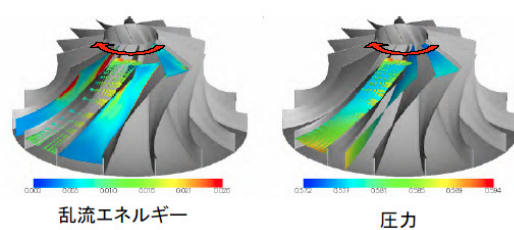


Fig. 7 Distributions of turbulence energy and pressure

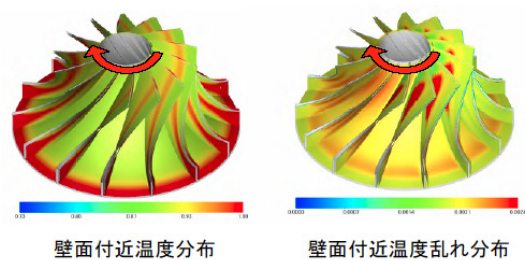


Fig. 8 Distributions of temperature a and temperature fluctuation on rotor wall

4. 剥離現象の計測と制御

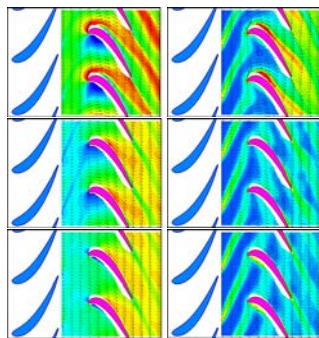
4.1 層流剥離によるタービン翼列の性能低下現象の解明

前述したように、マイクロガスタービンではタービン翼列の小型化によってレイノルズ数が低下する結果、流れの剥離や二次渦が発生しやすくなり、タービン翼列の空気力学的

高負荷状態
 $N = 50\%$
 $i = +32.7^\circ$

設計点状態
 $N = 100\%$
 $i = 0.0^\circ$

低負荷状態
 $N = 140\%$
 $i = -43.6^\circ$



性能が悪くなる。そこで、翼列の性能を改善する方法を検討するための基礎的知見を得るため、風洞実験から低レイノルズ数域での空気力学特性を調べている。Fig. 9は、レーザー流速計により流路内の速度測定が可能な軸流タービンを対象として、設計運転状態以外 (off-design) での流れを計測した結果である。特に高負荷状態では、翼前縁

Fig. 9 Velocity measurement between turbine blades

から大規模な剥離が発生する結果、性能低下が著しいことが明らかになっている。

4.2 はく離防止法の基礎研究

新技術の導入により、はく離を防止する方法についても検討している。そのための基礎研究として、はく離が発生する幾何的に最も単純な後ろ向きステップ流れを対象とし、熱流動制御の可能性について検討する実験を Fig. 10 に示す。本研究では、はく離制御用のデバイスとして電磁型ミニフラップを取り上げ、フラップの上下振動によってステップ後方のせん断層にかく乱を加えた場合の流動特性の変化を調べている。

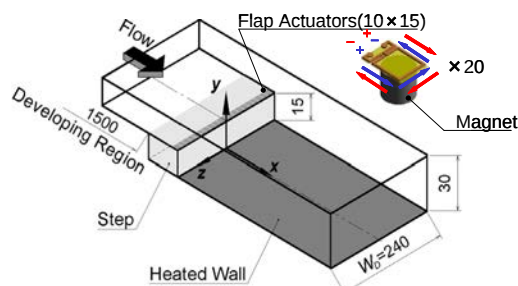


Fig. 10 Experimental apparatus for separation control

5. セラミックガスタービンの FOD（異物衝撃損傷）評価

ガスタービンの熱効率を向上させる代表的方法の一つとして、タービン入り口温度(TIT)を高くすることが挙げられる。現在、インコネルなどの耐熱合金が使用されているが、無冷却で使用できる TIT は高々1100℃程度である。一方、セラミックの場合は無冷却で1300℃以上の高温に耐えることができるが、脆性材料であるためエンジン内異物の衝突によって破損（foreign object damage: FOD）する危険性を有している。そこで、耐熱セラミックの耐 FOD 特性を把握することは設計上極めて重要となる。Fig. 11 に示すように、球状粒子が衝突した場合の衝撃応力を、理論的ならびに実験的に調べている。

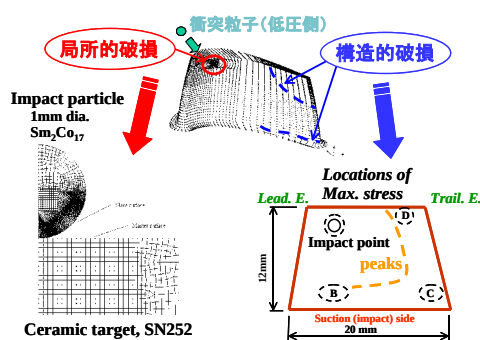


Fig. 11 Foreign object damage of ceramic blade

6. 軸受

Capstone Model 330 では、摩擦抵抗の小さい気体軸受を採用しメンテナンスフリーを実現している。しかし、気体軸受は、油軸受と比較して安定性で劣り、また動圧が十分で

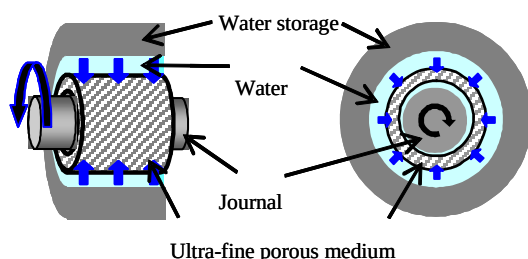


Fig. 12 Hybrid bearing with water evaporation from ultra-fine porous medium

ない起動・停止時には軸との接触といった欠点もある。そこで、このような問題点を克服する新しい軸受として、Fig. 12 に示すような超微細多孔体（孔径 $1\mu\text{m}$ 程度）からの水蒸気蒸発を用いた軸受を新たに提案し、その基はタービン部からの熱伝導で軸自体が 500°C を越える高温になるため、軸受の焼付きも懸念されるが、本軸受では蒸発潜熱による冷却作用も期待で礎特性を実験と理論の両面から

検討中である。この軸受では、動圧に加えて水蒸気蒸発による静圧も安定化力としてハイブリッドに作用することが特徴であり、また起動・停止時には水潤滑になるように制御することで軸と軸受の接触を防止できる可能性がある。また、マイクロガスタービンできる。

7. むすび

5kW 級の高性能マイクロガスタービン実現を目標として、ほぼ全要素について研究テーマを設定して、各チームで分担している状況を概説した。空気力学的な設計を最適化するための高精度乱流モデルの開発では困難が予想されたが、最終目標に向かって必要な各段階を経て前進を続けている。最終的には軸流タービンの実験から得られた知見も併せ、5kW 級に適した翼形状を提案したいと考えている。高温化のためのセラミック翼に関しては、現時点では高価という点は市場の変化を期待する側面が否定できないが、将来に向けた技術的な裏付けは本プロジェクトで押さえておきたい。いくつかの新技术の提案については未知の点が少なくないが、可能性を信じてさらに研究を進捗させたいと願っている。

(2) 研究成果の今後期待される効果

マイクロガスタービンとは、小型化に伴う不可避の効率低下が壁となってきた。本研究では、まず流体力学の一番の基礎に立ち返り、乱流場の正確な実験および精度の高い乱流モデルの開発を行ったことは、一見遠回りに見えるものの、これからの最適設計への貴重なデータとツールを提供したことになり、今後のブレークスルーへの確固とした一段階となることは間違いない。これらは、流体力学の純粋な学問的成果としても非常に価値あるものと考えている。また、タービンブレードのセラミック化はマイクロガスタービン性能向上の有力な選択肢の一つであり、その強度に関する実験結果を得たことも、セラミック化への貴重な指針を提供するものといえよう。また、空気軸受は、現在市場に出回っている第一世代のマイクロガスタービンで採用されているものの、一番ネックとなっている部分であり、新たなコンセプトに基づく蒸気を作動流体とするハイブリッド軸受のポテンシャルは高い。

3. 5 高性能小型再生熱交換器の研究

(1) 研究内容および成果

1. はじめに

固体酸化物形燃料電池(SOFC)とマイクロガスタービン(MGT)のハイブリッドシステムでは効率向上のため SOFC を昇圧して作動させる。そのためマイクロガスタービンは発電機としてのみならず空気の圧縮機としても重要な役割を担っている⁽¹⁾。圧縮された空気の温度を、タービン排気をもつ熱エネルギーを利用して上昇させること、すなわち熱再生をすることは、ハイブリッドシステムの高い効率を実現するために重要である。例えば図 1 は TIT が 1000℃で SOFC の平均電流密度が 300mA/cm² の場合に得られるシステム各所での温度である⁽²⁾。システム解析によればこのときのシステム全体の効率は圧力比 3 程度で最大となることがわかっている。同図から、圧縮機出口での圧縮空気温度は約 160℃であり、これが再生熱交換器通過後には約 730℃にまで上昇する。この熱再生を行うことでタービン排出ガスが持つ熱エネルギーが有効に利用され、システムのエネルギー効率が向上するのである。また、熱再生後の圧縮空気が SOFC に流入することを考えると、この位置での流体温度が SOFC のイオン伝導性を阻害するほど低いことは避けなければならない、この意味からもハイブリッドシステムにおいて再生熱交換器の温度効率を高くすることは重要である。さらに、図 2 は圧力比 3 で稼動するマイクロガスタービンの熱効率に及ぼす再生器温度効率の影響を示す。基準となる温度効率は 87%であり、マイクロガスタービンの熱効率を 5%向上させるためには、温度効率を 3.5%上昇させる必要があることがわかる。87%からの 3.5%の上昇は容易ではないが、同じ 5%の熱効率の向上を、TIT を上げることで達成するには、TIT の 250℃もの上昇が必要となることから、再生器の性能向上を目指す方が現実的である。

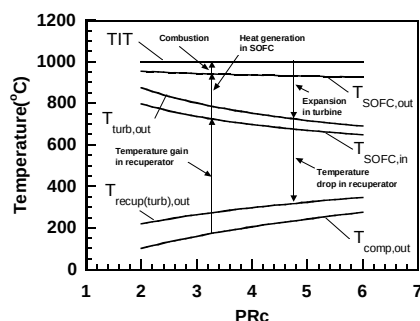


図 1 SOFC と再生熱交換器の入口・出口温度

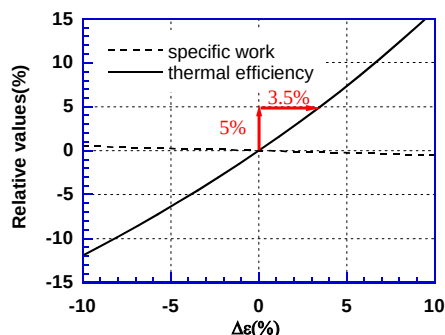


図 2 MGT 熱効率に及ぼす再生器温度効率の影響

以上のようにハイブリッドシステムで重要な役割をもつ再生熱交換器には、高い温度効率を低い圧力損失で達成すること以外にも、小型・軽量であること、低価格化につながる大量生産が可能な構造を持つことなどが要求される。既に実用化されている 20～100kW 級の MGT では、再生器としてプライマリサーフェス型もしくはプレートフィン型のレキュペレータが採用されており、ハイブリッドシステムにおいてもこれらが再生器の候補となる。

本プロジェクトでは、ハイブリッドシステム用再生熱交換器の高性能化の検討を行ってきた。以下ではこれまでに得られた検討結果について概説する。

2. プレートフィン型熱交換器

ハイブリッドシステムのシステム解析から求められる再生器の圧力損失や温度効率に対する条件を、既存のプレートフィン型熱交換器で満たすことは可能であるが、さらなる小型・軽量化、低コスト化など再生器には伝熱性能以外にも多くのことが求められる⁽³⁾。以下ではプレートフィン型熱交換器の高性能化のために本プロジェクトで行ってきた検討の概要を説明する。

スプリングフィン利用熱交換器

スプリング形状のフィン（以下、スプリングフィン）をもつプレートフィン型熱交換器を提案した。フィンとしてのスプリングの利用は、フィンのプレート面に対する拡大伝熱面としての効果と、流体が素線を通過する際に起こる流速分布の変化に伴う流体混合効果を期待するものである。また、大量生産されているスプリングをフィンに転用することで、フィンの形成コストを大幅に削減することが可能であるほか、スプリング自体の弾性の利用とスプリング素線の断面形状を工夫することも含めフィンとプレートの接触性を改善できれば、将来的にはロウ付けなしでの使用の可能性もでてくる。まずはスプリングフィンの性能を評価するために、熱伝達と圧力損失の計測を行い、スプリングフィンの有効性を実験的に検討した。

実験ではフィンを内部に設置した平行平板流路をテストセクション(幅 100mm、高さ 5.0mm、流れ方向長さ 50mm)とし、その壁面を等温加熱した。テストセクション前後での作動流体(空気)の温度差と圧力差を測定した。

フィンとして用いたスプリングの諸元を表 1 に示す。本実験ではスプリングをテストセクションに並べ、平板壁にロウ付けした。スプリングの軸を流れに対して平行に配置する方法 (case1) と直交して配置する方法 (case2) の二つの配置方法について実験を行った。図 3 は内部が見えるように壁面をアクリルで作成したテストセクション部であり、スプリングを case2 の方式で設置した様子である。流体は手前から奥へと流れる。またスプリングフィンの比較対象として、商用のオフセットフィン(アルミニウム製) について同様の実

験を行った。

スプリングフィンとオフセットフィンとの性能の比較を図4に示す。同一のポンプ動力 P で比較したときに、伝熱量 Q が大きいほど性能が高いと言えるため、グラフでは右側にシンボルがあるほど伝熱的に高性能であるといえる。フィンの総伝熱面積はオフセットフィンを 100 とした場合に、SP04、SP05、SP07 ではそれぞれ 54、65、88 である。テストセクションの大きさは一定であるので、それらの値はそのまま伝熱面密度の比でもある。スプリングフィンの方に注目すると、線径が大きくピッチ比の小さいものの方が性能はよい。これは伝熱面密度が大きいことによる。また、オフセットフィンとスプリングフィンの性能を比較すると、 P の値が比較的大きい領域で SP07 の Q の値がオフセットフィンのそれよりも大きく、この領域において SP07 はオフセットフィンより伝熱性能が高いことが分かる。前述の通り SP07 の伝熱面密度はオフセットフィンの 88%であり、また、オフセットフィンの材質がアルミニウムであることを考慮すると、これはスプリングフィンの高い熱伝達率を示す結果でもある。本研究での結果を参考に、さらに形状を最適化することで、低コストで高性能の熱交換器を実現できる可能性がある。

表1 スプリングフィンの諸元

Fins	Material	線径	ピッチ	ピッチ比
SP04	SUS304	0.4	1.9	4.9
SP05	SUS304	0.5	1.6	3.2
SP07	SUS304	0.7	1.4	2.0
オフセット	Aluminum	—	—	—

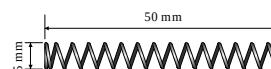


図3 テストセクション

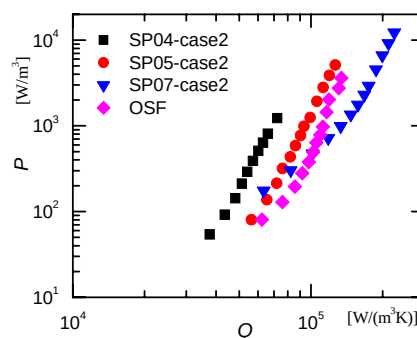


図4 スプリングフィン使用時の単位コア体積当たりポンプ動力と伝熱量の関係

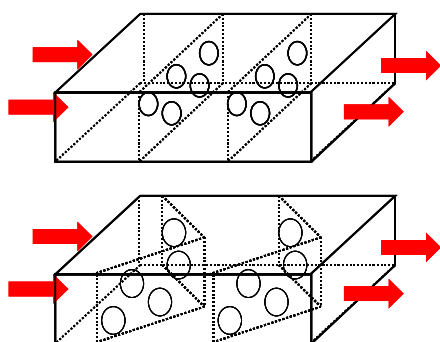


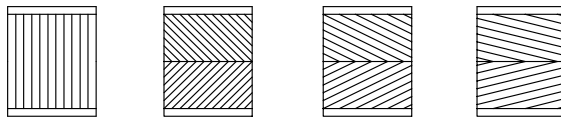
図5 孔空きフィン熱交換器の概念図

孔空きフィン型熱交換器

高い伝熱密度を有する新しい熱交換器として、強い乱流を有効に利用する孔空きフィンを用いた熱交換器を提案し、その基本的な伝熱特性を明らかにした。従来の孔空きフィン熱交換器との根本的な違いは流れの方向角度が、孔空きフィン面に対して垂直、あるいは、

表2 孔空きフィン諸元

Type	A, D, E, F	B	C
Perforated fin			
Hole diameter d	2.0mm	1.0mm	1.0mm
Hole pitch p	5.0mm	1.5mm	1.8mm
Open area ratio ϕ	25.0%	40.2%	22.6%



type A, B, C type D type E type F
(a) $\theta = 90^\circ$ (b) $\theta = 45^\circ$ (c) $\theta = 30^\circ$ (d) $\theta = 15^\circ$

図6 フィン傾き角.

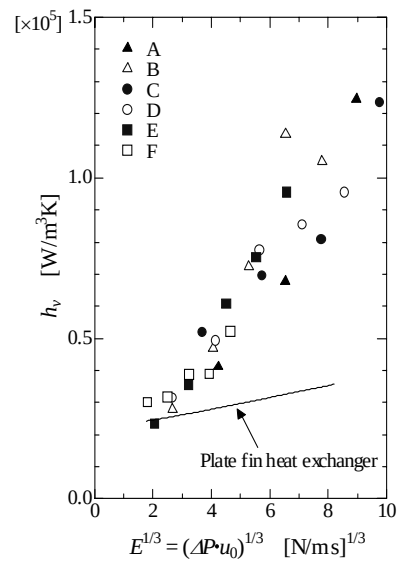


図7 孔空きフィンの伝熱性能評価

傾斜であることである。すなわち、図5に示すように、作動流体は孔空きフィンに対して垂直、あるいは、傾斜角を持って流入する。その結果、作動流体はフィン孔を不規則に通抜け、孔を通過した流れは渦を生成し、また、下流のフィン面への衝突噴流となる。

表2に本研究用に特製した孔空きプレートフィンをもとめる。異なる孔径と孔ピッチからなる3種類のフィンを用意した。さらに、図6に示すように、孔直径 d が2mmと最大である孔空きフィンを用いて、テストコアの中心線について対称となるようにしながら、フィン面への傾斜角 θ を 90° 、 45° 、 30° 、 15° に設定したものを用意し、それぞれ、タイプA、D、E、Fとした。フィン傾斜角が90度に固定されたタイプA、B、Cでは孔径とピッチの影響が、またタイプAとCとの比較では孔空き率 f がほぼ等しいため孔径 d の影響が、さらに孔径 d が等しいタイプBとCとの比較では孔空き率 f の影響がそれぞれ求められる。幅90mm、高さ38.6mm、流路方向長さ L は100mmで、10層からなるテストコアを作成し、テストコア前後での圧力損失を測定するとともに、伝熱性能を改良シングルブロー法による非定常実験で評価し、従来のプレートフィン熱交換器と比較した。図7に孔空きフィン型熱交換器と従来のプレートフィン型熱交換器の単位体積当たりの熱伝達率の比較を示す。 E はポンプ動力である。実線で表された従来のプレートフィン型熱交換器の伝熱性能と比較して、孔空きフィン型の性能は、ポンプ動力の増加につれて著しく向上しており、マイクロガスタービン用のよりコンパクトな熱交換器の実現につながるものである。

3. プライマリサーフェス型熱交換器

ハイブリッドシステムの再生熱交換器として要求される高い温度効率や低い圧力損失を

実現することは、既存のプレートフィン型熱交換器を用いることで十分可能であるものの、分散型エネルギーシステムとして利用されることを念頭に置くと、低コスト化につながる大量生産にむく構造を再生熱交換器に持たせることができれば大きな利点である。二次伝熱面を利用するプレートフィン型熱交換器では、フィンと一次伝熱面の接触熱抵抗を低減する目的で、両者のロウ付けを行う。本システムのような高温の熱交換器の場合には、高価なニッケル系のロウ付けが必要となり、熱交換器の低コスト化の面で課題となる。一方、二次伝熱面を用いず一次伝熱面のみによって熱交換を行うプライマリサーフェス型（プレート型）の熱交換器は、ロウ付けを必要とせず、また連続的な大量生産の可能性もあるため、本システムの再生器として有力な候補と言える。

プライマリサーフェス型熱交換器の性能はその伝熱面形状によるところが大きい。最も基本的な幾何形状である積層平板型熱交換器については、現実的な平板間隔を採用すると所要の温度効率を達成するために要する再生器コアのサイズが非常に大きくなってしまう^③。ただしその時の圧力損失は非常に小さいので、結局、プライマリサーフェス型では、プレート形状を最適化することで、要求を満足する範囲内で圧力損失の増大を許容しつつ熱貫流率を増大させ、コアを小さくすることが課題となる。以下ではプライマリサーフェス型熱交換器の高性能化のために本プロジェクトで行った検討の概要と結果を説明する。

渦構造を用いた超コンパクト熱交換器

再生熱交換器のコンパクト化・高性能化へ向け、東京大学グループのアプローチは次のとおりである。即ち、システム要求に合致した熱交換器性能の評価方法を確立すること、及び、それに基づいたシステムからの要請を実現するための新しい伝熱促進コンセプトを提案することを2つの柱とした。前者としては、同一システム効率を得るための熱交換器伝熱面積を評価することでコンパクト化の指標を得ることを主眼とし、また、後者としては、渦構造に伴う強度の2次流れを誘起することにより剥離を抑制しつつ伝熱の促進を図ることを目的として、斜め波状壁を用いた流路形状を提案した。

まず提案する熱交換器との比較対象として、矩形波状に折り曲げたプレートを積層することで流路を形成し、高温・低温の流体が対向する対向流型の熱交換器の構成を考え、これを従来型（Square Duct 熱交換器）と呼ぶことにする。ただしダクト幅： $d=2\text{mm}$ 、板厚： $t=0.2\text{mm}$ とする。新提案型（Hyper Micro Heat Exchanger と名付ける）では、1 流路

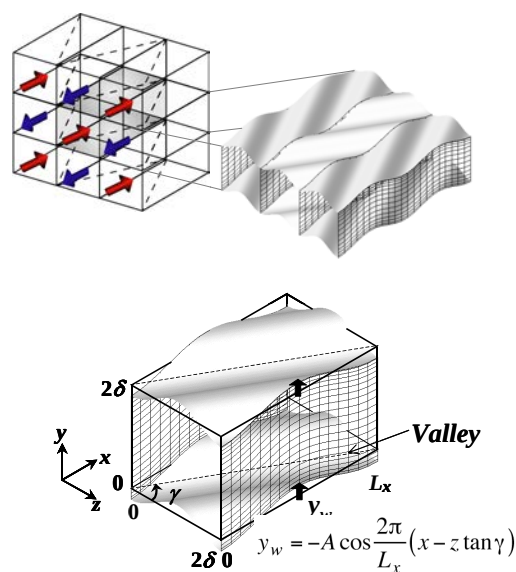


図8 Hyper Micro Heat Exchanger の概念図

あたりの形状は図 8 に示すように斜め波状壁（上下壁）と平滑面（側壁）により囲まれた形状とする。この流路形状をどう実現するかは懸案事項ではあるが、波状に折り曲げたプレートをプレス加工したものを積層することを考えている。新提案型のキーコンセプトは「剥離を抑えて、2 次流れを促進する」ということであり、本コンセプトを実現する流路構造として、上記の流路形状を考えるものである。このとき、DNS を用いた数値解析により、流体側から見て斜め波状壁の山の部分で生じる強い渦度により強度の 2 次流れが誘起され、側壁上の熱伝達が大きく促進されることがわかった。また図 9 に見られるとおり、上下壁で逆方向の渦構造が誘起される結果、一方の平滑面の熱伝達が著しく促進される結果が得られた。提案した流路では、流れ場は剥離が生じにくい構造となっており、圧力損失の上昇を上回る熱伝達の促進が達成された。例えば壁面形状を表すパラメータが、 $A = 0.25\delta$ 、 $\gamma = 50^\circ$ のとき、Square Duct 熱交換器に比べ、Nu 数：2.8 倍（ fRe ：2.3 倍、 j/f ：1.2 倍）という結果が得られた。

従来型（Square Duct 熱交換器：■印）と新提案型（Hyper Micro Heat Exchanger：★印）について同一システム効率時の熱交換器伝熱面積の比較を行った結果を図 1 0 に示す。上図は設定したシステム(出力 30kW)での、圧力損失と温度効率に対するシステム効率の等値線である。このとき、上図にプロットした等値線上（システム効率：約 66.2%）での伝熱面積の等値線（単位： m^2 ）を下図に示す。従来型（■）に比べ新提案型（★）では、伝熱面積が 1/3 に削減できることがわかった。

ディンプル/プロトルージョンの利用

プライマリサーフェス型熱交換器の伝熱面形状として、プレートにディンプル(凹部)とプロトルージョン(凸部)を配置する場合について検討を行った。これは、凹凸部を設けることによる伝熱面密度の増大と、ディンプルとプロトルージョンの配置を最適化すること

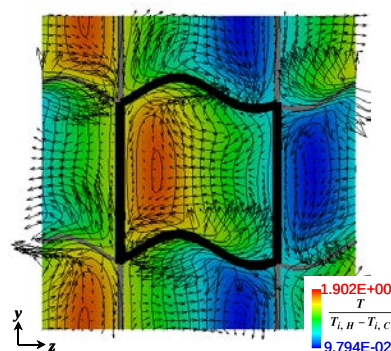


図 9 速度ベクトル線図と温度場

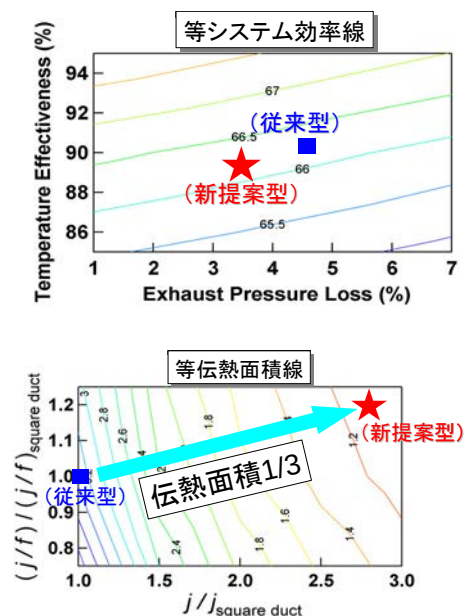


図 1 0 新提案型熱交換器の評価

で、プロトルージョン部を迂回する流れがディンプル内の流体を掃き出す効果とを期待するものである。加工を施したプレートの概要を図 1 1 に示す。凹凸部の直径、張出し高さ、隣接する凹凸部の距離、凹凸の配置などがパラメータとなる。本提案の有効性を確認するために同図に示すような伝熱板を実際に作成し伝熱実験を行った。実験では図 1 2 に示すように、伝熱板を挟んでその両側に流路を作成し、そこにそれぞれ高温流体と低温流体を対向流で流した。テストセクション入口・出口での流体バルク温度を測定することでテストセクション部での両流体の熱交換量を求め、そこから熱通過率を算出した。得られた熱通過率とレイノルズ数との関係を図 1 3 に示す。図中の値は、伝熱版が単純平板である場合の理論値で規格化されている。また TypeA～C は図 1 1 中に示された 3 種類の凹凸部配置に対応する。いずれの凹凸配置でも、単純平板よりは熱通過率が大きくなること、特に

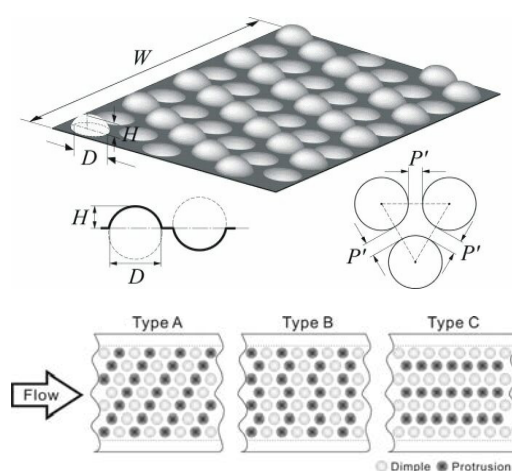


図 1 1 ディンプル/プロトルージョン設置板

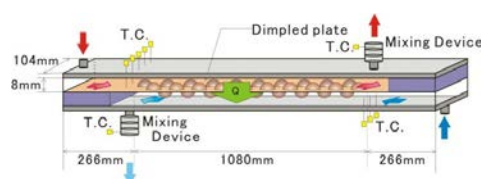


図 1 2 伝熱実験のテストセクション部概要

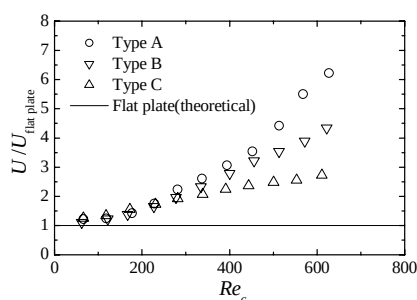


図 1 3 熱通過率のレイノルズ数依存性

レイノルズ数の値が大きくなるほどその傾向が顕著になることがわかる。凹凸の配置の影響はレイノルズ数が小さい場合には見られないが、 $Re > 250$ では 3 つの凹凸板の間には顕著な差異が見られ、凹凸板が有効となるレイノルズ数息では凹凸の配置がその性能に大きな影響を与えることが確認された。図は割愛するが圧力損失を考慮した検討の結果、検討した中では TypeA が最も良好な性能を示した。

上述のとおり幾何パラメータが非常に多い系であるため、それらの影響を実験的検討のみで明らかにすることは困難であり、数値解析による検討を併せて行った。数値解析では幾何形状の周期性から熱流動場の周期性を仮定し、最小繰返し範囲を計算領域とした。図 1 4 は最も基

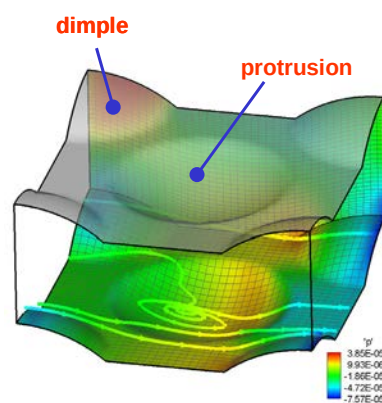


図 1 4 ディンプル/プロトルージョン利用 PS 型熱交換器内熱流動解析の一例

礎的な配列として凹凸がインラインに並んだ場合の計算領域とその計算結果の一例である。凹凸がインラインに並びさらにそれが主流方向に平行である場合には、平板に比しても伝熱性能は向上せず場合によってはそれを下回る結果も得られており、ディンプル/プロトルーションを利用する場合には、それらの配置がその性能に大きな影響を及ぼすことがわかった。

以上のほかにも、菱形管内乱流の伝熱・摩擦特性、拡大縮小流路内流れの非定常化と伝熱特性、多孔質フィンの特性評価、プライマリサーフェス型熱交換器におけるプレート内部熱抵抗の影響など本プロジェクトでは再生熱交換器に関する重点的な検討を行った。

参考文献

- (1) K. Suzuki, K. Teshima and J. H. Kim, 2000, Solid Oxide Fuel Cell and Micro Gas Turbine Hybrid Cycle for a Distributed Energy Generation System, Proceedings of the 4th JSME-KSME Thermal Engineering Conference.
- (2) K. Suzuki, H. Iwai, J.H. Kim, P.W. Li and K. Teshima, 2002, Solid Oxide Fuel Cell and Micro Gas Turbine Hybrid Cycle and related Fluid Flow and Heat Transfer, Proc. 12th Int. Heat Transfer Conference.
- (3) 岩井裕, 小田豊, 巽和也, 鈴木健二郎, マイクロガスタービン用再生熱交換器高性能化の検討, 「超小型ガスタービン・高度分散型エネルギーシステム」第 1 回公開研究成果発表会資料集, 2002.

(2) 研究成果の今後期待される効果

ハイブリッドシステム用の再生熱交換器には、高い温度効率を低い圧力損失で達成するという相反する要求を高い次元で達成する以外にも、小型であること、軽量であること、低価格化につながる大量生産が可能な構造を持つことなどが求められる。タービン排熱の有効利用や、燃料電池に流入する流体温度を適切に制御することなど、システム上重要な役割を担う装置である。本プロジェクトでは、これまでにない新しい発想の熱交換器の基礎形態を複数提案し、それらの有効性を理論と実験で検討することを主に進めてきた。その結果、提案したもののうちいくつかが既存の商用熱交換器に比して有望であることが確認され、一部については特許の出願を行った。本プロジェクトではハイブリッドシステムを念頭に新しい熱交換器を提案したが、その結果は決してハイブリッドシステムに限定されるものではなく、高性能熱交換器を必要とする各種熱機器への応用が可能である。

3. 6 排熱回収と吸収式冷凍機の研究

(1) 研究内容および成果

1. 緒 論

近年、分散型エネルギーシステムの重要性が明らかとなりつつある⁽¹⁾。これら分散型電源の有効性を強調する場合、まず廃熱を有効利用できることが長所として挙げられる。集中型のパワープラントでは、廃熱を長距離輸送できないため、35～40%のエネルギー効率しか得られない。一方単純なガスコージェネレーションシステムのような変換効率の低いシステムにおいてさえ、熱利用することでエネルギー効率を向上させることができるため、民生分野のエネルギーシステムとして普及しつつある。

このことは民生分野のエネルギー利用形態に深く関連する。すなわち民生分野においては、業務部門で約 40%、家庭部門で約 60%が熱エネルギーあるいは熱エネルギーでまかなえるエネルギーであるという統計的事実がある⁽²⁾。民生分野が車を除いても我が国の消費エネルギーの約 3 分の 1 に届かんとする近年の事情を考えると、廃熱利用がこれからのエネルギー対策において、いかに重要であるかがわかる。

民生分野で消費されている熱エネルギーの多くは、冷暖房および給湯である。温熱に関しては、ボイラーを用いて直接的に熱供給することが可能であるが、冷熱に関しては、適当なヒートポンプを介在させることが必要である。中でも我が国においては、独自技術を発展させてきた経緯と実績がある吸収冷凍機が広く用いられている⁽³⁾。また廃熱利用機器として多くの研究がなされている上に、3 重効用化による高効率化に関しての国家プロジェクトが推進されており、近未来においても有望な廃熱利用機器であると考えられる。

本研究では、次世代分散型エネルギーシステムとして期待されている。30kW 級超小型マイクロガスタービン(Micro Gas Turbine: MGT)と固体酸化物型燃料電池(Solid Oxide Fuel Cell: SOFC)を組み合わせたハイブリッド分散型エネルギーシステムの廃熱利用機器として、多重効用化吸収冷凍機を取り上げ、その有効性について検討する。なお、本研究では当初従来提案されていたようなボトムリングとしての熱利用(Terminal Wasted Heat Utilization: TWHU)について検討していたが、検討の過程で、MGT/SOFC ハイブリッドシステム内の中間位置に、熱利用システム組み込む中間廃熱利用システム(Intermediate Wasted Heat Utilization: IWHU)が有効であることがわかった。本稿ではその経緯とともに結果を議論する。

また、実用化のための最も重要なポイントとして、製造コストの低減が挙げられる^{(4)・(6)}。製造コストは、機器の重量と密接な関係があるため、コストの低減には、機器の小型化・軽量化を図らなければならない。小型化の場合には空冷、メンテナンスフリー、ヒートポ

ンプ化を併せて考えなければならないと同時に、いっそうの性能の向上化が望ましい。

そこで本研究では、コンパクトな小型熱交換器の開発を目的として、円管群の最適配列の検討や、吸収器の表面積が拡大できる蛇腹形熱交換器に注目した研究を行った。その成果についても併せて述べる。

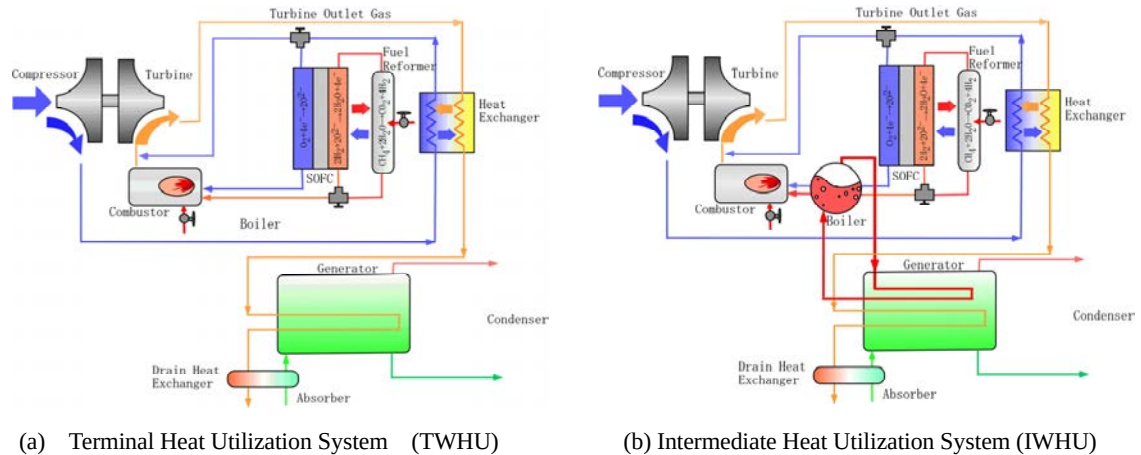


Fig. 1 Wasted Heat Utilization of Hybrid Combination System of Micro Gas Turbine (MGT) and Solid Oxide Fuel Cell(SOFC)

2. 解析対象システム

本節では、中間廃熱利用の有効性について検討した解析対象について解説する。

従来廃熱利用はシステムのボトムリングとして行うもの（Terminal Wasted Heat Utilization: TWHU）と考えられており、システムの終端部において熱回収を行っていた。本研究においても当初終端部に熱回収用ボイラーを設置し、その熱を利用するシステムについて解析を行った。図 1 (a)がそれである。本システムでは、まず固体酸化物型燃料電池（SOFC）に燃料を供給して 25kW の発電を行う。その排気中の未燃焼燃料分をマイクロガスタービン上流の燃焼器に供給して燃焼させ、同時にマイクロガスタービンに供給するガス温度を調節する。マイクロガスタービン入り口温度を調節するのに必要であれば、新たな燃料を燃焼器に供給する。ガスタービンでは 5kW の電力が得られ、SOFC 分と併せて 30kW となる。ガスタービン下流の排気ガスは、圧縮空気と熱交換を行った後、大気圧状態で排気される。その排気ガスの熱を利用して、吸収冷凍機の再生器へ熱供給を行い、低濃度臭化リチウム(LiBr)溶液の再生を行うシステムである。

しかしながら後に述べるように、このシステムでは、吸収冷凍機の多重効用化のメリットが損なわれることが明らかとなったため、本研究では廃熱回収用ボイラーを、燃料電池(SOFC)とマイクロガスタービン(MGT)の中間位置に置くシステム (Intermediate Wasted Heat Utilization: IWHU) を考案した (図 1 (b))。本稿ではこの中間廃熱利用システムについて詳細に検討する。

3. 多重効用吸収冷凍機

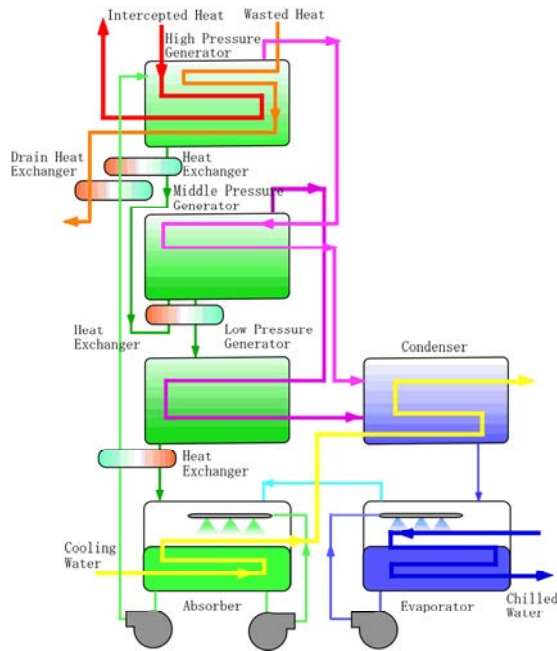


Fig. 2 Triple Effect Absorption Chiller

吸収冷凍機は廃熱利用機器として注目されてきたが、成績係数（Coefficient of Efficiency: COP）が高くはないため、十分に普及されていない。しかしながら、近年の多重熱利用（多重効用化）の推進によって、高い成績係数が期待されるようになり、分散型エネルギー供給システムのエネルギー利用率を向上させる機器として期待されている。現行いまだ三重効用吸収冷凍機は市場には投入されてはいないものの、各冷凍機メーカーが挙って開発しており、極短い将来に商品化されるものと思われる。その場合には1.6以上のCOPとなるものと考えられており、投入廃熱量以上の冷熱が生成されるようになる。

なお、近年調湿型の廃熱利用空調機器が話題となっているが、高温環境下での性能低下および低COPの問題があり、現状では多重効用吸収冷凍機が有用であると判断される。ここでは、効用数を二重、三重とした場合の吸収冷凍機を組み込んだ廃熱利用システムについて検討する。

Table 1 Computatinal Conditions

Chilled water	Inlet temperature	285K	Outlet temperature	280K
Coolant water	Inlet temperature	305K	Flow rate	5000kg/h
Pressure in high pressure generator		$4.0 \times 10^5 \text{Pa}$		
Pressure in middle pressure generator		$1.0 \times 10^5 \text{Pa}$		
Pressure in condenser		$0.1 \times 10^5 \text{Pa}$		
Temperature in evaporator		278K		
Wasted heat	Inlet temperature	585.7K	Outlet temperature	358K
	Flow rate	124kg/h		
Solution circulation ratio		12		
Strong solution concentration		63wt%		
Heat recovery ratio		1.0		

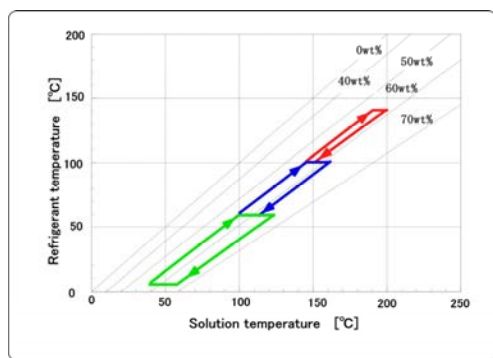


Fig.3 Dewling Diagram

図 2 に三重効用吸収冷凍機の概略を示す。三重効用冷凍機は高温・中温・低温の 3 つの再生器を有し、それぞれの高温側の再生器から排出される蒸気を三重に利用する。再生のフローを大別して、高温側から順に低濃度 LiBr 溶液を再生するシリーズ型、低温側から再生するリバーstype、溶液をそれぞれの再生器に分岐させて再生するパラレル型があるが、図はシリーズ型のものである。またここでは MGT/SOFC システム

の廃熱は、高温再生および低濃度 LiBr 溶液の昇温に利用する。二重効用、単効用のシステムでは、再生器がそれぞれ 2 つと 1 つであって、図 3 に示すディーリング線図上では高压側の部分が少ないシステムである。

4. 解析手法および条件

MGT/SOFC システムの解析については、別稿にて解説されているのでここでは省略する。吸収冷凍機のシステム解析は、その解析結果から得られる廃熱を高温再生器および低濃度 LiBr 溶液の昇温に用いる。詳細に述べると、中間廃熱を利用する場合には、SOFC 下流の位置に設けた高压ボイラーからの加圧蒸気が高温再生器に投入されると考え、蒸気の潜熱を高温再生器に投じたのち、ボイラーに返されるが、MGT/SOFC の終端廃熱は、再生器で顕熱を投じられ後に、ドレイン熱交換器において低濃度溶液の昇温に用いられる。中間廃熱を利用しない従来型の廃熱利用に関しては、終端廃熱のみが高温再生器に投入され、その後低濃度溶液の昇温に用いられるものとする。

表 1 に解析条件をまとめて示す。解析は各要素のエネルギー収支および物質収支の式に、LiBr 溶液および水の状態式から求めた。解析手法は、Asano et al⁽⁷⁾、Xu et al⁽⁸⁾、⁽⁹⁾、尹ら⁽¹⁰⁾、小島ら⁽¹¹⁾の検討手法を参考にした。

5. プレート型吸収器の伝熱実験

次に、吸収器のコンパクト性向上に対して行った蛇腹形流路を用いた吸収器について説明する。

図 4 に垂直平板を用いた縦型流下液膜式吸収器の概略を示す。蛇腹形状を構成する山ひだの数を 7 として、山ピッチを 5~15mm に変更して検討した。さらに、吸収器の表面効果を検討するため、表面加工なしの平滑面と、表面にメッシュ 24 番のステンレス金網を直に圧接した拡大面の四種類を用意した。吸収溶液、冷媒および冷却水の流量、温度などの実験条件を表 1 に示す。なお、詳細な実験手法については別報を参照いただきたい。

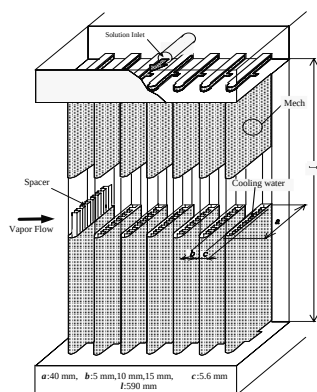


Table. 1 Specification of experimental conditions

Pressure (mm Hg)		6.5
Refrigerant		Water
Solution	LiBr aq	
	Inlet Concentration (mass %)	60.0
	Inlet Temp. (C)	47.0
	Film Flow Rate (kg/ms)	0.07~0.037
Cooling Water	Inlet Temp. (C)	25.0
	Mass Flow Rate (kg/s)	0.21

Fig. 4 Absorber with Accordion Pleated Flow Path

6. システム解析結果および考察

まず従来の末端廃熱利用型システムに関しての結果について検討する。図5に末端廃熱を利用した場合の吸収冷凍機の効用数を変化させたときに得られる利用廃熱および冷熱を示す。末端廃熱を利用する場合には、MGT/SOFC システムの排気ガスから顕熱を得て、溶液の再生を行う。その場合、効用数が増加するにしたがって、排気ガス温度と高温再生器の温度差が小さくなるため、効用数が大きくなるに従って、溶液再生に利用可能な廃熱量は図のように低下する。したがって、効用数が増加するにしたがって、COP は増加するものの、得られる冷熱には大きな差異は生じず、特に三重効用と二重効用の差異はほとんどない。したがって、廃熱の温度レベルが大きい場合には、効用数を上げて、有効利用できる廃熱量が低下するので、多重効用化は有効ではないことがわかる、これが、本研究で従来用いられてきた末端廃熱利用型システムを採用せず、新たな廃熱利用システムを提案する理由である。

そこで図1(b)で示した SOFC の下流域における高レベルの廃熱を利用することを考える。SOFC 下流では 900℃の廃熱が得られる。また排気ガス中には未燃焼水素や一酸化炭素が含まれており、その下流域に燃焼器を設け、これを燃焼させる必要がある。その下流には MGT があり、その材料強度を考えると、より低い TIT が必要となる。したがってある程度燃焼器下流の排気ガスを冷却する必要が生ずる。その冷却にコンプレッサーからの空気を利用することが考えられているが、SOFC に下流において廃熱回収を行い、吸収冷凍機の再生器に投入すれば、その必要がなくなると考えられ、有効にエネルギーを利用できると期待される。

図6に示したのは、SOFC 下流で熱回収をした場合に、回収した熱量に対する、TIT を 900℃とするために必要な追加燃料モル量を示したものである。図より、回収熱量が 7.8kW までは、追加燃料は必要ではなく、逆に空気による排気ガスの冷却が必要である。一方回収熱量が 7.8kW 以上では TIT を 900℃まで昇温するのに追加の燃料が必要となる。

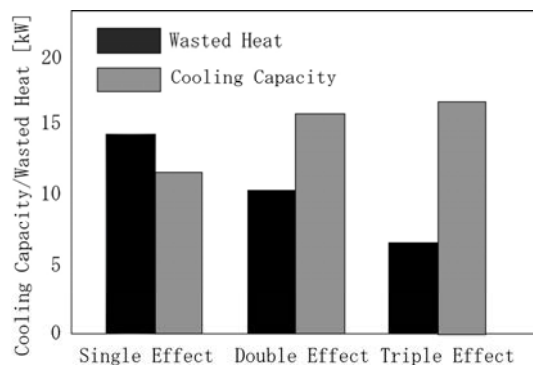


Fig. 5 Utilized Wasted Heat and Cooling Capacity

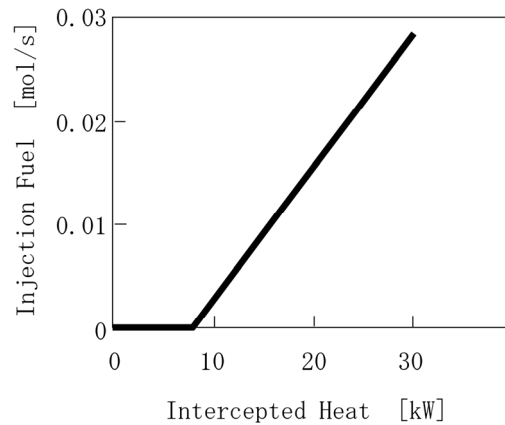


Fig. 6 Additional Injection Fuel

これら回収した中間廃熱を、ボイラーを介して吸収器に投入した場合の結果を図 7 に示す。ここで **COP** は、高温再生器に投入した熱量とドレイン熱交換器で低濃度 **LiBr** 溶液を昇温させるのに使用した熱量の合計に対する、得られた冷熱量で定義した。また、図で習慣廃熱回収量が 0 のときは、従来の終端廃熱利用システムに対応する。図よりわかるように、単効用および二重効用の場合には、高温再生器に十分な熱量を投入できるので、**COP** は中間廃熱回収量に大きくは異存しない。一方三重効用の場合には、高温再生器の温度が高いため、再生器における熱回収量よりもむしろドレイン熱交換器での熱回収量が多い。

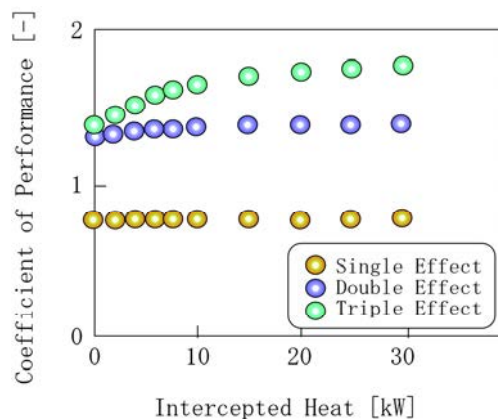


Fig. 7 Coefficient of Performance

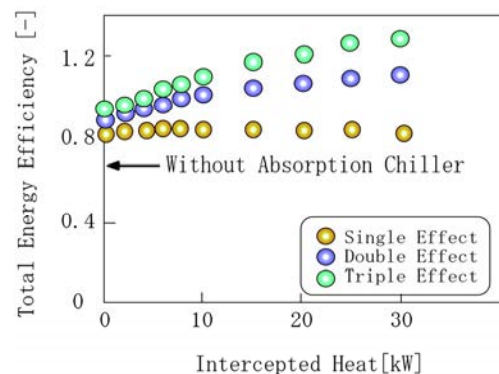


Fig. 8 Total Energy Efficiency

しかしながら、実質上の再生量は、再生器に投入される熱量によって決まるので、結果的に得られる冷熱量が小さく、そのために中間廃熱回収量が小さい場合には、**COP** は小さくなっている。

図 8 にエネルギー利用率を示す。ここでエネルギー利用率は、**SOFC** に投入した燃料および追加燃料の燃焼熱に対する、**SOFC** と **MGT** で得られた発電量に吸収冷凍機で得られた冷熱量を合わせたもので定義した。図よりわかるように、終端廃熱利用システムでは、得られる冷熱が小さいため、エネルギー利用率は多重効用吸収冷凍機を導入しても大きくは増加しないが、中間廃熱を利用する場合には、例えば **TIT** 温度の昇温のために燃料追加を行っても、大きなエネルギー利用率が得られる。特に三重効用の場合、中間廃熱回収量が

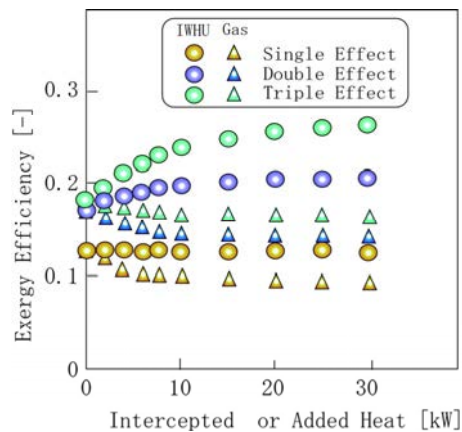


Fig. 9 Exergy Efficiency

大きい程、エネルギー利用率が増加しており、中間廃熱利用には多重効用化が有効であることがわかる。

図 9 には、中間廃熱を利用した吸収冷凍機と、同じ熱を再生器にメタンガスの燃焼で与えた、いわゆるガス炊き式の吸収冷凍機とのエクセルギー効率の比較を示す。エクセルギー効率は再生器に投入したエクセルギーに対する得られた冷熱エクセルギーの比で定義した。また、ガス炊き方式においても MGT/SOFC の末端廃熱を利用していると想定した。

図より、ガス炊きで行う場合のエクセルギー効率は投入エネルギーを増やすことで、燃焼に伴う損失が増大するため、徐々に低下する。一方、中間廃熱を利用した場合には吸収冷凍機の効率が向上することで多重効用化した場合には、高いエクセルギー効率が得られることがわかる。

以上のことから、廃熱回収は回収機器によっては、従来考えられていたような終端廃熱利用型のシステムより、適切な廃熱回収位置を想定したシステム構築による方が有利である場合が存在することがわかる。

7. プレート形熱交換機の最適設計

図 10 (a)の単孔供給ノズルの場合、溶液は出口部直前から筋状の流れを保って流下し、流下途中で液膜状の流れに変わり更に流下すると、その距離を延ばす毎に広がりが増した。伝熱面は予め凝縮水で濡らしてあるが、液膜はある程度までしか広がらない。筋状流れの一部が、表面上を左右に揺れ動く様子が観察された。この揺動により、表面上の濡れ面積が増大した。伝熱面の中央で、筋状の流れは、導入した蒸気側へ大きく偏流する傾向が強く顕れた。そのため、伝熱面の両側の流れが山側で合流し、一つの流れとなって流下した。スリット部にメッシュを詰めて分配器とした場合の流動様相が図 10 (b)である。伝熱面上部の表面はよく濡れるが、溶液の流れが蒸気の流入方向へ偏流するため、伝熱面の中ほどから濡れ面積は広がらなかった。

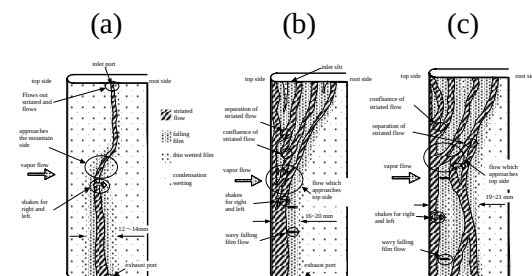


Fig.10 Flow behavior of falling film

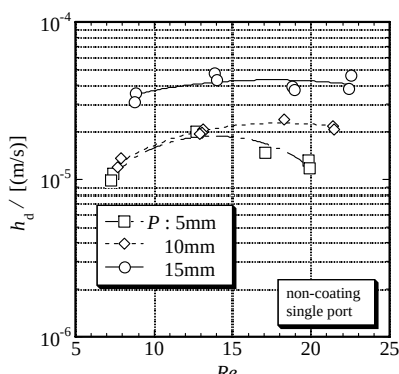


Fig. 11 Mass Transfer Characteristics

図 10 (c)に伝熱面の濡れ性を光触媒効果で改善する目的で表面に酸化チタンを塗布した場合の溶液の流動状況を示す。図 10 (b)の塗布していない場合、伝熱面の中ほどに液膜状の流れを形成し、溶液が流下する方向に液膜が広がり、流れが導入蒸気に引き寄せられる現象もこの位置で観察された。これに対し、光触媒を塗布した表面は溶液の流入直後に流れの様相は液膜状になり、伝熱面の山側へ偏流して流下した。溶液の流れが低圧蒸気に強く引き寄せられる現象が強く顕れた。伝熱面の上部において、すでに山側への偏流が観察された。塗布なしと比べると、筋状の流れは左右に揺れ動く様子が激しくなったため、濡れ面積が大きくなると考えられる。

図 11 に、溶液の膜レイノルズ数 Re と物質伝達係数 h_d の関係を示す。実験の流量範囲において、山ピッチが大きいほど、 h_d は大きくなる。物質伝達に与える山ひだピッチの効果は溶液の流量の増加に伴い上昇した後に、減少する。この結果は、吸収溶液の流量がある程度まで増加する際に、吸収溶液による伝熱面の濡れ面積が変化しなければ、液膜が厚くなるだけなので、蒸気の吸収量が低下すると考えられる。

なお、表面加工による濡れ性向上についても本研究で行っている。詳細は別報に記述した。

8. 結論

30kW 級マイクロガスタービン／固体酸化物型燃料電池(MGT/SOFC)の分散型電源のエネルギー利用率向上のため、廃熱を回収し、熱エネルギーとして利用するシステムとして、多重効用吸収冷凍機による廃熱回収システムについて検討した。その結果、まず従来行われてきた終端廃熱を利用する方法では、多重効用化のメリットが損なわれることがわかった。そこで、SOFC の下流における高レベルの中間廃熱を一旦ボイラーで回収し、冷熱生成に用いる中間廃熱利用型システムを提案し、その有効性について検討した。その結果、中間廃熱を利用したシステムで、多重効用吸収冷凍機を用いた場合には、エネルギー利用率が飛躍的に向上することがわかった。これは追加燃料が必要となるにもかかわらず、多重効用吸収冷凍機の高効率な冷熱生成が有効となるためであることが示された。

また、吸収器のコンパクト化に関連して、蛇腹形流路を有するプレート形吸収器を検討した。その結果、山ひだピッチに対して最適値が存在すること、表面の濡れ性向上によって性能改善されることを見いだした。

参考文献

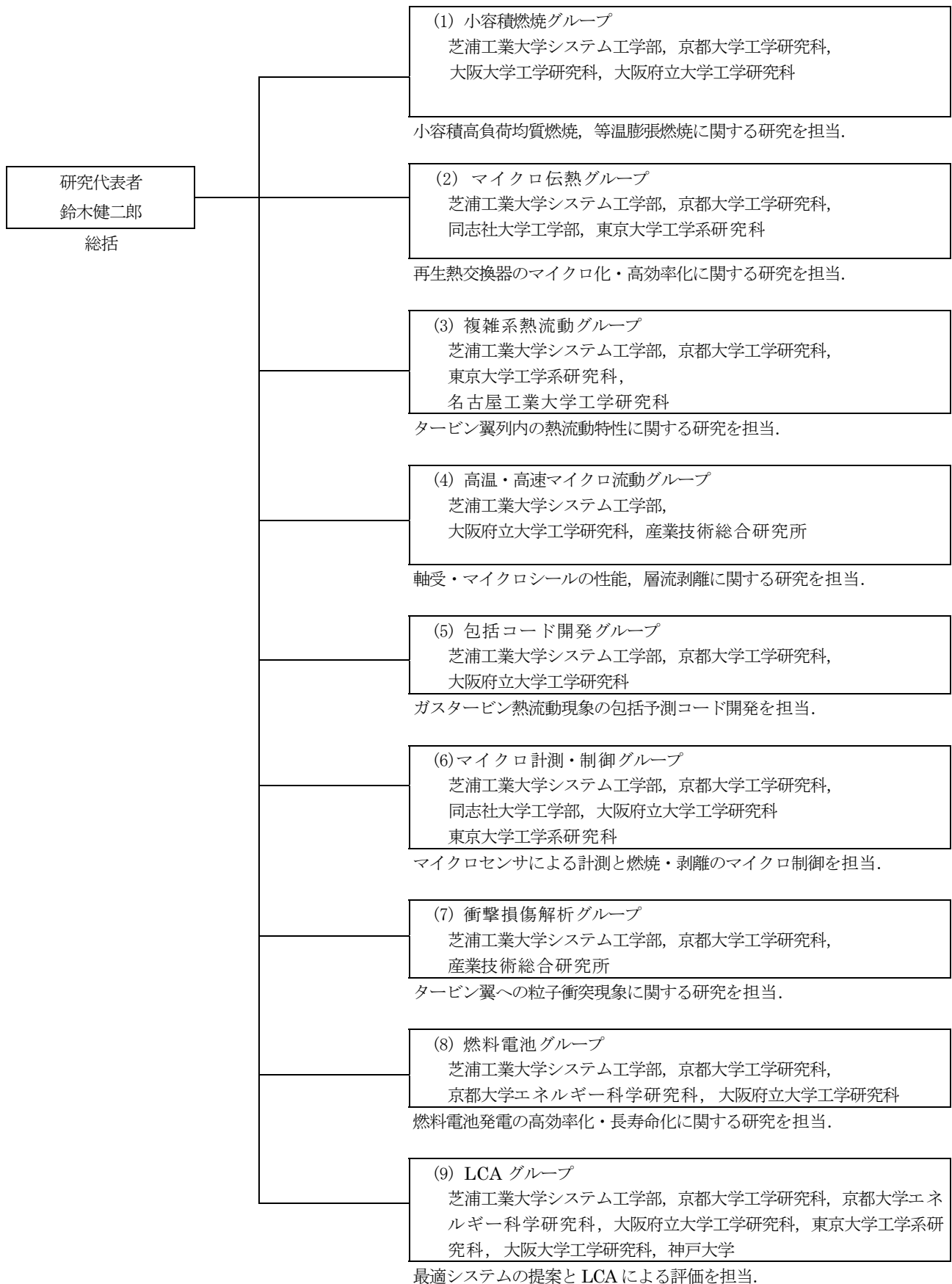
- (1) M. Hirata, Proc. Sym. Energy Eng. in the 21st Century, Vol.1, (2000), pp. 57-71, Hong Kong.
- (2) エネルギー活用事典, エネルギー活用事典編集委員会編, 1999, 産業調査会
- (3) 吸収冷凍機の進展—炎で冷やした半世紀, (2002), 日本冷凍空調学会
- (4) 永岡ほか3名, 第24回日本伝熱シンポ講論,(1987),507
- (5) Strenger,U.and Setterwall,F., Int. AHP Conf.,(1993), 149
- (6) Ishikawa,M., Isshiki, N.,Int. AHP Conf., (1999), 197
- (7) H. Asano, et al, Proc. Sym. Energy Eng. in the 21st Century, (SEE2000), Vol.3, pp.1122-1129.
- (8) G.P. Xu, et al, Applied Thermal Eng., Vol.16, No.12, (1996), pp.975-987.
- (9) G.P. Xu, and Y.Q. Dai, Applied Thermal Eng., Vol.17, No.2, (1997), pp.157-170.
- (10) 尹ら, 冷協論, Vol.12, No.1, (1995), pp.43-52.
- (11) 小島ら, 冷空論, Vol.14, No.2, (1997), pp.201-212..

（２）研究成果の今後期待される効果

超小型ガスタービンと燃料電池のハイブリッドシステムからの廃熱を利用するボトミング機関として例えば吸収式冷凍機を考え、ボトミングまで含めた統合システムの最適化とその評価を行うことを目的として、解析的研究を行った。その結果廃熱利用形態として従来、末端廃熱を利用することが考えられていたが、30kW 級超小型 SOFC/MGT の廃熱レベルが高くはなく、そのため吸収冷凍機の多重効用化による高効率熱利用が有効ではないことがわかった。そのため、システム全体を見直し、廃熱利用形態を再検討した。また、システムに蓄熱装置を組み込むことで負荷変動に対応するシステムを検討した。廃熱利用形態を再検討した結果、SOFC と MGT の中間領域に未燃燃料燃焼用の燃焼器上流にボイラーを配置して、SOFC からの廃熱を直接利用したシステムによると、吸収冷凍機の多重効用化が有効に廃熱利用に寄与することを見いだしたが、その有効性についてエクセルギー解析を通して詳細に検討した。また、適当な蓄熱装置を組み込むことで、負荷変動に対応可能な分散エネルギーシステムの構築が可能であることを示した。

4. 研究実施体制

(1) 概略図（研究チームの構成と所属機関）



(2) メンバー表

研究グループ名：(1) 小容積燃焼グループ

氏 名	所 属	役 職	担当する研究項目	参加時期
鈴木健二郎	芝浦工業大学 システム工学 部	教 授	総括	H. 11～H. 16
吉田英生	京都大学工学 研究科機械工 学専攻	教 授	等温膨張燃焼過程導入によるガスタービンサイクルの高効率化	H. 11～H. 16
齋藤元浩	京都大学工学 研究科機械工 学専攻	助 手	等温膨張燃焼過程導入によるガスタービンサイクルの高効率化	H. 11～H. 16
江口浩一	京都大学工学 研究科物質エ ネルギー化学 専攻	教 授	触媒燃焼過程を導入した燃焼効率の改善	H. 12～H. 16
竹口竜弥	北海道大学触 媒化学研究セ ンター	助教授	触媒燃焼過程を導入した燃焼効率の改善	H. 12～H. 15
菊地隆司	京都大学工学 研究科物質エ ネルギー化学 専攻	助教授	触媒燃焼過程を導入した燃焼効率の改善	H. 14～H. 16
高城敏美	大阪産業大学 工学部機械工 学科	客 員 教 授	燃焼手法の構想と実験・解析の総括	H. 11～H. 16
岡本達幸	京都工芸繊維 大学工芸学部	教授	火炎安定とふく射の影響の実験と解析	H. 11～H. 16
小宮山正治	大阪大学工学 研究科	講 師	燃焼計測	H. 11～H. 16
木下進一	大阪大学工学 研究科	助 手	燃焼実験と解析	H. 11～H. 16
中部主敬	大阪府立大学 工学研究科	教 授	小容積高負荷均質燃焼火炎の保炎・安定限界の拡大と超高速混合法	H. 11～H. 16
巽 和也	大阪府立大学 工学研究科	助手	小容積高負荷均質燃焼の研究	H. 15～H. 16

研究グループ名：（２）マイクロ伝熱グループ

氏 名	所 属	役 職	担当する研究項目	参加時期
鈴木健二郎	芝浦工業大学 システム工学 部	教 授	総括	H. 11～H. 16
岩井 裕	京都大学工学 研究科機械工 学専攻	講 師	多孔質体挿入型熱交換器の 開発, PS 型熱交換器内熱流 動の最適化	H. 11～H. 16
吉田英生	京都大学工学 研究科機械工 学専攻	教 授	千鳥配列衝突噴流付与式 プレートフィン形再生熱 交換器の開発	H. 11～H. 16
齋藤元浩	京都大学工学 研究科機械工 学専攻	助 手	千鳥配列衝突噴流付与式 プレートフィン形再生熱 交換器の開発	H. 11～H. 16
稲岡恭二	同志社大学工 学部	助教授	再生熱交換器のマイクロ 化・高効率化・最適化	H. 11～H. 16
笠木伸英	東京大学工学 系研究科	教 授	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	H. 11～H. 16
鈴木雄二	東京大学工学 系研究科	助教授	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	H. 11～H. 16
鹿園直毅	工学系研究科	助教授	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	H. 14～H. 16

研究グループ名：（３）複雑系熱流動グループ

氏 名	所 属	役 職	担当する研究項目	参加時期
鈴木健二郎	芝浦工業大学 システム工学 部	教 授	総括	H. 11～H. 16
岩井裕	京都大学工学 研究科機械工 学専攻	講 師	スライド壁を有する高回 転, 大曲率翼列内流れの 数値解析	H. 11～H. 16
笠木伸英	東京大学工学 系研究科	教 授	高速回転と大きな曲率を 有する翼列内流れの数値 解析	H. 11～H. 16
鹿園直毅	工学系研究科	助教授	高速回転と大きな曲率を 有する翼列内流れの数値 解析	H. 14～H. 16
長野靖尚	名古屋工業大 学	理事	複雑系乱流熱流動のモデリ ングと DNS およびその総括	H. 11～H. 16

保浦知也	名古屋工業大学工学研究科	助 手	複雑系乱流熱流動の DNS	H. 12～H. 16
服部博文	名古屋工業大学工学部	技 官	複雑系乱流熱流動のモデリングとそれを用いたシミュレーション	H. 11～H. 16

研究グループ名：（４）高温・高速マイクロ流動グループ

氏 名	所 属	役 職	担当する研究項目	参加時期
鈴木健二郎	芝浦工業大学システム工学部	教 授	総括	H. 11～H. 16
矢部 寛			高速小型気体軸受・非接触マイクロガスシールの特性解明	H. 13
筒井康賢	産業技術総合研究所	理事，所長	低レイノルズ数流れ下の翼列特性解明	H. 11～H. 16
松沼孝幸	産業技術総合研究所	研究員	低レイノルズ数流れ下の翼列特性解明	H. 11～H. 16
濱 純	産業技術総合研究所	部門長	低レイノルズ数流れ下の翼列特性解明	H. 15～H. 16
中部主敬	大阪府立大学工学研究科	教 授	高回転，大曲率を伴う流れの層流剥離現象の解明	H. 11～H. 16

研究グループ名：（５）包括コード開発グループ

氏 名	所 属	役 職	担当する研究項目	参加時期
鈴木健二郎	芝浦工業大学システム工学部	教 授	総括	H. 11～H. 16
岩井 裕	京都大学工学研究科機械工学専攻	講 師	マイクロガスタービン最適設計用包括解析予測パッケージの開発	H. 11～H. 16
LI, Pei Wen	京都大学工学研究科機械工学専攻	研究員	マイクロガスタービン最適設計用包括解析予測パッケージの開発	H. 12～H. 13
Dang Zheng	京都大学工学研究科機械工学専攻	研究員	マイクロガスタービン最適設計用包括解析予測パッケージの開発	H. 13～H. 16
巽 和也	大阪府立大学工学研究科	助手	マイクロガスタービン最適設計用包括解析予測パッケージの開発	H. 15～H. 16

研究グループ名：（６）マイクロ計測・制御グループ

氏 名	所 属	役 職	担当する研究項目	参加時期
鈴木健二郎	芝浦工業大学 システム工学 部	教 授	総括	H. 11～H. 16
岩井 裕	京都大学工学 研究科機械工 学専攻	講 師	層流剥離防止技術の開発	H. 11～H. 16
稲岡恭二	同志社大学工 学部	助教授	層流剥離防止技術の開発	H. 11～H. 16
鷺津正夫	京都大学工学 研究科機械工 学専攻	教 授	マイクロセンサー・アクチ ュエータの高機能化技術開 発	H. 11～H. 13
小寺秀俊	京都大学工学 研究科機械工 学専攻	教 授	マイクロセンサー・アクチ ュエータの高機能化技術開 発	H. 11～H. 16
牧野俊郎	京都大学工学 研究科機械物 理工学専攻	教 授	燃焼状態，ガス温度のイン プロセル計測法開発	H. 11～H. 13
松本充弘	京都大学工学 研究科機械物 理工学専攻	助教授	燃焼状態，ガス温度のイン プロセル計測法開発	H. 11～H. 13
笠木伸英	東京大学工学 系研究科	教 授	予混合・燃焼過程のマイク ロ制御	H. 11～H. 16
鈴木雄二	東京大学工学 系研究科	助教授	予混合・燃焼過程のマイク ロ制御	H. 11～H. 16

研究グループ名：（７）衝撃損傷解析グループ

氏 名	所 属	役 職	担当する研究項目	参加時期
鈴木健二郎	芝浦工業大学 システム工学 部	教 授	総括	H. 11～H. 16
小寺秀俊	京都大学工学 研究科機械工 学専攻	助教授	マイクロセンサー・アクチ ュエータ強度特性の解明	H. 11～H. 16
吉田博夫	産業技術総合 研究所	グループ リーダー	異物衝撃損傷特性の解明	H. 11～H. 16

研究グループ名：（８）燃料電池グループ

氏 名	所 属	役 職	担当する研究項目	参加時期
鈴木健二郎	芝浦工業大学 システム工学 部	教 授	総括	H. 11～H. 16
岩井 裕	京都大学工学 研究科機械工 学専攻	講 師	燃料電池および内部改質器 内の熱流動解析	H. 11～H. 16
江口浩一	京都大学工学 研究科物質エ ネルギー化学 専攻	教 授	燃料電池および内部改質器 の高性能化と機能評価	H. 12～H. 16
竹口竜弥	北海道大学触 媒化学研究セ ンター	助教授	燃料電池および内部改質器 の高性能化と機能評価	H. 12～H. 16
菊地隆司	京都大学工学 研究科物質エ ネルギー化学 専攻	助教授	触媒燃焼過程を導入した燃 焼効率の改善	H. 14～H. 16
島 進	京都大学工学 研究科機械工 学専攻	教 授	燃料電池セルの成形技術開 発	H. 13
LI, Pei Wen	京都大学工学 研究科機械工 学専攻	研究員	燃料電池および内部改質器 内の熱流動解析	H. 12～H. 13
Dang Zheng	京都大学工学 研究科機械工 学専攻	研究員	燃料電池および内部改質器 内の熱流動解析	H. 13～H. 16
西野貴文	京都大学工学 研究科機械工 学専攻	研究生	燃料電池および内部改質器 内の熱流動解析	H. 16
伊藤靖彦	同志社大学工 学部環境シス テム学科	教 授	カソード材料の高性能化 と長寿命化および熔融塩 電気化学プロセスによる 材料形成	H.11～H.16
萩原理加	京都大学エネ ルギー科学研 究科	助教授	カソード材料の高性能化 と長寿命化	H.11～H.16
後藤琢也	京都大学エネ ルギー科学研 究科	助 手	熔融塩電気化学プロセス による材料形成	H.11～H.16
野平俊之	京都大学エネ ルギー科学研	助 手	熔融塩電気化学プロセス による材料形成	H.11～H.16

中部主敬	究科 大阪府立大学 工学研究科	教 授	燃料電池および内部改質器 内の熱流動解析	H. 11～H. 16
------	-----------------------	-----	-------------------------	-------------

研究グループ名：（９）LCA グループ

氏 名	所 属	役 職	担当する研究項目	参加時期
鈴木健二郎	芝浦工業大学 システム工学 部	教 授	総括	H. 11～H. 16
手島清美			ガスタービンー燃料電池ハ イブリッドシステムの高効 率化解析	H. 13～H. 16
吉田英生	京都大学工学 研究科機械工 学専攻	教 授	等温膨張燃焼過程導入によ るガスタービンサイクルの 高効率化	H. 11～H. 16
齋藤元浩	京都大学工学 研究科機械工 学専攻	助 手	等温膨張燃焼過程導入によ るガスタービンサイクルの 高効率化	H. 11～H. 16
伊藤靖彦	同志社大学工 学部環境シス テム学科	教 授	熱・電気併給システムのエ ネルギー解析・エクセルギ ー解析手法の確立	H.11～H.16
野平俊之	京都大学エネ ルギー科学研 究科	助 手	熱再生型燃料電池等によ る燃料電池システムの高 効率化	H.11～H.16
笠木伸英	東京大学工学 系研究科	教 授	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	H. 11～H. 16
高城敏美	大阪大学工学 研究科	教 授	最適システムの構想と実 験・解析の総括	H. 11～H. 16
岡本達幸	京都工芸繊維 大学工芸学部	教 授	最適システムの構想	H.11～H.16
木下進一	大阪大学工学 研究科	助 手	システムの性能評価解析	H.11～H.16
中部主敬	大阪府立大学 工学研究科	教 授	ガスタービンー燃料電池ハ イブリッドシステムの高効 率化解析	H. 11～H. 16
君島真仁	芝浦工業大学 システム工学 部	講 師	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	H. 12～H. 16
岡本史紀	芝浦工業大学 システム工学 部	教授	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	H. 15～H. 16
角田和巳	芝浦工業大学	助教授	マイクロガスタービンの概	H. 15～H. 16

鴨志田隼司	システム工学 部 芝浦工業大学 システム工学 部	助教授	念設計とハイブリッドシス テムへの適用 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	H. 15～H. 16
鈴木洋	神戸大学自然 科学研究科	助教授	ボトミング機関を含むシス テム最適化の提案とその評 価	H.14～H.16
薄井洋基	神戸大学自然 科学研究科	教授	ボトミング機関を含むシス テム最適化の提案とその評 価	H.14～H.16

(3) J S Tが雇用し派遣する研究員等

氏名	所属	役職	担当する研究項目	参加時期
KIM, Jae Hwan	京都大学工学研 究科	CREST 研究員	項目 (9)	H. 12～H. 13
LI, Pei Wen	京都大学工学研 究科	CREST 研究員	項目 (5), (8)	H. 12～H. 13
君島真仁	東京大学工学系 研究科	CREST 研究員	項目 (9)	H. 12～H. 13
村岡浩	東京大学工学系 研究科	CREST 研究員	項目 (3)	H. 12～H. 13
巽和也	大阪府立大学工 学研究科	CREST 研究員	項目 (3)	H. 15 前期
Choi Hang Seok	京都大学工学研 究科	CREST 研究員	項目 (1)	H. 12～H. 15
荒木拓人	京都大学工学研 究科	博士後期課程	項目 (2)	H. 12～H. 14
岩本雄平	京都大学工学研 究科		項目 (9)	H. 12
塩谷仁	博士後期課程	大阪大学工学 研究科	項目 (1)	H. 12～H. 14
西田耕介	大阪大学工学研 究科	大阪大学工学 研究科	項目 (9)	H. 12～H. 13
Dang Zheng	京都大学工学研 究科	研究員	項目 (5), (8)	H13～H16
小田 豊	京都大学工学研 究科	博士後期課程	項目 (2)	H13～H16
西野貴文	京都大学工学研 究科	研究生	項目 (8)	H16

李 晶	大阪大学工学研究科	博士後期課程	項目 (9)	H. 14～H. 16
尾上なしか	京都大学工学研究科	研究補助員	チーム事務 (2)	H. 12～H. 16
上阪彰子	京都大学工学研究科	研究補助員	実験データの整理 (3)	H. 12～H. 16
野呂和子	京都大学工学研究科	研究補助員	実験データの整理 (9)	H. 12～H. 16
篠崎裕子	京都大学エネルギー科学研究科	研究補助員	実験データの整理 (8)	H. 12～H. 16
蒔生田祥代	京都大学エネルギー科学研究科	研究補助員	実験データの整理 (8)	H. 12～H. 16
丹羽左知子	名古屋工業大学工学研究科	研究補助員	実験データの整理 (3)	H. 14
入門朋子	名古屋工業大学工学研究科	研究補助員	実験データの整理 (3)	H. 13

5. 研究期間中の主な活動

(1) ワークショップ・シンポジウム等

研究連絡会

年月日	名称	場所	参加人数	概要
平成 11 年 12 月 17 日 (金)	戦略的基礎研究・研究連絡・報告会	京都大学工学研究科機械工学専攻大会議室	21 名	平成 11 年度の研究成果ならびに現在の進捗状況について、各研究グループの代表者が報告を行い、それに対する質問および討論が行われた。また、今後の研究遂行に関する打ち合わせも行われた。
平成 12 年 7 月 7 日 (金)	戦略的基礎研究・研究連絡・報告会	京都大学工学研究科機械工学専攻大会議室	30 名	平成 12 年度の研究成果ならびに現在の進捗状況について、各研究グループの代表者が報告を行い、それに対する質問および討論が行われた。また、今後の研究遂行に関する打ち合わせも行われた。
平成 13 年 1 月 26 日 (金)	戦略的基礎研究・研究連絡・報告会	京都大学工学研究科機械工学専攻大会議室	28 名	平成 12 年度の研究成果ならびに現在の進捗状況について、各研究グループの代表者が報告を行い、それに対する質問および討論及び、今後の研究遂行に関する打ち合わせも行われた。
平成 13 年 7 月 18 日	戦略的基礎研究・研究連絡・報告会	京都大学工学研究科機械工学専攻大会議室	26 名	平成 13 年度の研究成果ならびに現在の進捗状況について、各

(水)	告会	攻大会議室		研究グループの代表者が報告を行い、それに対する質問および討論が行われた。また、今後の研究遂行に関する打ち合わせも行われた。
平成 14 年 1 月 26 日 (土)	戦 略 的 基 礎 研 究・研究連絡・報 告会	京都大学工学研 究科機械工学専 攻大会議室	17 名	平成 13 年度の研究成果ならびに現在の進捗状況について、各研究グループの代表者が報告を行い、それに対する質問および討論が行われた。また、今後の研究遂行に関する打ち合わせも行われた。
平成 14 年 7 月 12 日 (金)	戦 略 的 基 礎 研 究・研究連絡・報 告会	京都大学工学研 究科機械工学専 攻大会議室	26 名	平成 13 年度の研究成果ならびに現在の進捗状況について、各研究グループの代表者が報告を行い、それに対する質疑、討論が行われた。
平成 15 年 1 月 24 日 (金)	戦 略 的 基 礎 研 究・研究連絡・報 告会	京都大学工学研 究科機械工学専 攻大会議室	32 名	平成 13 年度の研究成果ならびに現在の進捗状況について、各研究グループの代表者が報告を行い、それに対する質疑、討論が行われた。また、今後の研究遂行に関する打ち合わせも行われた。
平成 15 年 7 月 18 日 (金)	戦 略 的 基 礎 研 究・研究連絡・報 告会	京都大学工学研 究科機械工学専 攻大会議室	22 名	前回打合せ後の研究成果について、各研究グループの代表者が報告を行い、それに対する質疑討論が行われた。

公開シンポジウム

平成 14 年 1 月 25 日 (金)	「超小型ガスタービン・高度分散エネルギーシステム」公開研究成果発表会	京都リサーチパーク 東地区 1 号館 4 階サイエンスホール	145 名	平成 13 年度の研究成果を軸に、研究開始から現在までの進捗状況も交えて、各研究グループの代表者が公開で研究成果の報告を行い、それに対する質問および討論が行われた。
平成 15 年 12 月 19 日 (金)	「超小型ガスタービン・高度分散エネルギーシステム」公開研究成果発表会	京都リサーチパーク 東地区 1 号館 4 階サイエンスホール	88 名	これまでの研究成果、特に第 1 回公開成果発表会後に得られた成果を中心にシンポジウム形式にて発表・報告を行い、それに対する質疑討論が行われた。

6. 主な研究成果物、発表等

(1) 論文発表 (海外 20 件、国内 23 件)

1. Hiroshi Iwai, Hiroyuki Watanabe, Kazuya Tatsumi, Kenjiro Suzuki, Conjugate heat transfer for a minimal unit model of counter flow type corrugated primary surface heat exchangers, International Journal of Heat Exchangers, Vol. 4 No.1, p.1-26, 2003.
2. Hiroshi IWAI, Hiroyuki WATANABE, Kazuya TATSUMI and Kenjiro SUZUKI, Numerical Simulation on Flow and Heat Transfer Characteristics of Primary Surface Heat Exchanger, Thermal Science and Engineering Vol.9 No. 4 (2001), 2001 年 7 月.
3. Kazuya TATSUMI, Hiroshi IWAI, Kyoji INAOKA, Kenjiro SUZUKI, Numerical Simulation for Heat and Fluid Characteristics of Square Duct with Discrete Rib Turbulators, Int. Journal of Heat and Mass Transfer, 第 45 巻第 21 号, pp. 4353-4359, 平成 14 年 8 月 24 日.
4. 小田豊, 岩井裕, 鈴木健二郎, 吉田英生, 多孔質体内熱流動と固体壁内熱伝導の連成解析, 日本機械学会論文集 (B 編), 2003 年 3 月号 (第 69 巻第 679 号), 平成 15 年 3 月 25 日.
5. H. Yoshida, H. Ishibe, H. Matsui, T. Egawa, M. Saito, S. Yoshitomi, Hybrid Gas Bearing with Water Evaporation from Ultra-Fine Porous Medium, Thermal Science & Engineering, Vol.11 No.4, p.41-42, 2003.
6. 齋藤元浩, 吉田英生, 越後亮三, タービン内全温一定膨張燃焼の導入によるマイクロガスタービンの高性能化, 日本機械学会論文集 (B 編), 第 69 巻第 681 号, p.1262-1268, 2003.
7. Kousuke Nishida, Toshimi Takagi, Shinichi Kinoshita and Tadashi Tsuji, Performance Evaluation of Regenerative, Steam/Water Injection and Combined Gas Turbine Systems, 4th JSME/KSME Thermal Engineering Joint Conference, Kobe, Oct. 2000.
8. 西田耕介, 高城敏美, 木下進一, 辻 正, 燃料電池・ガスタービン複合発電システムの性能解析, 日本機械学会論文集 (B 編), Vol.67, No.664, pp.3203-3208, Dec. 2001.
9. Kousuke Nishida, Toshimi Takagi and Shinichi Kinoshita, Analysis of Entropy Generation and Exergy Loss during Combustion, Proceedings of the Combustion Institute, Vol.29, pp.869-874, Jul. 2002.
10. Kousuke Nishida, Toshimi Takagi, Shinichi Kinoshita and Tadashi Tsuji, Performance Evaluation of Multi-stage SOFC and Gas Turbine Combined Systems, ASME TURBO EXPO 2002, Amsterdam, Jun. 2002.
11. 西田耕介, 高城敏美, 木下進一, 燃焼におけるエクセルギーの損失過程の解析, 日本機械学会論文集 (B 編), Vol.68, No.673, pp.2643-2649, Sep. 2002.
12. 西田耕介, 高城敏美, 木下進一, 再生型蒸気噴射ガスタービンシステムの性能解析, エネルギー・資源, Vol.24, No.2, pp.135-141, Mar. 2003.
13. 西田耕介, 高城敏美, 木下進一, 固体酸化物形燃料電池の内部プロセス解析とエクセルギー損失評価, 日本機械学会論文集 (B 編), Vol.69, No.684, pp.1935-1942, Aug. 2003.
14. Kousuke Nishida, Toshimi Takagi and Shinichi Kinoshita, Performance Analysis of Regenerative Steam Injection Gas Turbine Systems, Applied Energy, (掲載予定)
15. Kousuke Nishida, Toshimi Takagi and Shinichi Kinoshita, Process Analysis and Evaluation of Exergy Loss in Solid Oxide Fuel Cell, JSME International Journal Series B, (掲載予定)

16. 西田耕介, 吉積尚志, 高城敏美, 木下進一, 円筒型内部改質 SOFC の性能解析, 日本機械学会論文集 (B 編), (投稿中)
17. 吉田博夫, 「ガスタービンにおけるモニタリング技術ーセンサ技術」, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 29 No. 2, pp. 12-15, 2001 年 3 月.
18. 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.
19. 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).
20. 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).
21. Pei-Wen LI, Kenjiro SUZUKI, Hajime KOMORI and Jae-Hwan KIM, Numerical Simulation of Heat and Mass Transfer in a Tubular Solid Oxide Fuel Cell, Thermal Science and Engineering Vol. 9 No. 4 (2001), 2001 年 7 月.
22. 上地 英之, 君島 真仁, 笠木 伸英, マイクロガスタービン・固体酸化物形燃料電池ハイブリッドシステムのサイクル解析, 日本機械学会論文集, Vol. 68B, No. 666, pp. 626-635 (2002).
23. 君島真仁, 笠木伸英, マイクロガスタービン・熔融炭酸塩形燃料電池ハイブリッドシステムのサイクル解析, 日本機械学会論文集 (B 編) 69 巻 680 号, 1001-1008, 2003 年 4 月.
24. 奥田英信, 君島真仁, 浜名芳晴, 笠木伸英, マイクロガスタービンの性能試験に基づくコージェネレーションシステムの導入評価, エネルギー・資源, Vol. 25, No. 1, 70-76, 2004 年 1 月.
25. Haibin Wu & Nobuhide Kasagi, Turbulent Heat Transfer in A Channel Flow with Arbitrary Directional System Rotation, International Journal of Heat and Mass Transfer, 平成 15 年 8 月.
26. Haibin Wu & Nobuhide Kasagi, Effects of Arbitrary Directional System Rotation on Turbulent Channel Flow, Physics of Fluids, 平成 16 年 4 月.
27. 森本賢一, 鈴木雄二, 笠木伸英, 斜め波状壁を用いた再生熱交換器の熱流動特性, 日本機械学会論文集 (B 編), 2003 年 12 月 22 日.
28. 森本 賢一, 鈴木 雄二, 笠木 伸英, 斜め波状壁を用いた再生熱交換器の伝熱促進機構, 第 41 回日本伝熱シンポジウム, 富山, 2004 年 5 月, pp. 97-98.
29. Uechi, H., Kimijima, S. and Kasagi, N., Cycle Analysis of Gas Turbine-Fuel Cell Hybrid Micro Generation System, Trans. ASME, Journal of Engineering for Gas Turbine and Power, Vol. 126 (2004) (in press).
30. Wu, H. and Kasagi, N., Turbulent Heat Transfer in a Channel Flow with Arbitrary Directional System Rotation, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 47, No. 21, 4579-4591 (2004).
31. Wu, H. and Kasagi, N., Effects of arbitrary directional system rotation on turbulent channel flow, Phys. Fluids, Vol. 16, 979-990 (2004).
32. Nagata, M. and Kasagi, N., Spatio-temporal evolution of coherent vortices in wall turbulence with streamwise curvature, J. Turbulence, Vol. 5, No. 017 (2004).
33. Morimoto, K., Suzuki, Y., and Kasagi, N., Mechanism of Heat Transfer Enhancement in Recuperators with Oblique Wavy Walls, Thermal Science and Engineering, Vol. 12, No. 4, 99-100 (2004).
34. Suzuki, H., Kasagi, N., and Suzuki, Y., "Active Control of an Axisymmetric Jet with Distributed Electromagnetic Flap Actuators," Exp. Fluids, Vol. 36, 498-509 (2004).
35. 栗本 直規, 鈴木 雄二, 笠木 伸英, マイクロ・アクチュエータ群による同軸二重噴流

- 混合の能動制御, 日本機械学会論文集, Vol. 70B, No. 694, pp. 1417-1424 (2004).
36. 君島 真仁, 笠木 伸英, マイクロガスタービン・固体酸化物形燃料電池ハイブリッドシステムの部分負荷特性の評価, 日本機械学会論文集, Vol. 70B, No. 692, pp. 1020-1027 (2004).
 37. 服部博文, 長野靖尚, 回転チャネル乱流を解析するための乱流モデル, 日本機械学会論文集, 平成 14 年 1 月.
 38. 辻村浩行, 後藤琢也, 伊藤靖彦, Electrochemical Formation and Control of Chromium Nitride Films in Molten LiCl-KCl-Li₃N Systems, *Electrochimica Acta*, 2002 年 7 月 5 日.
 39. 松沼孝幸, 阿部裕幸, 筒井康賢, 動静翼干渉によるタービン動翼ミッドスパンの非定常流れ, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 30, No. 4 (2002 年 7 月号), pp. 312-321, 平成 14 年 7 月 20 日.
 40. 松沼孝幸, 阿部裕幸, 筒井康賢, LDV Measurements of Unsteady Flow within a Turbine Rotor at Low Reynolds Numbers, *JSME International Journal Series B*, Vol. 4, No. 3, 平成 14 年 8 月.
 41. 松沼孝幸, 阿部裕幸, 筒井康賢, 低レイノルズ数域におけるタービン静翼の三次元流れ (損失と流れの構造に与えるレイノルズ数の影響), 日本ガスタービン学会誌, Vol. 30, No. 3, pp. 208-215, 平成 14 年 5 月 20 日.
 42. 松沼孝幸, 阿部裕幸, 筒井康賢, 低レイノルズ数域におけるタービン静翼の三次元流れ (損失と流れの構造に与える主流乱れ度の影響), 日本ガスタービン学会誌, Vol. 30-No. 6 (2002 年 11 月号), pp. 526-535, 平成 14 年 11 月 20 日.
 43. 松沼孝幸, 筒井康賢, タービン翼列の損失と三次元流れへ及ぼすチップクリアランスの影響, 第 1 報: レイノルズ数の低下, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 32, No. 4, 2004-7, pp. 303-312.
 44. 松沼孝幸, 筒井康賢, タービン翼列の損失と三次元流れへ及ぼすチップクリアランスの影響, 第 2 報: 主流乱れ度の増加, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 32, No. 4, 2004-7, pp. 313-321.

(2) 口頭発表 (国内 88 件、海外 61 件)

1. 鈴木健二郎, 手島清美, 金在煥, Solid Oxide Fuel Cell and Micro Gas Turbine Hybrid Cycle for a Distributed Energy Generation System, 4th JSME/KSME Thermal Engineering Joint Conference (神戸), 2000 年 10 月 4 日.
2. 鈴木健二郎, Pei Wen LI, 岩井裕, Numerical Modeling and Performance Study of a Tubular Type Solid Oxide Fuel Cell, Fourth Pacific Rim Thermal Science and Energy Engineering Workshop-PaRTSEE-4, Kyoto, Japan, 平成 14 年 6 月 2 日.
3. 岩井裕, 柳谷信孝, 中部主敬, 鈴木健二郎, 稲岡恭二, 旋回を伴って主流中に吹き込まれる斜め噴流の衝突熱伝達特性, 乱流シンポジウム (京都大学), 平成 12 年 7 月 25 日.
4. 柳谷信孝, 岩井裕, 中部主敬, 鈴木健二郎, 稲岡恭二, クロスフローを伴う斜め噴流の衝突熱伝達に関する三次元数値解析, 第 37 回日本伝熱シンポジウム, 神戸, 平成 12 年 5 月 31 日.
5. 荒木拓人, M. S. Kim, 岩井裕, 鈴木健二郎, An Experimental Investigation of Gaseous Flow Characteristics in Microchannels, Heat Transfer and Transport Phenomena in Microscale Banff, Canada, 平成 12 年 10 月 16 日.
6. P. L. Woodfield, 中部主敬, 鈴木健二郎, Numerical Computation on Recirculation Flow Structures in Confined Co-Axial Laminar Jets, 第 14 回数値流体力学シンポジウム (中央大学), 平成 12 年 12 月 22 日.
7. 崔恒碩, 中部主敬, 鈴木健二郎, 勝本洋一, An Experimental Investigation of Mixing

- and Combustion Characteristics on the Can-Type Micro Combustor with a Multi-Jet Baffle Plate, Symposium on Turbulent Mixing and Combustion (Queens University, Canada), 2001 年 6 月 6 日.
8. 金在煥, 手島清美, 鈴木健二郎, 分散電源用 SOFC/MGT ハイブリッドサイクルに関する研究, 日本機械学会関東支部第 7 期総会講演会 (東京), 2001 年 3 月 16 日.
 9. Yoichi KATAUMOTO, Hang-Seok CHOI, Kazuyoshi NAKABE and Kenjiro SUZUKI, Flow Structure and Flame Stability of a Multiple Jet in a Micro-scale Combustor for a Micro Gas Turbine, 第 38 回日本伝熱シンポジウム (さいたま市/大宮ソニックシティ), 平成 13 年 5 月 23 日.
 10. 小川亮, 太場裕昌, 岩井裕, 鈴木健二郎, チャンネル内乱流構造に及ぼす上壁面スパン方向スライドの影響に関する三次元直接数値シミュレーション, 日本流体力学会年会 2001 (工学院大学新宿校舎), 2001 年 7 月 31 日.
 11. 李沛文, 鈴木健二郎, 小森一, 金在煥, 円筒型高温固体電解質燃料電池の熱と物質輸送に関する解析, 第 38 回日本伝熱シンポジウム (さいたま市/大宮ソニックシティ), 2001 年 5 月 25 日.
 12. 渡辺寛之, 岩井裕, 巽和也, 鈴木健二郎, プライマリサーフェス型熱交換器の熱流動特性に関する数値解析, 第 38 回日本伝熱シンポジウム (さいたま市/大宮ソニックシティ), 2001 年 5 月 24 日.
 13. Peter L. Woodfield, Hang-Seok Choi, Kazuyoshi Nakabe, and Kenjiro Suzuki, Numerical Computation of Mixing and Combustion in a Multi-Hole Pencil-Size Can Combustor, Kyoto-Seoul National-Tsinghua University Thermal Engineering Conference (Kyoto University), 2001 年 9 月 26 日.
 14. Kazuya Tatsumi, Hiroshi Iwai and Kenjiro Suzuki, Numerical Study of Corrugated Type Primary Surface Recuperator, Kyoto-Seoul National-Tsinghua University Thermal Engineering Conference (Kyoto University), 2001 年 9 月 27 日.
 15. K. Nakabe, Y. Kitaoka, H. S. Choi and K. Suzuki, Experimental Study on Flow Characteristics of a Micro Jet Deformed by the Interaction with the Neighboring Jets, The 6th ASME-JSME Thermal Engineering Joint Conference at Hawaii Island, U. S. A., 2002 年, 3 月 19 日.
 16. 荒木拓人, 岩井裕, 鈴木健二郎, Numerical and Experimental Study of Gas Flow Characteristics in Microscale Nozzles, International Symposium on Micro/Nanoscale Energy Conversion and Transport Phenomena, Antalya Turkey, 平成 14 年 4 月 15 日.
 17. 小田豊, 岩井裕, 鈴木健二郎, 多孔質体と固体壁の界面近傍における熱移動現象に関する熱連成解析, 第 39 回伝熱シンポジウム, 札幌, 平成 14 年 6 月 7 日.
 18. 吉田英生, 石部英臣, 松井裕樹, 江川猛, 齋藤元浩, 吉富聡, Hybrid Gas Bearing with Water Evaporation from Ultra-Fine Porous Medium, International Conference on Power Engineering- 03, Kobe, Japan, 2003 年 11 月 12 日.
 19. 吉田英生, 齋藤元浩, 田原啓太郎, 川崎雅文, Heat Transfer Characteristics of Perforated Fin Heat Exchanger with Intense Turbulence, 4th International Conference. on Compact Heat Exchangers and Enhancement Technology for the Process Industries, Crete, Greece, 2003 年 9 月 29 日.
 20. 齋藤元浩, 吉田英生, 越後亮三, Cycle Analysis of a Micro Gas Turbine with Combustion Process under Constant Total Temperature, 6th ASME-JSME Thermal Engineering Joint Conference, Hawaii, U.S.A, 2003 年 3 月 18 日.
 21. 齋藤元浩, 吉田英生, 越後亮三, Cycle Analysis of Isothermal Expansion Combustion Gas Turbine, The Fourth JSME-KSME Thermal Engineering Conference, Kobe, Japan, 2000 年 10 月 2 日.
 22. 吉田英生, 上田章雄, 齋藤元浩, マイクロガスタービン・燃料電池・単効用および二

- 重効用 H₂O/LiBr 吸収冷凍機からなるマイクロコジェネレーションシステムの性能評価, 第 41 回日本伝熱シンポジウム, 富山, 2004 年 5 月 27 日.
23. 吉田英生, 岩本雄平, 齋藤元浩, マイクロガスタービン・燃料電池・吸収冷凍機から構成されるマイクロコジェネレーションシステムの性能解析, 第 40 回日本伝熱シンポジウム, 広島, 2003 年 5 月 28 日.
24. 吉田英生, 石部英臣, 松井裕樹, 江川猛, 齋藤元浩, 吉富聡, 超微細多孔質表面からの水蒸発を伴うハイブリッド気体軸受 (第 2 報), 第 40 回日本伝熱シンポジウム, 広島, 2003 年 5 月 28 日.
25. 吉田英生, 齋藤元浩, 田原啓太郎, 川崎雅文, 孔空きプレートフィン型熱交換器の伝熱特性, 第 39 回日本伝熱シンポジウム, 札幌, 2002 年 6 月 6 日.
26. 吉田英生, 松井裕樹, 齋藤元浩, 超微細多孔質表面からの水蒸発を伴うハイブリッド軸受, 第 39 回日本伝熱シンポジウム, 札幌, 2002 年 6 月 5 日.
27. P.L. Woodfield, K. Nakabe & K. Suzuki, The Effect of Three-Dimensional Recirculation Flow Structures on Flow Mixing of Micro-Scaled Confined Jets, The 13th International Symposium on Transport Phenomena July 14-18, 2002.
28. Hiroshi IWAI, Tomoyuki MAMBO, Kazuyoshi NAKABE, Kenjiro SUZUKI, Time-and Space-Averaged Convective Heat Transfer from the Surface of a Circular Cylinder in an Oscillating Flow, 第 12 回国際伝熱会議・グルノーブル, 平成 14 年 8 月 19 日.
29. Kenjiro SUZUKI, Hiroshi IWAI, Jae Hwan KIM, Pei Wen LI and Kiyomi TESHIMA, Solid Oxide Fuel Cell and Micro Gas Turbine Hybrid Cycle and related Fluid Flow and Heat Transfer, 第 12 回国際伝熱会議・グルノーブル, 平成 14 年 8 月 23 日.
30. Hiroshi IWAI, Kazuya TATSUMI, Kenjiro SUZUKI, Effect of Plate Thickness on Thermal Characteristics of a Counter Flow Type Primary Surface Recuperator, Compact Heat Exchanger Symposium, グルノーブル, 平成 14 年 8 月 24 日.
31. Yutaka ODA, Hiroshi IWAI, Kenjiro SUZUKI and Hideo YOSHIDA, Numerical Study of Conjugate Heat Transfer for a Channel Filled with Porous Insert, 6th ASME-JSME Thermal Engineering Joint Conference, Hawaii, 2003 年 3 月 17 日.
32. 西野貴文, 岩井裕, 鈴木健二郎, 円筒型 SOFC の発電特性に与える活性化過電圧の温度依存性の影響, 日本機械学会関西支部第 78 期定時総会講演会, 大阪市, 平成 15 年 3 月 22 日.
33. K. Tatsumi, H. Iwai and K. Suzuki, The Effects of Oblique Discrete Rib Arrangement on Heat Transfer Performance of a Square Duct, International Gas Turbine Congress (東京), 2003 年 11 月 5 日.
34. 巽和也, 田中美也子, 中部主敬, Peter WOODFIELD, 鈴木健二郎, 管内層流噴流群の導入部流れが及ぼす混合性能への影響に関する数値予測, 日本機械学会第 16 回計算力学講演会 (神戸), 2003 年 11 月 22 日.
35. Takafumi Nishino, Hajime Komori, Hiroshi Iwai, and Kenjiro Suzuki, Development of a Comprehensive Numerical Model for Analyzing a Tubular-Type Indirect Internal Reforming SOFC, First International Conference on Fuel Cell Science, Engineering and Technology (Rochester, USA), 2003 年 4 月 23 日.
36. 西野貴文, 岩井裕, 鈴木健二郎, 円筒型内部改質 SOFC セルにおける熱・物質移動と電流密度分布, 第 40 回日本伝熱シンポジウム (広島), 2003 年 5 月 28 日.
37. 不破邦博, 巽和也, 岩井裕, 鈴木健二郎, 波型壁面を有する矩形断面流路内の熱流動場に及ぼす流路形状の影響, 第 40 回日本伝熱シンポジウム (広島), 2003 年 5 月 29 日.
38. 河村慎一, 岩井裕, 鈴木健二郎, スプリング形状をもつフィンの伝熱及び圧力損失特性, 第 40 回日本伝熱シンポジウム (広島), 2003 年 5 月 29 日.

39. P. Woodfield, K. Tatsumi, K. Nakabe, K. Suzuki, The Effect of Upstream Flow Conditions to Laminar Mixing in a Miniature Combustion Chamber, United States of America (第4回日米流体工学会議, ホノルル, ハワイ州, 米国), 2003年7月10日.
40. 党政, 岩井裕, 鈴木健二郎, A Comparison of Different Activation Overpotential Models for Tubular SOFC Simulation, 熱工学コンファレンス2003(金沢), 2003年11月16日.
41. H. S. Choi, T. S. Park and K. Suzuki, Large Eddy Simulation of Turbulent Heat Transfer in a Channel having a Wavy Bottom Wall, International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer (Antalya, Turkey), 2003年10月14日.
42. Kenjiro, Suzuki, Hiroshi Iwai, High Performance Recuperators for the Solid Oxide Fuel Cell-Micro Gas Turbine Hybrid System, 4th International Conference on Compact Heat Exchangers and Enhancement Technology for the Process Industries-2003, 平成15年9月30日.
43. Hiroshi Iwai, Kunihiro Fuwa, Kenjiro Suzuki, Heat Transfer Characteristics of Flows in Undulated Rectangular Duct for Micro Gas Turbine Recuperator, 4th International Conference on Compact Heat Exchangers and Enhancement Technology for the Process Industries-2003, 平成15年9月30日.
44. 党政, 岩井裕, 鈴木健二郎, A Comparison of Different Activation Overpotential Models for Tubular SOFC Simulation, 日本機械学会熱工学コンファレンス2003, 金沢, 平成15年11月10日.
45. 党政, 岩井裕, 鈴木健二郎, Numerical Modeling of a Disk Shape Planar SOFC, 2nd International Conference on Fuel Cell Science, Engineering and Technology, 2004年6月15日.
46. 西野貴文, 岩井裕, 鈴木健二郎, Numerical Investigation of the Strategies for Reducing the Cell Thermal Gradient of an Indirect Internal Reforming Tubular SOFC, 2nd International Conference on Fuel Cell Science, Engineering and Technology (Rochester, New York, Jun3 13-16, 2004), 2004年6月15日.
47. 辻村浩行, 後藤琢也, 伊藤靖彦, 熔融 LiCl-KCl 系におけるコバルトの表面窒化, 第31回熔融塩化学討論会, 講演要旨集 p.29, 平成11年11月.
48. 井脇孝之, 後藤琢也, 伊藤靖彦, 熔融塩電気化学プロセスによる AlN 薄膜の形成, 31回熔融塩科学討論会, 講演要旨集 p.45, 平成11年11月.
49. 辻尚秀, 後藤琢也, 伊藤靖彦, 熔融 LiCl-KCl 系における窒素ガス電極反応の熱力学的検討, 第31回熔融塩化学討論会, 講演要旨集 p.73, 平成11年11月.
50. 田中, 菊池, 佐々木, 江口浩一, 耐熱性セラミックス微粒子を用いた高温触媒燃焼, 第86回触媒討論会(2000.9.19-20、鳥取).
51. 前田, Wennerstrom, 関澤, 菊池, 佐々木, 江口浩一, 小澤, Pd系燃焼触媒の水蒸気による被毒及びハニカム担持触媒の燃焼特性, 第86回触媒討論会(2000.9.19-20、鳥取).
52. 江口浩一, 堀, 菊池, 佐々木, 上野, 黒石, 相澤, 辻本, 田尻, 西川, 内田 石炭ガス模擬ガスを燃料とした SOFC の発電特性, 電気化学会 第68回大会 (2001.4.1-3、神戸).
53. 佐々木, 小城, 堀, 菊池, 江口浩一, アルコールや炭化水素などを燃料とした SOFC の発電特性, 電気化学会 第68回大会 (2001.4.1-3、神戸).
54. 長田光広, 笠木伸英, Spatio-Temporal Evolution of Coherent Vortices in Wall Turbulence with Streamline Curvature, Turbulence and Shear Flow Phenomena-2003, 2003年6月25日.
55. 木村泰康, 君島真仁, 鹿園直毅, 笠木伸英, 内部改質を伴う平板型 SOFC のセル単体解析, エネルギー・資源学会第22回研究発表会 (東京), 2003年6月13日.

56. 光石暁彦, 深淵康二, 笠木伸英, モデル燃焼器における混合能動制御の DNS, 第十七回数値流体力学シンポジウム講演論文集 (CD-ROM), 東京, B1-2, pp. 1-5, 2003 年 12 月 17 日.
57. 光石 暁彦, 深淵 康二, 笠木 伸英, 制御された閉空間内同軸噴流における渦輪の挙動と物質混合過程, 日本流体力学会年会 2004, 名古屋, 2004 年 8 月 (日本流体力学会誌, Vol. 23 別冊), pp. 304-305.
58. 栗本直規, 鈴木雄二, 笠木伸英, マイクロ・アクチュエータ群による同軸二重噴流の能動制御, 日本機械学会 2003 年度年次大会講演論文集(2), 徳島, pp. 147-148, 2003 年 8 月 6 日.
59. 栗本直規, 鈴木雄二, 笠木伸英, 同軸噴流メタン拡散火炎の浮き上がり構造の能動制御, 第 41 回燃焼シンポジウム講演論文集, つくば, pp. 195-196, 2003 年 12 月 4 日.
60. 君島真仁, 鹿園直毅, 笠木伸英, マイクロガスタービン・燃料電池ハイブリッドシステムのサイクル解析 (作動条件ならびに要素性能がシステム性能に及ぼす影響に関する検討), 第 22 回エネルギー・資源学会研究発表会講演論文集, 東京, 2003, pp. 57-62. 2003 年 6 月 12 日.
61. 森本賢一, 鈴木雄二, 笠木伸英, 斜め波状壁を用いた再生熱交換器の形状最適設計, 日本機械学会熱工学コンファレンス 2003 講演論文集, 2003 年 11 月, pp. 445-446, 金沢大学, 2003 年 11 月 16 日.
62. El-Samni, O. and Kasagi, N., Turbulent Channel Flow with System Rotation, 第 15 回東大生研 N S T シンポジウム, 東京, 2000 年 3 月 1 日, pp. 56-62.
63. Osama El-samni, 笠木伸英, Turbulent Channel Flow with System Rotation, 第 15 回東大生研 NST シンポジウム, 東京, 平成 12 年 3 月 2 日.
64. Osama El-samni, 笠木伸英, Passive Scalar Transport in Rotating Turbulent Channel Flows, 第 37 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, pp. 559-560, 神戸, 平成 12 年 5 月 30 日.
65. 堀内康広, 名児耶大輝, 鈴木雄二, 笠木伸英, 小型燃焼器モデル内同軸二重円形噴流の能動混合制御, 第 37 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, pp. 873-874, 神戸, 平成 12 年 5 月 31 日.
66. 福永茂和, 上地英之, 笠木伸英, サイクル解析用 GUI ソフトウェア開発とマイクロガスタービン概念設計, 日本ガスタービン学会第 28 回ガスタービン定期講演会, pp. 141-146, 日野, 平成 12 年 6 月 2 日.
67. Naoki Kurimoto, Yuji Suzuki and Nobuhide Kasagi, Active Control of Coaxial Jet Mixing and Combustion with Arrayed Micro Actuators, 5th World Conf. Exp. Heat Transfer, Fluid Mech. & Thermodyn., Thessaloniki, September 2001, 2001 年 9 月 24 日~28 日.
68. 鈴木雄二, 笠木伸英, 堀内康弘, 名児耶大輝, Synthesized Mixing Process in an Actively-Controlled Confined Coaxial Jet, 4th JSME/KSME Thermal Engineering Joint Conference (神戸), 2000 年 10 月 4 日.
69. Osama El-Samni, 笠木伸英, Heat and Momentum Transfer in Rotating Turbulent Channel Flow, 4th JSME/KSME Thermal Engineering Joint Conference (神戸), 2000 年 10.
70. 上地英之, 笠木伸英, 君島真仁, マイクロガスタービン・燃料電池複合システムのサイクル解析, 第 7 回動力・エネルギー技術シンポジウム講演論文集, 日本機械学会, No. 00-11, (東京), 2000 年 10 月, pp. 188-193.
71. 福島直哉, 笠木伸英, 四辺形断面管内の完全発達乱流と熱伝達の DNS, 第 14 回数値流体力学シンポジウム講演論文集 (CD-ROM), B03-4, pp. 1-5, (東京), 2,000 年 12 月 22 日.
72. 君島真仁, 上地英之, 笠木伸英, マイクロガスタービン・燃料電池複合システムのサイクル解析 (エクセルギーに基づく性能評価), 日本機械学会関東支部第 7 期総会講演

- 会 (東京), 講演論文集, No. 010-1, pp. 265-266, 2001 年 3 月 16 日.
73. 君島真仁, マイクロガスタービン・固体酸化物形燃料電池ハイブリッドシステムをベースとする小型分散エネルギーシステムの性能解析, 日本機械学会 第 14 回環境工学総合シンポジウム 2004, 講演論文集, 2004, pp. 419-422, 2004 年 7 月 13 日.
 74. 守田藍奈, 君島真仁 (芝浦工業大学), マイクロガスタービン・固体酸化物形燃料電池ハイブリッドシステムによるコージェネレーションシステムの最適運用シミュレーション, 日本機械学会第 14 回環境工学総合シンポジウム 2004, 講演論文集, 2004, pp. 423-426, 2004 年 7 月 13 日.
 75. 守田藍奈, 君島真仁, マイクロガスタービン・燃料電池ハイブリッドシステムの導入評価, 日本機械学会 2004 年度年次大会講演論文集 Vol. 3, pp. 325-326, 2004 年 9 月 8 日.
 76. 福島直哉, 笠木伸英, The Effect of Walls on Turbulent Flow and Temperature Fields, Turbulent Heat Transfer III (アラスカ), 2001 年 3 月 19 日.
 77. 栗本直規, 鈴木雄二, 笠木伸英, インテリジェントノズルを用いた混合促進による燃焼場の能動制御, 第 38 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, pp. 27-28, (埼玉県大宮市), 2001 年 5 月 23 日.
 78. 福島直哉, 笠木伸英, 複雑流路における乱流熱輸送機構, 第 38 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, pp. 413-414 (埼玉県大宮市), 2001 年 5 月 24 日.
 79. 笠木伸英, 浜名芳晴, 奥田英信, 三輪潤一, 君島真仁, 28kW マイクロガスタービンの性能評価試験, 日本ガスタービン学会第 29 回定期講演会, 講演論文集, pp. 83-88, (東京), 2001 年 6 月 1 日.
 80. 上地英之, 君島真仁, 笠木伸英, Cycle Analysis of Gas Turbine-Fuel Cell Hybrid Micro Generation System, The American Society of Mechanical Engineers International Joint Power Generation Conference & Exposition (ニューオリンズ), 2001 年 6 月 4 日.
 81. 奥田 英信, 三輪 潤一, 君島 真仁, 濱名 芳晴, 笠木 伸英, マイクロガスタービン・コージェネレーションシステムの導入評価, エネルギー・資源学会第 20 回研究発表会, 講演論文集, 東京, 2001, pp. 239-244.
 82. 君島真仁, 倉橋一豪, 上地英之, 笠木伸英, マイクロガスタービン・燃料電池ハイブリッドシステムの性能評価, エネルギー・資源学会 第 20 回研究発表会, 講演論文集, pp. 239-244, (東京), 2001 年 6 月 13 日.
 83. 君島真仁, 笠木伸英, 28kW マイクロガスタービンの排熱による吸収冷凍機の駆動に関する一考察, 平成 13 年度日本冷凍空調学会学術講演会講演論文集, pp. 85-88, (東京), 2001 年 10 月 17 日.
 84. 栗本 直規, 鈴木 雄二, 笠木 伸英, マイクロアクチュエータ群による噴流拡散火炎の能動制御, 日本機械学会熱工学講演会講演論文集, 2001, pp. 451-452.
 85. 長田光弘, 笠木伸英, 壁乱流における運動量・熱輸送機構に対する流線曲率の効果, 第 15 回数値流体力学シンポジウム講演論文集 (CD-ROM), (東京), C02-4, pp. 1-4, 2001 年 12 月 19 日.
 86. Osama A. El-Samni, 笠木伸英, The Effects of System Rotation with Three Orthogonal Rotating Axes on Turbulent Channel Flow, The American Society of Mechanical Engineers 7th International Conference of Fluid Dynamics and Propulsion, (エジプト), 2001 年 12 月 20 日.
 87. 上地英之, 君島真仁, 笠木伸英, マイクロガスタービン・固体酸化物型燃料電池ハイブリッドシステムのサイクル解析, 日本機械学会論文集 (B 編), 68 巻 666 号, 626-635, 2001 年 3 月 23 日 (掲載は 2002 年 2 月).
 88. 君島真仁, 笠木伸英, Performance Evaluation of Gas Turbine-Fuel Cell Hybrid Micro Generation System, The American Society of Mechanical Engineers (ASME) Turbo Expo 2002, 2002 年 6 月 3 日.

89. 長田光広, 笠木伸英, 凹凸壁面乱流における熱輸送機構の相異, 第 39 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, pp. 597-598, 札幌, 2002 年 6 月 7 日.
90. 福島直哉, 笠木伸英, 菱形管内乱流の伝熱・摩擦特性, 第 39 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, pp. 595-596, 北海道厚生年金会館, 札幌, 2002 年 6 月 7 日.
91. 君島真仁, 木村泰康, 笠木伸英, マイクロガスタービン・燃料電池ハイブリッドシステムの部分負荷特性, エネルギー・資源学会第 21 回研究発表会, 講演論文集, 大阪, pp. 327-332, 2002 年 6 月 13 日.
92. 奥田英信, 君島真仁, 浜名芳晴, 笠木伸英, マイクロガスタービンの性能試験に基づくコージェネレーションシステムの導入評価, 日本機械学会第 8 回動力・エネルギー技術シンポジウム (東京), 講演論文集, pp. 43-48, 2002 年 6 月 18 日.
93. 君島真仁, 笠木伸英, マイクロガスタービン・燃料電池ハイブリッドシステムの部分負荷特性の評価, 日本機械学会第 8 回動力・エネルギー技術シンポジウム (東京), 講演論文集, pp. 69-74, 2002 年 6 月 18 日.
94. 長田光広, 笠木伸英, 曲がりチャンネルにおける乱流と熱伝達の DNS, 日本流体力学会年会 2001, 日本流体力学会誌, Vol. 20 別冊, pp. 221-222, (東京), 2001 年 8 月 1 日.
95. 三輪 潤一, 奥田 英信, 君島 真仁, 笠木 伸英, マイクロガスタービン・コージェネレーションシステムの評価研究, 日本機械学会関東支部第 7 期総会講演会, 講演論文集, No. 010-1, 2001, pp. 263-264.
96. 福島直哉, 笠木伸英, レイノルズ応力に対する複雑形状壁の効果, 日本流体力学会年会 2001, 日本流体力学会誌, Vol. 20 別冊, pp. 421-422, (東京), 2001 年 8 月 2 日 (木).
97. 栗本直規, 鈴木雄二, 笠木伸英, 5th World Conference on Experimental Heat transfer, Fluid Mechanics, and Thermodynamics, Active Control of Coaxial Jet Mixing and Combustion with Arrayed Micro Actuators (Thessaloniki, Greece), 2001 年 9 月 26 日.
98. 福島直哉, 笠木伸英, Heat Transfer and Friction Characteristics in Turbulent Rhombic Duct Flows, Thermal Science and Engineering, Special issue for extended abstracts of papers presented at 39th National Heat Transfer Symposium of Japan, vol. 10, No. 4, pp. 7-8, 2002 年 7 月 20 日.
99. 長田光広, 森雅稔, 笠木伸英, 流線曲率を有する壁乱流に重畳する回転効果, 日本流体力学会年会 2002 (仙台), 日本流体力学会誌, Vol. 21 別冊, pp. 238-239, 2002 年 7 月 24 日.
100. 君島 真仁, 奥田 英信, 浜名 芳晴, 笠木 伸英, マイクロガスタービンの性能試験に基づくコージェネレーションシステムの導入評価 (集合住宅への導入における省エネルギー性および経済性に関する検討), 平成 14 年度 空気調和・衛生工学会学術講演会, 2002, pp. 217-220.
101. 福島直哉, 笠木伸英, Turbulent Momentum and Heat Transfer in Ducts of Rhombic Cross Section, Heat Transfer 2002 (グルノーブル), Proceeding of the Twelfth International Heat Transfer Conference, Aug. 2002, Vol. 2, pp. 207-212, 2002 年 8 月 22 日.
102. 武海浜, 笠木伸英, Effect of Combined Spanwise and Streamwise Rotations on Turbulent Channel Flow, The fifth JSME-KSME Fluid Engineering Conference, 2002 年 11 月 20 日.
103. 長田光広, 笠木伸英, 曲率を有する壁面せん断乱流の解析に適した SGS モデル, 第 16 回数値流体力学シンポジウム講演論文集 (CD-ROM), pp. 1-4, (東京), 2002 年 12 月 17 日.
104. 武海浜, 笠木伸英, Turbulent Heat Transfer in Channel Flow with non-orthogonal System Rotation, The sixth ASME-JSME Thermal Engineering Joint Conference, アメリカ, ハワイ, 2003 年 3 月 19 日.
105. 君島真仁, 吸収冷凍機を利用したマイクロガスタービンの吸気冷却に関する検討, 平成 14 年度日本冷凍空調学会学術講演会講演論文集, pp. 185-188, (岡山), 2002 年 11 月 19 日.
106. 松沼孝幸, 筒井康賢 (工業技術院機械技術研究所), LDV Measurements of Wake-Induced

- Unsteady Flow within a Turbine Rotor Cascade, 10th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, グルベンキアン財団, リスボン (スペイン), 平成 12 年 7 月 12 日.
107. 松沼孝幸, 筒井康賢, LDV Measurements of Unsteady Flow in a Turbine Rotor, 32nd AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit St. Louis, Missouri, U.S.A., 2002 年 6 月 24 日.
 108. 松沼孝幸, 筒井康賢, 部分負荷状態におけるタービン動翼ミッドスパンの非定常流れ, 第 31 回ガスタービン定期講演会 (北見), (社) 日本ガスタービン学会, 平成 15 年 6 月 25 日.
 109. Takayuki Matsunuma, Yasukata Tsutsui, LDV Measurements of unsteady Midspan Flow in a Turbine Rotor at Low Reynolds Number, ASME Turbo Expo 2003, 平成 15 年 6 月 17 日.
 110. Takayuki Matsunuma, Yasukata Tsutsui, Effects of Low Reynolds Number on Wake-Generated Unsteady Flow of an Axial-Flow Turbine Rotor, 10th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery (ISROMAC-10), 平成 16 年 3 月 8 日.
 111. Takayuki Matsunuma, Yasukata Tsutsui, Effects of Free-Steam Turbulence Intensity on Unsteady Midspan Flow in a Turbine Rotor at Low Reynolds Number, International Conference on Power Engineering - 03 (ICOPE-03), 平成 15 年 11 月 10 日.
 112. 服部博文, 長野靖尚, 回転を伴う壁乱流を予測するための乱流モデル, 乱流シンポジウム (京都大学), 平成 12 年 7 月 26 日.
 113. 服部博文, 長野靖尚, 回転チャンネル乱流を予測するための乱流モデル, 数値流体力学シンポジウム (中央大学), 平成 12 年 12 月 23 日.
 114. 服部博文, 平松嵩嘉, 長野靖尚, 垂直方向乱流応力の再分配と壁面漸近挙動を考慮した非線形モデルの構築, 第 16 回生研 NST シンポジウム (東京大学生産技術研究所), 平成 13 年 3 月 2 日.
 115. 服部博文, 長野靖尚, 乱流モデルによる回転壁乱流温度場の予測, 第 38 回伝熱シンポジウム (さいたま市, 大宮ソニックシティ).
 116. 長野靖尚, 保浦知也, Scaling of Near-Wall Structures in Turbulent Boundary Layers Subjected to Adverse Pressure Gradient, IUTAM Symposium on Reynolds Number Scaling in Turbulent Flow, Princeton, NJ, USA, 2002 年 9 月 13 日.
 117. 長野靖尚, 服部博文, 石橋伸晃, DNS and Modelling of Rotating Channel Flow with Heat Transfer, 5th International Symposium on Engineering Turbulence Modelling and Measurements, Mallorca, Spain, 2002 年 9 月 16 日.
 118. 西田耕介, 高城敏美, 木下進一, 辻正, Performance Evaluation of Multi-Stage SOFC and Gas Turbine Combined Systems, The 47th ASME International Gas Turbine & Aeroengine Technical Congress, Exposition & Users Symposium, オランダ, アムステルダム, 2002 年 6 月 3 日.
 119. 塩谷仁, 高城敏美, 岡本達幸, 木下進一, 寺岡弘宣, Construction of Low NO_x and High Stability Flames Aiming at Micro Gas Turbine Combustion, The 47th ASME International Gas Turbine & Aeroengine Technical Congress, Exposition & Users Symposium, オランダ, アムステルダム, 2002 年 6 月 6 日.
 120. 辻 正, 西田耕介, 高城敏美, 木下進一, 燃料電池・ガスタービン コンバインドシステムの性能評価, 日本機械学会関西支部第 257 回講演会, 大阪, 1999 年 11 月 6 日.
 121. 西田耕介, 高城敏美, 木下進一, 辻 正, 再生・蒸気噴射・コンバインド ガスタービンシステムの性能評価, 日本機械学会関西支部第 257 回講演会, 大阪, 1999 年 11 月 6 日.
 122. 辻正, 西田耕介, 高城敏美, 木下進一, 燃料電池とガスタービンの複合による高性能化

- とその評価, 第 37 回燃焼シンポジウム, 木更津, 1999 年 12 月 9 日.
123. Kousuke Nishida, Toshimi Takagi, Shinichi Kinoshita and Tadashi Tsuji, Performance Evaluation of Regenerative, Steam/Water Injection and Combined Gas Turbine Systems, 4th JSME/KSME Thermal Engineering Joint Conference (神戸), 2000 年 10 月 4 日, pp.1-73 - 1-78.
 124. Tadashi Tsuji, Toshimi Takagi, Shinichi Kinoshita and Kousuke Nishida, Hybrid Gas Turbine and Fuel Cell System for Advanced Combined Cycle, 4th JSME/KSME Thermal Engineering Joint Conference (神戸), 2000 年 10 月 4 日, pp.1-49-1-54.
 125. 西田耕介, 高城敏美, 木下進一, 山田大円, Analysis of Internal Processes and Exergy Losses in a Solid Oxide Fuel Cell (SOFC), The 6th ASME-JSME Thermal Engineering Joint Conference, 米国, ハワイ, 2003 年 3 月 18 日.
 126. 塩谷仁, 高城敏美, 岡本達幸, 木下進一, 寺岡弘宣, Low NoxPre-Mixed Combustion Aiming at Micro Gas Turbine Combustor, The 6th ASME-JSME Thermal Engineering Joint Conference, アメリカ, ハワイ, 2003 年, 3 月 18 日.
 127. 西田耕介, 高城敏美, 木下進一, Performance Analysis of Regenerative Steam Injection Gas Turbine (RSTIG) Systems, ASME Turbo Expo 2003 Power for Land, Sea & Air, 米国, アトランタ, 2003 年 6 月 16 日.
 128. Kousuke Nishida, Toshimi Takagi, Shinichi Kinoshita and Daien Yamada, Analysis of Internal Processes and Exergy Losses in a Solid Oxide Fuel Cell (SOFC), The 6th ASME-JSME Thermal Engineering Joint Conference, Hawaii, Mar. 2003.
 129. Kousuke Nishida, Toshimi Takagi, Shinichi Kinoshita, Performance Analysis of Regenerative Steam Injection Gas Turbine Systems, ASME TURBO EXPO 2003, Atlanta, Jun. 2003.
 130. Kousuke Nishida, Toshimi Takagi, Shinichi Kinoshita, Analysis of Electrochemical Performance and Exergy Loss in Solid Oxide Fuel Cell, ASME TURBO EXPO 2003, Atlanta, Jun. 2003.
 131. 西田耕介, 高城敏美, 木下進一, 辻 正, 燃料電池(SOFC)・ガスタービン複合システムの高効率化, 第 38 回日本伝熱シンポジウム, さいたま, 2001 年 5 月.
 132. 西田耕介, 高城敏美, 木下進一, 燃焼におけるエクセルギー損失生成過程の解析第 39 回燃焼シンポジウム, 横浜, 2001 年 11 月.
 133. Hitoshi Shiotani, Toshimi Takagi, Tatsuyuki Okamoto, Shinichi Kinoshita, Hironobu Teraoka and Shunichi Hirao, Low NOx and High Stability Flame Configuration for Micro Gas Turbine Combustors, The Third Asia-Pacific Conference on Combustion, Seoul, Korea, Jun. 2001.
 134. Hitoshi Shiotani, Toshimi Takagi, Tatsuyuki Okamoto, Shinichi Kinoshita, and Hironobu Teraoka, Construction of Low NOx and High Stability Flames Aiming at Micro Gas Turbine Combustion, ASME TURBO EXPO 2002, Amsterdam, Jun. 2002.
 135. Hitoshi Shiotani, Toshimi Takagi, Tatsuyuki Okamoto, Shinichi Kinoshita and Hironobu Teraoka, Low NOx Combustion and Process Analysis Aiming at Micro Gas Turbine Combustor, 29th International Symposium on Combustion, Work-in-Progress, Sapporo, Jul. 2002.
 136. Hitoshi Shiotani, Toshimi Takagi, Tatsuyuki Okamoto, Shinichi Kinoshita and Hironobu Teraoka, Low NOx Pre-Mixed Combustion Aiming at Micro Gas Turbine Combustor, The 6th ASME-JSME Thermal Engineering Joint Conference, Hawaii, Mar. 2003.
 137. Hitoshi Shiotani, Toshimi Takagi, Tatsuyuki Okamoto, Shinichi Kinoshita and Hidetoshi Nakatani, Characteristics and Mechanism of Low NOx Production at Lean Premixed Swirling Flame, Seventh International Conference on Energy for a Clean

Environment (Clean Air 2003), Lisbon, Jul. 2003.

138. 塩谷 仁, 高城敏美, 岡本達幸, 木下進一, 寺岡弘宣, マイクロガスタービン燃焼器における低 NO_x 高安定火炎構成に関する研究, 第 38 回燃焼シンポジウム, 横浜, 2000 年 11 月.
139. 塩谷 仁, 寺岡弘宣, 高城敏美, 岡本達幸, 木下進一, マイクロガスタービン燃焼器における低 NO_x 高安定火炎構成に関する研究—続報, 第 39 回燃焼シンポジウム, 2001 年 11 月.
140. 塩谷仁, 高城敏美, 岡本達幸, 木下進一, 中谷英俊, 希薄予混合火炎における低 NO_x 生成特性と機構, 第 40 回燃焼シンポジウム, 大阪, 2002 年 12 月.
141. 王宗光, 高城敏美, 岡本達幸, 木下進一, 高温・低酸素濃度における火炎安定, 第 41 回燃焼シンポジウム, つくば, 2003 年 12 月.
142. 西田耕介, 高城敏美, 木下進一, 固体酸化物形燃料電池の電気化学的性能解析とエクセルギー損失評価, 第 40 回燃焼シンポジウム, 大阪, 2002 年 12 月.
143. 石神徹, 山田実希, 鈴木洋, 薄井洋基, Non-Absorbable Gas Control in the Absorber/Evaporator in an Absorption Chiller Using a Immersed Plate, 21st IIR International Congress on Refrigeration (Washington D.C, USA), 2003 年 8 月 17-22 日.
144. 石神徹, 山田実希, 鈴木洋, 薄井洋基, 邪魔板を挿入した吸収冷凍機吸収器内の不凝縮性ガス拡散挙動, 平成 14 年度日本冷凍空調学会学術講演会 (岡山), 2002 年 11 月 19 日.
145. 石神徹, 鈴木洋, 薄井洋基, 邪魔板挿入による吸収冷凍機内の不凝縮性ガス拡散制御, 第 40 回日本伝熱シンポジウム (広島), 2003 年 5 月 28 日.
146. P.T. Fujii, H. Asano, H. Suzuki, K. Tanimoto, Y. Hisazumi, K. Mouri, K. Fujioka, Y. Aso, M. Muraji, T. Hori and T. Abiko, Development of the New Heat Supply Unit for the Neighboring Communities Co-generation System, International Conference on Power Engineering-03 (ICOPE-03), 2003 年 11 月 10 日.
147. 鈴木洋, 山田紗矢香, 薄井洋基, キャビティ内を掃引する粘弾性流体の流動特性に関する数値計算, 流体力学会年会 2004, 2004 年 8 月 10 日.
148. 鈴木洋, Hong-Phuc NGUYEN, 山内怜子, 薄井洋基, キャビティ内を掃引する粘弾性流体の熱流動に関する数値計算, 流体力学会年会 2004, 2004 年 8 月 9 日.
149. 鈴木洋, 中山友絵, 薄井洋基, Development Characteristics of Surfactant Solution Flow Fluctuation in a Duct, International Conference of Rheology 2004, 2004 年 8 月 23 日.

(3) 特許出願

①国内

1. 鋼材の電気化学的表面窒化処理法、伊藤靖彦、後藤琢也、辻村浩行、平成 14 年 10 月 16 日出願、 番号:特願 2003-019914
2. 固体酸化物形燃料電池システム、及び固体酸化物形燃料電池システムの駆動方法、鹿園直毅、笠木伸英、木村泰康、平成 16 年 6 月 30 日出願、番号:特願 2004-194167.

(4) 新聞報道等

- ・ 鈴木健二郎主催「超小型ガスタービン・燃料電池ハイブリッドシステム」公開研究成果発表会, 日刊工業新聞, 平成 14 年 1 月 15 日掲載.
- ・ 鈴木健二郎主催「超小型ガスタービン・燃料電池ハイブリッドシステム」公開研究成果発表会, 日刊工業新聞, 平成 15 年 12 月 11 日掲載.

- ・ 鈴木健二郎，地球温暖化の進行抑制へ注目される天然ガス利用，京都新聞，平成 15 年 4 月 26 日掲載.

(5) その他（基調講演，受賞，解説記事，招待講演）

■ 基調講演

- (1) K. Suzuki, K. Teshima and J-H Kim, 2000, Solid Oxide Fuel Cell and Micro Gas Turbine Hybrid Cycle for a Distributed Energy Generation System, 4th JSME-KSME Thermal Engineering Conference
- (2) K. Suzuki, H. Iwai, J. H. Kim, P. W. Li and K. Teshima, 2002, Solid Oxide Fuel Cell and Micro Gas Turbine Hybrid Cycle and related Fluid Flow and Heat Transfer, 12th International Heat Transfer Conference.
- (3) K. Suzuki, T.W. Song and H. Iwai, 2002, Micro Gas Turbine – Solid Oxide Fuel Cell Hybrid System for Distributed Energy Generation, Int. Symposium on Distributed Energy Systems in the 21st Century.
- (4) K. Suzuki and H. Iwai, 2003, High Performance Recuperator for the Solid Oxide Fuel Cell – Micro Gas Turbine Hybrid System, Int. Symposium on Compact Heat Exchangers and Enhancement Technology for the Process Industries.
- (5) 鈴木健二郎，2003，分散型エネルギーシステムとしての固体電解質燃料電池・マイクロガスタービンハイブリッドシステム，日本機械学会全国大会.
- (6) K. Suzuki, 2004, Solid Oxide Fuel Cell and Micro Gas Turbine Hybrid System for Distributed Energy Generation, ATI2004.

■受賞

受賞名：(社) 日本機械学会 動力エネルギー部門賞 優秀講演表彰

受賞者：松沼孝幸

受賞日：2004年10月22日（金）

対象となる発表：

Effects of Free-Stream Turbulence Intensity on Unsteady Midspan Flow in a Turbine Rotor at Low Reynolds Number, International Conference on Power Engineering (ICOPE-03), 2003年11月

■解説記事

1. 鈴木健二郎, 岩井 裕, 金在煥, マイクロガスタービンと燃料電池, 月刊 ECO INDUSTRY Vol.7 No.11, pp.14-24, シーエムシー出版, 2002.
2. 吉田英生, 最近の熱交換器と技術動向—機械工学的視点と化学工学視点から最近の話題—, 省エネルギー増刊号, Vol.55 No.4, p.2-6, 2003.
3. 吉田英生, 武石賢一郎, マイクロガスタービンの現状と関連話題, 混相流, Vol.17 No.4, p.377-386, 2003.
4. 吉田英生, 武石賢一郎, マイクロガスタービン—背景, 現状, 将来—, エネルギー・資源, Vol.23 No.3, p.177-182, 2002.
5. 吉田英生, マイクロガスタービン: 最近の動向と今後の課題, 日本機械学会東海支部第35回座談会「分散型エネルギー源の開発」講演論文集, 名古屋, 2002年11月25日.
6. 笠木 伸英, 金子 成彦, 鹿園 直毅, 東京大学超小型分散エネルギーシステムラボと5kW マイクロガスタービンの開発研究, コージェネレーション, Vol. 18, No. 1, pp. 28-32 (2003).
7. 笠木 伸英, 君島 真仁, マイクロガスタービン・燃料電池ハイブリッドシステムに関する研究, 燃料電池, Vol. 1, No. 4, pp. 42-43 (2002).
8. 笠木 伸英, 君島 真仁, ガスタービン・燃料電池ハイブリッドシステムの展望, エネルギー・資源, Vol. 23, No. 3, pp. 183-187 (2002).
9. 君島 真仁, 笠木 伸英, マイクロガスタービン・分散エネルギーシステムの現状と課題, 設計工学, Vol. 38, No. 8, pp. 367-374 (2002).
10. 笠木 伸英, 小型分散エネルギーシステムへの期待と展望, エネルギーの有効利用と環境保全 (改訂版), 新政策, 特集号, 政策総合研究所, 2001年1月, pp. 58-61 (2001).
11. 笠木 伸英, マイクロガスタービン 小型分散エネルギーシステム, 高圧ガス, Vol. 38, No. 6, pp. 545-552 (2001).
12. 笠木 伸英, エネルギー・ネットワーク 分散システムへの潮流, コージェネレーション, Vol. 16, No. 1, pp. 7-11 (2001).
13. 笠木 伸英, マイクロガスタービン, 計測と制御, 計測自動制御学会, Vol. 39, No. 2, p. 150 (2000).
14. 笠木 伸英, マイクロタービンの現状と展望, クリーンエネルギー, Vol. 9, No. 4, pp. 1-7 (2000).
15. 笠木 伸英, マイクロガスタービン: 分散エネルギーシステムへの展開, 高圧ガス, Vol. 37, No. 6, pp. 554-556 (2000).
16. 笠木 伸英, マイクロガスタービン, ターボ機械, 28巻9号, pp. 522-527 (2000).
17. 笠木 伸英, 小型分散電源の新展開, 省エネルギー, Vol. 10, No. 11, pp. 18-22 (2000).
18. 笠木 伸英, マイクロタービンの現状と課題, 資源環境対策, Vol. 35, No. 10, pp. 976-983 (1999).

■招待講演

- (1) K. Suzuki, 2000, Micro gas turbine for distributed energy system, Seoul National University
- (2) K. Suzuki, 2001, Micro gas turbine for distributed energy system, EDF Research Center at Chatou
- (3) 鈴木健二郎, 2001, 分散型エネルギーシステムとしての固体電解質燃料電池・マイクロガスタービンハイブリッドシステム, 日本燃焼学会-JFRC 合同研究会
- (4) 鈴木健二郎, 2001, 分散型エネルギーシステムとしての固体電解質燃料電池・マイクロガスタービンハイブリッドシステム, 日本機械学会エンジン部門
- (5) 鈴木健二郎, 2001, 分散型エネルギーシステムとしての固体電解質燃料電池・マイクロガスタービンハイブリッドシステム, 日本伝熱学会関西支部
- (6) K. Suzuki, 2002, Solid oxide fuel cell and micro gas turbine hybrid system, Nanyang Technological University
- (7) K. Suzuki, 2002, Solid oxide fuel cell and micro gas turbine hybrid system, National Laboratory Livermore
- (8) K. Suzuki, 2002, Solid oxide fuel cell and micro gas turbine hybrid system, Yonsei University
- (9) K. Suzuki, Solid oxide fuel cell and micro gas turbine hybrid system, 2002, Korea Society of Mechanical Engineers
- (10) K. Suzuki, 2002, Solid oxide fuel cell and micro gas turbine hybrid system, Korea Advanced Institute of Science and Technology
- (11) K. Suzuki, 2002, Solid oxide fuel cell and micro gas turbine hybrid system, Korea Aviation Research Institute
- (12) 鈴木健二郎, 2002, 分散型エネルギーシステムとしての固体電解質燃料電池・マイクロガスタービンハイブリッドシステム, 日本機械学会関西支部
- (13) 鈴木健二郎, 2003, 分散型エネルギーシステムとしての固体電解質燃料電池・マイクロガスタービンハイブリッドシステム, 日本学術会議シンポジウム
- (14) 鈴木健二郎, 2003, 分散型エネルギーシステムとしての固体電解質燃料電池・マイクロガスタービンハイブリッドシステム, 日本機械学会年次総会学術会議シンポジウム
- (15) K. Suzuki, 2003, Solid Oxide Fuel Cell and Micro Gas Turbine Hybrid System for Distributed Energy Generation and Related Activities in Japan, University of Genova
- (16) K. Suzuki, 2003, Solid Oxide Fuel Cell and Micro Gas Turbine Hybrid System for Distributed Energy Generation and Related Activities in Japan, Seoul National University
- (17) K. Suzuki, 2003, High Performance Recuperator for Solid Oxide Fuel Cell and Micro Gas Turbine Hybrid System for Distributed Energy Generation, KAIST
- (18) 鈴木健二郎, 2003, 分散型エネルギーシステムとしての固体電解質燃料電池・マイクロガスタービンハイブリッドシステムと伝熱, 日本伝熱学会北陸支部
- (19) 鈴木健二郎, 2003, 燃料電池と分散電源-エネルギーフローネサンス, 京機会.
- (20) K. Suzuki, 2004, High Performance Recuperator for Solid Oxide Fuel Cell and Micro Gas Turbine Hybrid System, ATI2004.
- (21) 吉田英生, 2004, マイクロガスタービンと分散電源, 八戸都市エリア産学官連携促進事業 中間研究成果報告会.
- (22) 君島 真仁, ガスタービン・燃料電池ハイブリッドシステムの展望, バイオマス利用研究会第19回研究会, 京都高度技術研究所, 2002年10月, pp. 27-38 (2002).
- (23) 笠木 伸英, 小型分散エネルギーシステムの新展開, 日本高圧力技術協会 HPI 技術セ

- ミナー，都市センターホール，2001 年 2 月，pp. 63-74 (2001)
- (24) 笠木 伸英，マイクロガスタービン・分散エネルギーシステム，エネルギー研究総合推進会議第 7 回講演会，工業技術院筑波研究センター，2000 年 2 月，つくば市，p. 2-13.
- (25) 笠木 伸英，マイクロガスタービン・コージェネレーションの新展開，第 16 回コージェネレーションシンポジウム前刷集，日本コージェネレーションセンター，経団連ホール，2000 年 11 月，pp. 223-226.
- (26) 笠木 伸英，マイクロガスタービン小型分散エネルギーシステムの新展開，機械技術協会講演会「急速な普及が期待されるマイクロガスタービンの現状と将来」，機械技術振興会館，平成 12 年 12 月.

7. 結び

研究開始にあたって立てた目標は十分達成でき、得られた成果はターゲットとしたハイブリッドシステムの実現の加速に貢献することが出来たとともに、その将来の設計に有用なデータベースとして活用できる意義ある研究が展開できたと考える。

確かに、当初構想した研究課題のうちの（４）超小型タービンの研究の一部、①全温一定タービン内膨張の実現、②超小型タービン内翼間流れの層流剥離制御、③資源循環の観点から重要と考えた LCA を応用した検討、については当初意図した研究成果が得られなかった。しかし、他の多数の研究課題については 100%あるいはそれ以上の成果を得ることが出来た。しかも、5 年間の研究の推進過程において、急進展をした SOFC 研究技術社会の中で浮上した「低温化」の課題に、いち早く対応し、SOFC の低温化がガスタービンの高温化指向と逆行するもの、中低温 SOFC を基盤とするハイブリッドシステムが効率の点で、高温 SOFC を基盤とするシステムに比べて大きな遜色を持つものではなく、むしろメタルタービンを利用できる点で現実的ターゲットとして適当であることを世界に先駆けて発表したこと、これに基づいて一段とレベルアップした新しい目標を掲げて研究を推進し、むしろ当初目指した研究成果よりも高度の成果が達成できたこと、研究陣容を強化したことも相俟って、（イ）SOFC 構成材料の開発、（ロ）触媒燃焼の研究、（ハ）吸収式冷凍機の研究など、より広がりを持つ分野に跨る研究成果が得られたことなど、高い評価を頂けるものと考えている。

5 年間にわたって総額としてはかなりの研究費を頂いたので、相当の研究成果を出すことが出来たと自負しているが、チームの組織が大きかったために、それぞれのグループの研究費としては研究費の欠乏感があったし、他の研究費を上乗せして成り立った研究も少なくない。振り返って見ると、研究開始時点で受けた指導通りに、グループの絞り込みを行うことも一つの選択であったかとも考える。また、多数のグループが取り組んだ研究課題の中には、研究代表者が考えるターゲットに合致しないものも無かった訳ではなく、研究費の投資効果について若干の反省も無い訳ではない。しかし、研究活動は本来研究者の自由な発想のもとに行うべきものであることからすると、このことについて近視眼的判断を行うことは早計とも考えられ、また当初のグループ作りの段階で行うべき絞り込みが不十分であった結果とも言えるので、これらの反省材料はチーム構成員全員の今後の研究活動に活かしたいと考える。しかし、結論的に言えば、総じて研究費の使い方は適切であり、ほぼ満点に近い評価を頂けるものと判断している。

それぞれのグループの中で、中堅、若手研究者が研究推進に大きな貢献をし、その過程で逞しい研究者として活躍するに到ったことは、研究代表者として大きな成果の一つと考えている。また、外国のポスドク研究者の育成にも貢献をしたが、その一人については本

研究に参加した経験を活かして、韓国内で本課題と同じ研究プロジェクトを立ち上げることに成功したものもあり、国際的に見ても若手研究者の育成に意義があったと判断している。

本課題を戦略的基礎研究推進事業の 1 課題として採択頂いたお陰で、以前から我が国が世界の学術技術界の中核を占めている SOFC 自体はもちろん、分散電源としてのハイブリッドシステムに関しても、我が国の研究レベルを、世界を牽引するレベルにまで引き上げることに貢献できた点で、大変良い経験をさせて頂いたことに感謝しており、今後も研鑽を重ねて行きたい考えである。



京都大学 研究室メンバー