

国際科学技術共同研究推進事業
地球規模課題対応国際科学技術協力プログラム（SATREPS）

研究領域「低炭素社会の実現に向けた高度エネルギーシステムに関する研究」

研究課題名「高効率燃料電池と再生バイオガスを融合させた
地域内エネルギー循環システムの構築」

採択年度：平成 26 年度/研究期間：5 年/相手国名：ベトナム

終 了 報 告 書

国際共同研究期間*1

平成 27 年 4 月 3 日から令和 2 年 3 月 30 日まで

JST 側研究期間*2

平成 26 年 5 月 1 日から令和 2 年 3 月 31 日まで

（正式契約移行日 平成 27 年 1 月 1 日）

*1 R/D に基づいた協力期間（JICA ナレッジサイト等参照）

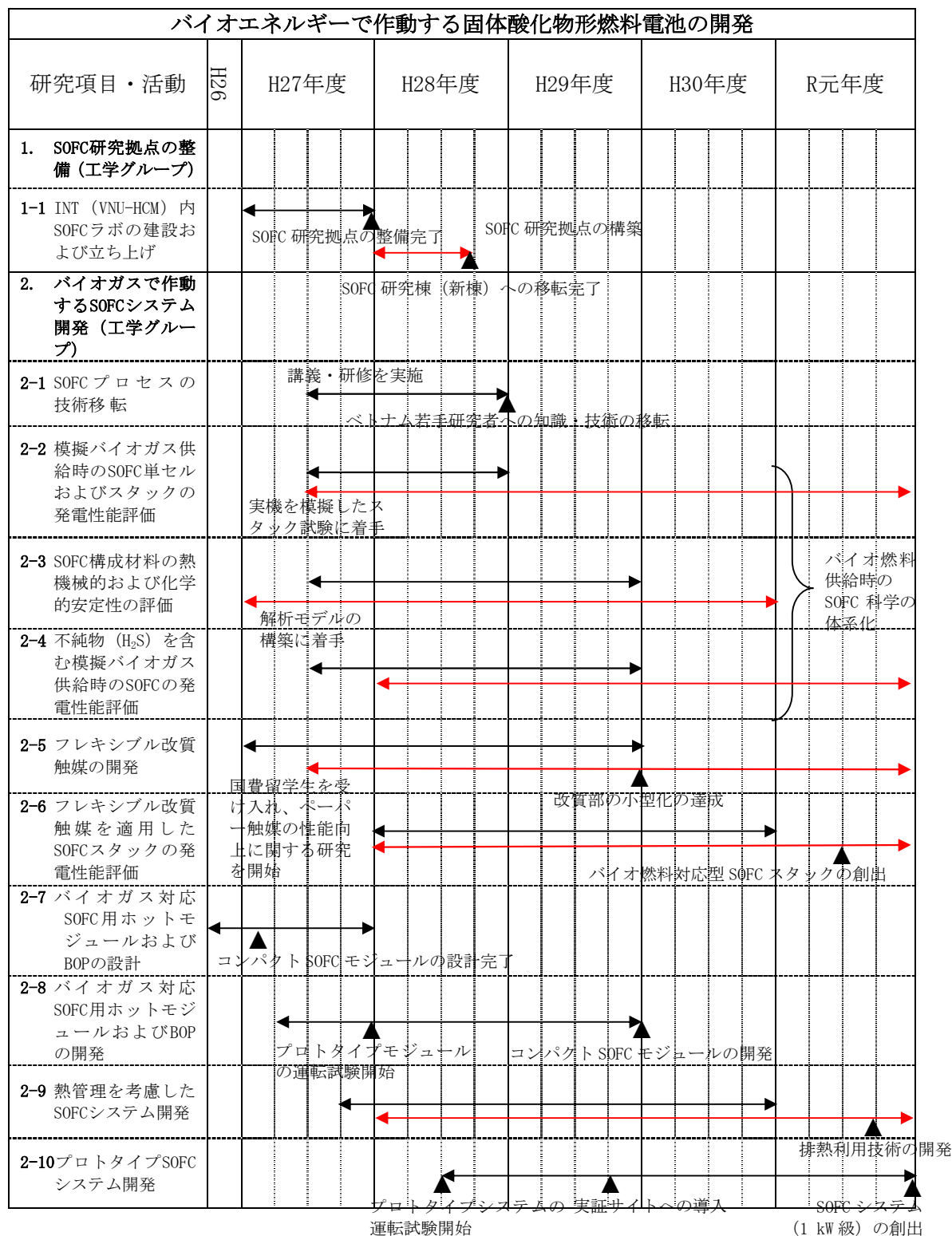
*2 開始日=暫定契約開始日、終了日=JST との正式契約に定めた該年度末

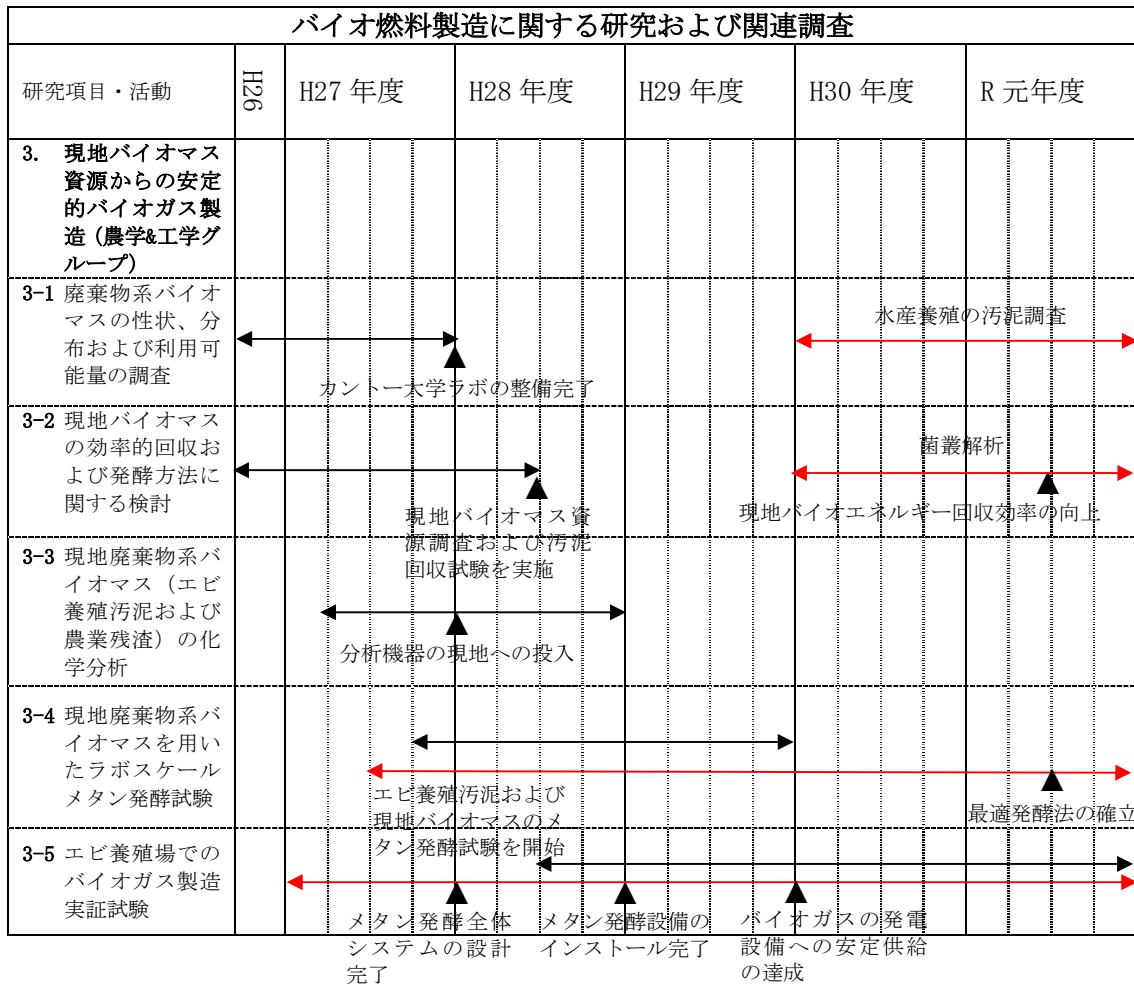
研究代表者：白鳥 祐介

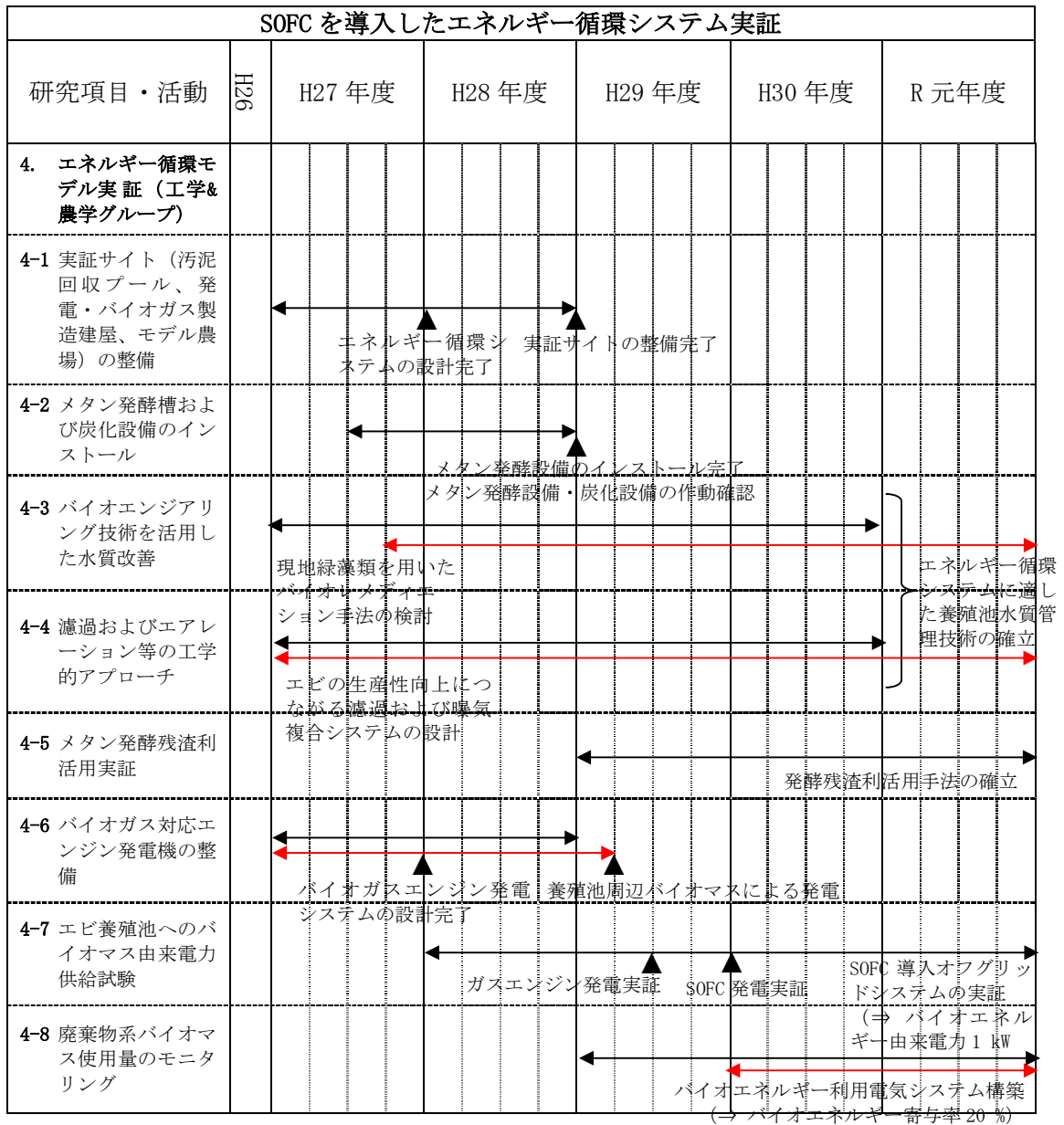
I. 国際共同研究の内容(公開)

I-1 当初の研究計画に対する進捗状況

I-1-(1) 研究の主なスケジュール







メコンデルタ地域における SOFC 技術システム普及ロードマップの構築						
研究項目・活動	H26	H27 年度	H28 年度	H29 年度	H30 年度	R 元年度
5. SOFC システムの普及ロードマップデザインの作成（普及ロードマップ策定グループ）						
5-1 社会経済的問題および環境問題の分析基盤の構築						
5-2 現地ニーズの分析と技術移転・普及のためのシナリオデザイン*						
5-3 SOFC のメコンデルタ地域への普及に向けた政策立案・制度設計*						
5-4 地域ステークホルダーを対象としたワークショップ開催のための運営委員会による協議						
5-5 メコンデルタ現地におけるワークショップの開催						
5-6 シナリオ分析およびワークショップにおける議論に基づいた普及ロードマップ策定						

*静岡大学の新規参画により、新たに「普及ロードマップ策定グループ」を組織したため、内容を変更

I-1-(2) 中間評価での指摘事項への対応

中間評価では、「水質汚染等が問題となっている養殖汚泥を有効利用して SOFC を運転し、養殖による環境負荷を軽減するという当初のプロジェクト目標に従い、今後エビ養殖場デモサイトでの実証試験と並行し周辺養殖池の汚泥集積池の汚泥や他養殖産業汚泥の組成分析を行い、ウェットなバイオガス発酵を実証に組み込む努力を行ない、汚泥のバイオマスとしてのポテンシャルを改めて検討することが望まれる。」との指摘を受けていた。

本プロジェクトに実証サイトを提供しているエビ養殖場が、2019 年春の養殖より、ヘドロを連続的に排出する機能を付与した養殖池を新たに整備してバナメイエビの生産を行うようになり、これにより、エネルギー（メタン）を環境に放散する前のヘドロ、加えてエビの脱皮殻を回収できるようになったため、これらエビ養殖残渣のみでのメタン発酵を行い、エネルギーポテンシャルを評価した。

I-1-(3) プロジェクト開始時の構想からの変更点(該当する場合)

該当なし。

I-2 プロジェクト成果目標の達成状況とインパクト(公開)

I-2-(1) プロジェクト全体

プロジェクト全体のねらい

インドシナ半島の南東部に広がるベトナム・メコンデルタ地域(図 1)は、約 40,000 km²の面積を有し、ベトナムの人口の 2 割にあたる約 1,800 万人の住民が暮らし、同国 GDP の約 2 割を占める農林水産業において、当地域が総生産量の半分以上を担っている。

ベトナムでは、90 年代以降、エビ養殖が同国の主要な輸出産業に位置付けられ、世界的に水産物の需要が増える中で、自然の調整能力にまかした粗放型の養殖(養殖密度:数匹 m⁻²)から、短期的な利益を狙った集約型の高密度養殖(養殖密度:100~300 匹 m⁻²)が広まって行った。メコンデルタ地域では、現在、年間約 60 万トン(ベトナムの 83%)のエビを養殖で生産しており、我々が本研究で対象としたメコンデルタ内のベンチェ省では、2000 年~2010 年にかけて省内の交通インフラの発展と共にエビ養殖業が拡大して行き、年間約 5.5 万トンを生産している[1]。

表 1 に、2017 年のベトナムの都市および農村人口を示す。ベンチェ省の農村人口比率は 89.3%であり、ベトナムの平均を大きく上回る。ベトナムは工業国化を目指しているものの、当面農業国であり、農村人口比率が高く貧困層の多いベンチェ省等の地域では、農林水産業の持続的発展が多くの住民の生活改善に最も重要である。



図 1: インドシナ半島の南東部に広がるベトナム・メコンデルタ地域 (Google マップ)

表 1: ベトナムの都市部・農村部の人口 (2017 年) [1]

	人口 / 千人			農村人口比率 / %
	都市部	農村部	合計	
ベトナム全土	32,813.4	60,858.2	93,671.6	65.0
ハノイ	4,367.1	3,053.0	7,420.1	41.1
ホーチミン	6,825.3	1,619.3	8,444.6	19.2
メコンデルタ地域	4,527.2	13,210.8	17,738.0	74.5
ベンチェ省	135.1	1,131.6	1,266.7	89.3

ベンチェ省でも主要な産業となっている集約型エビ養殖であるが、科学的な見地に立った管理の行き届いた生産が行われているとは言い難く、生産性、持続性が共に低く、「I. ヘドロの堆積による池内環境の悪化とそれによる病害の発生・稚エビの大量死」、「II. 収穫後の養殖水およびヘドロの河川への放出による環境汚染」、「III. 病害発生養殖池の放棄と新たな養殖池のためのマングローブ林開拓による生態系破壊」などの弊害が生じており、環境保全および食料安全保障の観点から、持続的養殖システムの構築が急務となっている。

ベトナムのエネルギー事情を見てみると、メコン川をはじめ豊富な水資源に恵まれていることから、現在、水力発電が発電量全体の約 4 割を占めているが、高い経済成長率(約 6%)を維持し、電力需要が毎年 10%以上伸びている同国では、電力不足を補うため石炭火力発電設備を増やしてきており(現在約 3 割)、2030 年には、電力の 5 割以上を石炭火力が占めるものと予想されている[2]。さらに、近年電力需要が急増している南部地域では、北部や中部から電力を融通している状況であり、送電ロスが高まる傾向にある[2]。このように

ベトナムでは、地域社会の持続的な発展に向けて電力の安定供給が大きな課題となっており、低炭素化および電力の安定供給に寄与する高効率分散型電源の社会受容性が極めて高いと言える。

以上、ベトナムを例に挙げたが、経済成長著しい ASEAN 諸国では、いずれもバイオマス廃棄物の増加による環境汚染や電力の安定供給が大きな問題となっており、バイオマス廃棄物を電力に変換して地域産業に利活用する地産地消のエネルギーシステムが普及すれば、上記課題を同時に解決に導くことが期待されるだけでなく、地球規模の低炭素化にも貢献できるであろう。

九州大学水素エネルギー国際センターを日本側代表機関とする本プロジェクトでは、バイオマス廃棄物を用いた発電に固体酸化物形燃料電池 (SOFC) を適用することを提案し、ベンチェ省・ビンダイ地区の集約型エビ養殖場を実証サイトを選定して、2015 年 4 月より、ベトナム国家大学ホーチミン市校 (VNUHCM)・ナノテク研究所 (INT) を相手国代表機関とするベトナム側研究機関と、5 年間の国際共同研究「高効率燃料電池と再生バイオガスを融合させた地域内エネルギー循環システムの構築」を開始した。プロジェクトの開始は、Viet Nam News (2014 年 8 月)、日本経済新聞 (2014 年 10 月)、ベンチェ省テレビ局 THBT (2015 年 11 月) 等で報道された。

研究運営体制

本プロジェクトには、**図 2** に示す通り、日越双方の代表機関に加え、九州大学大学院農学研究院、静岡大学、カントー大学 (CTU)、ホーチミン市工科大学 (HCMUT) および日本企業 4 社 (マグネクス株式会社、明和工業株式会社、ダイセン・メンブレン・システムズ株式会社、株式会社中山鉄工所) が参画し、メコンデルタ地域の持続的発展に貢献すべく、農工・産学・国際連携体制を構築し、INT にプロジェクトオフィスを設置して、JICA プロジェクト業務調整員の多大な協力の下、鋭意活動を行った。



図 2 : 農工・産学・国際連携に基づく本プロジェクトの研究体制

バックグラウンドが多岐に渡る日越双方の研究者総勢約 60 名が参画した本プロジェクトでは、研究分野により、工学グループ、農学グループおよび普及ロードマップ策定グループに分け、それぞれのグループが、上位目標の実現に向けたプロジェクト目標を設定し、

基礎研究から実証研究までを行った。日越間および各グループ間の日々の情報交換は主にメールで行い、日本側専門家の訪越時にホーチミン市またはベンチェ省でミーティングを行うだけでなく、プロジェクト参画者が一堂に会する日越合同会議および合同調整委員会（JCC）において情報共有を図りながらプロジェクトを遂行した（表 2 参照）。

表 2：本プロジェクトにおける日越合同会議および JCC の開催実績

日越合同会議		
開催日	場所（開催国）	参加人数（ベトナム側）
2018 年 7 月 13 日	九州大学 椎木講堂（日本）	40 名（8 名）
2017 年 9 月 6 日	INT（ベトナム）	30 名（14 名）
2016 年 7 月 22 日	九州大学 稲盛ホール（日本）	48 名（8 名）
2015 年 8 月 28 日	九州大学 稲盛ホール（日本）	41 名（7 名）
JCC		
開催日	場所（開催国）	参加人数（ベトナム側）
2019 年 1 月 8 日	INT, VNUHCM（ベトナム）	17 名（9 名）
2017 年 11 月 29 日	INT, VNUHCM（ベトナム）	18 名（11 名）
2017 年 1 月 17 日	INT, VNUHCM（ベトナム）	13 名（8 名）
2015 年 11 月 17 日	INT, VNUHCM（ベトナム）	15 名（9 名）

地球規模課題解決に資する重要性、科学技術・学術上の独創性・新規性

工学グループは、産学連携の下、バイオガス（メタン（約 60%）と二酸化炭素（約 40%）の混合ガス）の供給で作動する 1 kW 級の SOFC システム（バイオガス SOFC） の開発に取り組み、バイオガス発電では世界最高レベルとなる発電効率 62.5%（ガスエンジン発電機の 3 倍）を達成した（詳細は p26～30 参照）。（PO: 2-7～2-10）

農学グループは、エビ養殖池へドロに生息するメタン生成菌を利用したメタン発酵を確立し、エビ養殖池へドロに加え、現地で容易に入手できるバイオマス廃棄物（稲わら、サトウキビの搾りかす（バガス）およびココナッツの搾りかす）を資材として、加温・保温なしのバイオガス製造に成功した（詳細は p40～49 参照）。（PO: 3-1～3-5）

途上国農村部に適したエネルギーおよび物質循環を先駆的に実証することを目的とし、工学グループ、農学グループが連携し、2016 年 12 月に、ベンチェ省ビンダイ地区の Hoang Vu エビ養殖場内に（図 3 上参照）、バイオマス廃棄物を資源として利用した循環システムのパイロットプラントを構築し（図 3 下）、2017 年 12 月に、工学グループが開発したバイオガス SOFC システムを導入した。当パイロットプラントのコンセプトは、以下の通りである。エビ養殖池の底に蓄積したヘドロを、(I) 水循環膜ろ過システムを用いて回収・濃縮し、得られた濃縮ヘドロを、近隣で回収した稲わら、ココナッツの搾りかす、バガスとともに(II) メタン発酵槽に供給し、バイオガスを製造する。脱硫後のバイオガスを(III) SOFC に供給して 60%を超える極めて高い発電効率（エンジン発電機の 3 倍の効率）で電力に変換し、このバイオエネルギー由来の電力で(IV) マイクロバブルディフューザー（MBD）の稼働を行う。(II) から排出される消化液は、近隣で回収した籾殻と混合し、乾燥後、(V) 炭化設備で炭化物とし、土壌改良材あるいは肥料として農業生産に利用する。(I) で得られた透過水は稚エビ育成に用いる。（PO: 4-1, 4-2, 4-4, 4-5, 4-7, 4-8）

普及ロードマップ策定グループは、現地のエビ養殖ビジネスのネットワーク分析、土地利用調査およびワークショップ等の活動を通して、上記循環システム内の要素技術（膜ろ過および MBD）の社会実装およびメコンデルタ地域における新たな研究プロジェクトの創出を実現した（詳細は I-2-(5) 節（p73～77 参照）参照）。（PO: 5-1, 5-2）



図 3：ベトナム・ベンチエ省ビンダイ地区の Hoang Vu エビ養殖場（実証サイト）内に構築したバイオマス廃棄物利用エネルギー循環システムのパイロットプラント：（上）実証サイトの位置（Google マップ）、（下）プラントの全体像

我々は、図 3 のパイロットプラントにおいて、現地のバイオマス廃棄物から製造したバイオガスを、産学連携（マグネクス-九州大学）の下開発した 1 kW 級バイオガス SOFC システムに供給して、東南アジア地域初となる SOFC 発電実証を 2018 年 1 月より開始し、エンジン発電機の倍に達する発電効率 53.1%（直流発電端）を記録した。当成果を、2 年に 1 回開催される欧州最大の SOFC 関連の国際学会（13th EUROPEAN SOFC & SOE FORUM）にて、INT および参画企業と共同発表し（2018 年 7 月開催）、300 件以上の発表の内、1 件のみに与えられる最優秀賞（The Best Scientific Contribution, Christian-Friedrich-Schönbein medal（図 4））を受賞した。2019 年 7 月には、バイオガス発電としては世界最高レベルとなる発電効率 62.5%（直流発電端）を達成したが、この発電効率は同じ出力のエンジン発電機の 3 倍に達するものであり、新聞、テレビ等、各種



図 4：13th EUROPEAN SOFC & SOE FORUM にてメダルを授与される研究代表者

メディアで報道された（表 3 参照）。上記 SOFC システムは、開発途上国の農村部や僻地で使えるよう、バイオガスを、不純物（硫化水素）を除去するだけでそのまま供給できるシンプルな設計とし、ネットワークを通じて遠隔監視・遠隔操作が可能な仕様となっている。

（PO: 2-7～2-10）

当プロジェクトの成果が各種メディアを通じて広く発信されたことにより、国内外の複数の企業よりコンタクトがあり、現在、バイオガス SOFC の地球規模の普及に向け、新たな連携の準備を進めているところである。

表 3：各種メディアで報道された地球規模課題の解決に資する本プロジェクトの成果

SOFC の実証研究、バイオガスの供給により世界最高レベルの発電効率 62.5%を達成	
2019 年 9 月 11 日	EMIRA（インターネットメディア）“ヘドロや稲わらが原料に！ 九大がベトナムのエビ養殖池でバイオガス発電の高効率化を達成”
2019 年 9 月 9 日	みなと新聞“九大院 エビ養殖池汚泥から電力へ発電効率世界最高の 6 割～”
2019 年 8 月 17 日	朝日新聞“廃棄物活用し高効率発電～九大など ベトナムで実証実験中の燃料電池～”
2019 年 8 月 15 日	日本経済新聞“エビ廃棄物で発電～九大、ベトナムで実験成功～”
2019 年 8 月 3 日	毎日新聞“世界最高級 バイオ発電効率 62.5%”
2019 年 8 月 2 日	九州大学プレスリリース“ベトナム・メコンデルタにおける固体酸化物形燃料電池（SOFC）の実証研究～バイオガスの供給により世界最高レベルの発電効率 62.5%を達成～”
東南アジア初の固体酸化物形燃料電池（SOFC）の実証研究を開始	
2018 年 7 月 1 日	九大広報特集記事「フロントランナー」“農業・水産養殖業から出る有機性廃棄物を資源として用いた世界初のエネルギー循環システムを開発 燃料電池で産業の未来、地域の暮らしを変える”
2018 年 3 月 1 日	日経 xTEC “バイオガスで燃料電池を稼働、発電効率 53%を達成～ベトナムのエビ養殖場内にエネルギー循環システムを構築～”
2018 年 2 月 24 日	NHK ニュース “エビ養殖池汚泥を使って燃料電池発電、ガスエンジンの倍の効率を達成”
2018 年 2 月 23 日	国立環境研究所 環境展望台 国内ニュース “九州大など、ベトナムのエビ養殖場でバイオガスを燃料とする SOFC 発電実証を開始”
2018 年 2 月 23 日	日本経済新聞（電子版）“九大、固体酸化物形燃料電池（SOFC）の実証研究を開始”
2018 年 2 月 21 日	九州大学プレスリリース “東南アジア初の固体酸化物形燃料電池（SOFC）の実証研究を開始～ベトナム・メコンデルタにおいてバイオガスの供給により発電効率 53%を達成～”

日本人人材の育成(若手、グローバル化対応)、人的支援の構築(留学生、研修、若手の育成)等

開発した技術を途上国社会に広めるためには、相手国研究者・技術者の育成と地域ステークホルダーの理解が不可欠であり、本プロジェクトでは、個人（実習）、組織（相手国研究機関での講義および共同研究）および社会（プロジェクトワークショップの開催）の各階層におけるキャパシティ・ディベロップメントを目的とした活動を行った（図 5）。技術協力第 1 期（2015 年度）より、ベトナムにて、プロジェクトワークショップを毎年開催し（表 4 参照）、第 4 回（2018 年度）には、過去最高の約 280 名のステークホルダー（地域人民委員会およびベトナム科学技術省からの来賓、水産養殖業者および地域住民）の参加があり、開発・実証するエネルギー循環システムおよび各要素技術がもたらす便益が広範にわたって共有される機会となった。最終年度（2019 年度）に開催した第 5 回は、ターゲットをベトナム国内の企業に絞り、現地企業 4 社に加え、サイゴンハイテクパーク、ホーチ

ミン環境研究所も参加し、SATREPS 後の連携に向けた交流を行った。

ワークショップでは、第1回目より、エビ養殖池の底に堆積したヘドロを排出しながら養殖をする意義について説明を行ってきたが、当プロジェクトに実証サイトを提供している Hoang Vu 養殖場では、2019 年春の養殖から、ヘドロを連続的に排出する機能を付与したエビ養殖池を新たに整備してバナメイエビの生産を行うようになり、質の良い大型のエビが収穫できるようになったが、当養殖法の採用により、エネルギー（メタン）を環境に放散する前の“フレッシュな”ヘドロ、加えてエビの脱皮殻を回収できるようになったことで、これらエビ養殖残渣を資材としたバイオガス製造の実現可能性を実験的に示すことができた。（p30～35、p40～42 参照）（PO: 3-1～3-5）



図 5：当プロジェクトで実施した個人、組織および社会の各階層におけるキャパシティ・ディベロップメントの様子

表 4：ベトナムにおけるプロジェクトワークショップの開催実績

開催日	場所	参加人数
2019 年 9 月 20 日（第 5 回）	ホーチミン、INT	約 60 名
2018 年 5 月 7 日（第 4 回）	ベンチェ、Viet Uc Hotel	約 280 名
2017 年 11 月 12 日（第 3 回）	ファンティエット、Ocean Dunes Resort	約 120 名
2016 年 12 月 20 日（第 2 回）	ベンチェ、Viet Uc Hotel	約 200 名
2015 年 11 月 16 日（第 1 回）	ベンチェ、Viet Uc Hotel	約 200 名

本プロジェクトでは、キャパシティ・ディベロップメントの加速を目的とし、SATREPS およびベトナム政府の支援により、VNUHCM 内にベトナム初の SOFC 研究開発ラボ（図 6）を整備し、2016 年 9 月より運用を開始した。プロジェクト終了後も、当ラボを拠点として日越双方の若手研究者の育成を推進し、ベトナムにおける燃料電池およびナノテク関連研究の促進が大いに期待されることから、2018 年 7 月に九州大学-VNUHCM の大学間学術交流協

定（図 7）、2019 年 12 月には大学間学生交流協定が締結され、本プロジェクトをきっかけに、今後、次代を担う日越双方の人材育成をさらに強化して行く体制が整えられた。（PO: 1-1, 2-1～2-6, 5-1, 5-2）



図 6：VNUHCM 内に立ち上げた SOFC 研究開発ラボ

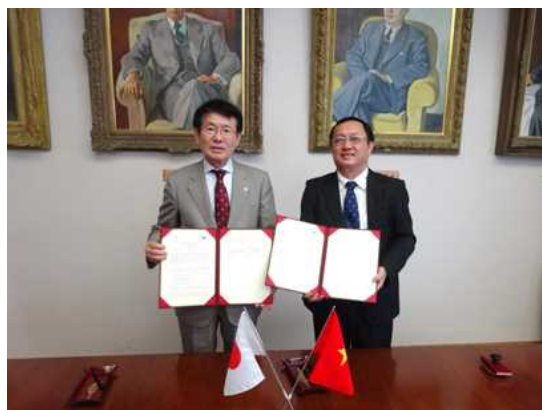


図 7：大学間学術交流協定の締結（2018 年 7 月）；（左）九州大学・久保千春総長、（右）VNUHCM・Huynh Thanh Dat 学長（九州大学・伊都キャンパスにて）

研究代表者は、本プロジェクト実施期間中に、カウンターパートである VNUHCM から 3 名の留学生を受け入れ（九州大学工学府・水素エネルギーシステム専攻の博士後期課程に入学）、内 2 名が博士号を取得し、1 名は博士課程に在学中である（表 5 参照）。以上の SATREPS を通じた学術交流が、九州大学-VNUHCM の共著論文 11 報の成果発表につながった。（PO: 2-1～2-10）

表 5：本プロジェクト・カウンターパートからの留学生の受け入れ実績（九州大学工学府・水素エネルギーシステム専攻、指導教員：白鳥 祐介）

出身大学	入学月/博士号 取得月・学位	学位論文タイトル	現所属
VNUHCM (INT)	2019 年 4 月/在 学中	Study on flexible catalyst material for compact fuel cell system (燃料電池のコンパクト化 に資するフレキシブル触媒材料 に関する研究)	九州大学在学中
VNUHCM (University of Science)	2015 年 10 月 /2019 年 3 月・ 博士 (工学)	Design and development of coking tolerant paper-structured catalyst for biogas reforming in SOFC (バイ オガスの直接供給による燃料電 池発電の実現を目指した炭素析 出耐性を有するペーパー触媒の 開発)	本邦自動車会社
VNUHCM (HCMUT)	2014 年 10 月 /2017 年 9 月・ 博士 (工学)	Modeling of methane multiple reforming in biogas-fuelled SOFC and its application to operation analyses (バイオガス 直接供給固体酸化物形燃料電池 におけるメタン複合改質反応の モデル化と動作解析への応用)	Automotive Engineering, Faculty of Transportation Engineering, HCMUT

本プロジェクトでは、ベンチェ省ビンダイ地区に構築した実証サイトを農工連携の拠点として学際的な研究活動を行ったが、これを成功させたのは、プロジェクトで整えた安全管理体制とトラブル対策によるところが大きい。全参画者に対して、ベトナム渡航前に緊急連絡先届の提出を義務づけ、所属先、個人の緊急連絡先の確認を行い、日本側プロジェクトメンバーのベンチェ滞在中は JICA プロジェクト業務調整員の同行を基本とし、有事の際は各関係機関に迅速に情報伝達を行うこととした。

2016 年度より、INT が Hoang Vu エビ養殖場従業員 1 名を、プラントに常駐するオペレーターとして雇用し、当オペレーターの協力の下、遠隔モニタリングシステム※を活用してパイロットプラントの運転管理を行った。トラブル発生時には、オペレーター ⇒ INT ⇒ 業務調整員 ⇒ 九州大学の連絡系統で迅速に対応できる体制とした。さらに、ベトナム側のみでもトラブルに対処できるよう、本邦参画企業が作成した各要素設備の詳細マニュアルを英文化し、これらをベトナム側に提供した上で、2017 年 2 月に、パイロットプラント各構成設備のスタートアップ試験を行い、日本側専門家（企業参画者および研究代表者）が、ベトナム側（INT、CTU、HCMUT およびオペレーター）に対して、各設備の取扱い説明を実施した。

※インターネット回線を利用した Virtual Private Network (VPN) を構築し、日本からの遠隔運転監視および遠隔メンテナンスを可能とした。高解像度のウェブカメラを備えた当システムの導入により、稼働状況のリアルタイム観察のみならず、各設備の運転データ収集の効率化、トラブルの未然防止およびトラブル対応の迅速化を実現している（図 70 参照）。

上位目標達成に向けて、我々は、SATREPS 終了後もメコンデルタ地域で継続的に活動して行く方針であり、特に最終年度（2019 年度）は、さらなる発展や新たな展開を念頭に活動を行い、普及ロードマップ策定グループ・藤本准教授がトヨタ財団助成金に採択され、2019 年 11 月より、CTU 資源環境学部との新たな学術連携を開始した。CTU 資源環境学部は、

10 年来、コミュニティバイオガスおよび肥料成分固定化を目的としたバイオマス炭化の研究を行ってきており、当学部の学部長より、本 SATREPS プロジェクトにてベンチェに構築した実証サイトを学部生の研究教育の場として活用したいとの申し出があり、2019 年 12 月に、CTU 資源環境学部の研究者（6 名）およびサイト管理責任者である INT の研究者（5 名）、加えて、INT が連携中のベトナムの環境関連企業（8 名）に対して、技術講習会（4 L 発酵試験の方法、7 m³ メタン発酵設備の運転管理方法、炭化設備の運転管理方法）を開催し（図 8）、2020 年度からの新たな活動体制を整えた。



図 8：ベンチェ実証サイトにおける技術講習会（2019 年 12 月 16 日～18 日開催）の様子

本プロジェクトで開発・実証したバイオガス SOFC をはじめとする技術は、当然ながら本邦でも適用すべきものであり、プロジェクトで得た成果や教訓を、本邦におけるセミナーやワークショップにて、市民、企業、学会関係者、留学生、国際協力従事者に積極的に発信した（表 6 参照）。

表 6 : 本プロジェクトに関する本邦での情報発信の実績（研究代表者講演分）

講演日時	イベント名/開催場所/対象
2019 年 12 月 20 日	第 20 回触媒学会バイオマス変換触媒セミナー『多様化するバイオマス資源の利活用技術』/九州大学カーボンニュートラルエネルギー国際研究所大ホール C（福岡）/触媒関連研究者
2019 年 7 月 26 日	科学と開発をつなぐブリッジ・ワークショップーSATREPS 研究成果の発表と社会実装への取組みに向けてー/JICA 市ヶ谷ビル（市ヶ谷）/国際協力従事者
2018 年 11 月 21 日	QB ファンド第 6 回技術交流会/SRP センタービル（福岡）/企業
2018 年 11 月 6 日	福岡水素エネルギー人材育成センター 平成 30 年度技術者育成セミナー「水素入門コース」/博多バスターミナル貸ホール（福岡）/企業技術者
2018 年 9 月 26 日	ワークショップ「アグリコラボいとしま」/九州大学椎木講堂（福岡）/農業関係者・研究者
2018 年 1 月 25 日	第 15 回ビジネス創造交流会/博多座・西銀ビル（福岡）/企業経営者
2017 年 10 月 13 日	第 56 回工業物理化学講習会/九州大学筑紫キャンパス（福岡）/電気化学関連研究者
2017 年 6 月 5 日	シンポジウム「農的エネルギーの新展開」/九州大学椎木講堂（福岡）/農学関係者
2017 年 4 月 14 日	第 45 回サイエンスカフェ@ふくおか/BIZCOLI 交流ラウンジ（福岡）/一般市民
2016 年 10 月 28 日	唐津市水素・再生可能エネルギー導入促進セミナー/大手口センタービル（唐津）/環境関連企業
2016 年 9 月 17 日	Vietnamese-Japanese Students' Scientific Exchange Meeting (VJSE 2016)/九州大学伊都キャンパス西講義棟（福岡）/ベトナム人留学生
2015 年 12 月 19 日	International Symposium of SATREPS-programs on Sustainable Aquatic Bioresources/東京海洋大学（品川）/水産技術・農学関連研究者
2015 年 12 月 20 日	SATREPS 国際シンポジウム「SATREPS 水産養殖技術開発研究プロジェクトネットワーク」/東京海洋大学（品川）/水産技術・農学関連研究者
2015 年 6 月 17 日	ビジネスショウ&エコフェア 2015 「循環型社会システム研究フォーラム」～九大発！再生可能エネルギー研究開発の最前線～/福岡国際センター（福岡）/企業・一般市民

I-2-(2) 研究題目 1: バイオエネルギーで作動する固体酸化物形燃料電池の開発 (工学グループ、リーダー: 白鳥 祐介)

I-2-(2)-① 研究のねらい

“燃料を燃やさずに発電する”固体酸化物形燃料電池(SOFC)は、熱機関の2~3倍の発電効率を有し、当技術が分散型電源として普及すれば、ベトナムの環境エネルギー問題の解決に寄与できるものと考えている。この上位目標の達成のためには、燃料電池技術・低炭素化技術に関する研究教育ネットワークを相手国側に構築し、技術の普及を牽引できる相手国側および日本側の若手人材の育成を継続して行うことが最も重要なミッションであると同時に、システムの現地対応化を図り、社会受容性を高めなければならない。以上の目的のためベトナム側代表機関であるVNUHCM-INTおよび参画企業(マグネクス)と連携して、以下の取り組みを行う。(PDM: Output 1 and 2)

- 項目 i** ベトナム初のSOFC研究開発拠点の整備と人材育成(PO: 1-1, 2-1, 2-2)
- 項目 ii** SOFCのさらなる性能向上と小型化に資する直接内部改質型SOFC(DIR-SOFC)の実現に向けた研究開発(PO: 2-1~2-6)
- 項目 iii** バイオガスSOFCシステムの設計および開発(PO: 2-7~2-10)
- 項目 iv** バナメイエビ養殖残渣のエネルギーポテンシャル評価(PO: 3-1~3-3, 4-8)

I-2-(2)-② 当初の計画(全体計画)に対する成果目標の達成状況とインパクト

項目 i ベトナム初のSOFC研究開発拠点の整備と人材育成

VNUHCM内にベトナム初のSOFC研究開発ラボ(図6参照)を整備し、2016年9月より運用を開始した。当ラボを活用して国際共同研究を推進しつつ相手国側の人材育成を行い(プロジェクト期間中に、3名のVNUHCM出身者が九州大学工学府・水素エネルギーシステム専攻に入学。内2名が博士号取得、1名は現在博士課程に在学中。(表5参照))、当連携により共著論文11報の成果が生まれ、VNUHCMとの大学間学術交流協定の締結につながった(図7)。以上、国際協力およびキャパシティデベロプメントの観点で、当初計画以上のインパクトを与えることができた。(PO: 1-1, 2-1, 2-2)

項目 ii SOFCのさらなる性能向上と小型化に資する直接内部改質型SOFC(DIR-SOFC)の実現に向けた研究開発

途上国農村部では、住民の生活に分散型発電機が欠かせない。発電機の高効率化の鍵は、燃料を“燃やして使う”エンジン発電機(発電効率: 20~30%)から“燃やさずに使う”燃料電池(発電効率: 40~60%)への転換である。エンジン発電機の場合、燃料の持つ化学エネルギーを燃やして一旦熱エネルギーに変換するので、エネルギーの質が低下する上、熱がさらに運動エネルギーに変換され、ようやく電気エネルギーが得られるためロスが大きくなる。一方、燃料電池の場合は、電気化学プロセスにより、燃料から直接電気エネルギーを取り出すので、効率が高まる。

固体酸化物形燃料電池(Solid Oxide Fuel Cell: SOFC)(図9)は、セラミックス材料からなる燃料電池であり、作動温度が高く(700℃付近)電極反応がスムーズに進むため、50%以上の発電効率を示す。この発電効率は、数種類の燃料電池の中でも最も高く、エンジン発電機の倍に達する。このような優位性にも関わらず、地球規模で普及しているエンジン発電機に比べ、SOFCの普及が進んでいるとは言えず、特に、途上国での導入事例はほとんどない。この状況を打破するためには、用途拡大、コンパクト化・低コスト化、さらなる高効率化など、途上国にも実装できるような技術革新が不可欠である。

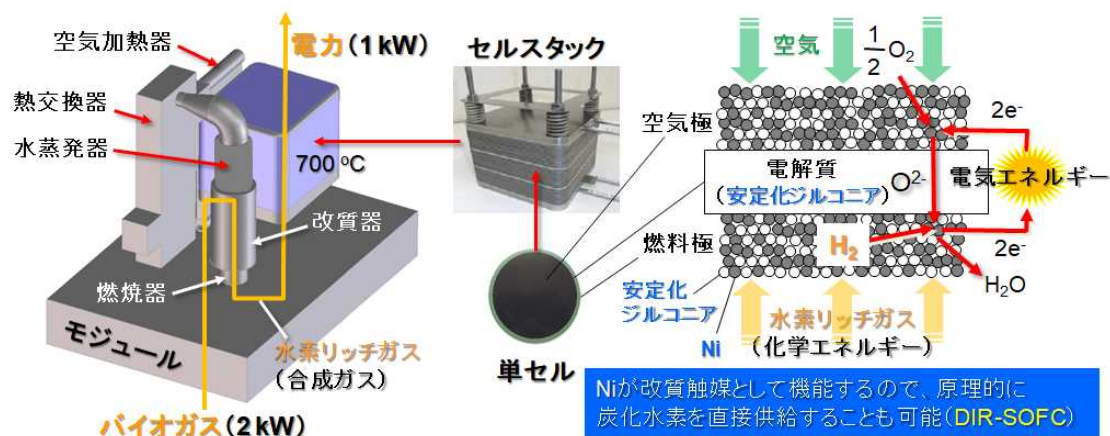


図 9：固体酸化物形燃料電池（SOFC）の構成（モジュール、セルスタック、単セル）と発電原理

SOFC の場合、原理的には炭化水素を直接供給することができ、この際、供給された炭化水素は、Ni ベースの多孔質燃料極内で Ni の触媒作用により水素に改質され、生成した水素がその場で電気化学的に酸化されて発電が行われる。この発電方式は直接内部改質型（Direct Internal Reforming: DIR）の発電と呼ばれ、SOFC のコンパクト化および高効率化に寄与する発電コンセプトであり、バイオガスで作動する DIR-SOFC が実用化されれば、水素インフラのない地域にも燃料電池が広まって行くことが期待される。本プロジェクトでは、バイオガス SOFC システムの開発（項目 iii）を産学連携の下着実に進めつつ、VNUHCM とは、SOFC のさらなる性能向上と小型化に資する、次世代型 SOFC（バイオガス DIR-SOFC）に関する基礎研究に取り組んだ。

「ペーパー触媒（Paper-structured catalyst: PSC）」は、無機繊維ネットワークの中にバイオガスから水素を製造する触媒粒子を分散させたシート状の触媒構造体であり、これを SOFC の燃料極上に積層させることで、バイオガス DIR-SOFC の性能を格段に向上させることができると期待される。工学グループでは、バイオガス供給時の DIR-SOFC 科学の体系化を目的とした研究テーマ（「メタン複合改質反応のモデル化」、「PSC の性能向上と SOFC 燃料極への適用」）を設定し、これらのテーマに対して、VNUHCM から受け入れた留学生および日本人学生が研究に取り組むことで、新しい知見を得つつ日越双方の人材育成を行った。

バイオガス DIR-SOFC の実現に向けて～メタン複合改質反応のモデル化～

バイオガス DIR-SOFC の性能を最大限引き出し、安定作動を行うためには、燃料極（アノード）内部で生じる改質反応の挙動を正確に把握する必要がある。図 10 にバイオガス直接供給時に燃料極内部で生じる反応を模式的に示したが、バイオガスは約 60% の CH_4 と約 40% の CO_2 の混合ガスであり、燃料入口側では、燃料極 Ni の触媒作用により、ドライリフォーミング（DRM）反応（ $\text{CH}_4 + \text{CO}_2 \rightleftharpoons 2\text{H}_2 + 2\text{CO}$ ）を主反応としてメタン改質が進行し、合成ガスが生成する。発電中には、水素および一酸化炭素の電気化学的酸化反応（ $\text{H}_2 + \text{O}^{2-} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^-$ 、 $\text{CO} + \text{O}^{2-} \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{e}^-$ ）により水蒸気および二酸化炭素が生成するので、下流側に行くにしたがって発電中に生成した水蒸気による水蒸気改質反応（ $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons 3\text{H}_2 + \text{CO}$ ）の寄与が高まることとなる。さらに、シフト反応（ $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_2 + \text{CO}_2$ ）、熱分解反応（ $\text{CH}_4 \rightleftharpoons \text{C} + 2\text{H}_2$ ）、ブドワール反応（ $2\text{CO} \rightleftharpoons \text{CO}_2 + \text{C}$ ）も同時に進行する。以上のように、バイオガス供給 DIR-SOFC の作動においては、様々な反応が複合的に関与しており、本研究ではこれを Methane Multiple Reforming（MMR）反応と呼び、MMR 反応のモデル化を試みた。

本研究を、カウンターパートである VNUHCM から研究代表者が受け入れたベトナム人留学生（2014 年 10 月年入学）が博士論文テーマとして行い（表 5 参照）、人材育成を推進した。

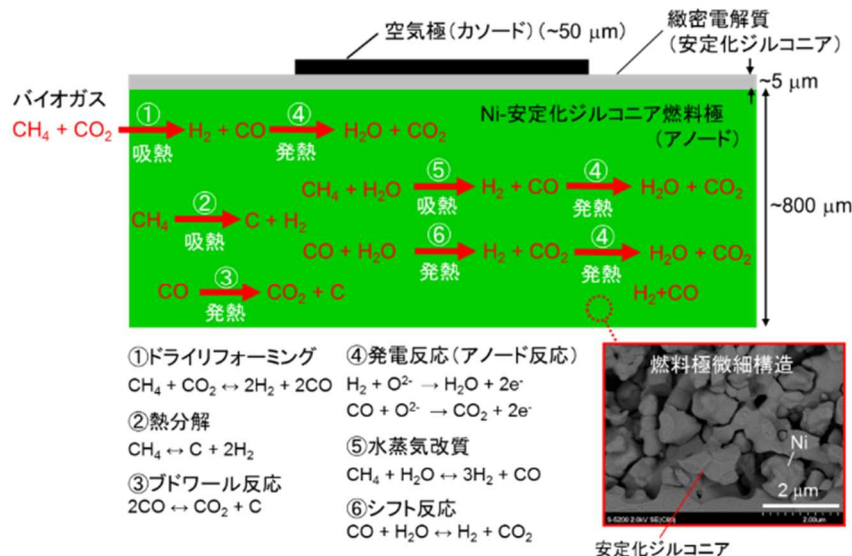


図 10 : バイオガス供給 DIR-SOFC の燃料極内部で生じる熱的・物質的に複雑なメタン複合改質反応 (MMR 反応) (MMR 反応を化学反応モデルで完全に表現することは難しい。)

DIR-SOFC の動作解析においては、MMR 反応のモデル化が不可欠であり、いくつかの化学反応モデルが提案されているが[3, 4]、様々な現象が複雑に関与している電極内部の現象を化学反応モデルで記述することは非常に難しい。本研究では、CH₄-CO₂-H₂O の混合ガスを Ni-安定化ジルコニア燃料極に供給して、700~800°C の温度範囲で、様々な CO₂/CH₄ 比および H₂O/CH₄ 比に対してメタン改質試験を実施し、この実験結果に人工神経回路網 (Artificial Neural Network (ANN)) の考え方に基づいた機械学習的手法を適用し、MMR 反応が生じる際の燃料組成と CH₄ 消費速度および H₂ 生成速度との規則性を帰納的に導き出した (*Journal of Power Sources* 359 507-519)。(PO: 2-2)

図 11 に示すように、任意のメタン、二酸化炭素および水蒸気分圧の組み合わせ (p_{CH_4} , p_{CO_2} , p_{H_2O}) に対して ANN を適用して MMR 反応における各化学種の反応速度を予測できるようにし、これに、反応場で生成する合成ガスの寄与をシフト反応を付与することで考慮し、SOFC 作動中の挙動を模擬した。

図 12 に ANN による MMR 反応のモデル化のフローを示す。(a) のように、径 20 mm の Ni-8YSZ (8 mol%Y₂O₃-ZrO₂) 燃料極支持型ハーフセルを外径 20 mm のアルミナ管の末端に緻密電解質が外側になるように取り付け、ハーフセルとアルミナ管の隙間をセラミックボンドで封止した。CH₄-CO₂-H₂O-N₂ の混合ガスを 100 mL min⁻¹ で燃料極側に供給し、メタン改質試験を行った。まず、図 12(b) の実験マトリックスにおける基準組成 (CH₄:CO₂:H₂O = 2:1:1) に対して試験を行い、N₂ 供給量を変えることによって当組成での p_{CH_4} 依存性を実験的に得た。その後、マトリックス中の実験プロトコル(1)~(6)に沿って各燃料組成での試験を行い、メタンおよび水素の生成速度を実測した。図 12(c) の ANN において、入力 (p_{CO_2}/p_{CH_4} , p_{H_2O}/p_{CH_4}) に対する出力 (メタンおよび水素の生成速度) が、実験で得た速度に限りなく近づくよう ANN 内ニューロン間の各パラメーター (重み、バイアス) を決定した。

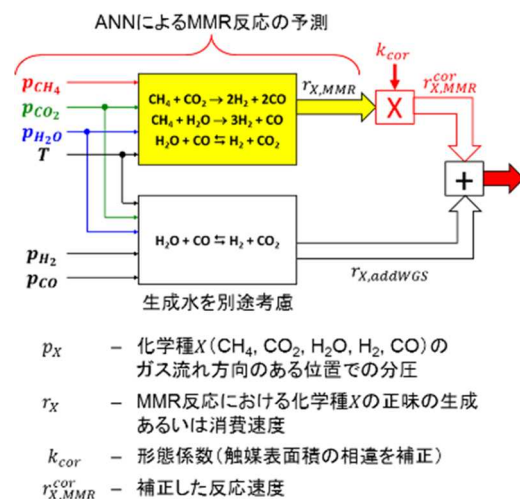


図 11 : CH₄ 改質に対する CO₂ と H₂O の複合効果をモデル化するために考案した手法

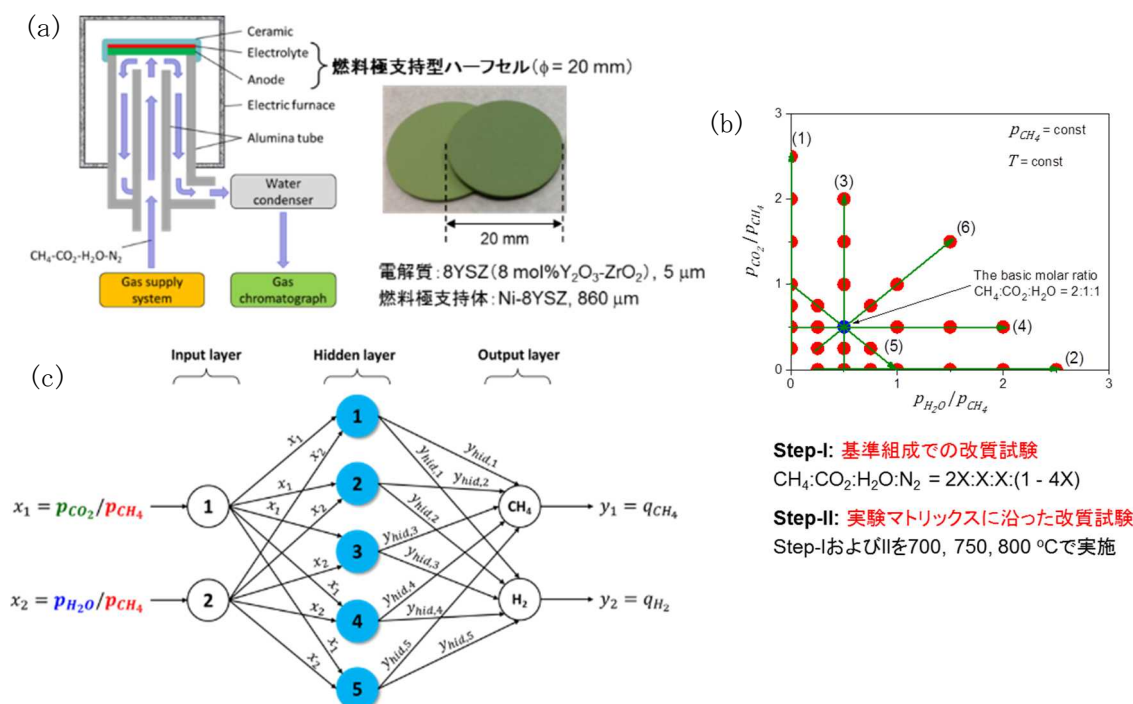


図 12 : ANN アプローチによる MMR 反応モデルの決定プロセス ; (a) 燃料極支持型ハーフセルを用いた改質試験のセットアップ、(b) ANN を実施するための実験マトリックス、(c) 構築した ANN (入力 : P_{CO_2}/P_{CH_4} 、 P_{H_2O}/P_{CH_4} 、出力 : q_{CH_4} 、 q_{H_2} (q は、基準燃料組成における各成分の生成速度に対する任意の燃料組成における生成速度の比))

図 13 に、上述の方法で得たメタンおよび水素の生成速度 q_{CH_4} および q_{H_2} (q は、基準燃料組成における生成速度に対する任意の燃料組成における生成速度の比) の燃料組成依存性を示すが、この結果は、**図 12(b)** に示した最小限の実験から、任意の燃料組成に対する反応速度を機械学習的に予測できるようになったことを意味している。さらに、適当な形態係数を用いて補正することより、SOFC 燃料極以外の触媒構造体にも当規則性を適用できることを、ペーパー触媒 (PSC) によるメタン改質試験結果との比較から示した。ANN により得た MMR 反応モデルを、SOFC 単セルを模擬した CFD モデルに導入して電気化学反応連成の熱流体解析を行ったところ、バイオガス DIR-SOFC の発電性能の実測値を再現できることが示され、DIR-SOFC の安定作動および高出力化に資するセルデザインや運転条件の探索が可能となるツールを得るに至った (*Journal of Power Sources* 359 507-519, *ECS Trans.* 78(1) 2017 2467-2476)。(**PO: 2-2, 2-3**)

以上、我々は、これまで難しかったメタン、水蒸気、二酸化炭素、水素、一酸化炭素が複雑に関与した MMR 反応のモデル化を ANN の手法を導入した新しいアプローチで試み、構築した MMR 反応モデルを電気化学反応連成の熱流体解析に組み込むことで模擬バイオガス直接供給時の SOFC 単セルの発電挙動の再現に成功しており、この成果は、バイオマス廃棄物から燃料電池を用いて直接電力を得る高効率分散型電源 (バイオガス DIR-SOFC) の創出に極めて重要な役割を果たすものである。博士論文テーマとして本研究を担当したベトナム人留学生は、当成果により、Honda Y-E-S Forum 2016 (2016 年 11 月) にて 1st Prize を受賞し、2017 年 9 月に博士号を取得した (**表 5** 参照)。(PO: 2-1~2-3)

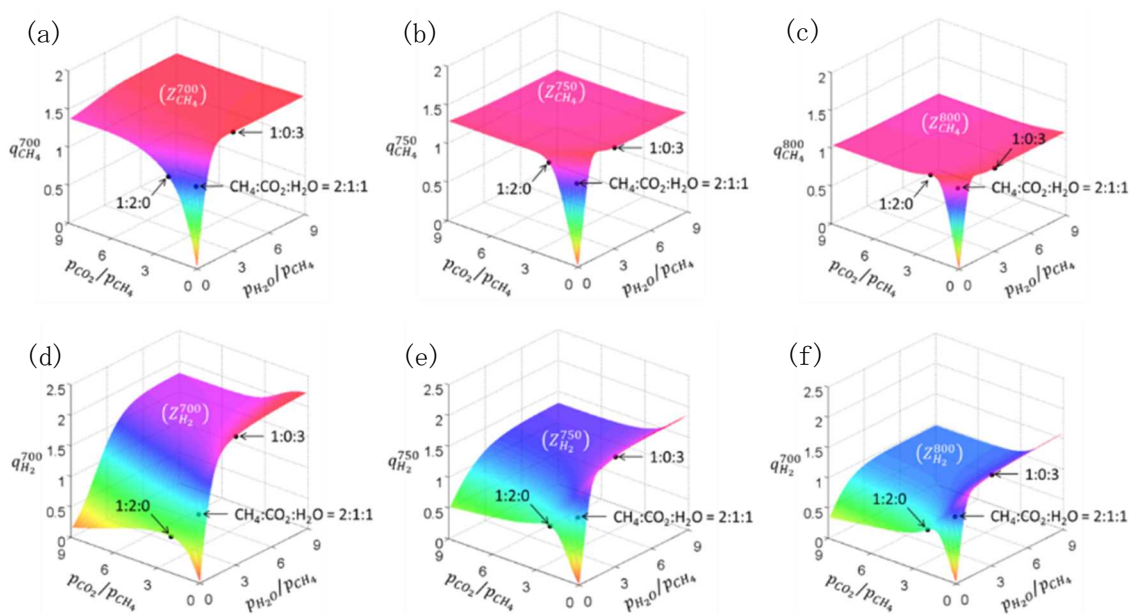


図 13 : ANN の手法により実験データから帰納的に導出した $\text{CH}_4\text{-CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 混合ガス供給時に燃料極内部で生じる MMR 反応の速度 ; (a)～(c) メタン生成速度および (d)～(f) 水素生成速度の水蒸気分圧 ($p_{\text{H}_2\text{O}}$) および二酸化炭素分圧 (p_{CO_2}) 依存性 ((a, d) 700°C, (b, e) 750°C, (c, f) 800°C)

バイオガス DIR-SOFC の実現に向けて～PSC の性能向上と SOFC 燃料極への適用～

研究題目 2 の取り組みにおいて、農学グループが、エビ養殖池へドロをメタン生成菌の供給源として、ベンチェ産バイオマス廃棄物（エビ養殖残渣、バガス、稲わら、ココナツ搾りかす）からバイオガスを安定的に製造できることをプラントレベルで実証することに成功した（**図 44** 参照）。製造したバイオガス中には、SOFC モジュール内部の改質反応や発電反応を阻害する硫化水素 (H_2S) が 200～2,000 ppm の範囲で含まれており（**図 45** 参照）、当プロジェクトでは、化学反応と物理吸着による 2 段階の脱硫を採用して H_2S を除去したが（**図 46** 参照）、これら脱硫剤が劣化してきた場合、数 ppm レベルの H_2S がバイオガス SOFC モジュール内部に入ってくる可能性がある。工学グループは、燃料極側にペーパー触媒 (PSC) を適用すれば、バイオガスに数 ppm の H_2S が含まれていても、DIR 発電が可能になるものと期待し、 H_2S 存在下でのバイオガス DIR-SOFC の発電試験を行った[5, 6]。

厚さ 160 μm の 10 mol% Sc_2O_3 -1 mol% $\text{CeO}_2\text{-ZrO}_2$ (10ScSZ) を支持体とし、厚さ 20 μm の Ni-10ScSZ ($\text{NiO}:\text{10ScSZ} = 56\text{wt}\%:44\text{wt}\%$) および 30 μm の LSCF-GDC ($(\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4})_{0.95}(\text{Co}_{0.2}\text{Fe}_{0.8})_{0.95}\text{O}_{3-x}:\text{Gd}_{0.1}\text{Ce}_{0.9}\text{O}_{1.95} = 50\text{wt}\%:50\text{wt}\%$) をそれぞれ燃料極と空気極に適用した 2 cm 角 (集電面積 1.4 x 1.4 cm^2) の電解質支持型 SOFC 単セルを作製した（**図 14(a)**）。空気極と電解質の間には、反応防止層として厚さ約 3 μm の $\text{Gd}_{0.10}\text{Ce}_{0.90}\text{O}_2$ (GDC) 層を適用した。燃料極および反応防止層の焼成温度は 1200°C、空気極の焼成温度は 900°C とした。**図 14(b)**のように、アルミナ製ホルダー内に 2 cm 角に成形した厚さ 1.1 mm の 9 wt% Ni 担持ハイドロタルサイト (HT) 分散 PSC (Ni/HT-PSC) を 3 枚敷き、その上に SOFC 単セルを配置した[6]。**図 14(c)**に Ni/HT-PSC の微細構造を示しておく。800°C において、燃料極側にセル面と平行に模擬バイオガス ($\text{CH}_4/\text{CO}_2 = 1$, 40 ml min^{-1}) を供給し、発電試験を行った。

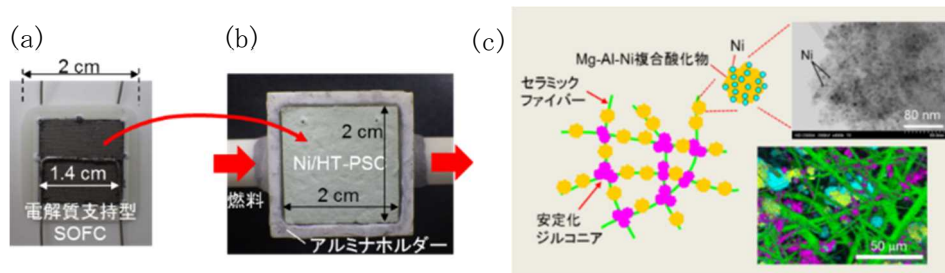


図 14 : (a) 実験に使用した電解質支持型 SOFC 単セル (Ni-ScSZ|ScSZ|GDC|LSCF-GDC)、(b) 単セルの燃料極側に適用した 9 wt% Ni 担持ハイドロタルサイト (HT) 分散 PSC (Ni/HT-PSC)、(c) Ni/HT-PSC の微細構造 [6]

図 15 に、模擬バイオガス直接供給時の 800°C における定電流試験 (0.2 A cm^{-2}) 中に、 H_2S (5 あるいは 10 ppm) を燃料に添加した被毒試験の結果を示す。Ni/HT-PSC を適用しない従来型の試験では、5 ppm の H_2S の添加直後に電圧が急降下し、電圧を維持できなかった。DIR 発電時の H_2S 被毒は致命的であるが [7-9]、Ni/HT-PSC を燃料極上に適用することにより、模擬バイオガスによる DIR 発電時にも 10 ppm の H_2S を許容できるようになった。

図 16 に模擬バイガス直接供給時、開回路条件下での燃料極側界面インピーダンスの測定結果を示す。Ni/HT-PSC を適用しない場合、5 ppm H_2S の添加により、電気化学反応に寄与する H_2 および CO の三相界面 (TPB) への多孔質燃料極内拡散 (100-10 Hz) およびメタン改質を含む物質輸送プロセスに起因するインピーダンス ($< 10 \text{ Hz}$) が H_2S 被毒の影響を強く受け [9]、燃料極側の分極抵抗が著しく増大した。この結果は、吸着 S 種の影響により改質反応が強く阻害され、物質輸送プロセスが律速過程となっていることを意味し、発電中においては燃料枯れを引き起こす。一方で、Ni/HT-PSC を燃料極に隣接して配置することで、 H_2S 被毒による燃料極側の分極抵抗の増大を大きく抑制することができ、特に物質輸送プロセスは、5 ppm H_2S の添加に影響されなかった。このことは、 H_2S 被毒下においても Ni/HT-PSC が高いメタン転化率で水素を製造し続けるため、TPB 近傍での燃料の枯渇が起こらないことを示している。

以上の模擬ガスの結果から、ベンチ産植物系バイオマス廃棄物 (バガスおよび廃糖蜜) から製造した低 H_2S 濃度 ($< 50 \text{ ppm}$) を特徴とするバイオガス (表 19 参照) であれば、PSC を適用すれば SOFC に直接供給できると考え、800°C、 0.2 A cm^{-2} において、当実バイオガスを燃料とした DIR 発電試験を行ったところ、燃料精製 (メタン濃縮および脱硫) 無しの実ガスの直接供給による発電に成功し、VNUHCM との共著論文につながった (Frontiers in Environmental Science 5 (2017) Article 25)。 (PO: 2-1, 2-4, 2-5)

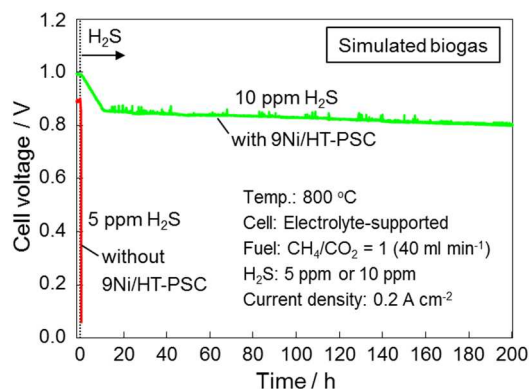


図 15 : 模擬バイオガス ($\text{CH}_4/\text{CO}_2 = 1$) 直接供給時の DIR 発電中 (800°C、 0.2 A cm^{-2}) に行った硫化水素被毒試験; H_2S 濃度: 5 ppm (従来セル)、10 ppm (Ni/HT-PSC 適用時)

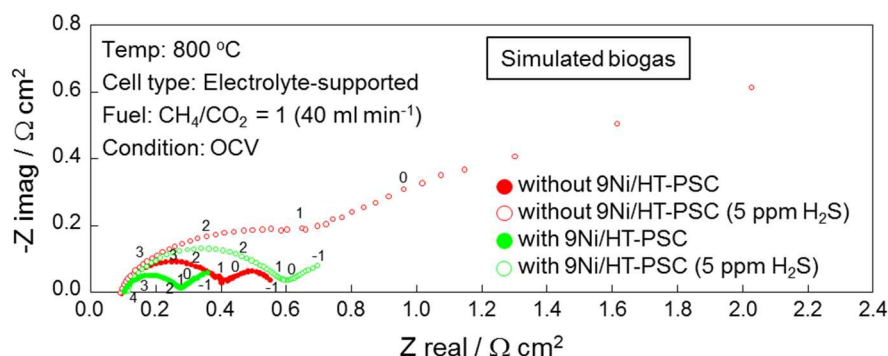


図 16: 800°C、開回路状態で測定した模擬バイオガス直接供給時の燃料極側インピーダンス；●従来セル (H₂S 被毒無し)、○従来セル (5 ppm H₂S 被毒時)、●Ni/HT-PSC 適用時 (H₂S 被毒無し)、○Ni/HT-PSC 適用時 (5 ppm H₂S 被毒時)

PSC の作製プロセスにおいて、無機繊維ネットワーク内で機能性材料を合成することもできる。本研究では、バイオガス DIR-SOFC の劣化要因であるメタンドライリフォーミング (DRM) 時の炭素析出の抑制を目的として、酸素吸蔵放出能 (Oxygen Storage Capacity (OSC)) を有するセリア (CeO₂) -ジルコニア (ZrO₂) 固溶体 ((Ce, Zr)O_{2-δ} : CZ) を PSC 内部で合成するプロセスの開発に取り組んだ (図 17(a))。本研究は、カウンターパートである VNUHCM から研究代表者が受け入れたベトナム人留学生 (2015 年 10 月入学) が博士論文テーマとして実施し (表 5 参照)、人材育成を推進した。

以下のプロセスで Ni 担持 CZ 分散 PSC (Ni/CZ-PSC) を得た。無機繊維を分散させたスラリーに、ポリビニルピロリドン、Ni(NO₃)₂・6H₂O、Ce(NO₃)₃・6H₂O および ZrO(NO₃)₂・2H₂O を溶解し、これに NaOH、続いて水素化ホウ素ナトリウム (NaBH₄) を添加し、濾過前のスラリー中で Ni/CZ の前駆体を形成させた。当スラリーにパルプを添加し、濾過プロセスで生シートを得て、これを 600°C で焼成することで PSC (Ni/CZ-PSC) とした。図 17(b)に示すように、OSC を有する CZ が無機繊維ネットワーク内で合成できており、この CZ 上に微細な Ni が担持されている。

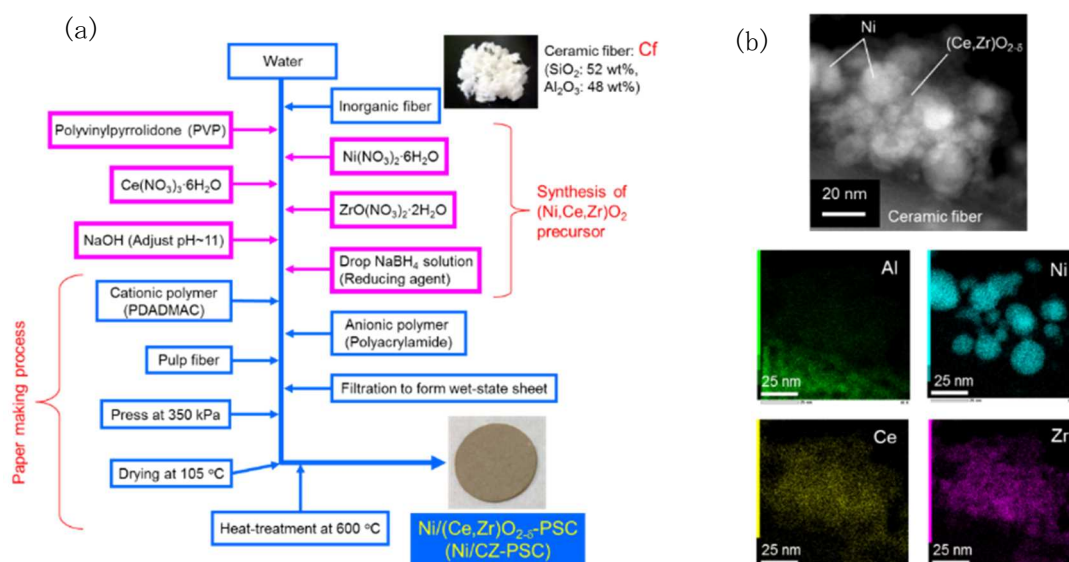


図 17: 本研究で開発した Ni 担持 CZ 分散ペーパー触媒 (Ni/CZ-PSC) ; (a) 作製プロセス、(b) 無機繊維ネットワーク内に分散された触媒微粒子 (酸素吸蔵放出能を有する CZ 粒子上に微細な Ni が担持されている。) の STEM 像

図 18 に、Ni 担持 PSC (Ni-PSC)、Ni/HT-PSC および Ni/CZ-PSC を用いて行った空間速度 GHSV = 3500 h⁻¹ におけるメタンドライリフォーミング試験の結果を示す。図はメタン転化率の経時変化を示しており、本研究で開発した Ni/CZ-PSC は、Ni 担持量 m_{Ni} が他の PSC の半分程度にも関わらず、650~800°C の温度範囲で最も安定に機能した。750°C における 15 時間の改質試験後の電子顕微鏡観察において、Ni-PSC および Ni/HT-PSC 内にはファイバー状炭素の析出が見られたのに対して、Ni/CZ-PSC 内には炭素は析出していなかった。

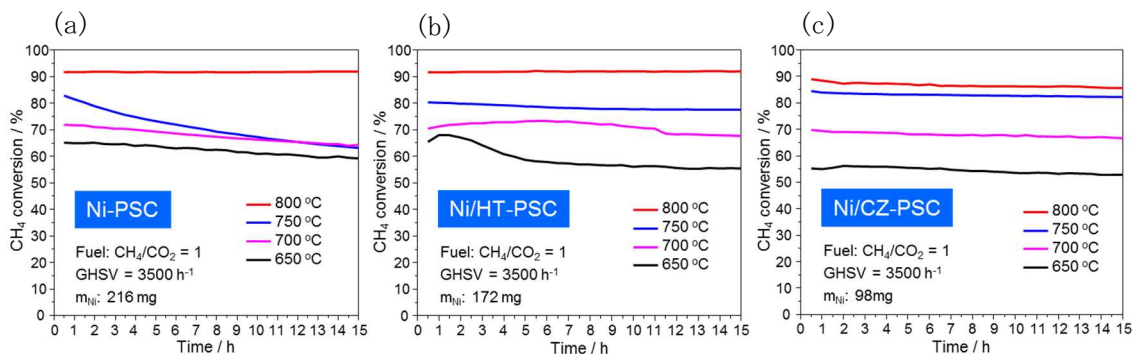


図 18 : ペーパー触媒を用いて行った空間速度 GHSV = 3500 h⁻¹ におけるメタンドライリフォーミング試験時 (650~800°C) のメタン転化率の経時変化 ; (a) Ni-PSC (Ni 担持量 m_{Ni} = 216 mg)、(b) Ni/HT-PSC (m_{Ni} = 172 mg)、(c) Ni/CZ-PSC (m_{Ni} = 98 mg)

図 19 に、各温度における 15 時間の改質試験後の昇温酸化 (TP0) プロファイルを示す。縦軸は質量分析装置で検出した CO₂ の強度を示しており、PSC 内部に析出した炭素量に相当する。図から、Ni/CZ-PSC が、他の PSC に比較して高い炭素析出抑制効果を有することが明らかである。

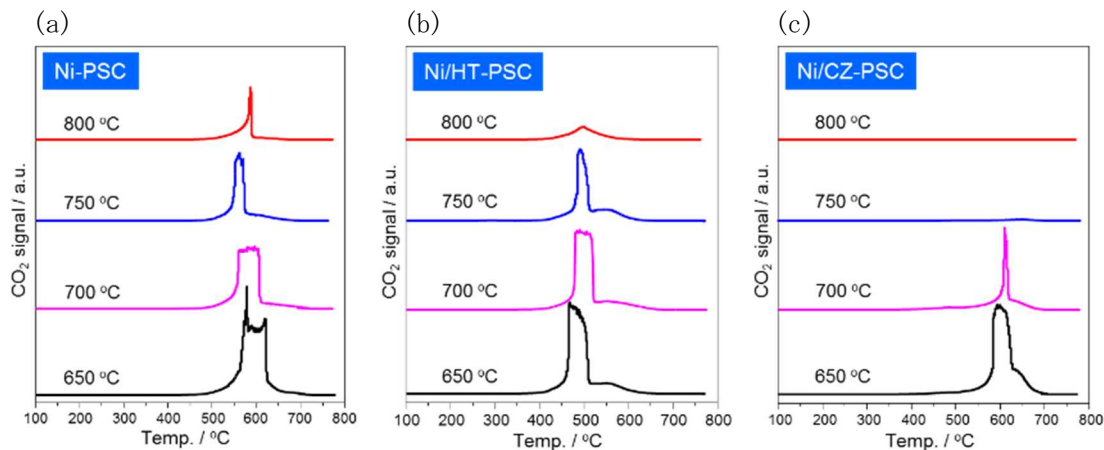


図 19 : 各温度 (650、700、750 および 800°C) における 15 時間のドライリフォーミング試験後の昇温酸化 (TP0) プロファイル (サンプル重量 : 100 mg 、昇温速度 : 3°C min⁻¹、空気流量 : 40 mL min⁻¹) ; (a) Ni-PSC、(b) Ni/HT-PSC、(c) Ni/CZ-PSC

以上、我々は、DRM 時の炭素析出の抑制を目的として、OSC を有する CeO₂-ZrO₂ 固溶体 Ce_xZr_{1-x}O_{2-δ} (CZ) を PSC 内部で合成するプロセスを開発し、Ni 担持 CZ 分散 PSC (Ni/CZ-PSC) を得たが、Ni 担持量としては、6 wt% 付近が良く、 x の低い場合 ($x = 0.2$) に、DRM 中に、炭素析出を伴った急激な劣化が生じた。 x が高まると共に、CZ との相互作用が強い Ni がより多く析出し、Ni も微細化され、 $x = 0.4$ および 0.6 の場合は、高い炭素析出耐性を示すことが明らかとなった。以上の成果は、炭素析出耐性を有する高機能ペーパー触媒 (Ni/CZ-PSC) の設計指針を与えるものであり、VNUHCM との共著論文 (*Int. J. Hydrogen*

Energy 43 (2018) 4951-4960 および ECS Trans. 78(1) (2017) 2431-2439) にまとめられている。(PO: 2-5)

Ni/CZ-PSC は、バイオガス DIR-SOFC を実現するサポート触媒として有望であるため、Ni/CZ-PSC ($x = 0.4$) を SOFC の燃料極上に適用し、模擬バイオガス供給時の電気化学性能の評価を行ったところ、DIR-SOFC の出力および安定性が大幅に向上した。Int. J. Hydrogen Energy 44 (2019) 10484-10497 に掲載された当成果を以下にまとめる。

厚さ $250\text{ }\mu\text{m}$ の ScSZ (10 mol% Sc_2O_3 -1 mol% CeO_2 -ZrO₂) を支持体とし、厚さ $24\text{ }\mu\text{m}$ の Ni-ScSZ (NiO:ScSZ = 56wt%:44wt%) および $35\text{ }\mu\text{m}$ の LSCF-GDC ($(\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4})_{0.95}(\text{Co}_{0.2}\text{Fe}_{0.8})\text{O}_{3-x}\text{Gd}_{0.1}\text{Ce}_{0.9}\text{O}_{1.95} = 50\text{wt%}:50\text{wt%}$) をそれぞれ燃料極と空気極に適用した 2 cm 角 (集電面積: $1.4 \times 1.4\text{ cm}^2$) の電解質支持型 SOFC 単セル (ESC) を作製した (図 20 参照)。図のように、アルミナ製ホルダー内に 2 cm 角に成形した厚さ 1.1 mm の PSC を 2 枚敷き、その上に ESC を配置した。 750°C において、燃料極側にセル面と平行に模擬バイオガス ($\text{CH}_4/\text{CO}_2 = 1$, 80 mL min^{-1} , PSC に対する GHSV = 6000 h^{-1}) を供給し、発電試験を行った。

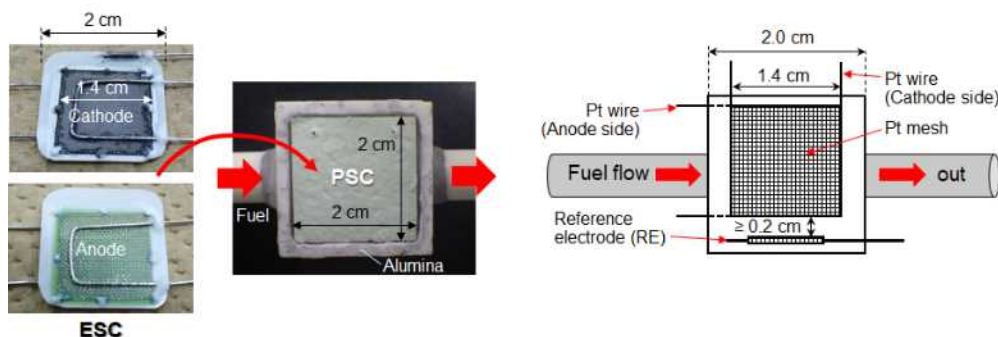


図 20 : バイオガス DIR-SOFC の発電試験に用いたセットアップ

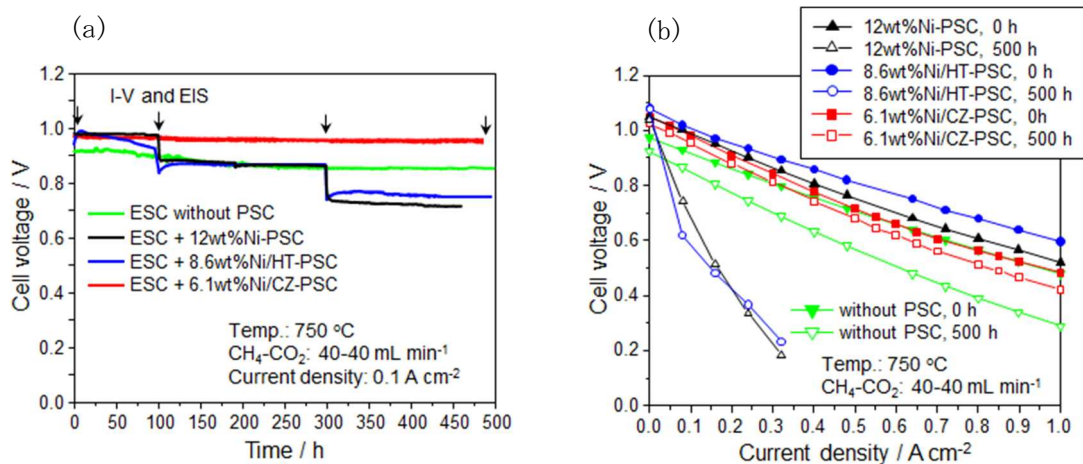


図 21 : 模擬バイオガス直接供給時 ($\text{CH}_4/\text{CO}_2 = 1$, 80 mL min^{-1}) の 750°C における電解質支持型セル (ESC) および ESC の燃料極上にペーパー触媒 (PSC) を適用した場合の発電性能 ; (a) 0.1 A cm^{-2} における 500 時間の定電流試験結果、(b) 定電流試験の初期と 500 時間における電流電圧特性 (I-V 特性)

図 21(a)は、電流密度 0.1 A cm^{-2} において実施した 500 時間の定電流試験の結果である。図 21(b)には、定電流試験中 (図 21(a)中に矢印で示した時点) に測定した電流電圧特性 (I-V 特性) の内、初期と 500 時間の結果を示した。これらの図には、PSC 適用時 (12wt%Ni 担持 PSC (12wt%Ni-PSC)、8.6wt%Ni 担持ハイドロタルサイト (HT) 分散 PSC (8.6wt%Ni/HT-PSC)

および 6.1wt%Ni/CZ-PSC)の結果に加えて、PSC を配置しなかった場合の結果も示している。定電流試験中の電圧低下率は、PSC 無しの場合に $0.015\% \text{ h}^{-1}$ であったが、6.1wt%Ni/CZ-PSC を燃料極上に適用することで $0.005\% \text{ h}^{-1}$ に低減された。一方で、12wt%Ni-PSC と 8.6wt%Ni/HT-PSC 適用時には、100 時間と 300 時間での I-V 測定時に階段状の電圧降下が生じ、電圧低下率を算出することができなかった。I-V 測定時には、開回路状態でインピーダンス測定も行ったが、PSC 無しの場合には、定電流試験中、電荷移動抵抗、物質移動抵抗のいずれも増大したのに対して、6.1wt%Ni/CZ-PSC 適用時には、500 時間の試験中、インピーダンスが増大することはなかった。一方で、12wt%Ni-PSC と 8.6wt%Ni/HT-PSC 適用時には、インピーダンスの著しい増大が生じた。

500 時間の定電流試験後の PSC 内部および ESC の燃料極表面の様子を **図 22** に示す。**(a)** および **(c)** に見られるように、12wt%Ni-PSC および 8.6wt%Ni/HT-PSC 内部には激しい炭素析出が生じており、燃料極表面にも多量の炭素が堆積していた **((b)および(d))**。この結果は、これらの PSC 適用時には、PSC 内部での触媒反応において、メタンの熱分解で発生した中間生成物が容易に重合してグラファイト系の炭素となり、それが多孔質燃料極上に堆積してガスの拡散を阻害することでセル性能の低下が進行したことを示している。I-V 測定とともに定電流試験中に行ったインピーダンス測定の際には、75 分程度開回路状態が維持されたため、これらの PSC 適用時には、析出炭素の電気化学的な除去（空気極側から電解質を介して燃料極側に輸送されてきた酸素イオンによる析出炭素の電気化学的酸化）が期待できないこの期間中に炭素析出がより促進され、**図 21(a)**に見られるような階段状の電圧降下が生じたと考えられる。一方、6.1wt%Ni/CZ-PSC 内 **(図 22(e))** には炭素析出は確認されず、燃料極上への炭素の堆積も著しく低減されており **((f))**、500 時間、安定した DIR 発電が可能となった。これは、OSC の高い CZ 中の格子酸素が DRM 時の表面反応（析出炭素の酸化除去）に寄与したためである。PSC 無しの場合に燃料極上に炭素析出が見られなかったのは **((g))**、供給メタンのほとんどが反応することなくセル部を通過したためである。

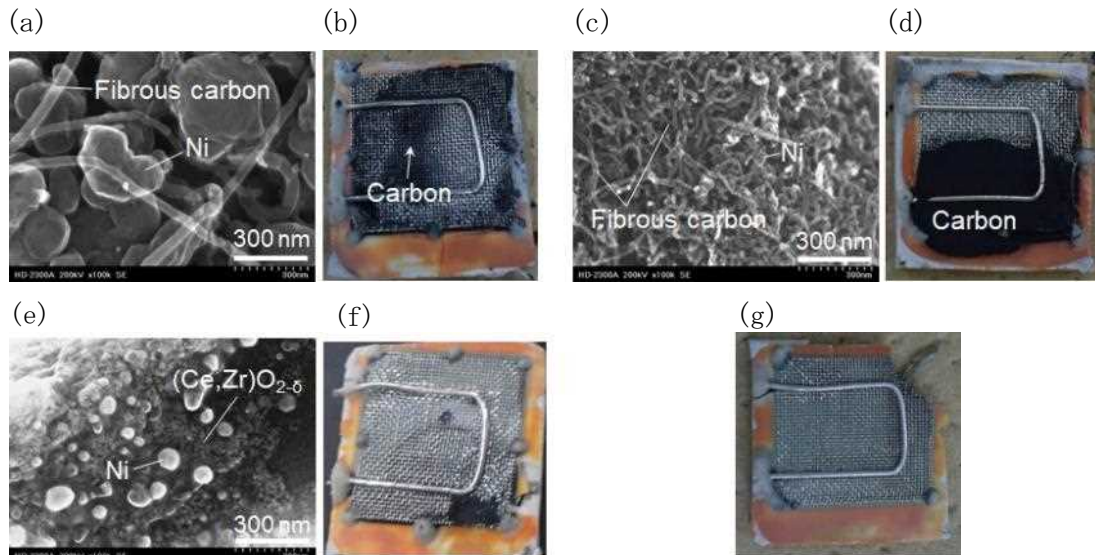


図 22 : 模擬バイオガス直接供給時 ($\text{CH}_4/\text{CO}_2 = 1$, 80 mL min^{-1})、 750°C 、 0.1 A cm^{-2} における 500 時間の定電流試験後の PSC 内部 **((a)、(c)、(e))** および燃料極表面 **((b)、(d)、(f)、(g))** の様子 ; **(a, b)** 12wt%Ni-PSC 適用時、**(c, d)** 8.6wt%Ni/HT-PSC 適用時、**(e, f)** 6.1wt%Ni/CZ-PSC 適用時、**(g)** PSC 無しの場合

以上の結果は、開発した Ni/CZ-PSC を燃料極上に配置するだけで、バイオガスの直接供給による燃料電池発電（バイオガス DIR-SOFC）が可能になることを示すものであり、改質部の小型化、さらには改質部をスタック内部に押し込めた新しいスタックの創出に寄与す

る成果である。博士論文テーマとして Ni/CZ-PSC に関する研究を担当したベトナム人留学生は、以上の成果により Honda Y-E-S Forum 2016 (2016 年 11 月) にて 1st Prize を受賞し、2019 年 3 月に博士号を取得した (表 5 参照) (PO: 2-5、2-6)

現在、上記、炭素析出耐性を有する Ni/CZ-PSC のさらなる性能向上を目的とし、カウンターパートである VNUHCM から研究代表者が受け入れたベトナム人留学生 (2019 年 4 月入学) が、博士論文テーマとして CZ 粒子の幾何学構造制御に取り組んでいる (表 5 参照)。当留学生は、水熱合成法の条件を調整することにより、図 23(a)に示すような花びら状のセリア (CeO₂) 粒子 (Ce(F)) の合成に成功し、これに Ni を担持した Ni/Ce(F) 粒子 ((b)) を無機繊維ネットワークに分散させたペーパー触媒 (Ni/Ce(F)-PSC) を開発した ((c))。

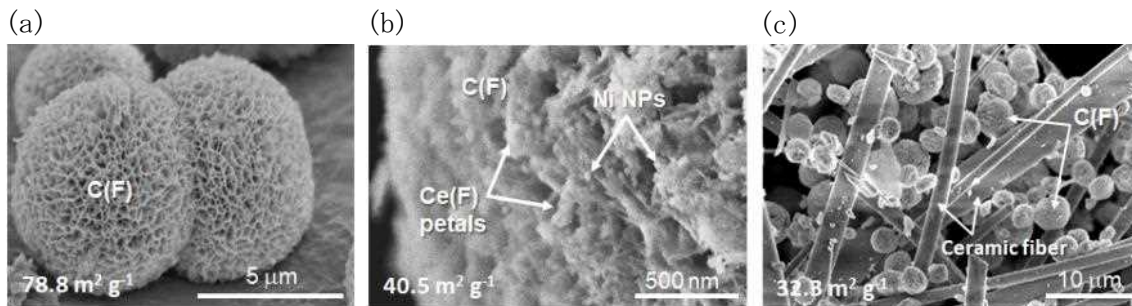


図 23 : Ni/Ce(F)-PSC の微細構造 ; (a) フラワー状セリア (CeO₂) 粒子 (Ce(F))、(b) Ce(F) 粒子上に Ni を担持した Ni/Ce(F) 粒子の表面、(c) Ni/Ce(F) 粒子を無機繊維ネットワーク内に分散させたペーパー触媒 (Ni/Ce(F)-PSC) ((a)、(b)、(c) の BET 比表面積は、それぞれ、78.8、40.5、32.3 m² g⁻¹)

フラワー状セリア (Ce(F)) 粒子の優位性を示すために、表 7 に示した PSC を作製し、750°C において 15 時間のメタンドライリフォーミング (DRM) 試験を行った。セリアのみで構成される Ce(F) 粒子は、セリア-ジルコニア固溶体 (CZ) に比べ OSC は低いものの (実測したセリアおよびセリア-ジルコニアの OSC は、それぞれ、47 および 408 μmol-O₂ g⁻¹)、その幾何学的構造から、触媒表面積を高められるだけでなく、担持した金属触媒粒子の凝集を抑制できるため、図 24(a)に示したように、DRM 試験において、Ni/Ce(F)-PSC は約半分の Ni 担持量 (3 wt%) にも関わらず (表 7 参照)、上述の Ni/CZ-PSC と同等の改質性能を示し、炭素析出も Ni/CZ-PSC 同様、抑制されていた ((b))。フラワー状でない通常のセリア粒子を分散させたペーパー触媒 (Ni/Ce-PSC) は、Ni/Ce(F)-PSC に比べ改質性能は低く、炭素析出も生じていた。

表 7 : 改質性能の比較のために作製した PSC

	BET 比表面積 / m ² g ⁻¹	Ni 担持量 / wt%	Ni 結晶子径* / nm
Ni-PSC	5.8	12	58
Ni/Ce-PSC	10.1	4.3	9.1
Ni/CZ-PSC	24	6.1	13
Ni/Ce(F)-PSC	32.3	3	16.8

炭素析出耐性を有するペーパー触媒のさらなる性能向上に資する以上の成果は、VNUHCM との共著論文 (*Int. J. Hydrogen Energy*, in press および *ECS Trans.* 91(1) (2019) 1661-1670) にまとめられている。今後、OSC の高い CZ をフラワー状にすることで、OSC と幾何学形状の相乗効果で、さらに改質性能を高められることが期待され、現在、当研究を担当する上記留学生が研究開発に取り組んでいる。(PO: 2-5)

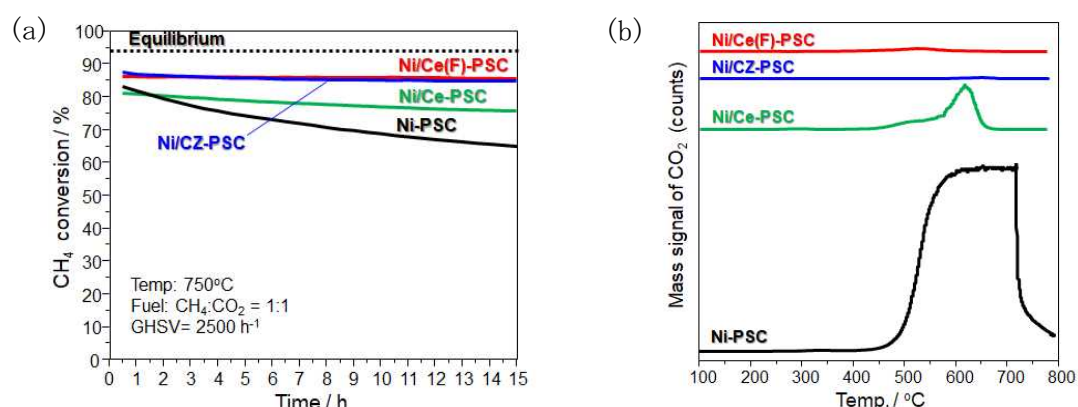


図 24 : (a) 表 7 のペーパー触媒を用いて行った空間速度 GHSV = 2500 h⁻¹におけるメタンドライリフォーミング試験時 (750°C) のメタン転化率の経時変化、(b) (a) の試験後の昇温酸化 (TPO) プロファイル (サンプル重量: 100 mg、昇温速度: 3°C min⁻¹、空気流量: 40 mL min⁻¹)

項目 iii バイオガス SOFC システムの設計および開発

設計指針

当プロジェクトでは、マグネクス株式会社との産学連携の下、SOFC の途上国農村部への実装を念頭に、高効率かつコンパクトとなるよう、作動温度 700°C、定格出力 DC 1 kW を想定したシステム構成案に対して、セルスタック、改質器、燃焼器、水蒸発器、熱交換器からなるバイオガス SOFC ホットモジュール (以下、モジュール) の設計および製作を進めた。

表 8 に示した通り、メタン濃縮なしのバイオガスの直接供給 (バイオガスの燃焼による昇温とバイオガス中 CO₂ のメタン改質への利用) を特徴とし、5.1 L min⁻¹ のバイオガス (60 % CH₄、40 % CO₂、発熱量 1,826 W) の供給で、燃料利用率 73 %、空気利用率 33 %において発電効率 54.8 % (LHV) を設計指針とした。

表 8 : バイオガス SOFC モジュールの設計指針

項目	仕様	
燃料	バイオガス (60 % CH ₄ 、40 % CO ₂) : 5.1 L min ⁻¹	
スチーム/カーボン比 (S/C)	1.1 (発電モード)	
運転温度	700°C (スタック内 680~720 °C)	
定格出力	DC 1 kW	
発電効率 (LHV)	54.8 %	
燃料利用率 (U _F)	73 %	
空気利用率	33 %	
セル構成	燃料極 (アノード) 支持型セル (厚さ 315 μm、外径 120 mm) 燃料極支持体: NiO/YSZ 燃料極: NiO/YSZ 電解質: 8YSZ (厚さ 3 μm) 反応防止層: GDC 空気極 (カソード): LSC (厚さ 12±5 μm、径 110 mm)	
スタック段数	40 段あるいは 30 段	
スタック性能	発電電流 32 A (0.34 A cm ⁻²) (定格出力時) 発電電圧 32 V (0.80 V/セル) (定格出力時)	

バイオガス ($\text{CH}_4/\text{CO}_2 = 1.5$) の供給に対して、SOFC の出力が高まるよう空気-排ガスの専用熱交換器 (空気予熱用) を設計し、モジュール各構成機器の熱収支計算に基づいて各構成機器の配置と断熱構造等の検討を進め、**図 25** のプロトタイプモジュールを製作した。この際、モジュール内温度が $500\sim 1000^\circ\text{C}$ と分布を持つことから、各構成機器に対して、耐熱性を考慮した材料選択を行った。(PO: 2-9)

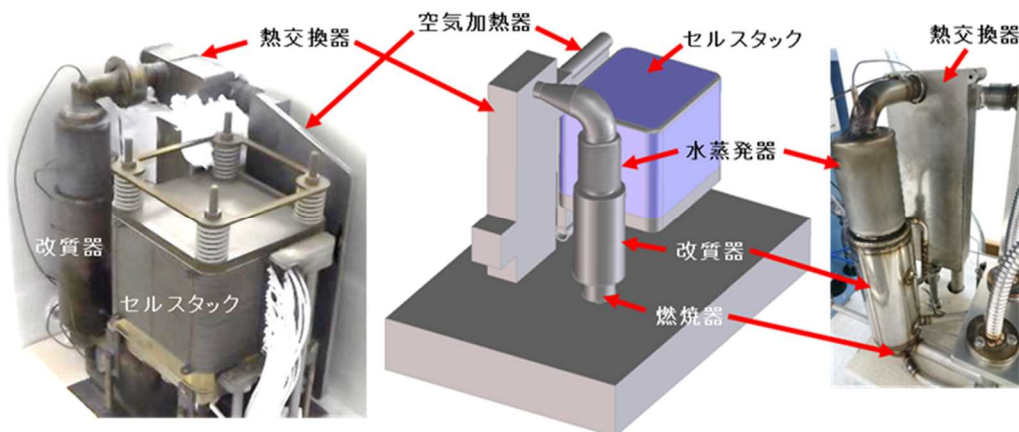


図 25 : 当プロジェクトで設計・製作したバイオガス SOFC ホットモジュール

バイオガス SOFC モジュールの起動試験

発電出力が高まるよう補機動力損失の低減を目指した BOP (ガスおよび水の供給・制御部) 構成を検討し、その配置フローの詳細設計を行った。ベトナム現地では、樹脂製のガスホルダに回収されたバイオガスが (**図 46** 参照)、ほぼ大気圧で SOFC に供給されるため、昇圧ブロワと低圧で作動可能なマスフローコントローラーを組み合わせ、高精度に流量制御する仕様とした。また、排ガス中の水蒸気を回収して純水タンクに導き、バイオガスの改質水として利用する仕様とした。SOFC システムをベンチ実証サイトに設置した際、バイオガスを供給したシステムの起動、発電、ホットスタンバイおよび停止を遠隔で行えるよう運転フローの詳細設計を行い、システム運転の自動化を図った。(PO: 2-7, 2-8)

図 26 に、種々のスチーム/カーボン比 (S/C) に対するバイオガス ($\text{CH}_4/\text{CO}_2 = 1.5$) 1 kmol 供給時の炭素生成量の温度依存性を、平衡計算ソフト (HSC Chemistry 9) を用いて見積もった結果を示す。 550°C を超えると吸熱反応であるメタンドライリフォーミング反応 ($\text{CH}_4 + \text{CO}_2 \rightarrow 2\text{H}_2 + 2\text{CO}$) が促進されるため、 $\text{S/C} = 0$ においても析出炭素量が大きく減少してくるが、SOFC の起動中あるいは運転中に、改質器やスタック内部の燃料極における炭素析出を防ぐためには、 S/C を 1.4 程度に高めておく必要がある。システム起動時は、バイオガス ($\text{CH}_4/\text{CO}_2 = 1.5$) を定格運転時の約半分の流量で供給し、カソード空気と混合することで燃焼器を作動させ、改質器温度によって **図 26** のように S/C を変えながら昇温を行うこととした。発電 100% 時の必要バイオガス流量 (L min^{-1}) は、セル数 N (枚)、発電 100% 時電流 (A 枚^{-1}) および燃料利用率 U_f から決定され、一連の動作を自動プログラムで制御するようにした。

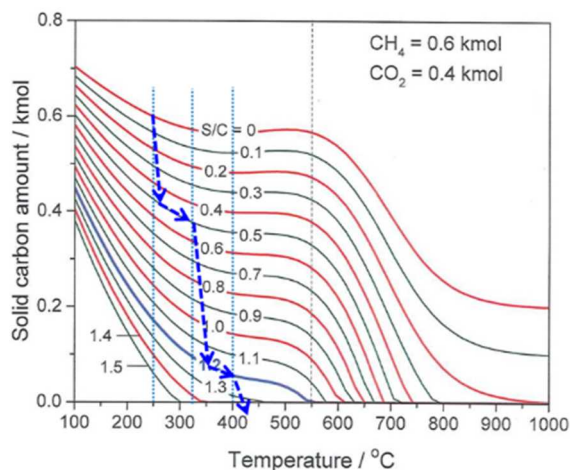


図 26 : 様々な S/C に対するバイオガス ($\text{CH}_4/\text{CO}_2 = 1.5$) 1 kmol 供給時の炭素生成量の温度依存性

バイオガスの低位発熱量は 22 MJ Nm^{-3} と都市ガスの約半分であるため、モジュールを構成する燃焼器には、①この発熱量でも着火と安定燃焼が可能な燃焼構造であること、②起動時間を短くできるよう、できるだけ多くの空気を循環させる必要があり、空燃比の高いところでも燃焼が可能なこと、③発電運転時の未反応バイオガスのアフターバーナとしても最適な燃焼構造であること、④燃焼ガスの熱が改質触媒に効率良く伝わる構造であること等が要求される。図 25 に示した燃焼器-改質器ユニットにおいては、円筒管（改質触媒容器）の中心部を高温の燃焼ガスが下から上へ流れ、円筒内部に充填された $\text{Ru-}\gamma\text{Al}_2\text{O}_3$ ビーズ（ $\phi = 3 \text{ mm}$ ）触媒に伝熱する仕組みになっている。燃焼器の着火試験を行い、起動昇温時およびアフターバーナ時に必要なバイオガスと空気の流量範囲で、着火および安定燃焼が可能なことを確認し、改質触媒への熱伝達は、平衡論値に近い改質ガス組成が得られたことにより良好であると判断した。

模擬バイオガス（ $\text{CH}_4/\text{CO}_2 = 1.5$ ）を供給し、開発した昇温プロトコルに従って自動プログラムを用いてモジュール昇温試験を行い、昇温開始から約 3 時間でモジュール内各温度が $600\sim 700^\circ\text{C}$ の範囲で安定し、ほぼ狙い通りの昇温特性が得られ、低カロリーガスであるバイオガスでの起動および自動プログラムによる制御が問題なく行われていることを確認した。実際のシステム運転時には、改質器温度 600°C 付近で改質容器内の触媒が機能し始め、生成した合成ガス（ H_2/CO ）が SOFC に供給されて発電が行われることになる。（PO: 2-9）

SOFC システムのベトナム対応化と実証運転

バイオガス中の二酸化炭素は燃料にはならず、不純物として含まれている数百～数千 ppm の硫化水素は改質反応や発電反応を阻害する。地球規模の低炭素化に貢献できるよう、バイオガス SOFC を途上国農村部や 僻地に広めて行くことが当プロジェクトの上位目標であり、このために、シンプルなシステム構成でありながら、これらの課題を解決する遠隔操作が可能なバイオガス SOFC システムを開発した（図 27）。



図 27 : 2017 年 12 月に実証サイト（ベトナム・ベンチェ省 Hoang Vu エビ養殖場）に設置した東南アジア初の 1 kW 級バイオガス SOFC システム

燃料にならない二酸化炭素はメタンと反応させて水素を作り出す改質反応に積極的に利用し、硫化水素は化学反応（酸化鉄ペレット）と物理吸着（ゼオライト）による 2 段階の脱硫を採用して除去する（図 46）。さらに、バイオガスに水蒸気を加えて炭素析出を抑える（図 26 参照）が、加える水蒸気が多すぎると発電効率の低下につながるため、熱力学平衡計算により、固体炭素が発生しない最小限の加湿量を求め、これをシステムの自動制御プログラムに組み込んだ。SOFC システムの頻繁な起動停止や待機運転はスタックの劣化を極端に進行させるため、定格運転が基本となる。

表 8 に示した設計指針の発電効率で SOFC システム 1 機を 24 時間連続稼働させるためには、 $7.3 \text{ Nm}^3 \text{ day}^{-1}$ のバイオガス供給が必要となる。発電電力は不規則な負荷変動のない養殖池への曝気に用いるが、メコンデルタ地域では、特に、乾季に停電が頻発するので、停電への対策として、SOFC システムの制御系および補機を 10 分程度バックアップする無停電電源（UPS）および緊急停止時に SOFC 燃料極の再酸化を防止するパージガス供給設備を導入した。この際、実証サイト VPN への接続制御プログラムを導入し、SOFC システムタッチパネルの遠隔操作を可能にするとともに、停電等の際に、UPS と連携して SOFC を安全に停止できるようにした。（PO: 2-10, 4-1）

2017 年 12 月に、開発した 1 kW 級バイオガス SOFC システム実証機を、ベンチェ実証サイト（図 3）に据え付けた（図 27 右下）。これは東南アジアに初めて設置される SOFC システムである。農学グループの取り組みにより、ベンチェ実証サイトにて、メコンデルタ特有のバイオマス廃棄物を発酵槽に投入するだけで、加温・保温なしに、現地の気温において、目標値を超える速度でバイオガスを安定して製造することに成功したため（表 22 参照）、2018 年 1 月末に、バイオガスを供給して東南アジア初となる SOFC 発電実証を開始した。バイオガス（ CH_4 : 55%, CO_2 : 45%）を、 5.5 L min^{-1} でモジュールに供給し、スタック温度 700°C 、燃料利用率 69%において、発電効率 53.1%LHV を達成した（電流値: 30 A、スタック電圧: 32 V、出力: 960 W）。この発電効率は、エンジン発電機の倍に達するものであり、2018 年 2 月にプレスリリースを行い、各種メディアで報道されることとなった（表 3 参照）。（PO: 2-7 ~2-10）

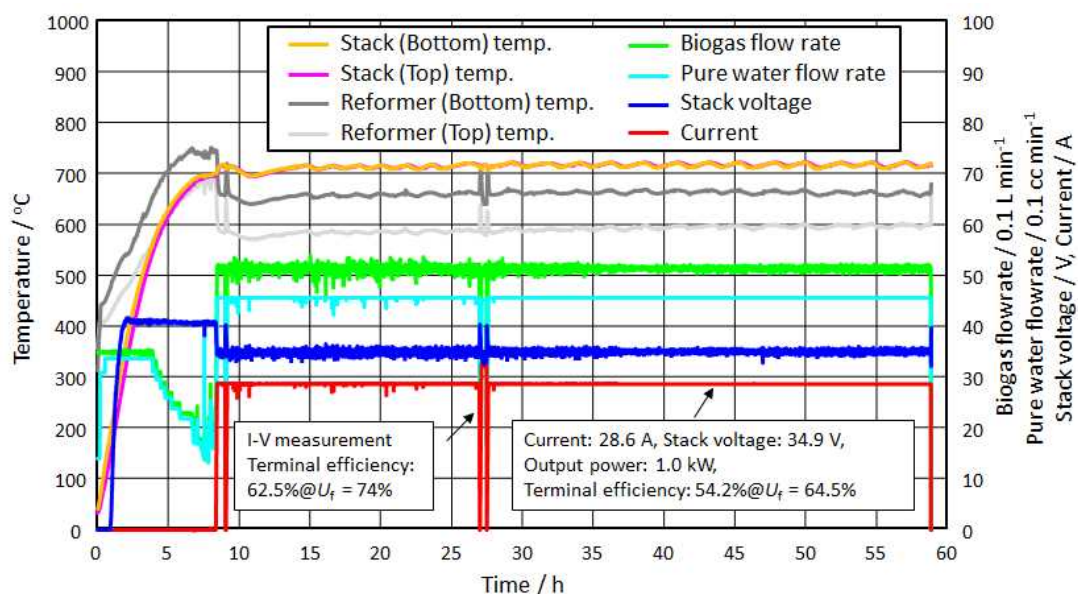


図 28 : ベンチェ実証サイトで実施した（2019 年 7 月）1 kW 級バイオガス SOFC システムの運転実証（起動から定格運転状態までのシステムの挙動）

セル間の接触抵抗の低減およびスタックを構成する各セルへの燃料分配の均一化などの改良を施したスタックを搭載し、 7 m^3 メタン発酵実証のフェーズ VII の終盤、VII から VIII

への移行期間（2019 年 7 月（**図 44** 参照））に実施した発電試験の結果を**図 28**に示す。発電試験中のバイオマスの投入は、乾物の日量平均で、稲わら 8.0kg、エビ養殖池へドロ 1.8 kg、エビの脱皮殻 9.2 kg であった。脱硫を行ったバイオガス（CH₄: 60%、CO₂: 40%）を SOFC に供給し、システムの起動を行ったところ、図のように、約 7 時間でスタック温度が 700℃ に達し、その後、710℃ で安定した。定格運転時（1 kW 出力時）のバイオガス流量は 5.15 NL min⁻¹（S/C=1.1）で、燃料利用率（U_F）= 64.5%において、発電端効率 54.2%LHV を示した。定格運転中に行った I-V 試験では（**図 29**）、U_F = 74%において、バイオガス発電としては世界最高レベルとなる発電端効率 62.5%（電流：32.5 A、スタック電圧：35.1 V、発電出力：1,139 W）を達成した。当成果を 2019 年 8 月にプレスリリースし、その後、新聞報道で当成果を知った複数の企業よりコンタクトがあり、新たな連携の創出につながった。

バイオガスを燃料とした SOFC システムについては、日本国内での実用化例はなく（開発例もほとんどない）、海外では数社が開発を行っているものの、実用段階にあるのは、Convion 社 50 kW 級システムくらいである。地域のバイオマス廃棄物を資源として利用した SOFC 導入エネルギー循環システムを提案し、その実証に取り組んでいるプロジェクトの成果は、国際学会 13th EUROPEAN SOFC & SOE FORUM での最優秀賞受賞に加え、アノード支持型 SOFC セルの世界最大の供給メーカーである Elcogen 社（エストニア）のホームページにてケーススタディとして取り上げられ（<https://elcogen.com/case-studies/>）、SOFC 業界に広く知られることとなった。

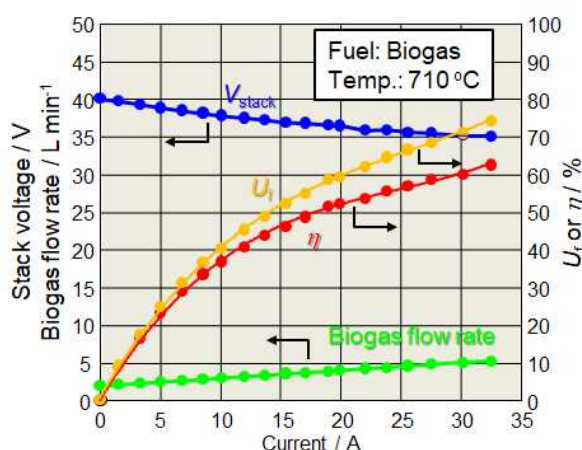


図 29：ベンチェ実証サイトで実施した（2019 年 7 月）1 kW 級バイオガス SOFC システムの運転実証（電流-電圧特性）

項目 iv バナメイエビ養殖残渣のエネルギーポテンシャル評価

中間評価時に、「デモサイトのエビ養殖池汚泥の有機物含有量が想定より低く、ウェットなバイオガス発酵では実証に十分なバイオガスの収量が得られないことが判明した。水質汚染等が問題となっている養殖汚泥を有効利用して SOFC を運転し、養殖による環境負荷を軽減するという当初のプロジェクト目標に従い、今後エビ養殖場デモサイトでの実証試験と並行し周辺養殖池の汚泥集積池の汚泥や他養殖産業汚泥の組成分析を行い、ウェットなバイオガス発酵を実証に組み込む努力を行ない、汚泥のバイオマスとしてのポテンシャルを改めて検討することが望まれる。」との指摘を受けていたが、本プロジェクトに実証サイトを提供している Hoang Vu 養殖場が、2019 年春の養殖より、へドロを連続的に排出する機能を付与したエビ養殖池を新たに整備してバナメイエビの生産を行うようになり、これにより、“フレッシュな”へドロ、加えてエビの脱皮殻を回収できるようになったため、これからエビ養殖残渣のみでのメタン発酵を行い、エネルギーポテンシャルを評価した。

へドロ排出機能を付与した新養殖池

図 30 が、2019 年春の養殖より、Hoang Vu 養殖場が採用した、へドロ排出機能を有するエビ養殖池である。底の全面をラバーシートで覆い（**上**）、池底の中央部にへドロ排出孔を掘り（**左中**）、ポンプと繋いだ（**左下**）。池の構造は、養殖中、へドロ排出孔付近にへドロが集積するように円錐状となっている（**右中**）。このような改良により、養殖中、へドロを含む養殖池底層の水を、隣接する溜池に定期的に排出できるようになった。底層水の排出は、1 日に 3 回（6:00、10:00、18:00）行われ、排出速度は 545 L min⁻¹であった。1 回の排出時間は 5 分であり、底層水の排出日量は 8.2 トンであった（**右下**）。（PO: 3-2）

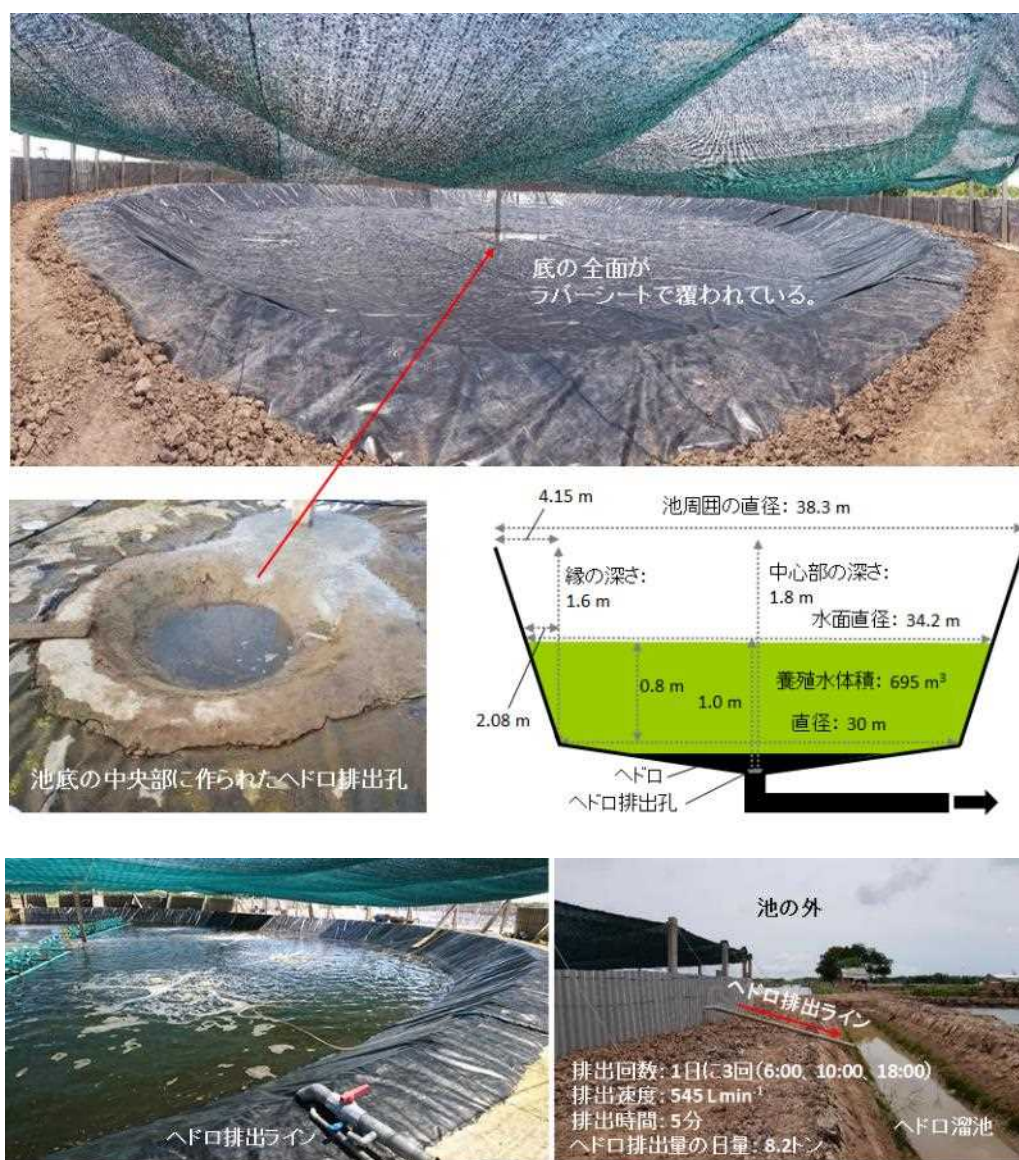


図 30 : 2019 年春の養殖より、Hoang Vu 養殖場が採用した、ヘドロ排出機能を有するエビ養殖池（養殖開始日：5 月 10 日、養殖密度：350,000 匹/695 m³ = 504 匹 m⁻³、エビサイズ（養殖開始 1 ヶ月）：2.07 g、17.3 mm、溶存酸素濃度（管理値）：6.0 mg L⁻¹、消費電力（6 月 9 日測定）：5.08 kW）

表 9 に、上記養殖におけるバナメイエビの成長の推移を示したが、4 ヶ月間の養殖で平均体重が 44.63 g にもなり（一般的な出荷サイズの倍のサイズ）、**図 30** のような、毎日ヘドロを排出して池の環境をクリーンに保つ養殖法の採用により、エビの生産性が著しく向上した。（PO: 3-2, 4-4）

表 9 : 2019 年春の養殖（**図 30** 参照）におけるバナメイエビの成長の推移

	平均頭胸甲長 / mm	平均体重 / g
6 月 10 日（開始後 1 ヶ月）	17.31	2.07
7 月 11 日（開始後 2 ヶ月）	27.59	12.87
8 月 15 日（開始後 3 ヶ月）	35.26	31.36
9 月 9 日（開始後 4 ヶ月）	—	44.63

図 31 右上のように、排出した底層水を 3 時間ほど静置させると、上澄みと沈殿層に分かれ、写真の場合、上澄みの割合は 92.8 %であった。本プロジェクトでエビ養殖池へドロと呼んでいるのは、この沈殿層のことであり、1 日に 600 kg 近く回収できることになる。また、底層水をポンプで排出する際、ネットを介してエビの脱皮殻を回収することができ (**図 31 右下**)、1 日に回収した量は、21.22 kg-FW (6.68 kg-DW) (2019 年 7 月 9 日～8 月 6 日 (養殖開始 2 ヶ月目～3 ヶ月目) の期間の平均) であった。(PO: 3-2)



図 31 : **図 30** の養殖池から回収したエビ養殖残渣 ; (左上) 池中央部底層の水をポンプで排出している様子、(右上) 排出水を 3 時間静置した後の様子、(左下) 上澄みを除いて得られたへドロ、(右下) 底層水をポンプで排出する際、ネットを介して回収したエビの脱皮殻

エビ養殖残渣のエネルギーポテンシャル

上述のように、バナメイエビ養殖中に発生するへドロおよびエビの脱皮殻を回収できるようになったため、これらのエビ養殖残渣のエネルギーポテンシャルの評価を行った。**表 10** に、ベンチェ産バイオマス廃棄物の水分含有率および有機物含有率を示す。稲わらについては、福岡県糸島産のサンプルを用いて評価を行った。

表 10: ベンチェ産バイオマス廃棄物の水分含有率および有機物含有率 (2018 年 4 月から現在までの、7 m³メタン発酵槽への投入データの平均値を取ったもの。)

バイオマス廃棄物	水分含有率* / wt%-FW	有機物含有率** / wt%-DW	有機物含有率*** / wt%-FW
エビ養殖池へドロ	90.00	41.27	4.127
エビの脱皮殻	68.38	57.48	18.18
稲わら (福岡県糸島産)	13.78	86.57	74.64
ココナッツ搾りかす	33.59	97.15	64.51
バガス	24.23	60.00	45.46

*湿潤重量 (FW: Fresh Weight) 中の水分量割合

**乾燥重量 (DW: Dry Weight) 中の強熱減量割合 (TG-DTA で測定)

***FW 中の有機物量割合

バイオマス乾燥重量当たりの高位発熱量 (HHV [MJ kg-DW⁻¹]) は、バイオマス中の炭素含有率 C_0 [wt%]用いて、(1)式で見積もることができる[10]。

$$HHV = 0.4571 \times C_0 - 2.70 \quad (1)$$

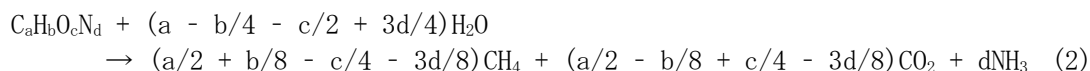
表 11 にベンチェ産バイオマス廃棄物の C_0 の測定値から求めた HHV の値を示す。

表 11: ベンチェ産バイオマス廃棄物の炭素含有量と (1) 式で算出した高位発熱量

バイオマス廃棄物	C_0^* / wt%	HHV / MJ kg-DW ⁻¹
エビ養殖池へドロ	12.6	3.07
エビの脱皮殻	21.4	7.07
稲わら (福岡県糸島産)	38.5	14.9
ココナッツ搾りかす	47.0	18.8
バガス	47.7	19.10

*CHN コーダーで測定

メタン発酵によるバイオマス ($C_aH_bO_cN_d$) からのメタン生成は、(2)式で表され、バイオマス廃棄物 (乾物) の強熱減量 (VS: 有機物含有量) 当たりのメタン発生量 (理論メタンポテンシャル (Theoretical Biochemical Methane Potential, ThBMP [NL kg-VS⁻¹])) は、(3)式で算出される[11]。 f_0 は補正係数で、発酵による分解率に相当する (草本は 0.55、下水汚泥は 0.50 程度)。



$$ThBMP = (a/2 + b/8 - c/4 - 3d/8) \times 22400 \times f_0 / (12a + b + 16c + 14d) \quad (3)$$

表 12: ベンチェ産バイオマス廃棄物の化学組成と (3) 式で算出した ThBMP

バイオマス廃棄物	モル比*				ThBMP (at $f_0 = 1$) / NL kg-VS ⁻¹		ThBMP (at $f_0 = 1$) / NL kg-DW ⁻¹
	a	b	c	d	式 (3)	平均	
エビ養殖池へドロ	18	23	34	1	84.32	74.52	30.75
	21	23	40	1	72.34		
	19	19	36	1	66.91		
エビの脱皮殻	7	14	10	1	195.6	225.4	129.6
	8	16	10	1	244.8		
	8	15	10	1	235.8		
稲わら (福岡・糸島産)	73	122	63	1	395.0	398.1	344.6
	71	120	61	1	398.2		
	61	104	52	1	401.2		
ココナッツ搾りかす	43	81	31	1	475.5	481.3	467.6
	46	85	32	1	486.3		
	36	66	25	1	482.0		
バガス	199	290	19	1	976.6	976.6	586.0

*EDX で測定

表 12 に、ベンチェ産バイオマス廃棄物の化学量論比の測定値 a 、 b 、 c 、 d ($= 1$)、および $f_0 = 1$ として(3)式で算出した ThBMP [NL kg-VS^{-1}]を示す。各種バイオマス廃棄物の有機物含有率が分かっているので (**表 10** 参照)、その値を用いて ThBMP の単位を NL kg-DW^{-1} に変換した結果も併せて示した。

HHV [MJ kg-DW^{-1}] (**表 11**) および ThBMP [NL kg-DW^{-1}] (**表 12**) の相関を**図 32** に示す。線形近似した直線の傾きは 37.4 MJ Nm^{-3} であり、メタンの HHV (39.8 MJ Nm^{-3}) に近い値を示した。このことから、**図 32** は、バイオマス廃棄物のエネルギーポテンシャルをほぼ正確に示していると言える。最も低品位なバイオマスと言えるエビ養殖残渣 (エビ養殖池ヘドロ、エビの脱皮殻) は、稲わら、ココナッツ搾りかす、バガス等、家畜の飼料やボイラー燃料としての用途もある植物系のバイオマス廃棄物に比べ、当然のことながらエネルギーポテンシャルは低いが、全く市場価値がなく、環境汚染・生態系破壊の要因となっていることを考えると、脱皮殻を含むエビ養殖池ヘドロは、うまく回収することで、積極的にエネルギー利用すべきポテンシャルを有していると言える。(PO: 3-3, 4-8)

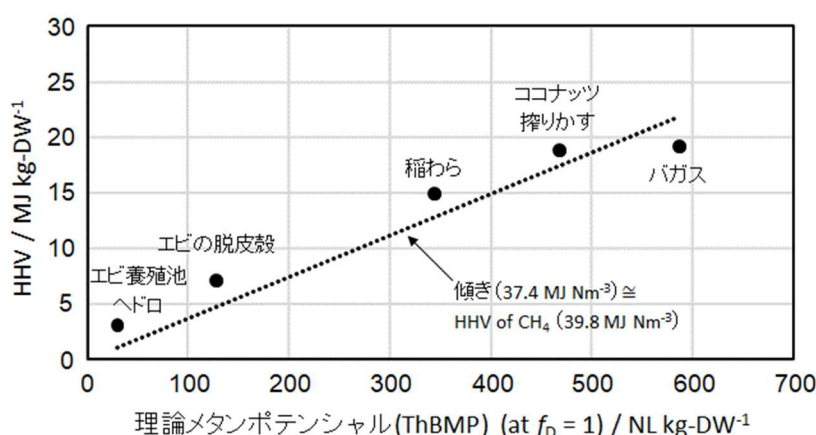


図 32 : ベンチェ産バイオマス廃棄物のエネルギーポテンシャル

表 13 に、本プロジェクトで得たバナメイエビ養殖残渣に関する基礎データをまとめた。エビ養殖中に発生する養殖残渣のすべてを、SOFC 発電によりエネルギー利用するモデルを考える。本プロジェクトで開発した直流発電端効率 62.5%LHV (発電出力 1.139 kW) の 1 kW 級バイオガス SOFC システム (**図 27**) を、**表 13** のエビ養殖残渣由来のバイオガス ($\text{CH}_4:\text{CO}_2 = 65\%:35\%$) で連続稼働することを考えると、メタンの低位発熱量 35.9 MJ Nm^{-3} を考慮して、バイオガス供給日量 $6.75 \text{ Nm}^3 \text{ day}^{-1}$ ($= 4.69 \text{ NL min}^{-1}$) が要求される (発電出力 = $(4.69 \text{ NL min}^{-1} \times 0.650 / 1000 \text{ L m}^{-3}) / 60 \text{ s min}^{-1} \times 35.9 \text{ MJ Nm}^{-3} \times 0.625 \times 1000 = 1.139 \text{ kW}$)。現地の平均気温 29°C で の値とすると、 $7.47 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$ ($= 6.75 \text{ Nm}^3 \text{ day}^{-1} \times (273.15 + 29) / 273.15$) のバイオガス発生量が要求される。

エビ養殖残渣 (エビ養殖池ヘドロおよびエビの脱皮殻) のバイオガス発生ポテンシャルが明らかとなったので、**図 30** の養殖中に養殖残渣から製造可能なバイオガス量を見積もった。結果を**表 14** に示す。回収された残渣をメタン発酵することにより得られるバイオガスは $3.08 \text{ Nm}^3 \text{ day}^{-1}$ と見積もられ、開発した 1 kW 級バイオガス SOFC の連続運転に必要なバイオガスの約半分をエビ養殖残渣から賄えることになる。**図 30** の養殖池 2 つを対象とすれば、養殖残渣のみで SOFC を連続運転することができる。そもそも、エビ養殖池ヘドロは、メタン生成菌の供給源として現地の植物系バイオマス廃棄物の発酵に必須であるし、養殖残渣に植物系バイオマス廃棄物を添加することで、安定した燃料電池発電を実現することができる。(PO: 4-8)

表 13：本プロジェクトで得たバナメイエビ養殖残渣に関する基礎データ

	エビ養殖池へドロ	エビの脱皮殻
HHV / MJ kg-DW ⁻¹	3.07	7.07
水分含有率* / wt%	90.0	68.4
密度 / kg-FW L ⁻¹	1.11	—
有機物含有率 / wt%-FW	4.13	18.2
メタン発酵消化率 (f_0) ** / —	0.67	
バイオガス中の CH ₄ 比率*** / —	0.65	
バイオガス発生ポテンシャル**** / NL kg-DW ⁻¹	31.70	133.6

*2019年7月9日～8月6日において含水率計を用いて測定した現地データの平均値

**エビ養殖池へドロを用いて4 L 発酵試験を行い、バイオガス発生量の実測値をへドロの組成分析結果より算出した ThBMP (at $f_0 = 1$) で割った値 (詳細は表 15 参照)

***エビ養殖池へドロのみを資材とした4 L 発酵試験 (2019年10月25日～12月2日@ベンチェ実証サイト) で実測したバイオガス組成

****ThBMP (表 12)、バイオガス中 CH₄ 比率、メタン発酵消化率の値を考慮して算出 (エビ養殖池へドロの場合 $\Rightarrow 30.75 \text{ NL kg-DW}^{-1} \times 0.67 / 0.65 = 31.70 \text{ NL kg-DW}^{-1}$)

表 14：表 13 のバイオガス発生ポテンシャルから見積もられるエビ養殖残渣の投入日量およびバイオガス発生日量

	乾物投入日量 / kg-DW day ⁻¹	投入日量 / kg-FW day ⁻¹	バイオガス発生日量 / Nm ³ day ⁻¹
エビ養殖池へドロ	55	550	1.74
エビの脱皮殻	10	31.6	1.34
合計	65	581.6	3.08

I-2-(2)-③ カウンターパートへの技術移転の状況

本プロジェクトで開発・実証した固体酸化物形燃料電池 (SOFC) は、ベトナムでは全く新しい技術であるため、以下に示す通り、機材供与、専門家派遣、国費留学生の受け入れおよび実習を通して SOFC に関する技術移転を進めた。

相手国のキャパシティ・ディベロップメントの加速を目的とし、SATREPS および相手国政府の支援により設立した SOFC 研究開発ラボ (図 6) の運用を、技術協力第 2 期、2016 年 9 月より開始し、国際共同研究を行ってきた。本プロジェクト終了後も、ベトナムにおける燃料電池およびナノテク関連研究の発展および人材育成のため、国際連携の拠点として、当ラボを継続して利用して行く。(PO: 1-1, 2-1)

ベトナム人若手研究者の育成とベトナムへの技術移転を目的とし、燃料電池およびバイオマスの高効率利用をテーマに、カウンターパート研究機関にて、日本側専門家が講義を行った。HCMUT にて 2016 年 9 月に開催された集中講義 (School on Micro-Nanotechnology (MINATEC 2016)) においては、INT および HCMUT の研究スタッフおよび学生に対して、中島 (日本側専門家) および研究代表者が、それぞれ電気化学測定およびバイオガス SOFC の高効率化に資する触媒材料開発をテーマに講義を行った (図 33 上)。VNUHCM の University of Science にて 2017 年 5 月開催された Third International Workshop on Nano Materials for Energy Conversion (NMEC-3) では、ワークショップに参加したベトナム人学生に対して、研究代表者が、SOFC によるバイオエネルギー利用をテーマに講義を行った (図 33 下)。さらに、2 年に 1 回、INT が開催する国際会議 International Workshop on Nanotechnology and Application では、2015 年からの各回 (IWNA-2015, 2017, 2019)、研究代表者が招待講演を行い、ベトナムのナノテク、燃料電池関連の若手研究者および学生に対して、SOFC 技術やペーパー触媒技術の優位性について解説した (図 5 右上)。(PO: 2-1～2-6, 3-1～3-5, 4-3～4-5, 4-8)

   		
Time	Content	Location
Monday, 19th Sept. 2016: School on Micro-Nanotechnology (MINATEC 2016)		
7:30 - 8:00	• Registration	Conference Hall (B4), Ho Chi Minh City University of Technology
8:00 - 8:20	• Opening speech • Speech of VNUHCM Representative	
8:20 - 8:35	• Speech of CEA-MINATEC Representative	
8:35 - 9:30	• Talk 1: Fundamentals of Solid Oxide Fuel Cell and electrochemical evaluation	
9:30 - 9:45	Coffee break	Conference Hall (B4), Ho Chi Minh City University of Technology
9:45 - 10:45	• Talk 2: Development of structured-catalyst material for biogas-fueled SOFC	
10:45 - 12:00	• Talk 3: Lithium-Ion Batteries Hazard and Use Assessment	
12:00 - 13:30	Launch time	Class room, Ho Chi Minh City University of
13:30 - 15:30	• Talk 4: Simple electronic devices used in everyday life • The solar cell: a special device for conversion of energy	



 The Third International Workshop on Nano Materials for Energy Conversion May 03 - 06, 2017, HO CHI MINH CITY, VIETNAM				
	May 3 rd	May 4 th	May 5 th , Parallel Sessions	May 6 th
Morning 8:30 - 12:00	Short Course 1 Y. SHIRATORI First order technology for highly efficient biomass utilization (8:30-10:00)	Registration Opening Ceremony Plenary Session Group Photo	Grand Hall Session: Thermo-Electric Materials	Room 023 Sessions: Modeling and Computation (8:30-9:15) Rechargeable Batteries 2 (9:15-10:00)
	Coffee Break	Coffee Break	Coffee Break	Coffee Break
	Short Course 2 M. ONTAKI (Thermo-Electric Materials) (10:15-12:00)	Parallel Sessions Grand Hall Session: Fuel Cell Room 023 Session: Nano materials for energy conversion 1	Session: SOFs, ZIFs, Gas separation & storage	Session: Rechargeable Batteries 2 (cont.)
			CLOSING CEREMONY (11:45-12:00) Grand Hall	Short Course 4 LE Quoc Hung (Volcanism)



図 33 : 技術移転を目的としたカウンターパート (VNUHCM) での集中講義のプログラムと講義中の様子 ; (上)School on Micro-Nanotechnology (MINATEC 2016)にて講義を行う研究代表者 (2016 年 9 月 19 日)、(下)Third International Workshop on Nano Materials for Energy Conversion (NMEC-3)にて講義を行う研究代表者 (2017 年 5 月 3 日)

INT 研究者が九州大学を訪問し、SOFC プロセッシング用の各機材を用いた SOFC 単セル作製法、SOFC 発電性能評価装置を用いた電気化学評価法および走査型電子顕微鏡による微細構造観察の実習を行った。2016 年度は INT 副所長 (Doan Duc Chanh Tin 氏) および研究員 (Thien Dien To 氏) が、2017 年度は To 氏が来日し、九州大学水素エネルギー国際研究センターの学生およびスタッフの指導の下、模擬バイオガス供給時の SOFC 発電性能評価およびペーパー触媒を用いたメタンドライリフォーミング試験を通して上記の実習を行った。当実習は INT での研究促進に寄与するとともに、環境エネルギー分野さらには産業界における東南アジアの現状や課題について日本人学生が知る良い機会となり、ベトナムでの実践活動に強い興味を持った研究代表者の指導学生 (当時修士課程 1 年) が、2018 年 4 月から 1 年間、INT に留学した。(PO: 2-1, 2-2, 2-4~2-6)

研究代表者が VNUHCM から受け入れたベトナム人留学生 (2014 年 10 月博士後期課程入学) が、バイオガス供給時の SOFC 運転状態シミュレーション手法の開発を行い、2016 年度に得られた成果により、Honda Y-E-S Forum 2016 (2016 年 11 月) にて 1st Prize を受賞した (図 34)。当学生は、2017 年 9 月に博士号を取得した (表 5 参照)。(PO: 2-1~2-3)

同じく、VNUHCM から受け入れたベトナム人留学生 (2015 年 10 月博士後期課程入学) が、バイオガス改質用のペーパー触媒に関する研究を行い、2016 年度に得られた成果により特許出願 (特願 2016-167119 (出願日: 平成 28



図 34 : Honda Y-E-S Forum 2016 における受賞の様子 (当グループのベトナム人留学生 (2 名) が 1st Prize を受賞)

年 8 月 29 日) に至り、さらに Honda Y-E-S Forum 2016 (2016 年 11 月) にて 1st Prize を受賞した (図 34)。当学生は、2019 年 3 月に博士号を取得した (表 5 参照)。(PO: 2-4, 2-5)

プロジェクト参画者が一堂に会する日越合同会議を毎年開催した (表 2 参照)。図 35 は、2016 年 7 月 22 日に開催した第 2 回日越合同会議の様子であるが、合同会議の前に、日越双方の研究代表者およびベトナム側の主要メンバーのみでプロジェクト運営会議 (Project Internal Meeting (PIM)) を開き、プロジェクトの進捗状況を確認し、PIM にて、今後の進め方について日越双方のコンセンサスを取った上で全参画機関が出席する合同会議に臨み、スムーズな討議および決定ができるようにした。(PO: 5-2)



図 35 : 2016 年 7 月 22 日に開催した第 2 回日越合同会議の様子 ; (左)Project Internal Meeting (PIM) (参加者 : ベトナム側研究代表者 (Dang Mau Chien 氏 (INT 所長))、日本側研究代表者、VNUHCM 科学技術局 副局長、VNU-HCM 人事・業務管理室 室長、ベンチェ省農業局副局長、Hoang Vu 社副社長、INT 研究開発室 室長、カントー大学 応用生物学部 学部長、HCMUT 内燃機関研究室 室長、JICA プロジェクト業務調整員)、(中央)全参画機関が出席した日越合同会議、(右)合同会議後の集合写真

I-2-(2)-④ 当初計画では想定されていなかった新たな展開

該当なし。

I-2-(3) 研究題目 2: バイオ燃料製造に関する研究および関連調査 (農学グループ、リーダー:北岡 卓也)

I-2-(3)-① 研究のねらい

カウンターパート研究機関であるカントー大学 (CTU) と連携して、メコンデルタで回収可能なバイオマス廃棄物から、バイオガスを効率よく製造するためのメタン発酵条件を明らかにするとともに、参画企業 (明和工業) および INT と連携してメタン発酵槽実証機をベンチュ・Hoang Vu エビ養殖場内に設置し、1 kW 級バイオガス SOFC システム (図 27 参照) を 24 時間連続稼働できるバイオガス生成速度の達成を目指す。当目的のため、下記の取り組みを行う。(PDM: Output 3 and 4)

- 項目 i メタン発酵に関する技術移転と人材育成 (PO: 3-1~3-5)
- 項目 ii ベンチュ実証サイト周辺で回収できるバイオマス廃棄物の調査 (PO: 3-1~3-3)
- 項目 iii 現地バイオマス廃棄物を資材としたメタン発酵ラボ試験 (PO: 3-2~3-5)
- 項目 iv 現地バイオマス廃棄物を資材としたバイオガス製造実証 (PO: 3-5)

I-2-(3)-② 当初の計画(全体計画)に対する成果目標の達成状況とインパクト

項目 i メタン発酵に関する技術移転と人材育成

メタン発酵によるバイオガス製造効率率は、バイオマス廃棄物の組成および嫌気性細菌の菌叢構造に依存するため、発電用に安定してバイオガスを得るためには、現地バイオマスの性状に合わせた発酵プロセスを見出す必要がある。



図 36 : 農学関連の研究教育ネットワーク構築のための協議 ; (左)Hoang Vu エビ養殖場オーナーとの現場協議 (2014 年 7 月 13 日)、(中央)CTU メンバーとの協議 (2014 年 7 月 14 日、College of Aquaculture and Fisheries にて)、(右)Hoang Vu エビ養殖場オーナーとの協議 (2015 年 4 月 14 日、オーナー自宅にて)

本プロジェクトにおける農学関連の研究教育ネットワークの構築のため、2014 年 7 月より、CTU (グループリーダー : Do Thi Thanh Huong 氏) および Hoang Vu エビ養殖場オーナーとの協議を開始し (図 36 参照)、CTU 内に各種分析装置やメタン発酵菌の培養装置などを導入してメタン発酵試験ラボを立ち上げ (図 37 参照)、技術協力第 1 期 (2015 年度) より、専門家派遣および九州大学での試験実習を通したベトナム側への技術移転および人材育成を実施できる国際協力体制を築くことができた。(PO: 3-3, 3-4)



図 37 : CTU 内に立ち上げたメタン発酵試験ラボで指導する日本側専門家

国内では、実証サイトに導入するメタン発酵設備の設計・開発を担当する参画企業（明和工業）と、九州大学大学院農学研究院（九州大学箱崎キャンパス（2018 年度中に伊都キャンパスに移転）およびCTU（College of Aquaculture and Fisheries）に設置するメタン発酵ラボ試験装置の仕様について協議を重ね、実証試験に適用できる結果をラボで得るための実験環境を整えた。（PO: 3-3, 3-4）

項目 ii ベンチェ実証サイト周辺で回収できるバイオマス廃棄物の調査

本プロジェクトでは、バナメイエビ養殖池の底に蓄積した汚泥（エビ養殖池ヘドロ）を連続的に回収して資源として利用することで、養殖池水質の低下および周辺への汚泥廃棄による環境汚染を防ぎ、エビ養殖生産の持続性を高めることを上位目標としている。

実証サイト（Hoang Vu エビ養殖場）の養殖池底部からエビ養殖池ヘドロを回収し（図 38）、乾燥後、元素分析を行ったところ、素掘りの養殖池であるため多量の土壌成分が含まれており、乾物中の有機物含有率は 10%以下であった（表 17 参照）。当ヘドロの C/N 比は約 14 で発酵可能な範囲にあったが、これをメタン発酵資材としてバイオガス生産に用いるためには、有機物が濃縮され、かつ、分解の進んでいないフレッシュなヘドロを回収できるしくみが必要であった。プロジェクト第 4 期（2018 年度）までは、従来からの一般的な養殖法で生産が行われていたため、“質の良い”ヘドロを連続的に回収することをあきらめざるを得ない状況であったが、第 1 期より毎年開催してきたプロジェクトワークショップ（表 4 参照）にて、ヘドロの連続的な排出の必要性を訴え続けてきた甲斐もあり、Hoang Vu エビ養殖場が、2019 年春の養殖より、図 30 の養殖池を新設して養殖を開始したことに伴い、フレッシュなヘドロを回収できるようになった（乾物中の有機物含有率は約 40%（表 10 参照））。また、エビの脱皮殻を、ヘドロよりも質の高い資源として利用できることも分かった。（図 32 参照）（PO: 3-1～3-3）



図 38：（左）Hoang Vu エビ養殖場内養殖池、（中央）素掘りの養殖池の底から集積ヘドロを回収する養殖場従業員、（右）回収した養殖池ヘドロ

当プロジェクトでは、バイオマス廃棄物の排出場所とエネルギー需要地との空間的結合状態を考慮して現地の主要産業を先端技術でつなぐことを目指し、カウンターパート（CTU および INT）の協力の下、実証サイト周辺で安定的に利用可能なバイオマス廃棄物の調査を行い、エビ養殖残渣に加え、製糖残渣（バガス）、ココナッツ加工残渣（ココナッツ搾りかす）および稲わらを利用するシステムを実証することとした。（PO: 3-1）

項目 iii 現地バイオマス廃棄物を資材としたメタン発酵ラボ試験

エビ養殖残渣を資材としたメタン発酵ラボ試験

2019 年の春に新設され養殖生産を開始した図 30 の養殖池では、毎日フレッシュな養殖残渣（エビの脱皮殻や屍体を含むヘドロ）を回収できるので（図 39 左上）、これを資材として、4 L 発酵槽（図 39 右）を用いてラボスケールの試験を行った。



図 39 : エビ養殖池ヘドロを用いたメタン発酵ラボ試験 ; (左上) 実証サイト養殖池からのヘドロ回収の様子、(右) 4 L メタン発酵ラボ試験装置 (@ベンチェ実証サイト)、(左下) 発酵試験中の発酵槽内の様子

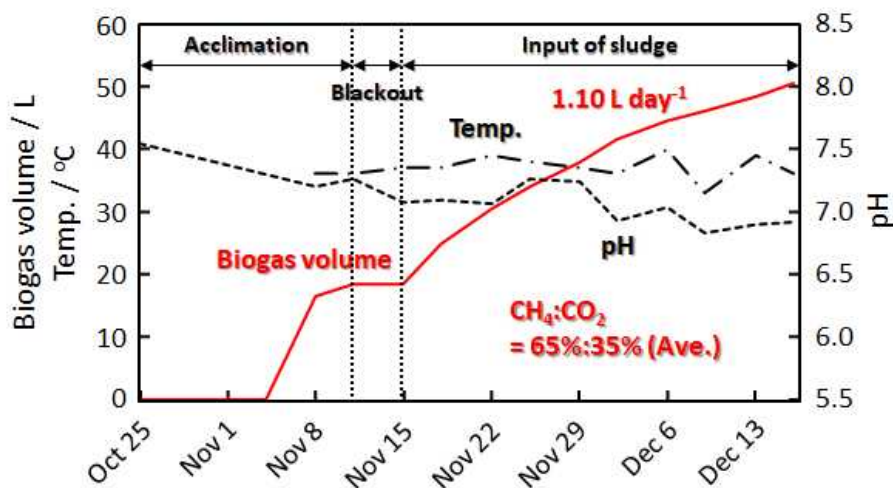


図 40 : バナメイエビ養殖残渣（ベンチェ）を資材としたメタン発酵ラボ試験の結果

2019 年 10 月 25 日より行った発酵試験の結果を図 40 に示す。発酵槽に水道水 2 L と上澄みを除いた水分含有率 54.2%の濃縮ヘドロ 2 L を投入し、スターラーの回転速度を 400 rpm に設定して、加温はせずに、室温で 2 週間放置した（馴養期間）。その後、11 月 15 日より、ホットスターラーの温度を 30°C に設定し（発酵槽内の温度は約 37°C）、水理学的滞留時間（HRT）を 40 日（ヘドロを水で 2 倍に希釈したスラリーの投入日量: 100 mL day⁻¹）、固形分濃度（TS）を 22.9% に設定してヘドロの投入と排出を繰り返した。この期間、平均組成 CH₄: 65%、CO₂: 35% のガスが 1.10 L day⁻¹ で得られ、メタン発酵を確認した。このことは、エビ養殖池ヘドロ中にメタン生成菌が存在しており、メコンデルタでバイオガス製造を行う際、当ヘドロ

を種菌の供給源として利用できることを示している。しかしながら、発酵期間が延びるとともに pH が低下し、発酵速度が徐々に落ちる現象が見られた。この結果は、負荷量が過剰になったことを反映していると考えられる。(PO: 3-4, 4-8)

上記ラボ試験から、エビ養殖池ヘドロのメタン発酵の際の消化率は、表 15 にまとめた通り、67.0%と見積もられた。

表 15 : バナメイエビ養殖池ヘドロのメタン発酵消化率の試算

11 月 15 日以降のヘドロ (乾物) の投入日量 : 30.5 g-DW day ⁻¹
ヘドロ (乾物) 中の有機物含有率 : 41.3%
ヘドロ (有機物) の投入日量 : 30.5 g-DW day ⁻¹ x 0.413 = 12.6 g-VS day ⁻¹
バイオガス発生日量 : 1,100 mL day ⁻¹
メタン発生日量 : 1,100 mL day ⁻¹ x 0.65 = 715 mL day ⁻¹
VS1g 当たりのメタンガスの発生日量 : 715 mL day ⁻¹ / 12.6 g-VS day ⁻¹ = 56.7 L kg-VS ⁻¹
VS1g 当たりのメタンガスの発生日量 (at 0°C) : 49.9 NL kg-VS ⁻¹
ThBMP (at $f_0 = 1$) : 74.5 NL kg-VS ⁻¹ (表 12 参照)
メタン発酵の消化率 : 49.9 NL kg-VS ⁻¹ / 74.5 NL kg-VS ⁻¹ = 0.670

菌叢の解析

実証サイトで回収したエビ養殖池ヘドロとメタン発酵槽内の消化液を植物防疫所の許可のもと輸入し、ヘドロと消化液内に生息する微生物の菌叢解析を行った。それぞれのサンプルから微生物画分のみを抽出し、その画分から DNA を抽出してメタゲノム解析を行った結果を表 16 に示す。

表 16 : 門 (Phylum) レベルでの消化液および汚泥の微生物群集構造

Phylum	リード数		存在比 / %	
	ヘドロ	消化液	ヘドロ	消化液
<i>Euryarchaeota</i>	16	9882	0.01	10.33
<i>Firmicutes</i>	7207	36247	6.65	37.90
<i>Chloroflexi</i>	3451	19756	3.18	20.66
<i>Synergistetes</i>	186	13576	0.17	14.20
<i>Acidobacteria</i>	21503	5445	19.84	5.69
<i>Proteobacteria</i>	38416	2182	35.45	2.28
<i>Planctomycetes</i>	22726	944	20.97	0.99
<i>Verrucomicrobia</i>	2102	459	1.94	0.48
<i>Others</i>	12850	6822	11.86	7.13

比較的豊富である全組成の 5%以上の系統が示された。

エビ養殖池ヘドロには古細菌 (Archaea) に属する高度好塩性古細菌である *Euryarchaeota* 門の菌が非常に僅かに存在した (*Halobacteriaceae* 科の *Halococcus thailandensis* と *Halococcus qingdaonensis* を合わせて 0.01%)。この菌は、増殖に高い塩化ナトリウム (NaCl) 濃度を要求する菌であり、エビ養殖場のヘドロ集積環境が汽水であることと矛盾しない。ヘドロ中の主な細菌は *Proteobacteria* 門 (35%)、*Planctomycetes* 門 (21%) であり、その多くは *Rhodobacterales* 目 *Rhodobacteraceae* 科の細菌 (21.6%)、*Legionellales* 目 *Legionellaceae* 科の *HE587226_s* (2.2%) および *Planctomycetales* 目 *Planctomycetaceae* 科の *JQ072996_s* (3.1%)、*FN822132_s* (1.6%) であった。これらの細菌とメタン発酵のプロセスとの関連性の報告は見当たらない。

バガスとココナッツ搾りかすを原料としたメタン発酵の消化液には、古細菌が微生物叢の 10%を占めた。その多くは *Methanobacteriaceae* 科の *Methanobacterium formicicum*

(3.1%)、*Methanobacterium bryantii* (1.6%) および *Methanosarcina* sp. (3.4%) であった。*Methanobacterium* 属の古細菌は嫌気性で、多くは非運動性であり、メタン生成の基質としてはギ酸あるいは水素分子および二酸化炭素の両方、あるいはどちらかを使用するものが多いことが知られている。嫌気消化槽やその排水、温泉、哺乳類の消化器官など、比較的暖かい低酸素の環境に広く分布することが知られており、実証サイトの環境に適合した菌である。消化液中の主な細菌は *Firmicutes* 門 (38%) と *Chloroflexi* 門 (21%) であり、その多くは *Clostridiales* 目 *Christensenellaceae* 科の *GU112206_s* (10.2%)、*PAC001207_g* sp. (3.9%)、*Anaerolineales* 目 *Anaerolinaceae* 科の *AJ009469_g* sp. (11.6%) および *Ktedonobacterales* 目 *Thermosporotrichaceae* 科の *Thermosporothrix* sp. (7.8%) であった。これらの微生物の代謝活性については、*Christensenellaceae* 科はグルコースを基質として酢酸や酪酸を、*Anaerolinaceae* 科はグルコースを主な基質として VFAs や水素を生成し、フェノール化合物の分解に寄与する。また、*Thermosporothrix* 属の菌は、好熱性クテドノバクテリアの放線菌様細菌として知られているが、その実態はよく分かっていない。

以上、表 16 に示した通り、エビ養殖池へドロと消化液では微生物層に大きな差が認められ、へドロ中（還元的環境下にある。）に極微量存在するメタン生成菌（*Methanobacterium formicicum*、*Methanobacterium bryantii*、*Methanosarcina* sp）がメタン発酵の過程でその菌数を爆発的に増大させていたことが明らかとなった。植物系のバイオマス廃棄物にメタン生成菌が生存している可能性は非常に低く、実際、エビ養殖池へドロを加えず、稲わらおよびココナッツ搾りかすのみを投入した場合は、3～4 週間の馴養ではメタン発酵は不可能であった（長期間試験を続ければ、休眠状態で環境中に存在している菌による発酵が生じる可能性はある）。（PO: 3-3, 3-4）

ベンチェ特有のバイオマス廃棄物を用いたメタン発酵ラボ試験

プロジェクト第 4 期（2018 年度）までは、フレッシュなエビ養殖池へドロを継続的に入手することが困難であったが、当初より、このへドロを、現地におけるバイオガス製造の際のメタン生成菌の供給源として利用することを考えていたので、ベンチェ実証サイトに設置した 7 m³ 発酵槽（図 43 参照）を用いたバイオガス製造実証の最適条件探索のため、第 1 期（2015 年度）に、Hoang Vu エビ養殖場（図 30 の新設養殖池ではなく、従来の素掘りの養殖池）で回収した (A) エビ養殖池へドロ、(B) 近隣の製糖工場で採取したバガスおよび (C) 廃糖蜜を植物防疫所の検査を受けて輸入し、メタン発酵ラボ試験を行った。

A（約 350 mL）を 121℃ で 20 分オートクレーブにより滅菌し、105℃ で水分が完全になくなるまで乾燥した。また、必要量の B および C を 105℃ で水分が完全になくなるまで乾燥した。それぞれの発酵資材の現物および乾燥後の重量を測定し、水分含有率を測定した。乾燥試料を粉砕機および振動ミルで微粉化後、600℃ で加熱し、有機物量に相当する VS（強熱減量）と無機物量に相当する灰分（強熱残量）を求め、分散型蛍光 X 線分析装置（EDX7000、島津）で元素分析を行った。表 17 に、A、B および C の乾物あたりの VS、灰分、含水率および組成を示す。A に含まれる VS はドライベースで 7.4% と低く、Si と Al の含有率が高かったことから、エビ養殖池へドロには多くの粘土が含まれていることが分かる。

メタン生成菌の供給源として A を、その菌を増殖させるための資材として B および C をサンプリングし、メタン発酵ラボ試験に供した。1 kg の A（VS：1.86%、灰分：24.5%、含水率：73.6%）、3 L の水道水および 27 g の B を九州大学大学院農学研究院に設置したメタン発酵試験装置の 4 L 発酵槽内（図 39 と同型）に投入し、35℃ に保ちながらスターラー回転数 300 rpm の攪拌条件で 120 日間メタン生成菌の馴養を行った。この間、80 g の B、さらに適宜無機塩を加え、pH をモニタリングした。表 18 に、酢酸利用速度 30 g L⁻¹ day⁻¹ を維持する無機栄養塩の最小必要量[12]と、本研究で 4 L の発酵槽内に逐次添加した無機塩ストック（No. 1、No. 2、No. 3）を示しておく。

表 17: ベンチェで採取したバイオマス廃棄物の VS、灰分、含水率および含有元素比率

	Content (Dry basis) / wt%		Moisture /wt%	Elemental composition (Dry basis) / wt%			
	VS	Ash		C	H	N	P
A	7.4	92.6	57.2	2.20	0.55	0.16	0.025
B	93.7	6.3	21.2	48.0	5.49	0.50	0.036
C	88.4	11.6	32.2	42.8	5.11	1.81	–
	Elemental composition (Dry basis) / wt%						
	K	Ca	Mg	S	Fe	Mn	
A	5.57	4.49	1.77	2.39	11.29	0.22	
B	0.26	0.093	–	0.11	0.54	0.012	
C	4.84	0.31	0.83	1.04	0.031	0.007	
	Elemental composition (Dry basis) / wt%						
	Zn	Cl	Ni	Si	Co	Al	
A	0.027	2.19	0.024	52.4	–	14.9	
B	0.004	0.073	0.002	1.80	–	0.12	
C	0.003	4.47	–	–	0.005	–	

A: エビ養殖池ヘドロ、B: バガス、C: 廃糖蜜

表 18: 酢酸利用速度 $30 \text{ g L}^{-1} \text{ day}^{-1}$ を維持する無機塩（菌の栄養源）の最小必要量[12]

Nutrient salts	Necessary quantity ($10^2 \text{ mg L}^{-1} \text{ day}^{-1}$)	Salt amount corresponding to the necessary quantity for 4 L ($10^2 \text{ mg 4 L}^{-1} \text{ day}^{-1}$)		Stock
$\text{NH}_4\text{-N}$	1.00	NH_4Cl	15.3	No. 1
$\text{PO}_4\text{-P}$	0.04	KH_2PO_4	0.703	
S	0.10	Na_2SO_4	1.77	
Ca	0.05	$\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0.734	No. 2
Mg	0.01	$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0.335	
Fe	0.01	$\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0.194	No. 3
Ni	0.002	$\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0.0320	
Co	0.001	$\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0.0160	

120 日間馴養後の消化液に VS 10 g の C を添加してメタン発酵を開始したところ、図 41 に示すように、初めの 1 日で 2.75 mL min^{-1} の速度でガスが発生し、この値は、貯留量 7 m^3 のメタン発酵槽（図 43）に換算すると、目標値に近い $6.14 \text{ Nm}^3 \text{ day}^{-1}$ であった。しかしながら、pH が 5.5 まで大きく低下し、炭酸ガスと水素の発生が多く見られ、開始 3 日後の CH_4/CO_2 比は 0.66

であり、一般的なバイオガス ($\text{CH}_4/\text{CO}_2 = 1.5$) に比べて著しく低い値を示した。試験開始 7 日後に、VS 20 g の B:C = 4:1 の混合物 (Mixture-(I)) を添加したところ、水素の発生が見られず pH 約 6.5 で発酵が安定化し、最終的に $\text{CH}_4/\text{CO}_2 = 1.7$ のバイオガスが得られた。この際（9 日目～13 日目）のガス発生速度は平均 1.26 mL min^{-1} であり、この値を、 7 m^3 の発酵槽に換算すると、1 kW 級 SOFC システムを連続運転するための目標値 ($7.3 \text{ Nm}^3 \text{ day}^{-1}$) に遠く及ばないバイオガス生成速度 $2.82 \text{ Nm}^3 \text{ day}^{-1}$ が見積もられた。

上述の Mixture-(I) のメタン発酵試験で発酵が認められなくなった時点で、全 VS 量 20g において B:C の比率を (II) 4:1、(III) 3:2、(IX) 2:3 と変化させ、1 週間ずつの発酵試験を行った。発酵資材を添加する際は、発酵槽内の消化液 500 mL を排出し、資材に必要な量（表

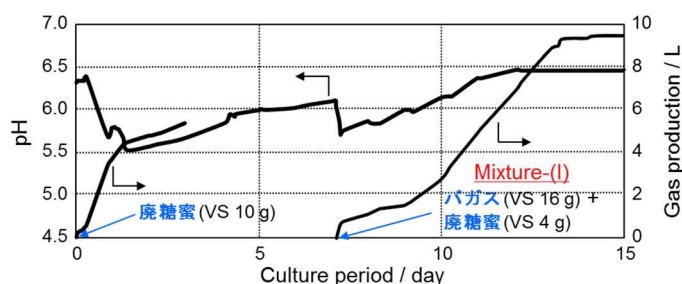


図 41: エビ養殖池汚泥を用いたメタン菌馴養試験後の消化液にバガスおよび廃糖蜜を投入した際のガス発生量と pH のモニタリング（無機塩 2 倍）

18 参照) の 2 倍の無機塩及び水道水を加えて 400 mL として発酵槽に加え、水道水で添加口を洗浄しながら全量を 4 L とした。表 19 に結果を示す。Mixture-(II)、(III)および(IV)それぞれの場合に、バイオガス収率 165、404 および 461 L kg-VS⁻¹を記録した。廃糖蜜の割合が高くなるほど pH の低下が大きく、水素発生量が多くなり、メタンの発生も増加する傾向にあった。バガスと廃糖蜜だけではメタン生成に進むために必要な無機塩類が不足しており、無機塩類を補う事でバイオガスの発生が促進され、さらに、バガスの主成分であるセルロースやリグニンを資化する菌の活性を高めることを目的に幾分発酵したバガスを資材として用いたことにより、アルカリ処理バガスを発酵資材とした文献値 540 L kg-VS⁻¹ [13]に近い収率が得られた。

表 19 : 図 41 の発酵停止後、バガスと廃糖蜜の比率を変えて 1 週間の間隔で行った発酵試験*の結果

Mixture	(B) Bagasse : (C) Molasses**	Production (mL / week)			pH	H ₂ S / ppm	Biogas yield / L kg-VS ⁻¹
		CH ₄	CO ₂	H ₂			
(II)	4:1	2095	1198	0	6.21	9.0	165
(III)	3:2	4059	3998	18	6.19	14	404
(IV)	2:3	4401	4772	55	6.17	51	461

* Retention time was 56 days (= 4 L/(0.5 L week⁻¹)).

** Total VS (Bagasse + Molasses) was 20 g.

以上の通り、エビ養殖池ヘドロと水道水を混合して得られた上澄みに、バガスおよび廃糖蜜を添加し、pH を 6 以上に保ちながら馴養を行い、バイオガス生成速度は低下するものの、廃糖蜜添加割合の低減と滞留時間の延長で pH の維持が容易になることを確認した。当プロジェクトで行っているエビ養殖池ヘドロと製糖残渣の混合物を資材としたメタン発酵プロセスはこれまで報告例がなく、ヘドロをメタン発酵のための種菌として利用可能なことを見出した当成果は JST Topics (2017 年 2 月) で紹介され、INT との共著論文として国際誌に掲載された (*Frontiers in Environmental Science* 5 (2017) Article 25)。(PO: 3-3, 3-4)

表 20 : エビ養殖池ヘドロを種汚泥とし、バガスとココナッツ搾りかすを資材とした 4 L メタン発酵試験中の資材および栄養塩の投入記録 (2018 年 1 月 19 日～3 月 16 日)

Date	Period / days	VS / g		Mineral solution		Urea / g
		Bagasse	Coconut pomace	No. 1 + No. 2	No. 3	
①19-Jan	0	12	6	1 Volume	2 Volume	0.43
③27-Jan	8	12	6	1 Volume	2 Volume	0.43
⑤4-Feb	16	12	6	1 Volume	2 Volume	0.43
⑦12-Feb	24	12	6	1 Volume	2 Volume	0.43
⑧16-Feb	28	8	12	2 Volume	2 Volume	0.86
⑨20-Feb	32	8	12	2 Volume	2 Volume	0.86
⑪28-Feb	40	8	12	2 Volume	2 Volume	0.86
⑬8-Mar	48	8	12	2 Volume	2 Volume	0.86
⑮16-Mar	56	8	12	2 Volume	2 Volume	0.86

Discharge and input: 200 mL (4 days interval), HRT = 80 days

2018 年 1 月には、エビ養殖池ヘドロを種汚泥とし、バガスとココナッツ搾りかすを資材として、4 L 発酵試験を行った。表 20 は、その際の資材および栄養塩の投入記録である。栄養塩 No. 1、No. 2、No. 3 は、表 18 に示した通りである。図 42 に発酵試験の結果を示す。最終的に 10%のバイオマス (バガス : ココナッツ搾りかす = 2:3) を用いた発酵試験

で、 4 L day^{-1} 以上の安定したバイオガス (CH_4 : 60.7%、 CO_2 : 34.0%) の発生を確認して目的を達成し (7 m^3 発酵槽では、 $7 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$ 以上のバイオガス発生量が期待できる。)、これまでに、無機塩 (N、P、K、Mg、Ca、Fe、Ni、Co) の添加が重要であると判断した。(PO: 3-2~3-4)

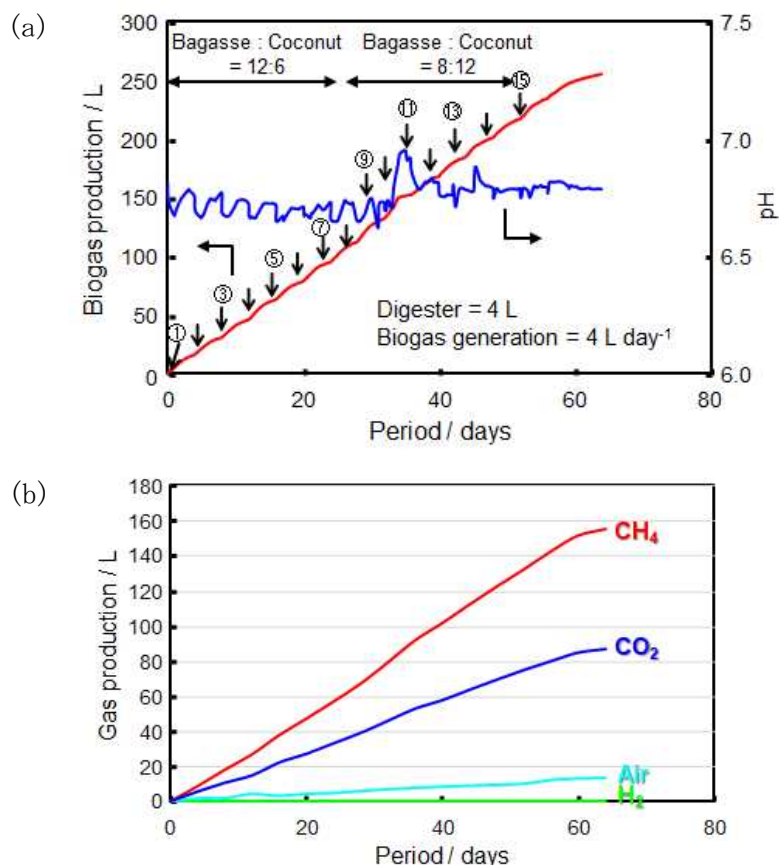


図 42：エビ養殖池ヘドロを種汚泥とし、バガスとココナッツ搾りかすを資材とした 4 L メタン発酵試験の結果；(a) バイオガスの累積発生量とスラリーの pH の推移、(b) メタンおよび二酸化炭素の累積発生量の推移

項目 iv 現地バイオマス廃棄物を資材としたバイオガス製造実証

上述の通り、我々は、ベンチェ産バイオマス廃棄物のメタン発酵に関する基礎的知見をラボ試験によって蓄積しつつ、2016 年 12 月にメタン発酵槽実証機（スラリー貯留量 7.0 m^3 、図 43）の Hoang Vu エビ養殖場内への据付けを完了させた。

2017 年 2 月に、エビ養殖池ヘドロの上澄み液 840 L、膜ろ過装置（図 54 参照）で濾別されたエビ養殖池濃縮水 1,980 L、水道水 4,000 L およびバガス 550 kg（水分含有量 36%）を図 43 の発酵槽に投入し、固形分濃度（TS）約 10 %でメタン菌の馴養を開始した。この際、炭素率（C/N 比）が 20 程度となるよう尿素 ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$) 10 kg を添加し、さらに、pH を約 7 に維持するため、CaO および CaCO_3 をそれぞれ 16 kg および 24 kg 投入した。馴養開始 1 ヶ月後からガス発生を確認し、その後、



図 43：Hoang Vu エビ養殖場内に据付けた 7 m^3 メタン発酵槽

約 1 年間にわたって、固形分濃度や発酵資材の種類を変え、1 kW 級 SOFC を連続運転可能なバイオガス製造量の目標値 ($7.3 \text{ Nm}^3 \text{ day}^{-1}$) の達成を目指した。

2018 年 3 月 5 日～11 日の期間のバイオマス原料の投入と発酵残渣の排出の日量を表 21 に示す。この週のバガスおよびココナッツ搾りかす投入の平均日量は、それぞれ $6.00 \text{ kg-DW day}^{-1}$ および $8.02 \text{ kg-DW day}^{-1}$ で、これらに養殖池濃縮水を加えたスラリー投入の平均日量は 111 kg day^{-1} (水理学的滞留時間 (HRT) = 68 日) であった。当該期間のメタン発酵槽の運転条件およびバイオガス製造量を表 22 にまとめたが、TS13 %、平均 pH7.07、平均気温 29.5°C において、目標値を上回る平均日量 $8.48 \text{ Nm}^3 \text{ day}^{-1}$ (29.5°C での計測値 $9.40 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$) のバイオガス生成 (平均組成 $\text{CH}_4(\%) / \text{CO}_2(\%) = 62.2/37.8$) を達成した。(PO: 3-5, 4-2)

表 21：バイオマス原料の投入と発酵残渣の排出の日量 (2018 年 3 月 5 日～11 日)

Local time 9:00 am	Mar 5 (Mon)	Mar 6 (Tue)	Mar 7 (Wed)	Mar 8 (Thu)	Mar 9 (Fri)	Mar 10 (Sat)	Mar 11 (Sun)
Input							
Bagasse (kg-FW* day^{-1})	7.45	7.40	7.85	7.05	7.40	7.65	0
Water content (%)	19.6	19.0	23.5	15.0	18.7	21.7	–
Bagasse (kg-DW** day^{-1})	5.99	5.99	6.01	5.99	6.02	5.99	0
Coconut pomace (kg-FW day^{-1})	14.2	19.6	11.9	10.7	10.7	11.0	0
Water content (%)	43.6	59.1	32.4	25.3	24.9	26.9	–
Coconut pomace (kg-DW day^{-1})	8.01	8.02	8.04	7.99	8.04	8.04	0
Concentrated pond water (L day^{-1})	90.0	90.0	90.0	90.0	90.0	90.0	0
City water (L day^{-1})	0	0	0	0	0	0	0
Urea*** (kg)	0.520	0.520	0.520	0.520	0.520	0.520	0
Chemical fertilizer (kg)	0.106	0.106	0.106	0.106	0.106	0.106	0
Total (kg)	112	118	110	108	109	109	0
Discharge							
Bagasse (kg-FW day^{-1})	30.0	29.0	29.6	30.7	35.4	39.1	0
Water content (%)	87.7	85.4	84.7	85.2	85.8	84.4	–
Bagasse (kg-dry day^{-1})	3.69	4.23	4.53	4.54	5.03	6.10	0
Digestate (L)	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	0
Water content (%)	97.4	98.1	97.8	97.6	97.6	97.6	–
Evaporation residue (kg)	1.82	1.32	1.55	1.72	1.67	1.65	0
Total (kg)	102	100	101	102	107	111	0

*生重量、**乾燥重量、***C/N 比 20 維持のため

表 22：メタン発酵槽の運転条件およびバイオガス製造量 (2018 年 3 月 5 日～11 日)

Local time 9:00 am	Mar 5 (Mon)	Mar 6 (Tue)	Mar 7 (Wed)	Mar 8 (Thu)	Mar 9 (Fri)	Mar 10 (Sat)	Mar 11 (Sun)
Stirring rate (rpm)	16	16	16	16	16	16	16
Stirrer current (A)	1.39	1.4	1.41	1.39	1.38	1.38	1.37
Pressure of slurry (kPa)	25.6	25.7	25.8	25.9	25.9	26.1	26.0
Slurry volume (m^3)	7.46	7.49	7.52	7.54	7.54	7.60	7.57
Temperature ($^\circ\text{C}$)	29.9	30.1	29.7	29.4	29.2	29.2	28.8
pH	7.12	7.06	7.07	7.07	7.06	7.04	–
Biogas production* ($\text{m}^3 \text{ day}^{-1}$)	7.52	7.85	10.8	10.2	9.48	9.23	10.7
Biogas pressure (kPa)	0.78	0.73	0.72	0.75	0.77	0.78	0.76
CH_4 (%)	64.8	64.1	59.4	61.4	62.1	61.6	–
CO_2 (%)	35.2	35.9	40.6	38.6	37.9	38.4	–
CH_4/CO_2	1.84	1.79	1.46	1.59	1.64	1.60	–

*現地気温における値、TS: 13%、 H_2S 濃度: 75–1,600 ppm (脱硫塔上流)、 $< 0.5 \text{ ppm}$ (脱硫塔下流)

図 44 に、エビ養殖池ヘドロを種汚泥として用いた、ベンチェ 7 m³メタン発酵槽を用いたバイオガス製造実証の結果を示す。2017 年 8 月中旬より、炭素率 (C/N 比) 20 を維持しながら、水分を染み込ませたバガスに加えてココナッツ搾りかすの投入を開始した (フェーズ I)。**表 23** には、**図 44** 中のフェーズ I~IX に投入した現地バイオマス廃棄物の日量を示した。図の各棒グラフは、エネルギーの日量を示しており、それぞれ、(緑) バイオマス廃棄物のエネルギーとしての投入日量、(青) 生成バイオガスのエネルギー日量 (生成バイオガスの組成、流量および CH₄ の HHV 値から算出)、(黒) バイオマス輸送に要するエネルギーの日量[14]、(赤) 発酵槽の攪拌に要するエネルギーの日量[14]である。(黒) と (赤) は、積み上げ棒グラフで表しているの、エネルギー消費の総和がバイオエネルギー供給のどの程度を占めるのか (正味得られるエネルギー) を視覚的に確認することができる。2018 年 6 月以前のエネルギー消費データを示していないのは、攪拌動力をモニタリングしていたかったためである。当発酵槽は、現地の大気温で運転しており、加温・保温のエネルギー消費はない。発酵槽内温度は 30℃ 付近で、pH は 6.7 付近で推移していたが、フェーズ VI の中盤に 9.4 付近まで上昇した。フェーズ VIII では、エビ養殖残渣 (エビ養殖池ヘドロおよびエビの脱皮殻) のみでのバイオガス製造を行い、投入エネルギー量と生成バイオガス量から算出したバイオガス製造効率 η_e は 59.4%となった。養殖残渣の供給源となる**図 30**の養殖池は、**図 43**の 7 m³発酵槽から約 100 m 離れた場所に新設されたものであり (**図 69** 参照)、プロジェクト期間中は、養殖残渣を発酵槽まで人力で運搬せざるを得ず、今後、残渣のみでのバイオガス製造を連続的に行うためには、パイプラインの増設が必須である。

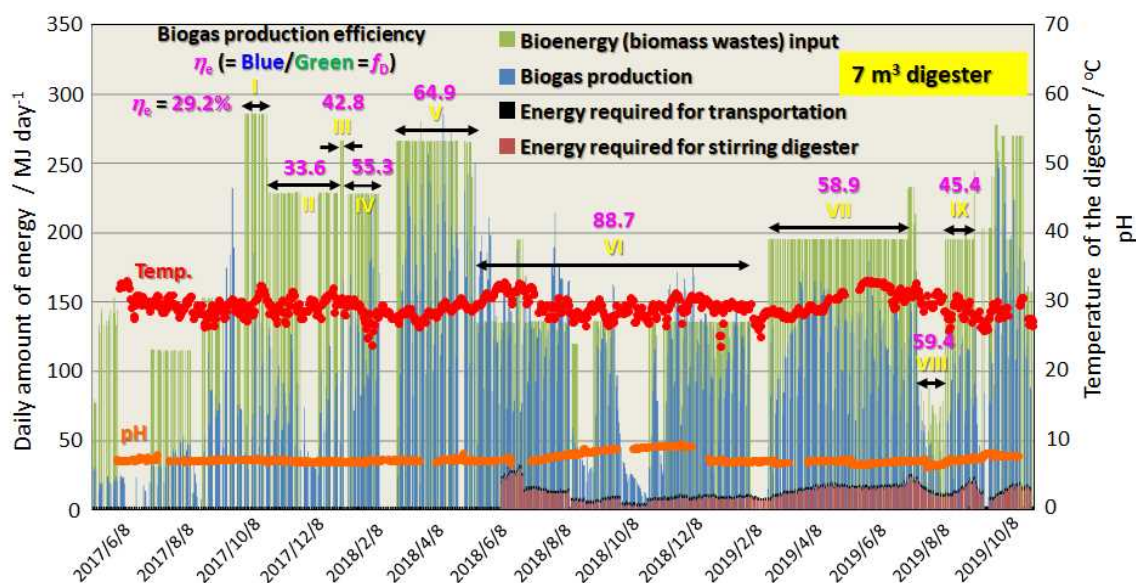


図 44 : ベトナム・ベンチェにおけるエビ養殖池ヘドロを種汚泥としたバイオガス製造実証 (7 m³メタン発酵槽、加温・保温なし)

表 23 : 7 m³メタン発酵槽へのバイオマス廃棄物投入日量 (kg-DW day⁻¹) および各資材の水分含有率 C_w (%)

フェーズ	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	C _w
バイオマス廃棄物										
エビ養殖池ヘドロ	0	0	0	0	0	0	0	3	0	90.0
エビの脱皮殻	0	0	0	0	0	0	0	7	0	68.4
稲わら	0	0	0	0	0	4	8	0	8	13.8
ココナッツ搾りかす	5	4	8	7	8	4	4	0	4	33.6
バガス	10	8	6	5	6	0	0	0	0	24.2
計	15	12	14	12	14	8	12	10	12	

以上、当 7 m³ メタン発酵槽は、運転開始以来、現在まで 2 年 7 ヶ月間、一度も停止することなく、加温・保温なしに現地のバイオマス廃棄物を用いて安定したバイオガス製造に成功した。開発した 1 kW バイオガス SOFC システムの連続運転には、その発電効率から、175 MJ day⁻¹ のバイオガス供給が必要であり（[14]、表 32）、SOFC 運転時には、図 44 の青の棒グラフの値がこの値を超えるようにバイオマス投入を調節することになる。

現地に生息しているメタン生成菌（養殖池へドロが菌の供給源）を用いて、現地の気温でリグノセルロースおよびデンプン系バイオマスをバイオガス化できることをプラントレベルで示したことは、農学グループが得た新しい知見であり、加温・保温を必要とせず、現地のバイオマス廃棄物を投入するだけで発電用燃料を得るシンプルなエネルギーシステムを組めることを意味する点で、工学的にも極めて意義のある成果である。（PO: 3-5）

当プロジェクトでは、製造したバイオガスを 1 kW 級 SOFC システムに供給して発電実証を行うが、バイオガス中に含まれている不純物（硫化水素（H₂S）やシロキサン）により、発電システムの耐久性が著しく損なわれることが知られている[15]。下水汚泥や生ごみを発酵資材とする場合、バイオガス中には、生活用品（シャンプー、リンス、化粧品等）に含まれているシロキサンが微量存在し、これが、発電中、システム内部にシリカとして堆積し故障を引き起こすが、当プロジェクトの発酵系（エビ養殖池へドロ、バガス、ココナッツ搾りかす、稲わら）は、シロキサンフリーの系であり、この影響は考えなくて良い。一方、H₂S はバイオガス中に必ず存在する不純物である。ベトナムの農村部で導入が進んでいる豚糞尿を用いたダイジェスターにおいては、一般的に 3,500 ppm 程度の H₂S がバイオガス中に含まれており、高濃度の H₂S は、発電システム内部の金属の腐食やエンジン内潤滑油の劣化を引き起こす。

図 45 に、携帯型バイオガス組成分析装置（Biogas 5000）で測定したバイオガス中の H₂S および NH₃ 濃度を示す。ココナッツ搾りかすの投入が多いフェーズ V で、いずれの濃度も上昇し（H₂S は 1,400 ppm まで上昇。NH₃ は、装置の測定範囲の上限（1,000 ppm）を超えたため、0 と表示。）、ココナッツ搾りかすの投入日量（乾燥重量）を 8 kg から 4 kg に半減させ、バガス 6 kg を稲わら 4 kg に変更したフェーズ VI では、いずれの濃度も減少に転じ、300～400 ppm 付近に収束した。その後、稲わらの投入日量を 4 kg から 8 kg に倍増させたフェーズ VII では、いずれの濃度も上昇を始め、500～700 ppm 付近に収束した。エビ養殖池へドロとエビの脱皮殻のみを投入したフェーズ VIII では、H₂S 濃度が 2,000 ppm まで急上昇し、NH₃ 濃度は 1,000 ppm を超え、豚糞尿等、動物系のバイオマス廃棄物特有の挙動を示した。（PO: 3-5）

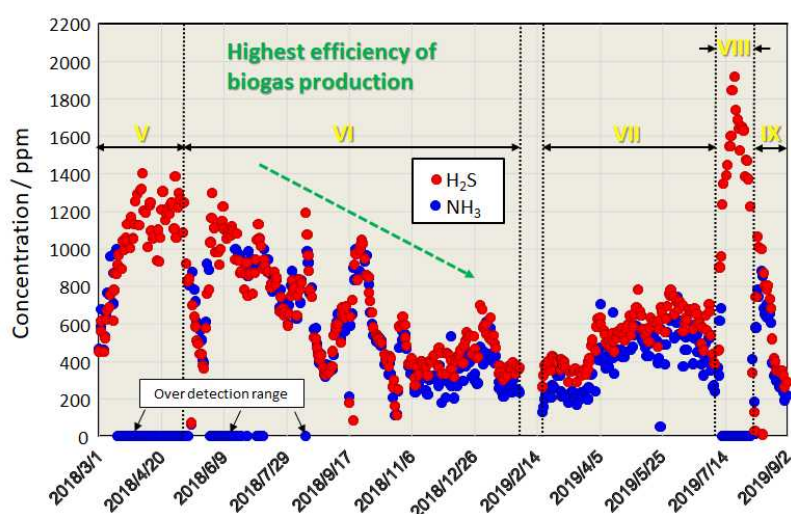


図 45：7 m³ メタン発酵槽で製造した現地バイオマス廃棄物由来バイオガスに含まれる硫化水素（H₂S）およびアンモニア（NH₃）濃度の推移

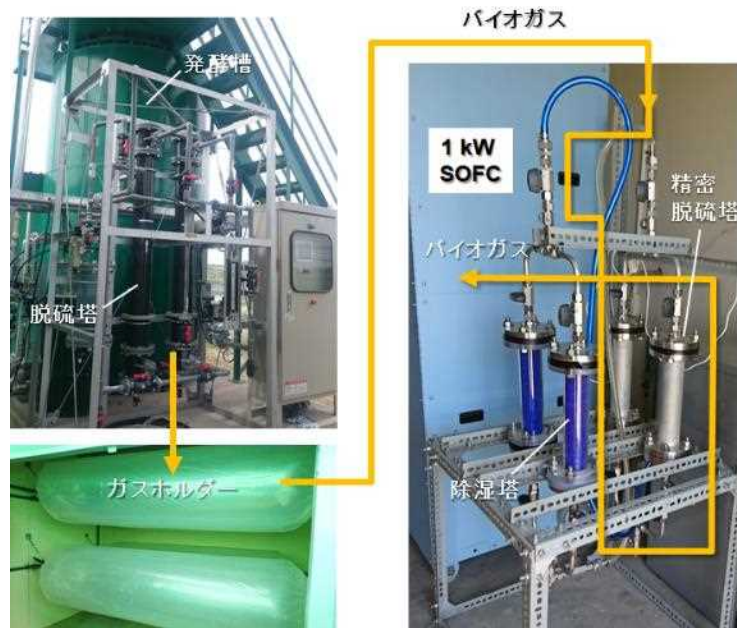


図 46：本プロジェクトでのバイオガス供給系；(左上)7 m³ メタン発酵槽に接続された酸化鉄ペレットを充填した脱硫塔、(左下) バイオガス貯蔵用の樹脂製ガスホルダー、(右) 1 kW バイオガス SOFC の直前に配置した除湿塔（シリカゲル）および精密脱硫塔（ゼオライト）

当プロジェクトで製造したバイオガス中の H₂S 濃度は、200～2,000 ppm であり、一般的なバイオガスに比べて低いが、SOFC の運転には、0.5 ppm 以下の H₂S 濃度が要求される[16]。これは、SOFC の作動条件下（700℃、還元雰囲気）において、燃料極触媒として用いられている金属 Ni 表面上（電極反応および改質反応のミクロな活性サイトとして機能）に H₂S 由来の硫黄成分が化学吸着しやすく、低濃度でも容易に触媒活性を低下させるためである[17]。

7 m³ メタン発酵槽実証機には、**図 46 左上**のように酸化鉄（Fe₂O₃）ペレットを充填した 2 つの脱硫塔が備え付けられており（Fe₂O₃ ペレット総重量 40 kg）、H₂S は酸化鉄との化学反応により、硫化鉄（FeS）として除去される。酸化鉄脱硫塔下流で検知管により測定したバイオガス中 H₂S 濃度は 0.25 ppm 以下（検出限界以下）となっており、このバイオガスは、SOFC 発電用に樹脂製ガスホルダー（容量 11 m³）（**図 46 左下**）に貯蔵され、余剰ガスは、ガスホルダー内の圧力上昇の検知により排気ブロウにて自動的に大気に放出されるしくみとした。さらに、H₂S 濃度を ppb オーダーまで落とすため、本プロジェクトでは、ガスホルダー下流の 1 kW 級バイオガス SOFC システムの前段に、ゼオライトを充填した物理吸着による精密脱硫ユニットを配置した（**図 46 右**）。ゼオライトの H₂S 吸着能は、水分により劣化するため、精密脱硫塔の前段にはシリカゲルを充填した除湿塔を配置した。（PO: 3-5）

I-2-(3)-③ カウンターパートへの技術移転の状況

当プロジェクトでは、技術移転と人材育成を目的として、メタン発酵に関する基礎研究を CTU でも実施できる体制を整えた。2015 年 12 月に CTU 研究員（Trang Trung Giang 氏）が来日し、九州大学大学院農学研究院 SATREPS ラボにおいて、CTU に導入するメタン発酵試験装置のセッティング方法に関する実習を行った。この際、ベンチェ実証サイトでメタン発酵資材として利用可能なエビ養殖池ヘドロ、バガスおよび廃糖蜜を用いた馴養試験のマニュアルを作成し、供与した。さらに、メタン発酵により発生したガスの組成分析法についても実習を行い、実験法を修得した。（PO: 3-4）



図 47 : バイオガス製造に関する技術移転の様子 ; (a) 農学研究院 SATREPS ラボにてメタン発酵および無機分析のトレーニングを行う CTU の Thinh 氏、(b) メタン発酵設備の操作講習会の様子、(c) メタン発酵実証の仕込み作業を行うカウンターパート研究機関の若手研究者および学生、(d) 消化液の pH 測定を行う養殖場スタッフおよび INT の学生、(e) 日本側専門家の指導の下、実証プラントで製造したバイオガスの分析を行う INT の学生、(f) 日本側が作成したマニュアルに従ってメタン発酵設備のオペレーションを行う養殖場スタッフ

2016 年 10 月に、CTU の若手研究者 (Nguyen Quoc Thinh 氏) が来日し、農学研究院 SATREPS ラボにて、メタン発酵実習および発酵資材の無機分析のトレーニングを行なった (**図 47(a)**)。 (**PO: 3-3**)

ベンチェ実証サイトに据付を完了させたメタン発酵設備の操作講習会を実施した (参加者 : カウンターパート研究者 5 名、エビ養殖場従業員 1 名、説明者 : 明和工業 松原氏、実施日 : 平成 28 年 2 月 14 日 (火)) (**図 47(b)**)。メタン発酵設備の操作マニュアル (英文) を作成し、ベトナム側に供与した。技術移転の促進およびベトナム側の能力向上に役立つよう、当マニュアルには、操作方法だけでなく技術の原理も記した。その後も、実証サイトにて、日本側専門家がベトナム側に対して継続的に技術指導を行った。 (**PO: 3-5, 4-2, 4-5**)

本プロジェクト終了後、2020 年度からの新たな活動体制を整えるため、2019 年 12 月 16 日～18 日に、CTU 資源環境学部 of 研究者 (6 名) およびサイト管理責任者である INT の研究者 (5 名)、加えて、INT が連携中のベトナムの環境関連企業 (8 名) に対して、技術講習会 (4 L 発酵試験の方法、7 m³ メタン発酵設備の運転管理方法、炭化設備の運転管理方法) を開催した (**図 8** 参照)。この際、上記マニュアルの (当プロジェクトでの経験を踏まえた) 更新版をベトナム側に提供した。 (**PO: 3-5, 4-2, 4-5**)

I-2-(3)-④ 当初計画では想定されていなかった新たな展開

メコンデルタ南部の 27 箇所のエビ養殖場、同じく 27 箇所のナマズ養殖場を訪問し、養殖池に堆積する汚泥量の調査を行った。調査したすべての養殖場が素掘りの池を用いており、エビ、ナマズ養殖の平均池面積は、それぞれ 1,900 m² および 4,800 m² であった。27 箇所中 18 箇所のエビ養殖場で、養殖中に一定量の汚泥を排出しており、ナマズの場合は、すべての養殖場で養殖中に汚泥の排出を行っていた。堆積汚泥の厚みが 15 cm を超えていた養殖場は、エビの場合は 4 箇所、ナマズの場合は 15 箇所に上った。ナマズの場合は、堆積汚泥が 60 cm に達する場合もあった。これらの調査結果から、養殖中には、数百トンレベルの汚泥が池に堆積していることになるが、素掘りの池であるため、エビおよびナマズ養殖池汚泥の有機物含有率は、乾物ベースでそれぞれ平均 9.8% および 7.8% であった。**図 30** のような仕組みを導入し、有機分を無駄なく回収することができれば、養殖池へドロをメインの資材としたメタン発酵は十分可能であると考えられる。調査したサイトは、本プロジェクトのエネルギー循環システムの実装先として有望であるため、プロジェクト後もコンタクトを続けて行く。また、カントー近郊のハウザン省では、繁殖力が強く、水上輸送や漁業に悪影響を与えるウォーターヒヤシンスをバイオガスの原料として資源化する取り組みが行われており、この取り組みを実施している CTU 資源環境学部とは、新たな連携体制を構築済みである。

I-2-(4) (研究題目番号無し): SOFC を導入したエネルギー循環システム実証 (工学&農学グループ)

I-2-(4)-① 研究のねらい

ベンチェ実証サイト (Hoang Vu エビ養殖場) 内に構築したパイロットプラント (図 3) を構成する各設備を用いて、技術の社会実装を目指した下記の項目 i~v の活動を実施し、実験事実に基づいて、メコンデルタに適用できる SOFC 導入エネルギー循環システムのモデルを提案する。(PDM: Output 4)

- 項目 i 炭化による地域バイオマス廃棄物の農業利用実証(PO: 4-5)
- 項目 ii 膜ろ過によるエビ養殖池の水質改善実証(PO: 4-4)
- 項目 iii 水生植物を利用したエビ養殖池の水質改善実証(PO: 4-3)
- 項目 iv マイクロバブルディフューザーの導入によるエビ養殖の省エネ実証(PO: 4-4)
- 項目 v エンジンによるバイオガス発電実証(PO: 4-6)
- 項目 vi メコンデルタに適した SOFC 導入エネルギー循環システムの提案(PO: 4-7, 4-8)

項目 i 炭化による地域バイオマス廃棄物の農業利用実証

実証サイト奥に整備した乾燥ヤード (図 48 参照) に籾殻を敷き詰め、当乾燥ヤードにメタン発酵槽 (図 43) から排出された消化液を供給し、数日後得られた乾燥物 (含水率 15% 以下) を炭化炉 (図 49) に供給して炭化物を製造し、これを肥料として実証サイト内試験圃場 (図 51) にて現地農作物の栽培試験を行った。



図 48 : 7 m³ メタン発酵槽から排出された消化液および現地未利用バイオマス (籾殻) を用いた炭化物 (炭肥料) の製造

図 49 のように、原料ホッパーに投入された原料は、ホッパー下部のコンベヤより定量的に切り出されて空気と共にサイクロン分離機に搬送される。空気と分離された原料は二重のエアロックバルブを通り、原料供給コンベヤによって炭化炉 (ロータリーキルン) 内に供給される。キルン内に到達した原料は、酸素不足の条件下で 400~600℃ に加熱されて熱分解を起こし、乾留ガスと固形物 (炭化物) に変化し、炭化物はキルン下にあるドラム缶に回収される。乾留ガスの一部は、炉内温度を保つために使われるが、ほとんどが煙道から二次燃焼炉に導かれ、外気と混合後燃焼処理される。二次燃焼炉内で完全燃焼した高温排ガスは (650~800℃)、ダンパーより取り込んだ外気により 200℃ 以下に冷却され、排気ファンで大気に放出される。



図 49：ベンチェ実証サイトに設置した炭化設備（明和工業製）

技術協力第 3 期（2017 年度）に入り、炭化炉の運転を行った。原料粃殻 30 kg に対して、消化液を 2017 年 3 月 15 日～4 月 4 日の期間、合計 223 L 加え、重量 37.7 kg、含水率 11.9%とした原料をホッパーに投入し、 30 kg h^{-1} の速度でシステムに供給し、キルン温度 400°C 、二次焼成炉温度 650°C の条件で、炭化物を収率 32%で得た。得られた炭化物の微細構造を図 50 に示す。直径約 $10 \mu\text{m}$ のシリカおよび炭素を主成分とするチューブがバンドル構造を形成しており、EDX 分析において、カリウム、リン、カルシウム、塩素等を含む $1\sim 2 \mu\text{m}$ の微粒子が観察された。（PO: 4-5）

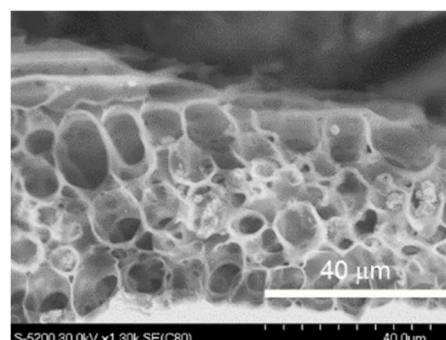


図 50：メタン発酵消化液と粃殻の混合物から製造した炭化物の微細構造

2017 年度は、図 51 のように、ベンチェ実証サイト内に、高さ 25 cm、幅 70 cm（断面の底辺）、長さ 4.5 m の畝を 4 つ整備し、消化液乾燥残留物と粃殻の混合物から製造した炭化物の混入の有無、施肥の多少について、トウガラシへの影響を調査した。炭化物を混入した畝には、体積比で 8.63%、重量比で 1.08%にあたる炭化物（68 L、密度： 0.125 g cm^{-3} ）を混ぜ込んだ。その結果、炭化物の混入の有無はトウガラシの生育や収量に影響しないことが明らかとなり、また、栽培前後の土壌 pH やナトリウム濃度（塩害の目安）にも炭化物混入の影響は認められず、この混入割合においては、製造した炭化物の土壌への投入は、現地での農業の維持には問題ないことが示された。

続いて、2018 年度には、ワケギを用い、より多くの炭化物を土壌に混入（重量比で 2.72%）した区と、混入しない区をそれぞれ 2 連で設けて栽培試験を行った。炭化物を混入した区ではワケギ苗の活着が悪く、栽培期間が長くなるほど生育が悪化した。栽培試験圃場の栽培跡地の pH と電気伝導度（EC（土：蒸留水 = 1:5））を測定したところ、炭化物を混入していない区で pH は 7.50-7.65、EC（ mS m^{-1} ）は 3.8-5.8 であり、実証サイトの土壌 pH が異常に高く、EC も高いことが判明した。ワケギに類縁の玉ねぎの至適 pH は 5.5-6.5 であり（表

24 参照)、塩類耐性はやや弱く (EC で 0.4-0.8) (表 25 参照)、選択した試験植物に問題があることが分かった。前年度に用いた試験作物のトウガラシの塩類耐性は中程度 (EC で 0.8-1.5) であることから、生育の抑制が大きくなかったと考えられる。



図 51 : ベンチェ実証サイト内試験圃場 ; (左) 農場を整備する INT スタッフ、(中央) 整備した 4 つの実験区 (左側から A、B、C および D)、(右) 炭化炉で製造した現地廃棄物系バイオマス由来炭化物を土に混ぜて畝を作る養殖場作業員

2018 年 12 月より、至適 pH が 6.0-6.5、塩類耐性が中程度であり、収量調査がピンポイントで可能なトウモロコシを選択し、ワケギの栽培跡地に化成肥料を適量施肥し、よく混合して栽培試験を開始した。栽培試験の結果、炭化物の添加の有無に関わらず、トウモロコシの生育は不良であった。これは、土壌と灌水に用いた水道水の pH が 7.0 以上のためであると考えている。至適 pH が 7.0 以上の作物は存在しないので、硫黄の粉末を散布することで pH を矯正し、再度トウモロコシの栽培を行うこととした。

表 24 : 作物の至適 pH[18]

pH	普通作物	果菜・豆類	葉根菜類	果樹・花き等
6.5~7.0	大麦		ホウレンソウ	イチジク
6.0~7.0	小麦	エンドウ、トマト	ダイコン、キャベツ、アスパラガス	ブドウ、アンズ、カーネーション
6.0~6.5	サトイモ、大豆	インゲン、エダマメ、カボチャ、キュウリ、スイートコーン、スイカ、ソラマメ、ナス、ピーマン、メロン、アズキ	ウド、カリフラワー、コマツナ、シュンギク、ショウガ、セロリ、チンゲンサイ、ニラ、ネギ、ハクサイ、ブロッコリー、ミツバ、レタス	ナシ、カキ、キウイフルーツ、ユズ、キク
5.5~6.5	イネ、エンバク、ライムギ	イチゴ、ラッカセイ	カブ、ゴボウ、タマネギ、ニンジン	ウメ、リンゴ
5.5~6.0	サツマイモ、ソバ、ヤマノイモ、オカボ			モモ、オウトウ、ミカン
5.0~6.5	バレイショ			

表 25 : 作物の塩耐性[18]

耐塩性	EC (1:5)* / mS cm ⁻¹	普通作物	野菜
強い	≥ 1.5	大麦	ホウレンソウ、ハクサイ、アスパラガス、ダイコン
中程度	0.8-1.5	水稲、小麦、ライ麦、大豆	キャベツ、カリフラワー、ブロッコリー、ネギ、ニンジン、バレイショ、サツマイモ、トマト、カボチャ、スイートコーン、ナス、トウガラシ
やや弱い	0.4-0.8		イチゴ、タマネギ、レタス
弱い	< 0.4		キュウリ、ソラマメ、インゲン

*土:蒸留水 = 1:5

高さ 25 cm、幅 1.2 m、長さ 3.4 m (4.08 m²) の試験区 (A、B、C、D 区) の 4 区を整備し、2019 年 10 月に各試験区に化成肥料 (N:P₂O₅:K₂O=20:20:15) を 2.41 kg (100 kg/10 a) を元肥として施肥した。粃殻と消化液の混合物を原料とした炭化物の施用効果を見るために、**表 26** に示したように、当炭化物を A 区に 2.04 kg (500 kg 10a⁻¹)、B 区に 3.06 kg (750 kg 10a⁻¹)、C 区に 1.02 kg (250 kg 10a⁻¹)、D 区に 0.00 kg (0 kg 10a⁻¹) を施用し、表層 10 cm に均一にすき込んだ。また、試験圃場の土壌の pH がアルカリ性 (pH 7.05) を示したため、炭化物 (pH: 8.62、EC(1:5): 0.34 mS cm⁻¹) の施用によりさらに pH が上昇すると考え、各試験区の半分 (12.07 m²) に硫黄粉末を 0.66 kg (55 kg 10a⁻¹) 施用し、表層 10 cm に均一にすき込んだ。その後、各試験区中央部分の作土層から 10 cm の深さで土壌をサンプリングし、土壌の pH と EC を定法に従って測定した結果、播種前の土壌の pH は期待したほど低下していなかった (**表 26** 参照)。

表 26 : 各試験区のトウモロコシ播種前の作土層の pH と EC

	A 区		B 区		C 区		D 区	
炭化物 / kg 10a ⁻¹	500		750		250		0	
硫黄	-	+	-	+	-	+	-	+
pH _{KCl} *	7.22	7.15	7.15	7.06	7.07	7.05	7.05	6.97
EC** / mS cm ⁻¹	0.72	0.65	1.04	0.84	0.69	0.43	0.54	0.40

*土:蒸留水 = 1:2.5、**土:蒸留水 = 1:5



図 52 : トウモロコシ栽培中のベンチェ実証サイト試験圃場の様子

実証サイトの土壌の土性を砂質土壌と考えて、硫黄の粉末を $55 \text{ kg } 10\text{a}^{-1}$ のレベルで施用したものの不十分であったが、EC の低下は見られた。この理由は現在のところ不明である。作物の至適 pH は表 24 に示した通りであり、栽培試験圃場の pH を中性付近に低下する必要がある。また、作物栽培に用いている水道水に問題があり、その pH が 7.49、EC が 0.13 mSv cm^{-1} と高い値を示した。EC は炭化物の施用レベルに応じて増加したものの、表 25 に示すように、トウモロコシの塩耐性は中程度であり、EC による生育阻害の可能性は低い。

トウモロコシ栽培中の実証サイト試験圃場の様子を図 52 に、収穫後の収量調査の結果を表 27 に示す。図 53 は、栽培したトウモロコシの写真である。試験区間の比較より、炭化物の施用を $250 \text{ kg } 10\text{a}^{-1}$ とし、硫黄を加えた場合には、根の張りが大きく改善され、草丈、地上部、可食部、根部の新鮮重が増加した。今回の試験では硫黄の施用量が不十分であり、最適な炭化物の施肥量および炭化物/硫黄比を見出す必要があるが、現地に合った作物を選定し、土壌の条件を調整することで、炭化物を肥料として効果的に利用できることが明らかとなった。この際、炭化物の原料となるバイオマス廃棄物にメタン発酵消化液を混合することで、消化液を河川等に流すことなく農作物の生産に利用できる上、化成肥料の使用量の低減にもつながり、地域に適正な窒素循環を取り戻すことができると期待される。この上位目標を達成するためには、ベトナム側に圃場の土性等に見識のある共同研究者が必要であり、メコンデルタにおいて、10 年来、農業利用を目的としたバイオマス炭化の研究を行ってきている CTU 資源環境学部との新たな連携を始めたところである。 (PO: 4-5)

表 27：トウモロコシ収穫時の草丈と植物体各部位の新鮮重および可食部の本数の平均値（収量調査実施日 2019 年 12 月 18 日）（表中の（番号）は、順位を示している。）

試験区	硫黄施用	草丈 / mm	地上部 / kg-FW	可食部 / kg-FW	根部 / g-FW	植物体 / kg-FW	可食部数 / 植物体
A	有	1930	1.03	0.42(4)	185	1.64	2.00(1)
	無	1690	0.85	0.39	143	1.38	2.00(1)
B	有	2063(3)	1.15(2)	0.40	452(2)	2.00(2)	1.67(4)
	無	1887	1.00	0.41	215	1.63	1.33
C	有	2317(1)	1.52(1)	0.62(1)	623(1)	2.76(1)	2.00(1)
	無	2070(2)	1.02	0.43(3)	226(4)	1.67	1.33
D	有	2033(4)	1.12(3)	0.46(2)	308(3)	1.88(3)	1.67(4)
	無	2060	1.07(4)	0.43(3)	195	1.69(4)	1.33



図 53：栽培したトウモロコシ（試験区 C、硫黄施用）；（左）収穫直前の果実、（中央）収量調査時の植物体、（右）根部

項目 ii 膜ろ過によるエビ養殖池の水質改善実証

エビ養殖池の水に含まれる有機物を濃縮してメタン発酵の種汚泥および無機栄養塩を供給すること、および周辺水環境の維持とエビの成長促進のために水質管理を行うこと目的として、技術協力第1期（2015年度）に、ダイセン・メンブレン・システムズ（参画企業）が膜ろ過装置の基本設計を行い、第2期より当該設備の開発を進め、2016年12月にベンチ実証サイトへの据付けを完了した（図54左）。

実証池の原水を水中ポンプで引き込み原水タンク（TK-1）に貯留し、余剰原水は池に戻す。原水タンクの原水はサイクロンセパレーターを通過させて沈降性が高い無機粒子を池に戻し、比較的軽い有機成分を膜濾過タンク（TK-2）に流入させる。膜ろ過タンク内には、図54右のように、膜面積1m²の限外濾過膜（親水性ポリエーテルスルホン、孔径0.04μm）を縦方向に一定間隔で50枚配列した浸漬型平膜モジュール（総膜面積50m²）が配置されている。本モジュールの下部には、チューブ型のディフューザーが設置されており、膜の下部から気泡が上昇する際に膜表面に付着するろ過堆積物を物理的に洗浄する機構が設けられている。運転初期におけるろ過設備の運転条件は、設定濾過流量0.4m³h⁻¹、濾過時間8分→停止時間2分の繰り返し運転、停止中の曝気流量は6m³h⁻¹とした。

2017年2月中旬から実証池水の膜ろ過運転を開始したが、4月には膜ろ過水槽に水生生物が、また、6月には配管内に貝類が激しく繁殖し、膜ろ過運転を安定に継続することが困難であった。その後、配管ラインにバルブや流量計を設けないシンプルなバイパスラインの設置、膜洗浄用曝気量の増加、および膜透過側にエア抜きタンクを設けて逆圧洗浄頻度を最適化するなどの改良を行い、3か月以上の安定運転ができるようになった。（PO: 4-4）



図54：ベンチ実証サイトに設置した水循環膜ろ過設備；（左）システム外観、（右）膜濾過タンク内に組み込まれている浸漬型平膜モジュール（設備上部から撮影）

当膜ろ過装置には、水質の違いによるエビの生育状態を調査するために、図55に示すように原水水槽と透過水水槽を設けており、それぞれにマイクロバブルディフューザー（MBD）（ダイセン・メンブレン・システムズ製）を設置した。右側の透過水水槽では、濁度1以下の清澄な水が得られるので、この透過水を利用して、農学グループが、2017年10月25日～2018年1月29日の97日間、バナメイエビ飼育の水槽試験を行った。掛け流し式の飼育水槽のレイアウトを図56に示す。透過水、原水とも、写真左端の500L水槽（沈殿槽）に一旦貯めて、揚水ポンプによって原水系、透過水系各4つの飼育水槽（100L）に水を連続供給し、ストレーナーを通して排水を行った。飼育個



図55：膜濾過設備に設置した（左）原水水槽と（右）透過水水槽

体数は、6 月 13 日～8 月 21 日まで行った予備実験の結果に基づき、各飼育水槽あたり 10 個体とした。飼育開始時の稚エビの大きさは、透過水系では 1.39 g (0.5～3.6 g)、原水系では 1.05 g (0.4～1.8 g) であった。

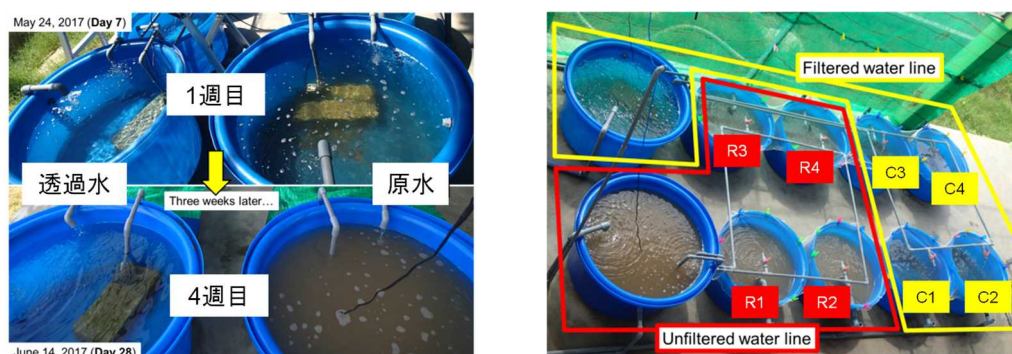


図 56：(左) バナメイエビ養殖開始(上段)1 週目と(下段)4 週目における膜ろ過装置で得た透過水と原水、(右) 実証サイトで行ったエビ飼育試験の水槽レイアウト (黄：透過水系 (水槽 C1～C4)、赤：原水系 (水槽 R1～R4))

表 28：バナメイエビ飼育水槽実験 (2017 年 10 月 25 日～2018 年 1 月 29 日) の結果

	水槽	収穫量 / g	平均頭胸甲長 / mm	平均体重 / g	生残率 / %
透過水系	C1	139.2	26.8	13.9	100
	C2	153.0	28.8	17.0	90
	C3	165.79	28.2	16.6	100
	C4	123.3	29.0	17.6	70
原水系	R1	0	NA*	NA	0
	R2	97.0	27.9	16.2	70
	R3	133.7	26.2	13.4	100
	R4	0	NA	NA	0

*全個体死滅のため計測できず。

表 28 に、バナメイエビ飼育水槽試験の結果を示す。透過水系と原水系では生残率に大きな違いが現れた (透過水系は平均 90%、原水系は平均 43%)。原水系では、全滅した水槽 (2 基) があった一方で、10 個体すべて生き残った水槽もあり、生残率が不安定であった。一方、生存個体のみで各個体の体サイズを比較するとそれほど顕著な違いは見られなかった。透過水系では原水系に比して、平均頭胸甲長で有意に大きかったが、体重では両者で違いは見られなかった。透過水系と原水系において体重に差が見られなかった原因は、生育密度が関係している可能性が考えられる。透過水系、原水系とも、飼育中、個体数の少なくなった水槽で良い成長が見られたが (C2、C4、R2)、生育個体数の大小に関係なく等量の投餌を行ったため、飼育個体数の少ない水槽では、個体あたりが食べる餌の量が増えたものと考えられる。また、飼育個体が少ないほど、個体間の干渉度合が減ることから、ストレスが軽減され、成長にプラスに働いたのかもしれない。(PO: 4-4)

収穫したエビを目視観察したところ、透過水系と原水系でエビの体色に違いが見られた。透過水系では色素沈着が多く、原水系で飼育した個体に比べて濃い色合いに感じられた (図 57 左)。また、エビを湯がいた後の比較でも、透過水飼育個体ではより赤味が強く (図 57 右)、外骨格をはずしてむき身にした状態で比較した際でも両者の色素の違いが感じられた。この体色の違いは、2017 年度の前半に実施した予備実験においても観察された。体色の違いが生じた要因として、飼育水の濁度の違いが考えられる。透過水系では、飼育終盤においても上から個体を目視できるほど高い透過性を保っていたが、原水水槽では全く目視で

きないほどの濁りであった（図 56 参照）。この体色の差は、透過水が透明であり、太陽光をより強く浴びたことによる違いであると考察できるが、さらなる調査が必要である。また、透過水での生残率が高かったことについても、再現性を含めてより詳細な調査が必要であるが、透過水にはビブリオ菌などの細菌やウイルスが存在しないことによって高い生残率が得られるという仮説を本実験結果は支持している。



図 57：収穫後のエビの体色の比較；(a)収穫直後、(b)茹で揚げ直後

上記水槽試験の結果を踏まえ、2018 年 10 月に、普及ロードマップ策定グループの藤本准教授および農学グループのダイセン・メンブレン・システムズがカントー市の稚エビ養殖業者 3 社を訪問し、情報提供を行った。カントー市での養殖エビは、バナメイ、オニ手長エビおよびブラックタイガーと様々であったが、いずれの業者も同じ稚エビ養殖法を採用しており、室内に 4.5 m³ の角形養殖水槽を多数設置し、一水槽あたり 50～100 万匹の稚エビを育成していた。その中の一社（A 社）によると、タンカー船でメコン川を下り、約 100 km 先の海岸沖まで清浄な海水を取りに行き、その海水を次亜塩素酸カルシウムで殺菌し、さらに抗生物質を添加して稚エビ養殖に用いる水を調製しているとのことであった。しかしながら、このような非効率かつ薬剤を使うやり方であっても、エビの孵化から養殖期間 18 日目（PL18）の生残率は約 50% であり、上述の膜ろ過技術によって、薬剤フリーで生残率を 80% 以上に向上させることができるのであれば、ぜひ導入したいとのことで、具体的な実証試験計画について協議を行った。

協議の結果、A 社が図 54 と同じ膜を用いた小型の膜ろ過装置（膜面積 7 m²、ろ過水量 2.7 m³ h⁻¹）をダイセン・メンブレン・システムズから購入することとなり、2019 年 10 月に A 社への設置を完了し、実証試験を開始した。殺菌しない海水を吸引ポンプによって加圧送液し、フィルターおよび膜ろ過装置を経て透過水を製造し、原水および透過水に対して、腸炎ビブリオ菌および一般細菌の培養後の生菌数測定を実施した。その結果、ビブリオ菌については、原水および透過水ともに生菌数は確認されず、検出限界以内（<10）であったが、一般細菌については、原水には著しい数の生菌が確認されたのに対して、透過水には全く確認されなかった（図 58）。

上記の結果によって、膜ろ過技術により、薬剤添加なしに無菌海水を生産できることを現地業者が実際に知ることとなったが、ベンチ実証サイトに設置した膜ろ過装置一式はポンプや制御ユニットを組み込んだ比較的高額な設備になるため、実証サイトでの実験をきっかけに、小型ながらも上記のような活動を通じて社会実装を実現できたことは、今後、その効果が広く知られ、普及につながる成果である。（PO: 4-4）

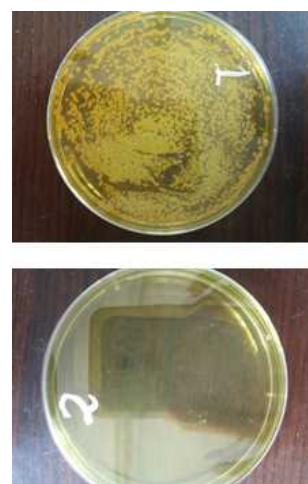


図 58：一般細菌の生菌数測定結果（上）原水、（下）透過水

項目 iii 水生植物を利用したエビ養殖池の水質改善実証

エビ養殖池の水質管理法として、図 54 の膜ろ過に加え、現地周辺に生育している水生植物に過剰な栄養塩を吸収させるバイオエンジニアリング的アプローチも検討した。ベンチエ省を含めたメコンデルター帯では、バナメイエビ (White-leg shrimp) やブラックタイガー (Black tiger shrimp) といった海産エビの養殖が大変盛んであるが、海産エビであるがゆえに、使われる池の水は汽水 (塩分 0.9~1.0%) である。そのため、用いる水生植物は、広塩分耐性を有する (特に低塩分側に耐性を持つ) 汽水域で生育する海藻類が塩生植物よりも有利だと考えた。現地に生育している海藻類をエビ養殖の水質管理に利活用できるようにするためには、ラボレベル試験によるデータ収集が不可欠であり、我々は、CTU の協力の下、メコンデルタ地帯の海藻植生調査を行い、この結果に基づき、2017 年 8 月より、CTU において、紅藻オゴノリ属 1 種を利用したバナメイエビ/海藻複合飼育試験を実施した。

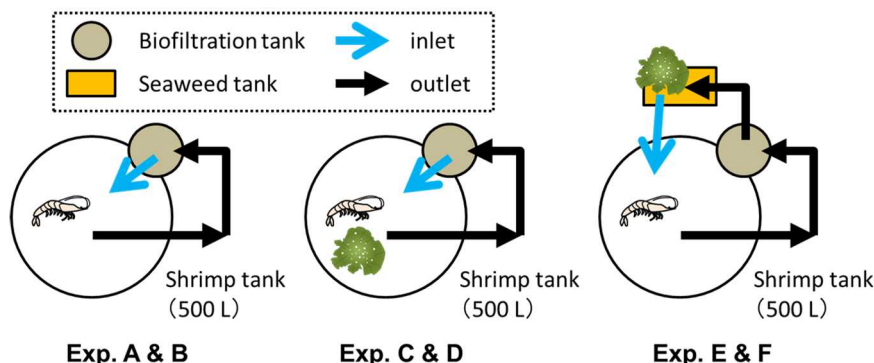


図 59 : バナメイエビ/海藻複合養殖試験の実験デザイン ; エビ飼育水槽と生物濾過槽を組み合わせた閉鎖循環系水槽であり、A・B 区はエビのみ飼育、C・D 区はエビ飼育水槽に海藻を入れた水槽、E・F 区では海藻栽培水槽を用意し、エビ飼育水槽に海藻を入れずに飼育した。エビ飼育密度は 1 m³ あたり 200 尾 (A・C・E 区) と 400 尾 (B・D・F 区) とした。

図 59 は、本実験で採用した水循環飼育装置の模式図である。海藻の有無 (3 処理) とエビの飼育密度 (2 処理) の計 6 区 (n = 3) を設定した。海藻なし (A・B 区)、海藻あり (エビ飼育水槽に海藻同居 : C・D 区)、海藻あり (エビ飼育水槽と海藻栽培水槽が独立 : E・F 区) の各区で、初期のエビ飼育密度が 1 m³ あたり 200 個体と 400 個体となるようにした。500 L の丸型水槽に希釈人工海水 (400 L) を張り、オーバーフロー方式で排出を行った。排水は一旦生物濾過槽に送られ、亜硝酸酸化細菌、硝酸酸化細菌の働きによりアンモニア態窒素→亜硝酸態窒素→硝酸態窒素へと無毒な形に変えた後、水中ポンプにより再び飼育水槽へ戻した (生物濾過槽での貯留時間が短いため、全てのアンモニア態窒素が硝酸態窒素へと変わるわけではない)。ただし、E・F 区では、生物濾過槽から出た飼育水は海藻水槽を経由してエビ飼育水槽へ戻す設計とした (水中ポンプは海藻水槽側に設置)。C・D 区と E・F 区では海藻の栽培場所が異なる。海藻あり水槽では、飼育水中の溶存栄養塩の吸収による除去を期待しているが、C・D 区のようにエビ飼育水槽に海藻が混在している場合、海藻が遮蔽効果や餌としてエビの生残や成長にもプラスに働く可能性が考えられた。ここでいう遮蔽効果とは、日光や紫外線に対する効果、あるいは他のエビ個体から自分を隠すカモフラージュ効果を指す。そのため、純粹に海藻の栄養吸収効果を見るためには、E・F 区のようにエビ水槽から海藻を隔離する必要があると考えた。本実験に用いた海藻は、紅藻オゴノリ属の 1 種である *Gracilaria tenuistipitata* を 1 区あたり 1 kg 用いた。本実験は 2017 年 8 月 17 日に開始し、3 か月間行う予定であったが、エビの大量死が確認されたため、51 日目に実験を中止した。

収穫したエビに対して測定した、日間成長率、生残率、1 m³ あたりの生産量、餌料転換

効率を表 29 に示す。大量死が発生する直前に得られたデータであることを断っておく必要があるが、「低密度飼育下でのエビ海藻複合飼育」で高い生産量を打ち出すことができた。他の試験区に比べて特に良好な結果を示した項目は、灰色セルで示している。海藻の入れ方では、エビ飼育水槽に海藻を入れない「海藻栽培別水槽」の方が若干だが効率的なエビ生産に繋がった。高密度飼育下では、海藻有水槽でもあっても低生産に押さえられ、生残率に関しては「低密度飼育下でのエビ海藻複合飼育」との差が顕著であった。(PO: 4-3)

表 29：陸上水槽におけるエビ/海藻複合養殖試験の結果

	対象区 (海藻なし)		処理区 (海藻はエビ飼育水槽)		処理区 (海藻栽培水槽)	
	A 区	B 区	C 区	D 区	E 区	F 区
エビ飼育密度 (1 m ³ あたり)	200	400	200	400	200	400
エビ体重 (1 日目) / g	0.04 (± 0.01)	0.05 (± 0.02)	0.05 (± 0.01)	0.04 (± 0.01)	0.05 (± 0.01)	0.04 (± 0.01)
エビ体重 (51 日目) / g	9.2 (± 1.04)	6.94 (± 1.38)	10.93 (± 1.86)	7.77 (± 1.07)	11.82 (± 1.42)	9.68 (± 0.47)
成長量 / g*	9.16 (± 1.03)	6.89 (± 1.39)	10.88 (± 1.85)	7.73 (± 1.07)	11.77 (± 1.43)	9.64 (± 0.47)
日間成長率 / g day ⁻¹ **	0.18 (± 0.02)	0.14 (± 0.03)	0.21 (± 0.04)	0.15 (± 0.02)	0.23 (± 0.03)	0.19 (± 0.01)
生残率 / %	19.2 (± 13.8)	2.3 (± 1.0)	68.3 (± 21.5)	12.3 (± 6.9)	60.4 (± 8.3)	39.0 (± 5.8)
生産量 / kg m ⁻³	1.08 (± 0.06)	1.4 (± 0.3)	1.80 (± 0.5)	1.74 (± 0.34)	1.88 (± 0.17)	2.68 (± 0.22)
餌料転換効率***	1.31 (± 0.04)	1.35 (± 0.34)	1.25 (± 0.36)	1.39 (± 0.16)	0.96 (± 0.05)	0.80 (± 0.08)

*飼育期間中に増えた体重量、**成長量を飼育日数で除した値、***エビの体重を 1 グラム増やすのに必要な投餌量(g) (小さい値ほど効率的に成長していることを示している。)

今回のエビ大量死は、CTU キャンパス内で行われていた別のエビ養殖試験場で発生した感染症の飛び火の可能性もあるが、大量死の発生状況からエビ飼育方法を評価してみたい。大量死が起こらなかったのは、「低密度飼育下でのエビ海藻複合飼育」(C・E 区)のみであった。このことから、①高密度飼育下でのストレス、または②亜硝酸・硝酸態窒素の蓄積(富栄養化)とそれに伴う細菌叢の変化(水変わり)により生体防御機構が低下し、感染症に罹患しやすくなった可能性が考えられた。海藻有水槽では、生物濾過槽で産生された(亜)硝酸態窒素を海藻が吸収するが、海藻無水槽ではその機能がないため硝酸態窒素濃度が高めで維持する、すなわち飼育日数が増すほど栄養塩濃度が高くなることを意味する。一方、③アンモニア中毒の可能性も否定できない。生物濾過槽は全ての試験区で共通して設置されている装置だが、もし生物濾過槽に問題があったとすると、海藻有水槽では海藻がアンモニア態窒素を吸収することでアンモニア中毒の影響低減に働いていたと推測される。逆にエビ飼育密度が高い場合には、例え海藻有水槽でもアンモニア態窒素の除去が追いつかず、アンモニア中毒によるエビ個体の活性低下を招いた可能性も考慮に入れる必要がある。

本実験から「低密度飼育下でのエビ海藻複合飼育」で良好な結果を得たが、海藻の利用方法による違いには明瞭な差は見られなかった。ただし、餌料転換効率の面からみると海藻とエビを一緒の水槽で飼育(栽培)しない方が良さそうである。

海藻栽培に適した諸条件を検討するため、市販の人工海水の素をエビ養殖池の水または市水で希釈したものを用いて、バクリュウ省のエビ養殖池(塩分濃度 5 ppt)で採集された海藻(オゴノリ属の 1 種とシオグサ科)(図 60)の栽培試験を行った。予備実験の結果から、塩分濃度と光条件は、オゴノリ属は塩分濃度 12 ppt と 10 ppt (屋外のみ)、シオグサ科は

塩分濃度 5 ppt（屋外と半屋外）とした（屋外と半屋外の違いは屋根の有無のみ）。培養液として農業用液体肥料（Hyponex®）を 2 週間に 1 度水槽に添加した。栽培期間は 2018 年 10 月 30 日～11 月 26 日の 1 ヶ月間とした。オゴノリ属では 12 ppt（+0.9 kg（2.0 kg → 2.9 kg））より 10 ppt（+1.1 kg（1.5 kg → 2.6 kg））で、またシオグサ科では屋外水槽で若干生長が良かった。



図 60：海藻栽培実験に使用した Bac Lieu 省のエビ養殖池より採集された海藻。（左）オゴノリ属の 1 種、（右）シオグサ科。

以上の実験結果を受けて、追肥用栄養塩を検討する実験を実施した（2018 年 11 月 27 日～2019 年 1 月 27 日）。用水は前実験同様、希釈した人工海水を使用した。オゴノリ属では、塩濃度を 10 - 12 ppt に固定し、栄養添加方法を液体肥料とエビ用配合餌料の 2 種類、水槽の置き場は屋外とした（各試験区 2 水槽）。一方、シオグサ科では、塩濃度を 5 ppt、栄養塩として化成肥料（N = 20%、P₂O₅ = 20%、K = 20%）、液体肥料、エビ用配合餌料の 3 種類とし、元肥、追肥（2 週間ごと）として各肥料 50 g、20 mL、20 g を与えた。水槽の置き場は屋外と半屋外とした。各試験区 2 水槽ずつとした（各試験区 2 水槽）。オゴノリ属ではエビ用配合餌料が最も良く（2.35 kg（1.6 kg → 3.95 kg））、液体肥料は微増であった（0.55 kg（1.6 kg → 2.15 kg））のに対し、シオグサ科では、液体肥料もエビ用配合餌料ともに微増で明瞭な差はなかった。化成肥料試験区では、いずれの海藻も実験途中で全て枯死した。

本実験で用いたオゴノリ属、シオグサ属はいずれも汽水エビ養殖池に生育していたものであり、汽水環境への適応力が備わっていた海藻であったと考えられ、実証池の低塩分環境でも十分な成長が期待された。また、シオグサ属藻類は、汽水エビ（ブラックタイガー）との複合養殖試験においてエビ単一区と比較して海藻混合飼育区でエビの日間成長率が増加することが知られていたため、本プロジェクトでの積極的な利用を考えていたが、本実験ではオゴノリ属の方が栽培しやすいことが明らかとなった。また、エビ用配合餌料が栄養塩類の補給に使えることが分かった点も汽水エビ養殖施設におけるアクアポニクス技術の導入では有利に働くことが予想される。集約型養殖では、用水の富栄養化へとつながる残餌から溶出する窒素やリンが問題となるが、エビの排泄物から溶出する栄養塩類も併せてオゴノリ類が吸収し富栄養化の進行を鈍化させる働きが期待される。（PO: 4-3）

項目 iv マイクロバブルディフューザーの導入によるエビ養殖の省エネ実証

図 61 にエビ養殖に用いる曝気装置を示す。(a)と(b)は、メコンデルタ地域で一般的に用いられている従来型の曝気装置で、(a)はパドル型、(b)は下向噴射型で、いずれも水面から曝気を行う方式である。(c)は、本プロジェクトで導入したマイクロバブルディフューザー（MBD）である。MBD は、シート状ラバーからなっており、ラバーには、約 1 mm 長さの貫通したスリットが多数設けられている。水中に設置された MBD の下部にブロワから空気が送り込まれるとラバーが膨らみ、その際、スリットが開いて径約 1 mm の微細な気泡が多数発生する。従来型の曝気（図 61(a,b)）では、酸素は池表面付近のみに滞留し、池の底部にまで十分酸素を送ることが難しいが、MBD の場合は、空気が池の底部から上部に流れることによって旋回流が生じて酸素が池全体に拡散されるので、溶存酸素濃度（DO）の維持に必要なエネルギー消費を大幅に低減できると期待される。

MBD の効果を研究するために、実証サイト（Hoang Vu エビ養殖場）内に、従来型曝気装置のみ（下向噴射型 4 台）を利用した対照池（池面積：3,200 m²、水深：1.5 m）と、図 62 に示したように、MBD をユニット化し（MBDU）、下向噴射型の半分を MBDU に置き換えた実証池（池面積：2,700 m²、水深：1.5 m）を準備し、バナメイエビの養殖を行った。2018 年 5

月から3ヶ月間行ったバナメイエビ養殖へのMBD導入試験の結果、従来型（下向噴射型）の曝気を行った対照池（稚エビ投入数：60万匹、養殖密度：125匹 m^{-3} ）では、エビの生存率が非常に低く（33.8%）、従来型（下向噴射型）の半分をMBDUに置き換えた以外、池の前処理、種苗、養殖開始日のいずれも対照池と同じである実証池（稚エビ投入数：49万匹、養殖密度：121匹 m^{-3} ）では、77.5%の生存率を示した。同年9月からの第二期の養殖でもMBDを導入した池で生存率が高くなり、池底部からの微細気泡による曝気のエビの生育に正の効果を与えたことが示唆された。

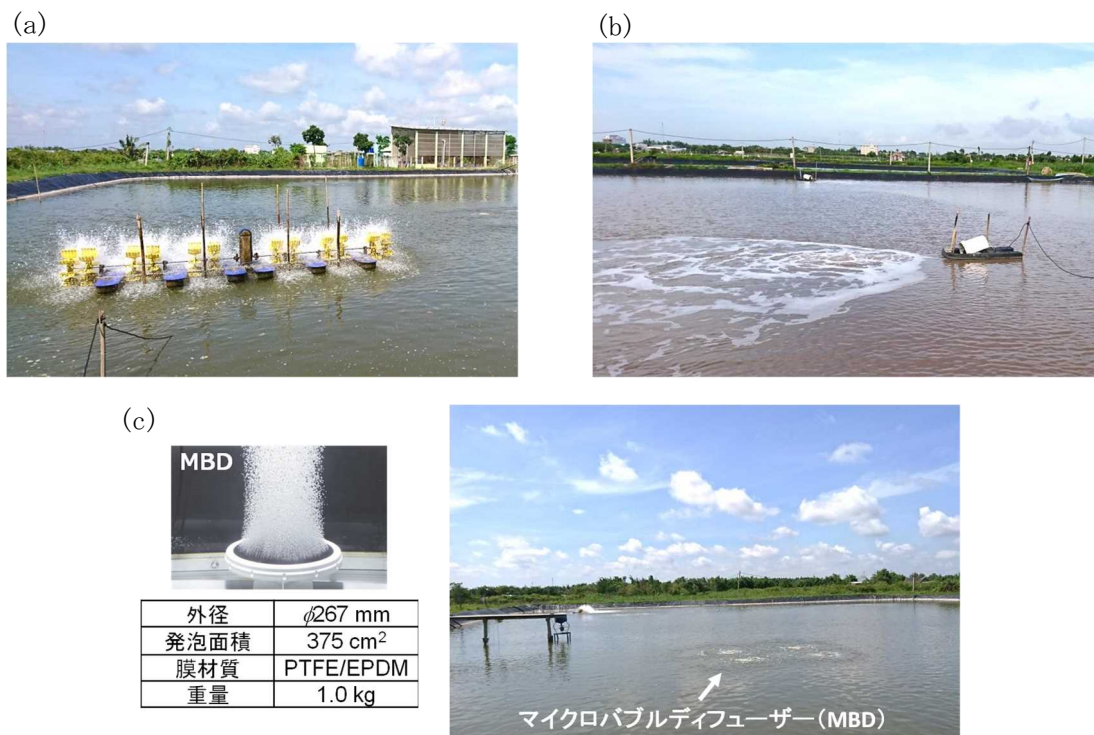


図 61 : エビ養殖に用いる曝気装置 ; (a, b) 従来型曝気装置 ((a) パドル型、(b) 下向噴射型)、(c) 本プロジェクトで導入したマイクロバブルディフューザー (MBD)

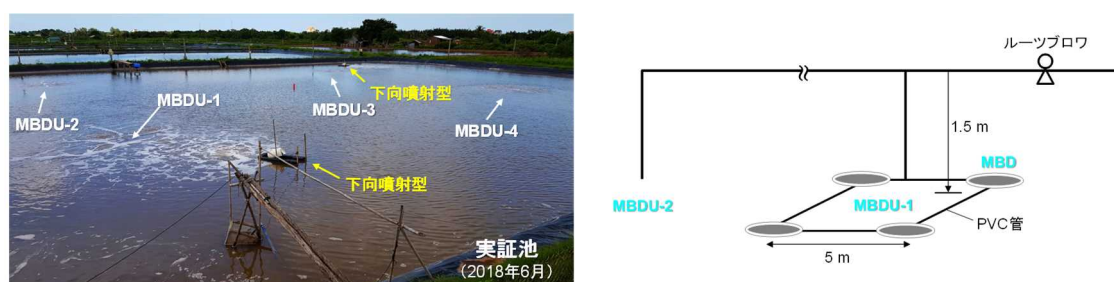


図 62 : Hoang Vu エビ養殖場内で行ったバナメイエビ養殖へのマイクロバブルディフューザー (MBD) 導入試験 ; (左) 従来型曝気装置（下向噴射型）の半数をMBDUに置き換えて養殖を行った実証池、(右) 4つのMBDを組み合わせたユニット (MBDU) の模式図 (1つのループブロワから2つのMBDに空気を送る。)

曝気のエネルギー消費に関しては、同じ DO (4.0 mg L⁻¹) を維持するための曝気において、対照池（従来型の下向噴射型のみ）での消費電力は 5.72 kW であったのに対して（エビ養殖開始から 34 日目）、下向噴射型の半分を MBDU に置き換えた実証池では 3.48 kW で、エビ単位量当たり 25.5% (= (5.72 kW / (125 匹 m^{-3} x 3200 m² x 1.50 m) - 3.48 kW / (121

匹 $\text{m}^{-3} \times 2700 \text{ m}^2 \times 1.50 \text{ m}$) / (5.72 kW / (125 匹 $\text{m}^{-3} \times 3200 \text{ m}^2 \times 1.5 \text{ m}$)) x 100) の省エネ化が可能であることが示された。つまり、従来型曝気装置のすべてを MBDU に置き換えることで、曝気の消費電力を半減させることができる。以上より、集約型養殖の一般的な養殖密度 (40 匹 m^{-3} 程度) での養殖に対して、MBDU のみで曝気を行った場合を想定すると、消費電力は 0.915 kW (= 5.72 kW x 0.5 x 40 匹 m^{-3} / 125 匹 m^{-3}) と見積もられ、本研究で開発した 1 kW 級バイオガス SOFC システムの発電出力にほぼ一致する。

MBD 導入時の池内環境の把握を目的として、2018 年秋季の養殖開始時に、養殖池表層 (水面下 30 cm) と底層 (底から 30 cm) における溶存酸素濃度 (DO) を、約 1 週間、隔膜式溶存酸素ロガーでモニタリングした。結果を図 63 に示す。DO の日周変化 (微細藻類による日中の光合成に伴う酸素放出と夜間のエビの呼吸) は表層、底層ともほぼ同じで、1 日の内に最低値と最高値を 1 回ずつ示した。最低値は夜明け前後 (午前 5 時～7 時) に、最高値は正午前後に記録され、これは実証サイトの気温変化とほぼ一致していた。実証池、対照池のいずれにおいても、表層と底層で DO 値に差はなく、このことは、温度躍層がなく、池の攪拌も十分行われていることを示しているが、対照池では、表層、底層のいずれも変動量 (最高値から最小値を引いた値) が大きく、実証池では小さい傾向が見られ、溶存酸素濃度の日最高値は常に対照池が記録した。測定期間中、DO は、エビ養殖における貧酸素状態の目安と言われる 4.0 mg L^{-1} を下回ることにはなかったが、MBD を適用した実証池では、電力消費を低減しつつこれを達成できており、DO の最低値も安定していた (対照池では 9 月 7 日や 8 日のように下方にぶれる日があった)。日中、対照池の DO 値が実証池より高くなる要因を、微細藻類が多いことと考えた場合、光合成が停止する夜間を経て DO 値の低くなる明け方の時間帯に、MBD を導入した実証池の DO が対照池を逆に上回れることは、MBD 使用時には、底面からの微細気泡によって効果的に酸素を供給できていることを示唆している。

(PO: 4-4)

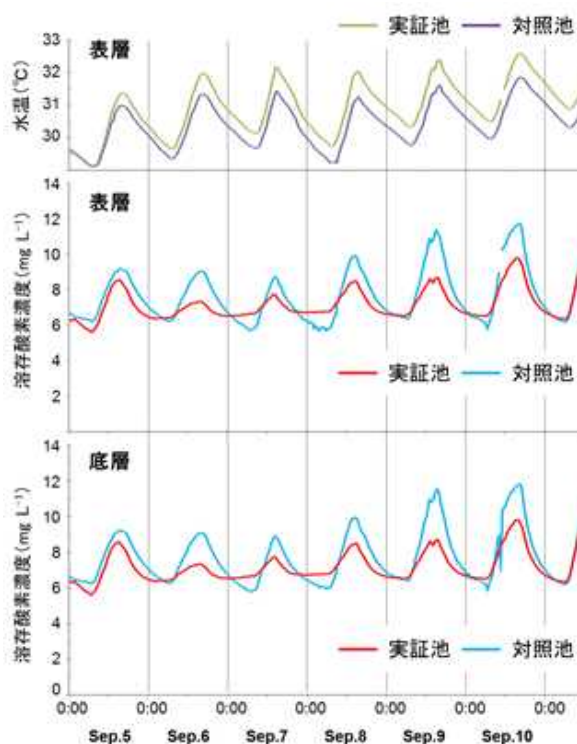


図 63 : 実証池 (MBD を導入) と対照池 (従来型曝気装置のみ) の表層と底層における溶存酸素濃度の経時変化 (2018 年 9 月 5 日～11 日)

2018 年に実施した養殖では、春季 (2018 年 5 月 22 日開始) は対照池で、秋季 (9 月 2 日開始) はいずれの池でもエビの大量斃死が発生した。斃死したエビの肝臓が白変していたことから、この大量斃死は東南アジアのエビ養殖において甚大な被害をもたらしている急性肝臓壊死病 (Early Mortality Syndrome/Acute Hepatopancreatic Necrosis Disease :EMS/AHPND) が原因である可能性があり、PCR による遺伝子診断を実施した。

表 30 に示した日にサンプリングし、70%エタノール中に固定したエビの内、無作為に 5 尾を選出し、CTU おいて、肝臓から NucleoSpin DNA RapidLyse を用いて DNA を精製した。EMS/AHPND 病原株 (*Vibrio. parahaemolyticus*) のみが有する DNA 配列から設計したプライマーを用いて、精製した肝臓由来の DNA を鋳型として *V. parahaemolyticus* の遺伝子断片の PCR による増幅を九州大学にて試みた。*V. parahaemolyticus* の DNA (東京海洋大 廣

野教授から分与)を陽性対照 (Positive Control) の DNA とした PCR 解析の結果、すべてのエビにおいて、Positive Control と同じサイズのバンドは検出されなかった (図 64)。さらに検出感度の高い Nested-PCR[19]によっても検査したが、*V. parahaemolyticus* は検出されなかった (Data not shown)。以上の結果から、2018 年の春季および秋季における斃死は、EMS/AHPND が原因ではないと判断した。

表 30 : PCR 疾病診断に用いたバナメイエビ

	サンプリング日	サンプリング場所	サンプル数
春季養殖	2018 年 6 月 25 日	実証池と対照池	5
秋季養殖	2018 年 10 月 9 日	実証池と対照池	5

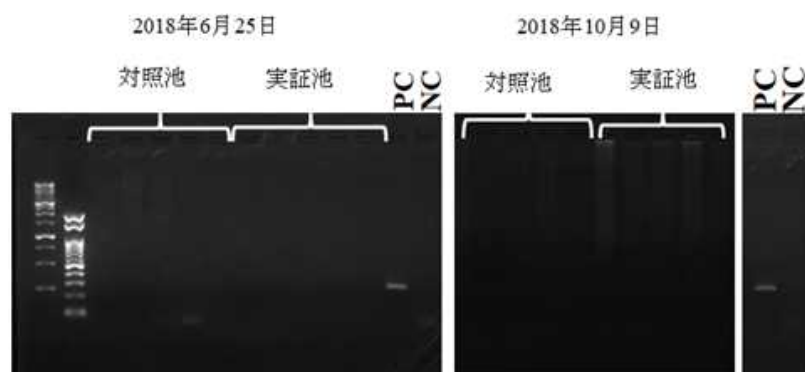


図 64 : 急性肝臓壊死症 (EMS/AHPND) の診断結果;Positive Control (PC) : *V. parahaemolyticus* 由来の DNA、Negative Control (NC) : DNA 無し

2018 年の養殖の斃死に原因が EMS/AHPND でなかったことから、EMS/AHPND と同様に東南アジアで猛威を振るっているエビ類の感染症であるホワイトスポット病 (WSD) を疑い、Nested-PCR による診断を実施した。木村らの方法[20]を参考にホワイトスポット病の原因ウイルスである white spot syndrome virus (WSSV)を検出するプライマーを用いて Nested-PCR を実施した。EMS/AHPND の診断と同じ DNA を鋳型として用いた。PCR 解析の結果、秋季養殖の対照および実証池の斃死エビの 5 分の 4 が WSSV 陽性であることが明らかになった (図 65)。この結果より秋季養殖の大量斃死の原因は WSD だと判断した。春季養殖ではすべて陰性であったことから、WSD は発症していなかったことが考えられる。

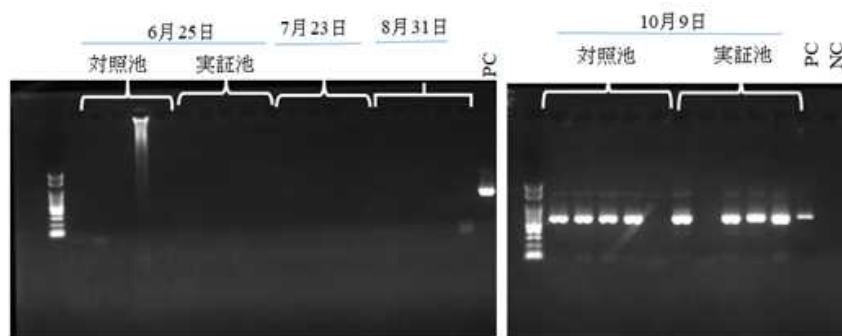


図 65 : ホワイトスポット病 (WSD) の診断結果;Positive Control (PC) : WSSV 由来の DNA、Negative Control (NC) : DNA 無し

以上まとめると、2018 年春季に、MBD を導入した実証池で、従来型の曝気を行った対照池に比べてエビの生存率が高くなった理由として、MBD の導入により DO 値の変動が小さく

なったことでエビが受けるストレスが軽減されたことが考えられ、この結果は、MBD 曝気により、省エネ化が図られる上、より安定的なエビの生産が可能になることを意味している。現地養殖生産者は、ヘドロの連続的な排出による池内環境の維持がエビの生産性に最も効果的であると認識しており、2019 年度に入り、Hoang Vu エビ養殖場は、**図 30** の養殖池を新設し、同年 5 月から、ヘドロを毎日排出（日に 3 回）する養殖法に切り替え、これによりバナメイエビの生産性が大幅に向上することになったが、以上の MBD に関する結果を踏まえ、Hoang Vu 社のオーナーから、新たな MBD の導入の要請を受け、**図 30** の新養殖池の曝気装置として MBD が採用された。（PO: 4-4）

項目 v エンジンによるバイオガス発電実証

I-2-(3)-②で詳述した 7 m³ メタン発酵槽から得られるバイオガスを用いて、カウンターパート機関である HCMUT 内燃機関研究室 (Huynh Thanh Cong 氏) と連携し、小型エンジンを用いた発電試験を行った。発電実験は、①ガソリン、②ディーゼル、③バイオガスおよび④50%バイオガス-50%ディーゼル（デュアルフュエル）の 4 種の燃料に対して行った。①と③については、単気筒火花点火エンジン（定格 5.2 kVA、220 V、50Hz）（**図 66 左**）を用い、バイオガスの場合は、大気圧下で空気と混合し、エンジンの吸気行程の際に、シリンダー内に引き込んだ。②と④については、直接噴射式ディーゼルエンジン（定格 7.5 kVA、220 V、50Hz）（**図 66 右**）を用い、デュアルフュエルの場合は、本研究で HCMUT が設計・開発した混合器を介して、吸気マニホールドに供給した。バイオガスは、酸化鉄脱硫塔で脱硫したものをガスホルダー（**図 46 左下**）から供給した。



図 66：ベンチ実証サイトにて発電試験に用いたエンジン；(左) ガソリンあるいはバイオガスによる発電に用いたガソリンエンジン、(右) ディーゼルあるいはデュアルフュエルによる発電に用いたディーゼルエンジン（実証サイトにて、HCMUT の学生が実験を行っている。）

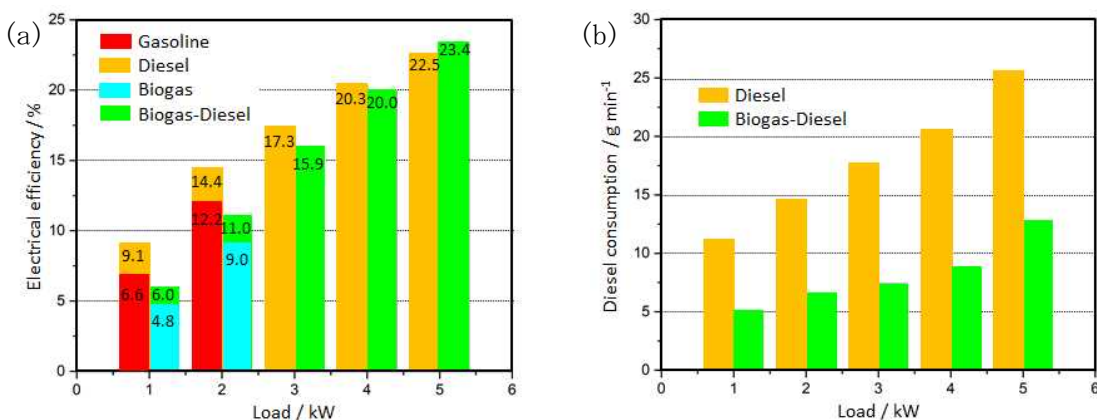


図 67：ベンチ実証サイトにて行ったエンジン発電試験の結果；(a) 発電効率、(b) ディーゼル発電およびデュアルフュエル発電の際のディーゼル燃料の消費速度

図 67 にエンジン発電試験の結果を示す。1 kW 出力時の発電効率は、6.6% (ガソリン)、9.1% (ディーゼル)、4.8% (バイオガス) および 6.0% (デュアルフュエル) となり、本プロジェクトで開発した 1 kW バイオガス SOFC システムの発電効率 62.5%LHV (直流発電端) (**図 27**、**図 29** 参照) が、いかに高いかを示す結果となった (開発した SOFC は、同じ出力 (1 kW) では、10 倍もの発電効率を有する。)。エンジン発電機発電の発電効率は、定格出力に近づくにつれて高まって行くが、それでも 20~25%程度である。(PO: 4-6)

以上、エンジン発電機は、数 kW レベルの小型分散型電源として使うには発電効率が低すぎ、バイオマス資源としては最も質の低いエビ養殖残渣 (**図 32** 参照) を“使えるエネルギー”に変換することを可能にするのは、圧倒的に効率の高い SOFC しかないであろう。一方で、出力が 5 kW を超えてくると、エンジン発電機もある程度の効率 (> 20%) を示すようになる上、**図 67(a)**に示したように、ディーゼルの半分をバイオガスで代替したデュアルフュエル供給時の発電効率は、100%ディーゼル供給時と同等かそれを上回るようになる。デュアルフュエルでの運転時には、**図 67(b)**に示したように、使用するディーゼル燃料が半分で済むので、SOFC が本格的に普及するまでは、汎用技術であるエンジン発電機を使って、数十キロワットレベルのバイオマス発電を積極的に進めて行くべきである。

項目 vi メコンデルタに適した SOFC 導入エネルギー循環システムの提案

メコンデルタに適したエネルギー循環システムの構築に向け、これまで本プロジェクトで得た知見および成果を以下にまとめる。

- 1 kW 級バイオガス SOFC システムを開発し、バイオガス発電としては世界最高レベルとなる発電端効率 62.5% (電流: 32.5 A、スタック電圧: 35.1 V、発電出力: 1,139 W) を達成した。(p30、PO: 2-10)
- エビ養殖池の改良 (**図 30** 参照) により、ヘドロを含む養殖池底層の水を、養殖中に排出できるようになった。(p30~31、PO: 3-2)
- 毎日ヘドロを排出して池の環境をクリーンに保つ養殖法の採用により、エビの生産性が著しく向上した。(p31、PO: 4-4)
- 最も低品位なバイオマスであるエビ養殖残渣のエネルギーポテンシャルを、組成分析およびメタン発酵ラボ試験により明らかにした。(p34、PO: 3-3, 4-8)
- 新養殖池 (**図 30**) から回収されるエビ養殖残渣をメタン発酵することにより得られるバイオガスは $3.08 \text{ Nm}^3 \text{ day}^{-1}$ と見積もられ、開発した 1 kW 級バイオガス SOFC の連続運転に必要なバイオガスの約半分以上をエビ養殖残渣から賄うことができる。(p35、PO: 4-8)
- エビ養殖池ヘドロ中にメタン生成菌が存在しており、メコンデルタでバイオガス製造を行う際、当ヘドロが種菌の供給源として必須である。(p40~42、PO: 3-1~3-4, 4-8)
- 養殖残渣に植物系バイオマス廃棄物を添加することで、安定した燃料電池発電を実現することができる。(p44~45、PO: 3-2~3-4)
- ベンチェ実証サイトに設置した 7 m^3 メタン発酵槽は、運転開始以来、現在まで 2 年 7 ヶ月間、一度も停止することなく稼働しており、加温・保温なしに、現地のバイオマス廃棄物を投入するだけで、1 kW 級バイオガス SOFC システムの連続運転に必要なバイオガスを安定して製造する技術を確立した。(p47、PO: 3-5)
- 現地の土壌環境を十分把握し、効果的な栽培計画を立てることで、現地バイオマス廃棄物から製造した炭化物を、肥料として農業生産に活用できることが明らかとなった。今後の栽培試験には、ベトナム側に圃場の土性等に見識のある共同研究者が必要であり、メコンデルタにおいて、10 年来、農業利用を目的としたバイオマス炭化の研究を行っている CTU 資源環境学部との新たな連携を開始した。(p55~56、PO: 4-5)

- ・ 実証サイトに導入した膜ろ過装置で製造した透過水をエビの育成に用いることで、エビの生存率が大幅に向上することが水槽試験により示された。この結果をきっかけに、薬剤添加なしに無菌海水を生産できることを現地業者が実際に知ることとなり、カントー市の養殖業者が、小型膜ろ過装置を導入した。(p57～59、PO: 4-4)
- ・ 集約型エビ養殖では、富栄養化へとつながる残餌から溶出する窒素やリンが問題となるが、「低密度飼育下でのエビ海藻複合飼育」で高い生産量を打ち出すことができ、特に、オゴノリ類が富栄養化の進行を鈍化に効果的であることが分かった。(p60～62、PO: 4-3)
- ・ 従来型の下向噴射型の曝気装置に代わり、マイクロバブルディフューザー (MBD) を導入することで、エビ養殖の省エネ化が図られるが、MBD 導入池で、エビの生存率が高まる傾向にあった。MBD で曝気することで、エビ養殖池中の溶存酸素濃度の変動が小さくなることが分かり、これによりエビが受けるストレスが軽減されたことが考えられる。結果、実証サイトを提供している Hoang Vu エビ養殖場が、図 30 の新養殖池の曝気装置として MBD を採用することとなった。(p62～66、PO: 4-4)
- ・ エンジン発電機は、数 kW レベルの小型分散型電源として使うには発電効率が低すぎる。バイオマス資源としては最も質の低いエビ養殖残渣 (図 32 参照) を“使えるエネルギー”に変換することを可能にするのは、本プロジェクトで開発した圧倒的に発電効率の高いバイオガス SOFC しかない。(p67、PO: 4-6)

以上の知見および成果を踏まえると、図 68 のようなエビ養殖モデルを構築することで、エビ養殖の持続性・生産性が飛躍的に向上するであろう。当養殖法が広まれば、メコンデルタ地域の環境汚染および生態系の破壊に歯止めがかかり、地域の社会経済に大きなインパクトを与えられると強く期待される。

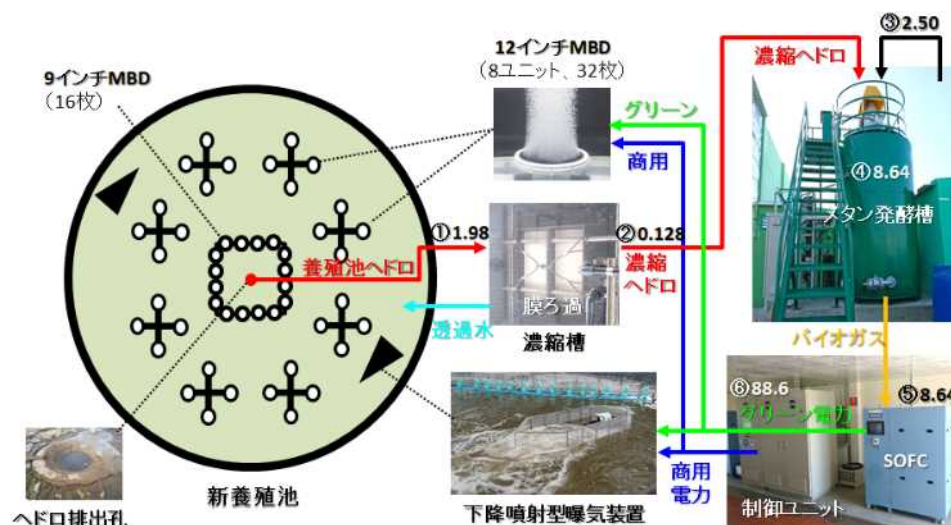


図 68：本プロジェクトの得た知見および成果を踏まえて提案する持続的エビ養殖モデル；図中の数値は、表 31 に示した数値①～⑤（バイオエネルギー生産に伴うエネルギー消費）、表 32 に示した数値⑥（生産される有用エネルギー（電気エネルギー））である。

ヘドロ排出機能を有する新養殖池（図 30）を採用することで、エビの生産性が大きく向上することが確かめられているが、それに加えて、エビの生産性向上に寄与することが実験的に確認された膜ろ過および MBD 曝気を導入する。この上で、排出したヘドロ（脱皮殻を含む）を積極的にエネルギー利用するのであるが、このような極めて質の低いバイオマスから有用な電気エネルギーを生み出す際のキーとなるのが、加温も保温も必要ないメタン発酵によるバイオガス製造と、エンジン発電機では出し得ない発電効率を有する SOFC の導入である。

表 31：図 68 のエビ養殖モデルにおけるエネルギー消費

養殖条件（新養殖池（図 30 参照））		
項目	数値	根拠
養殖密度	350,000 匹/695 m ³ = 504 匹 m ⁻³ （超高密度養殖）	・ヒアリング ・実測
溶存酸素濃度（DO）管理値	6.0 mg L ⁻¹	・実測
エネルギー消費（エビ養殖に不可欠な分）		
項目	数値	根拠
養殖池曝気	438.9 MJ day ⁻¹ (= 5.08 kW = 0.86 kW + 2.12 kW + 2.10 kW) ・9 インチ MBD（16 枚）：0.86 kW ・12 インチ MBD（32 枚）：2.12 kW ・下向噴射型（2 台）：2.10 kW	・実測
エネルギー消費（バイオエネルギー生産の際に発生する分）		
項目	数値	根拠
エビ養殖池底層水の排出 （養殖池→濃縮槽）	①1.98 MJ day ⁻¹ (= 2.20 kW x 15 min day ⁻¹ x 60 s min ⁻¹ / 1000) ・ポンプ動力：2.20 kW ・底層水排出時間：15 min day ⁻¹ (= 5 min 回 ⁻¹ x 3 回 day ⁻¹)	・試算
エビ養殖残渣の投入 （濃縮槽→メタン発酵槽）	②0.128 MJ day ⁻¹ (= 2.20 kW x 58 s day ⁻¹ / 1000) ・ポンプ動力：2.20 kW ・ポンプ能力：9.10 L s ⁻¹ ・残渣投入日量：530 L day ⁻¹ （表 14 の 527 kg-FW day ⁻¹ より。比重を 1 と仮定。） ・1 日のポンプ駆動時間：58 s day ⁻¹ (= 530 L day ⁻¹ / 9.1 L s ⁻¹)	・ポンプスペック ・エビ養殖残渣のエネルギーポテンシャルの評価から見積もった残渣投入量
地域バイオマス廃棄物の輸送	③2.50 MJ day ⁻¹ (= 120 km 回 ⁻¹ x 2 回 year ⁻¹ / 10 km L ⁻¹ x 38.0 MJ L ⁻¹ / 365 day year ⁻¹) ・1 回の運搬距離：120 km (= 50 km x 2 + 20 km)（製糖工場およびココナッツ加工工場は、実証サイトから約 50 km の距離に位置しており、工場間の距離は約 20 km である。） ・ディーゼルトラックの燃費：燃費 10 km L ⁻¹ ・ディーゼル燃料の HHV：38.0 MJ L ⁻¹ ・メタン発酵槽への投入：0（人力） ※図 44 のフェーズ V では、ココナッツ搾りかす 8.0 kg-DW day ⁻¹ (= 12.0 kg-FW day ⁻¹)、バガス 6 kg-DW day ⁻¹ (= 7.92 kg-FW day ⁻¹) の投入で、1 kW 級 SOFC の連続稼働に必要なバイオガス供給速度を超える速度でバイオガスが発生していた。バイオガスの約半分はエビ養殖残渣から得るので、ココナッツ搾りかすおよびバガスの投入日量を 6.0 kg-FW day ⁻¹ 、4.0 kg-FW day ⁻¹ に設定し、年 2 回、1100 kg-FW のココナッツ絞りかすと 730 kg-FW のバガスを、ディーゼルトラックでまとめて輸送する。	・試算
メタン発酵槽の運転	④8.64 MJ day ⁻¹ (= 100 W x 3600 s h ⁻¹ x 24 h day ⁻¹) 攪拌ブレード動力：100 W 加温・保温：0（加温・保温無し）	・実測
SOFC システム補機損	⑤8.64 MJ day ⁻¹ (= 100 W x 3600 s h ⁻¹ x 24 h day ⁻¹)	・実測

図 68 の養殖システム導入時の、曝気（エビ養殖に不可欠なエネルギー消費）へのバイオエネルギー寄与率およびエネルギー投入量/エネルギー生産量（Primary energy input to output ratio（PEIO 比）[21]）を評価した。表 31 は、図 68 のエビ養殖モデルにおけるエネルギー消費（①～⑤）を算出した結果である。これらの値は図 68 中にも記載した。表 32

に示した通り、バイオエネルギー寄与率 (= 数値⑥ (生産される有用エネルギー) / 曝気に要するエネルギー) は 20.2%と算出され、プロジェクト目標を満たす結果となった。PEIO 比に関しては、この値が低いほどシステムチェーンの効率が高いことを意味し、100%を超えるとエネルギー生産が負であると見なされるが、**図 68** のモデルでは 24.7% (= (①1.98 + ②0.128 + ③2.50 + ④8.64 + ⑤8.64) / ⑥88.6 x 100)) となり、このような小規模循環システムとしては、十分低い値となった。第一に、これらの値は、発電機としてガスエンジンを選択した場合には実現することはできない。他の要因としては、バイオマス廃棄物を資源とすることでエネルギー作物の生産に要するエネルギー投入がないこと、バイオガス製造の際、発酵槽の加温・保温がいらないこと、電気化学デバイスである SOFC がカロリーの低いバイオガスの供給を許容し、メタン濃縮や補助燃料がいらないことが挙げられる。以上の結果の一部は、INT との共著論文として、国際学会誌 (*Fuel Cells*, Wiley Online Library (2019), <https://doi.org/10.1002/face.201800184>) に掲載済である。(PO: 4-7, 4-8)

表 32 : 図 68 のエビ養殖を実践した際のバイオエネルギー寄与率および PEIO 比[21]

項目	数値	根拠
バイオエネルギー投入	$260.6 \text{ MJ day}^{-1}$ (= $174.6 \text{ MJ day}^{-1} / 0.67$) ・供給バイオガスが有するエネルギー : $174.6 \text{ MJ day}^{-1}$ (= $6.75 \text{ Nm}^3 \text{ day}^{-1} \times 0.65 \times 39.8 \text{ MJ Nm}^{-3}$) ・1 kW 級バイオガス SOFC の連続稼働に必要なバイオガス供給日量 : $6.75 \text{ Nm}^3 \text{ day}^{-1}$ (= $3.08 \text{ Nm}^3 \text{ day}^{-1} + 3.67 \text{ Nm}^3 \text{ day}^{-1}$) ・エビ養殖残渣由来バイオガス : $3.08 \text{ Nm}^3 \text{ day}^{-1}$ (表 14 参照) ・地域バイオマス廃棄物由来バイオガス : $3.67 \text{ Nm}^3 \text{ day}^{-1}$ ・バイオガス組成 : $\text{CH}_4:\text{CO}_2 = 65\%:35\%$ (表 13 参照) ・メタンの高位発熱量 : 39.8 MJ Nm^{-3} ・メタン発酵消化率 : 67% (表 15 の消化率を採用)	・実測に基づいた見積もり
1 kW 級バイオガス SOFC の送電端出力	$⑥88.6 \text{ MJ day}^{-1}$ (= $1.025 \text{ kW} = 1.139 \text{ kW} \times 0.9$) 直流出力@発電効率 62.9%LHV : 1.139 kW DC-DC コンバーターおよびインバーターロス : 10%	・実測
曝気へのバイオエネルギー寄与率	20.2% (= $88.6 \text{ MJ day}^{-1} / 438.9 \text{ MJ day}^{-1} \times 100$)	・ <u>> プロジェクト目標</u>
PEIO 比	24.7% (= (①1.98 + ②0.128 + ③2.50 + ④8.64 + ⑤8.64) / ⑥88.6 x 100)	

図 68 の循環システムの連続稼働に向け、本プロジェクトでは、参画機関である中山鉄工所が中心となり、途上国対応型のオンサイト発電電力供給システムを構築した。

ベンチェ実証サイトでは停電が多く、サイトの建屋内でのラボ試験等に使用する電気については、当初計画の通り、無停電装置 (UPS) を導入し、その後、UPS の個数を増やして行ったが、停電の頻度・時間が想定以上に長く、最終的には鉛バッテリーを直列・並列に積層した実用レベルの電源装置を構築した。エネルギー循環システムの各設備 (200 V 機器) に関しては、系統電力の供給以外に、ガソリンエンジンの非常用発電機を導入し、停電時には、自動で非常用電源に切り替わるようにした。SOFC 発電時には、DC-DC コンバーターおよびインバータを介して、発電電力 (直流) と系統電力 (交流) を組み合わせて負荷 (曝気装置) に供給する回路を、制御ユニット (**図 27 右下**参照) 内に構築し、負荷が存在しない場合は、SOFC が発電を続けられるよう、抵抗器を並列設置することで連続稼働ができる環境とした。**図 28** および **図 29** に示したバイオガス SOFC システムの発電試験結果は、このような環境を整えた上で得た成果であり、**図 69** に示した通り、発電した電力はルーツブロワに供給され、MBD による新養殖池への曝気に用いられた。



図 69 : ベンチェ実証サイトにおけるバイオガス SOFC 発電電力の供給

図 69 のベンチェ実証サイトは、INT（ホーチミン）からも離れているため（図 3 参照）、パイロットプラントに設置された機器を、プロジェクトメンバーがリアルタイムにモニタリングできるようにすることが重要である。図 70 は、中山鉄工所が構築した遠隔モニタリングシステムの概念図である。大学・複数企業の連合体で実施されているため、個々にインターネット回線を利用した Virtual Private Network（VPN）を設置し、アクセス階層を設けることで管理を行った。収集データは基礎研究において重要となるため、各機器の PLC に保存されたデータを日本からアクセスし、収集できるようにした。膜ろ過設備 Web カメラの映像を図 70 に示したが、解像度が高く、設備のコントロールパネルをズームアップすることにより、設備の稼働状況や警報の発報等を日本から確認することができる。当システムの導入により、各設備の運転データ収集の効率化、トラブルの未然防止およびトラブル対応の迅速化が達成された。（PO: 4-8）

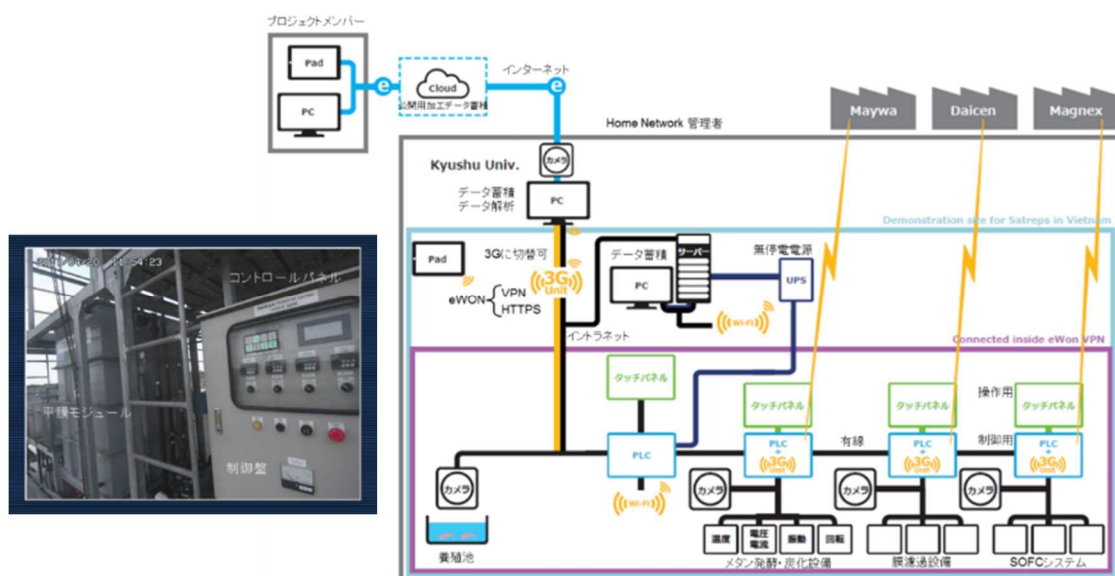


図 70 : 本プロジェクトで構築した遠隔モニタリングシステムの概念図

I-2-(4)-③ カウンターパートへの技術移転の状況

上述のベンチ実証サイトでの活動を通じて、エネルギー循環システムを構成する各要素技術に関して、相手国への技術移転が進んだ。

エビ養殖の持続性向上に資する膜ろ過および MBD については、メコンデルタへの実装例も出てきており、メタン発酵および炭化については、CTU 資源環境学部にて技術移転が行われ、新たな連携が開始された。バイオガス SOFC に関しては、学会賞受賞や各メディアでの報道により、国内外の複数の企業よりコンタクトがあり、現在、新たな連携の準備を進めているところである。(PO: 2-10, 3-5, 4-4, 4-5)

以上のことから、本プロジェクトで立ち上げた実証サイトは、学術的な成果を生み出している SOFC 研究開発ラボ (図 6) とともに、地球規模の課題解決を目指す研究拠点として、有効に機能している。

上記技術移転の加速とトラブル対応の迅速化を目的として、エネルギー循環システムを構成する各設備について、英文操作マニュアルを作成してカウンターパート機関に供与し、図 8 や図 47 に示した通り、日本側専門家による技術講習会を実施した。

海藻類を用いて養殖池余剰栄養塩の除去を行う際には、現地周辺に生育している種を利用することが生物多様性維持の観点からも重要となる。しかしながら、海藻類の中には形態的特徴が少なく、種同定が困難なものが多い。そこで、目的とする分類群の DNA 配列を既知種のものと比較することで種同定を試みる DNA バーコーディング技術の導入が近年盛んである。当 DNA バーコーディング技術の習得を目的として、2016 年 10 月に CTU の研究者 (Nguyen Thi Ngoc Anh 氏) が来日し、九州大学大学院農学研究院内の実験室にて、海藻からの DNA 抽出、目的 DNA 領域の PCR 増幅、アガロース電気泳動による増幅断片の確認、DNA 断片の精製、DNA シーケンス、分子系統解析に関する手法について実習を行った。(PO: 4-3)

I-2-(4)-④ 当初計画では想定されていなかった新たな展開

該当なし。

I-2-(5) 研究題目 3: メコンデルタ地域における SOFC 技術システム普及ロードマップの構築 (普及ロードマップ策定グループ、リーダー: 藤本 稔彦)

I-2-(5)-① 研究のねらい

当プロジェクトで開発・実証する「SOFC を導入した地域廃棄物系バイオマス利用エネルギー循環システム」の社会受容性を高め、メコンデルタの持続的発展に寄与するものとなるよう、カウンターパート研究機関、地域および参画企業と密に連携し、以下の取り組みを行う。(PDM: Output 5)

項目 i プロジェクトワークショップの開催(PO: 5-1, 5-2)

項目 ii 本邦における情報発信(PO: 5-1)

項目 iii メコンデルタ地域への技術の社会実装に向けた課題の整理

項目 iv SOFC 普及ロードマップの策定

I-2-(5)-② 当初の計画(全体計画)に対する成果目標の達成状況とインパクト

項目 i プロジェクトワークショップの開催

新しい技術を途上国に実装し、それを普及させて行くためには、現地行政官、養殖業者、製糖業者および地域住民等、現地のステークホルダーの理解を深めることが極めて重要である。そこで、エネルギー循環システムの概要、開発状況および普及時の地域社会への貢献等、我々の理念や取り組みについてメコンデルタ地域への情報発信を行うことを目的とし、技術協力第 1 期(2015 年度)より、毎年、200 規模のプロジェクトワークショップを開催してきた(図 71)。計 5 回開催したが(表 4 参照)、研究代表者の講演後の質疑応答では、毎回、人民委員会の来賓や地域住民と活発な議論が交わされ、SOFC のコストおよび実現時期、メタン発酵の際に投入する無機栄養塩のコスト、メタン発酵ラゴ試験のサイト依存性に関する質問が出るなど反響があり、効果的に情報発信をすることができた。(PO: 5-1, 5-2)



図 71 : ベンチェでのプロジェクトワークショップの開催風景 ; (上段)第 1 回、(下段)第 2 回、(右上)ベンチェ人民委員会の来賓からの質問に答える日本側研究代表者、(右下)会場からの質問に答える農学グループ北岡教授

項目 ii 本邦における情報発信

本プロジェクトで開発・実証したバイオガス SOFC をはじめとする技術は、当然ながら本邦でも適用すべきものであり、表 6 に示した通り、プロジェクトで得た成果や教訓を、本邦におけるセミナーやワークショップにて、市民、企業、学会関係者、留学生、国際協力従事者に積極的に発信した。（PO: 5-1）

項目 iii メコンデルタ地域への技術の社会実装に向けた課題の整理

図 72 は、ベンチェ省内のエビ養殖業のビジネスフローとネットワークを、養殖関連業者へのインタビューを基にまとめたものである。2017 年、ベンチェ省のエビ養殖面積は 47,000 ha、総生産量は 53,000 t であった。集約的な養殖に取り組んでいる事業体は 36 社、幼生を販売する会社は 53 社、エビのトレードを担う会社は 1 社（20%のシェア）という構成であり、その他は、他省の業者や個人仲介で流通して行く。2017 年度の調査で、ベンチェ省内でのエビ殖業の構造（ネットワークと幼生を含む物資のフロー）と発展の経緯（時間軸）がある程度クリアになり、プラント運営を含めた当プロジェクトにおける実証研究の成果を効果的に展開して行くための知見を得ることができた。

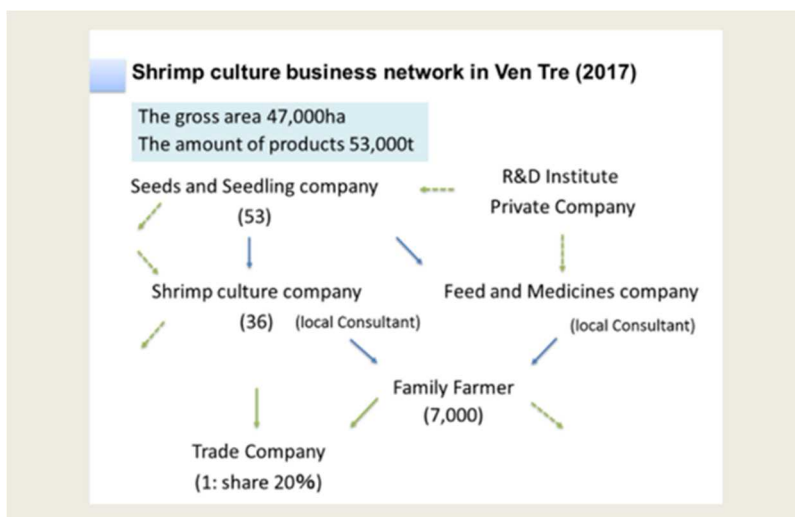


図 72：ベンチェ省内のエビ養殖ビジネスのフローとネットワーク

本プロジェクトに実証サイトを提供している Hoang Vu 養殖場は、ベンチェ省内で最も早く集約的なエビ養殖生産に取り組み始めた企業であり、地域特性を理解したエビ養殖技術とネットワークを有している。そのため、実証サイトでの成功がそのまま省内での実装につながることを期待される。また、種苗生産会社から、幼生とその後のエビの成育に関する情報が提供されており、この上流部分との技術協議も社会実装において重要である。

現地調査に基づいたネットワーク分析を行った結果、2000 年代の中盤以降、カントー市を中心に、メコンデルタ南部へ稚エビ供給を行うローカルベンチャーが次々と起業していることが明らかになった。これらのローカルベンチャーでは、本プロジェクトのカウンターパートである CTU 水産学部の卒業生が起業家あるいは従業員として活躍していたことから、ネットワーク拠点としての CTU 水産学部を再評価し、プロジェクトメンバーと共にインタビューを行いながら稚エビ生産にかかるビジネスのニーズと課題を整理した。その結果、最もクリティカルな課題として稚エビ生産現場での生残率が 50%と低いままにとどまっていることが分かった（p59）。これら稚エビ業者は、それぞれ 500～1,000 人の仲介業者を通じて南部メコンデルタのエビ生産農家と接続しており、技術の有効性を自ら確認したうえで、普及を担いたい意志を示す起業家にも出会った。本プロジェクトの最終年度には、これらの起業家との社会実験を開始するに至った。

本プロジェクトでは、メコンデルタの集約型エビ養殖場を実証サイトを選定して現地の環境改善に資する技術をベンチにて先駆的に実証し（Ⅰ-2-(4)節参照）、持続的養殖モデルを提案したが（図 68 参照）、エビ養殖生産は、メコンデルタ南部のカマウ省、バクリュウ省、ソクチャン省に広域に広がっており（図 73）これら地域への技術移転が重要である。また、図のように、メコンデルタは多様な土地利用が展開されているエリアであり、我々は、エビ養殖池ヘドロ以外のバイオガス利用として、カントー市周辺で取り組まれている VACB（V：果樹、A：養魚、C：養豚、B：バイオガス）モデルに注目し（図 74）、当技術の開発と普及に取り組んでいる CTU 資源環境学部との連携体制を新たに構築した。

CTU 資源環境学部が実証サイトとしているハウザン省タンティ村の VACB モデルでは、各家庭レベルにバイオガスダイジェスターが設置され、家庭からの生ごみ、養豚糞尿を主な資源としてバイオガスを製造し、料理用コンロで利用する家庭モデルが構築されていた。しかしながら、地域コミュニティ全体での取り組みには至っておらず、スマート農家の一部が CTU でトレーニングを受けて実施しているだけであった。そこで、将来的なバイオガス SOFC の搭載を見据え、集約的にバイオガス利用を行うためのコミュニティの中心（今回は農産物加工所とエコツーリズムの拠点）を作りスケールアップすること、併せて、メコンデルタ農村の特徴である水路環境の再生を同時に行うことを目的として「コミュニティバイオガス」のプロジェクトデザインを行い、トヨタ財団国際助成プログラムに採択された。これにより、2019 年 11 月から、CTU 資源環境学部との連携を本格的にスタートさせている。

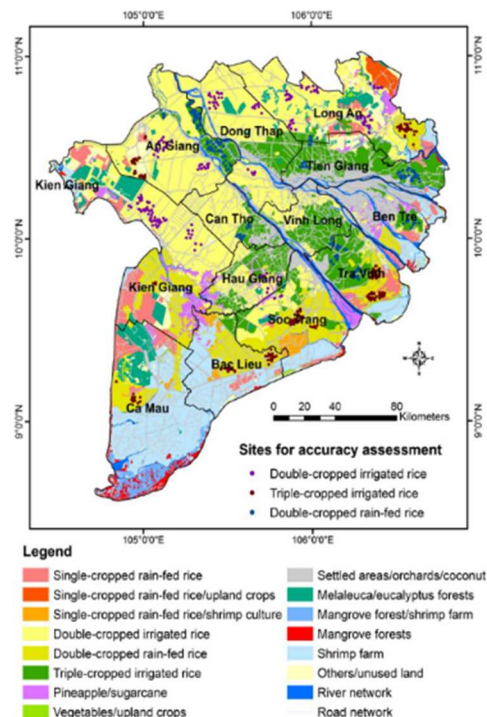


図 73：メコンデルタの土地利用図 2014
(CTU 資源環境学部、Laboratory of Land Management 提供資料)

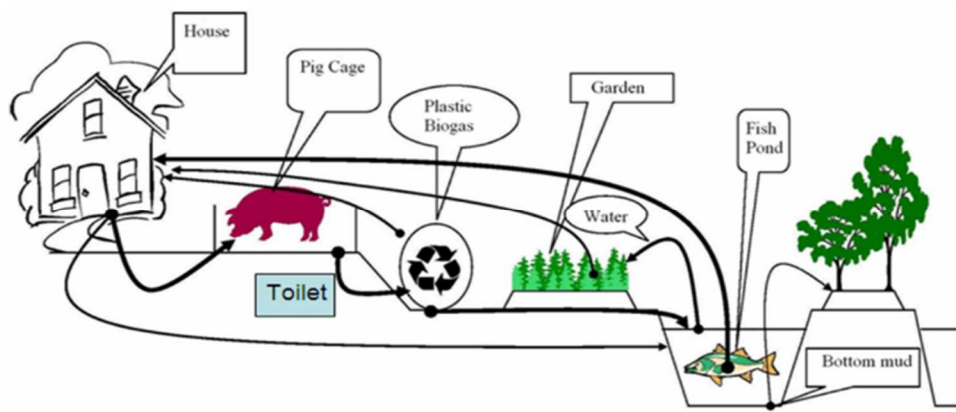


図 74：カントー市周辺で取り組まれている VACB（V：果樹、A：養魚、C：養豚、B：バイオガス）モデル（CTU 資源環境学部提供）

項目 iv SOFC 普及ロードマップの策定

メコンデルタ地域への普及シナリオにあたって注目したのが、ベトナム政府が進める「新しい農村発展プログラム (New Rural Village, NRV)」である。それぞれの村レベルでの開発計画を策定し、その達成度を 19 の評価指標で測り、その達成度に応じて開発資金を傾斜的に配分するというプログラムである。2010 年にスタートして 2020 年までに全国半数の村を NRV の水準に到達させるという目標が定められているものの、その達成率は低い。とりわけ、「環境」、「コミュニティ経済の開発」、「美しい村づくり」に関する指標の到達状況が悪い。そのため、CTU 農村発展学部との新たな連携を構築し、2018 年 3 月に行ったセミナーでは、本プロジェクトの成果について、その実装プロセスと結果を検証することで、新たな NRV の評価指標を開発・政策提案して行くことを共通の目標として設定した。

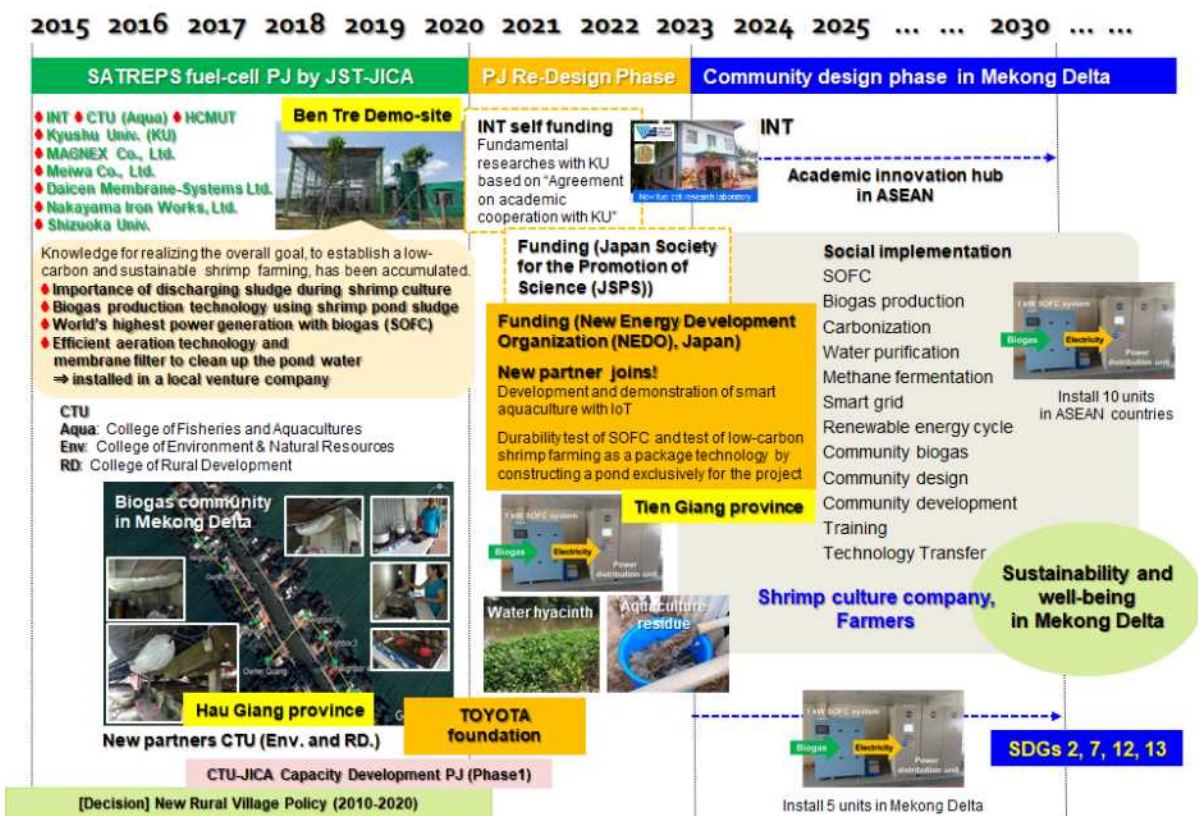


図 75 : SOFC のメコンデルタ地域への実装に向けたロードマップ

以上の取り組みに基づいて、プロジェクトおよびチームビルディングの視点から SOFC 技術の普及ロードマップを作成した (図 75)。ロードマップの特徴は、以下の 5 点にまとめられる。(1) 普及活動の主体形成：本プロジェクト終了後は、他の省や地域にも技術移転を進めて行くことになるため、国際共同研究基盤をより強化して行かなければならないが、SATREPS の統合的チームをそのまま継続していくことは困難であると考えられるため、1) 基礎研究 (INT との SOFC 関連の共同研究)、2) 社会実装研究 (CTU との新たな連携によるメコンデルタでの社会的実践に基づく研究開発→トヨタ財団に採択、他の助成金にも応募済)、3) ビジネス (参画企業と現地企業とのネットワーク) のそれぞれの視点から、今後の継続を担保しながら、次回の統合的実証研究に着手する。(目標 2021 年度)。(2) 普及・技術移転モデルの確立：エネルギー循環、物質循環、水循環技術の一つのパッケージ技術とした普及モデルを構築する (目標 2023 年度)。(3) バイオガスコミュニティへの SOFC の実装：CTU 農村発展学部との連携を深め、New Rural Village の形成を目指すベトナム政府国

家戦略との接合を図ることを基盤として、メコンデルタ地帯に整備されたバイオガスコミュニティに SOFC システムを 1 基実装する（目標 2024 年度）。(4)バイオガスコミュニティから地域への展開：2024～2030 年度までをコミュニティデザインフェーズと捉え、メコンデルタ地域内 5 ヶ所に SOFC システムを実装する。それと並行して各要素技術の現地化を行い、技術普及と社会開発を担う企業体を構築する（目標 2030 年度）。(5)ASEAN 諸国への SOFC の実装：世界銀行やアジア開発銀行、国連工業開発機関への働きかけを通じて、東南アジア地域に計 10 基の SOFC システムを導入する（目標 2030 年度）。(PO: 5-2)

I-2-(5)-③ カウンターパートへの技術移転の状況

p72、I-2-(4)-③に記載した通りである。

I-2-(5)-④ 当初計画では想定されていなかった新たな展開

膜ろ過による養殖水の浄化がエビの生育に良い効果をもたらすことが検証されたことを受けて（p57～59）、エビ養殖ビジネスの上流（稚エビ業者）へ視点を移し、エビ養殖ネットワークの拠点であるカントー地域でネットワーキングを行った。CTU 水産学部と連携したローカルベンチャー企業のうち 1 社と、2019 年 10 月に膜ろ過装置の社会実験を開始し、ビジネスベースでの社会実装に至った（p59）。

SOFC を将来的に搭載することができるコミュニティスケールのバイオガス集約利用モデルを設計し、CTU 資源環境学部および農村発光学部と新たな連携体制を構築し、ハウザン省タンティ村でコミュニティバイオガスに関する新しいプロジェクトを立ち上げた（トヨタ財団 2019 年度国際助成プログラムに採択（プロジェクト名：Sustainable Agriculture of Rural Area in Mekong Delta, Vietnam and Mountainous Area, Japan by Community-based Action for Effective Utilization of Bio-wastes Resources、研究機関：2019 年 11 月～2021 年 10 月、研究代表者：藤本穰彦）

CTU 資源環境学部とは、INT の協力を得て、ベンチェにて国際ワークショップ（2019 年 8 月 27～28 日）を開催して研究成果を共有すると共に、ベンチェ実証サイトにて、学生も含めた技術講習会（2019 年 12 月 16～18 日に）を開催した。SATREPS プロジェクトで構築した実証サイトは、CTU 資源環境学部の研究・教育サイトとしても共同利用することで合意している。

I-2-(6) 補足資料

I-2-(6)-① 研究題目 1

バイオガス SOFC の燃料利用率について

表 33 に、バイオガス流量 5.09 NL (= 7.33 Nm³ day⁻¹)、S/C = 1.1 で図 27 の SOFC システムを作動させた際の、改質ガス組成（平衡計算値）およびモル流量相当電流の値を示す。バイオガスの水蒸気改質は、図 25 の改質器内（580～640℃（図 28 参照））で行われるが、最終的に、710℃ のスタック内で改質が完了すると考え、平衡計算の際の温度を 710℃ とした。表 33 の改質組成から算出されたモル流量相当電流（改質ガス中の燃料成分（CH₄、H₂、CO）それぞれが、すべて電気化学的に酸化されたとして算出した電流値であり、燃料利用率（ U_f ）100%の時の電流値を意味する。）は 43.7 A であり、スタック電流が 32.5 A であったことから、 U_f は、32.5 A / 43.7 A = 0.744（74%）となる。

表 33 : 改質ガス組成およびモル流量相当電流（電流@ U_f = 100%）

	バイオガス組成	改質ガス組成 (@710℃) *		モル流量相当電流（電流@ U_f = 100%）** / A
	流量 / NL min ⁻¹	流量 / NL min ⁻¹	モル流量 / mol s ⁻¹	
CH ₄	3.05	0.147	1.09 x 10 ⁻⁴	2.10
CO ₂	2.04	1.73	1.29 x 10 ⁻³	—
H ₂ O	5.60	3.01	2.24 x 10 ⁻³	—
H ₂	0	8.40	6.24 x 10 ⁻³	30.1
CO	0	3.21	2.39 x 10 ⁻³	11.5
O ₂	0	5.59 x 10 ⁻²¹	4.15 x 10 ⁻²⁴	—
				計 43.7

*HSC Chemistry 9 にて算出

** = モル流量 mol s⁻¹ x 電子数 x 96485 C mol⁻¹ / セル数 (= 40)

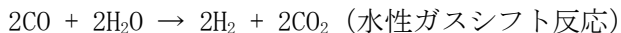
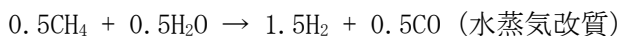
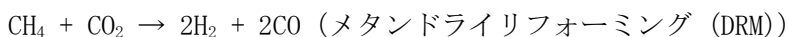
電子数 CH₄ ⇒ 8 (CH₄ + 4O²⁻ → 2H₂O + CO₂ + 8e⁻)

H₂ ⇒ 2 (H₂ + O²⁻ → H₂O + 2e⁻)

CO ⇒ 2 (CO + O²⁻ → CO₂ + 2e⁻)

バイオガス SOFC の発電効率について

CH₄/CO₂ = 1.5 のバイオガスを S/C (= H₂O/(CH₄ + CO₂)) = 1.1 で加湿した場合に生じる改質反応は、以下の 3 つの反応からなっており、



これらを足し合わせた総括反応は、



となる。したがって、燃料電池の理論効率 η_{th} は、スタック温度 T における H₂、CO の燃焼反応のギブス自由エネルギー変化 ($\Delta G^\circ(\text{H}_2\text{-O}_2@T)$ 、 $\Delta G^\circ(\text{CO-O}_2@T)$) および 25℃ における CH₄ の低位発熱量 $\Delta H^\circ(\text{CH}_4\text{-O}_2@25^\circ\text{C})$ を用いて、

$$\eta_{th} = (11 \times \Delta G^\circ(\text{H}_2\text{-O}_2@T) + \Delta G^\circ(\text{CO-O}_2@T)) / (3 \times \Delta H^\circ(\text{CH}_4\text{-O}_2@25^\circ\text{C}))$$

により見積ることができる。

電圧効率 η_V は、セル電圧 V_{cell} および開回路電圧 OCV を用いて

$$\eta_V = V_{\text{cell}} / \text{OCV}$$

で表され、SOFC の発電効率 η は

$$\eta = \eta_{\text{th}} \times \eta_V \times U_F$$

であるので、表 34 に示したように、図 29 の電流-電圧特性を得た際の、スタック電流 32.5 A における 1 kW バイオガス SOFC の発電効率 η は、62.5%と算出された。

表 34 : 1 kW バイオガス SOFC の発電効率の算出～その 1～

$\Delta H^\circ (\text{CH}_4\text{-O}_2@25^\circ\text{C}) / \text{kJ mol}^{-1}$	-802.4		
$\Delta G^\circ (\text{H}_2\text{-O}_2@T) ^* / \text{kJ mol}^{-1}$	-194.2		
$\Delta G^\circ (\text{CO-O}_2@T) ^* / \text{kJ mol}^{-1}$	-198.1	$\eta_{\text{th}} / -$	0.970
$V_{\text{cell}}^{**} / \text{V}$	0.878		
OCV*** / V	1.014	$\eta_V / -$	0.866
スタック電流 / A	32.5		
モル流量相当電流 / A	43.7	$U_F / -$	0.744
		$\eta / -$	0.625

*700°C での熱力学データ

** = スタック電圧 (35.1 V) / 40 セル

***表 33 の改質ガス組成から得た酸素分圧値 (3.39×10^{-22} atm) を用いてネルンストの式で算出

また、表 35 のように、発電効率は、単純に、発電電力の実測値をエネルギー供給速度（バイオガス (CH₄) 供給速度 x CH₄ 低位発熱量）で除して求めることができる。当然であるが、この際も、 η は同じく 62.5%となる。

表 35 : 1 kW バイオガス SOFC の発電効率の算出～その 2～

CH ₄ 供給速度（体積流量） / NL min ⁻¹	3.05
CH ₄ 供給速度（モル流速） / mol s ⁻¹	2.27×10^{-3}
CH ₄ 低位発熱量 ($\Delta H^\circ (\text{CH}_4\text{-O}_2@25^\circ\text{C})$) / kJ mol ⁻¹	-802.4
エネルギー供給速度* / W	1,821
スタック電流 / A	32.50
スタック電圧 / V	35.05
発電電力 / W	1,139
$\eta^{**} / -$	0.625

* = CH₄ モル流速 x CH₄ 低位発熱量

** = 発電電力 / 供給エネルギー量

SOFC システムの運転の際には、ブロワや送液ポンプなどの補機に 100 W 程度（表 31⑤）の電力が必要であり、これを含めて発電効率を算出すると、 $62.5\% \times (1,139 \text{ W} - 100 \text{ W}) / 1,139 \text{ W} = 57.0\%$ となる。

バイオガス SOFC の耐久性と社会実装について

改質器、セルスタック、燃焼器、熱交換器からなる SOFC ホットモジュール（以降、モジュール）は、ある燃料組成に対して効率が上がるよう熱バランスを考慮して設計されている。これまでの試験で、バイオガス SOFC の耐久性・信頼性が損なわれる要因として、バイオガスの組成が発酵状態に依存して変動することに伴い、モジュール内の熱バランスが崩れ、スタックの温度が安定しないことが挙げられる。特に、CH₄ 比率が高い時のスタックの

冷却が課題であり、スタックの耐久性を確保するためには、燃料組成に対応してスタック温度を高度に制御する必要がある。そこで、これまでのスタックの運転状況を勘案して自動制御プログラムを新たに開発し、これをバイオガス SOFC システムに組み込み、SOFC スタックを順次投入して発電試験を行わなければならない。2018 年度中に、ベンチェ実証サイトにて、高性能が期待できる新しいスタックを導入してバイオガス SOFC システムの発電試験を行い、当システムからマイクロバブルディフューザー（MBD）への給電テストを開始して課題の抽出にあたる予定であったが、2018 年 11 月に日本から発送したスタック（R/D に記載の投入機材）の免税許可が得られず、約 10 ヶ月試験ができない状態が続き、2019 年 9 月によりやく試験を行うことができたものの、予想される性能からは程遠いものであった。

一方、ベンチェに投入したものと同一セルで構成された 10 セルスタックを用い、改質模擬ガスを供給した耐久試験を本邦にて行った。結果を図 76 に示す。当試験は定格の 1.4 倍の電流下で行った加速試験であるものの、劣化率（電圧低下率）は 0.47%/1000 h であり、実用レベルの耐久性を確認することができた。今後、ベンチェでの活動資金を獲得することができた際には、実バイオガスを供給して定格 55%の発電効率を確認後、3 ヶ月間のバナメイエビ養殖中に連続的に電力を供給することを想定して 2,000 時間の連続運転を行い、実用レベルの耐久性（スタック電圧の劣化率 < 0.5%/1000 時間）に目途をつける。

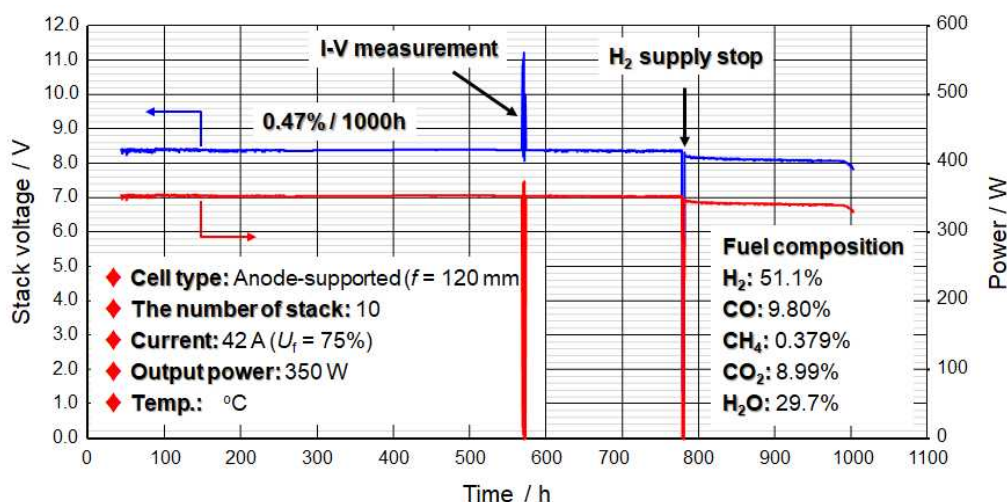


図 76：改質模擬ガスを供給した 10 セルスタック試験（定格の 1.4 倍の電流を印加した加速試験）

SOFC 業界では、10 年の耐久性（0.1%/1000 h）を目指しており、バイオガスに対しても、当プロジェクトで行ったモジュールおよび運転設計を行い、燃料不純物の除去がなされていけば、上記耐久性を有する SOFC スタックを適用することで社会実装可能であり、コストについては、ガスエンジン発電機レベル（20 万円/kW）まで落とすことは現状では難しいが、水産養殖事業者の経済的メリットや環境、安定電力供給、政治配慮等を考慮した普及モデルを立てることで、本研究の上位目標（メコンデルタへの普及）を実現できると考えている。

脱硫について

脱硫については、p48～49 に詳述しているので、参照されたい。酸化鉄脱硫塔（図 46 左上）も、精密脱硫塔（図 46 右）も、それぞれ 2 セットずつ備え付けられており、脱硫塔下流の硫化水素濃度を検知管により定期的にモニタリングし、使用中の脱硫塔が硫化水素（H₂S）を吸着しきれなくなる前に（H₂S が破過する前に）、フレッシュな脱硫材が充填された塔に切り替えることで、システムの連続運転が可能となっている。このように、切り替え機構

を一段目（酸化鉄脱硫）および二段目（精密脱硫）の双方に設けているため、SOFC 内部に H_2S が入るリスクは限りなく低い。

コジェネについて

年間を通して気温が高いベトナム・メコンデルタ地域（実証サイトの年間平均気温約 30°C ）では、エネファームのように、排熱をお湯として貯めておくよりも有効な排熱利用法を考える必要がある。メタン発酵の際に排出される消化液は、液肥としての利用価値があるものの、貯留・輸送・散布のコストが嵩む上、不均一な肥料成分（N、P、K）や悪臭により有効利用できていない現状がある。この点に着目し、バイオガス SOFC から排出される低温の未利用排熱を熱源として、蒸留により消化液からアンモニア濃縮バイオ液肥を製造するプロセスを考案し、現在、SOFC の排ガスポートに接続できるガス流通型コンパクト蒸留装置を福岡県内企業と共同開発中である。

ペーパー触媒の耐久性と社会実装について

図 77 に、高い炭素析出耐性を有することが明らかになった 6wt%Ni/CZ-PSC ($x = 0.4$) (p22) を用いて DRM の耐久試験を行った結果を示す。現在も試験を継続中であるが、熱力学的に炭素析出領域内の燃料組成であるにも関わらず、100 時間以降で算出した劣化率は $1.31\%/1000 \text{ h}$ であり、200 時間までを安定化に要する時間と考えれば劣化は無く、実用レベルの耐久性を確認した。1000 時間まで耐久試験を継続し、試験後の電子顕微鏡観察および昇温酸化測定により、炭素析出を評価する予定である。

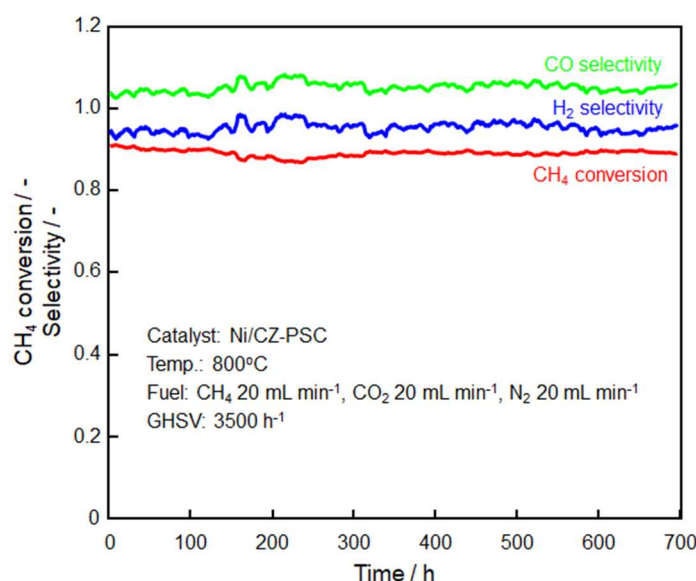


図 77: 6wt%Ni/CZ-PSC を用いて行った 800°C における DRM 耐久試験 ($\text{GHSV} = 3500 \text{ h}^{-1}$)

ペーパー触媒（PSC）は、通常の改質器に充填する触媒として利用できるが、一番のメリットは、燃料極上改質のための触媒として、SOFC スタック内部に適用できることである。PSC 技術の社会実装に向けては、隣接する改質器構成材料や SOFC 構成材料との、高温環境下での化学的両立性を確保することが重要であり、現在、劣化要因となる現象の理解とその抑制法の研究に取り組んでいる。

I-2-(6)-② 研究題目 3

バイオガス SOFC 導入資源循環システムの社会実装に向けた課題とビジネスモデルについて

水産養殖には、水質の維持や酸素供給を行うための安定的な電力供給が必須であり、ヘドロの堆積や停電等がもたらす事業リスクは計り知れないことから、省エネ制御技術およびシステム統合技術を有し、ベトナムで事業を展開している本邦企業およびティエンザン省の人民委員会が当プロジェクトの成果に高い関心を示し、SOFC を導入した低炭素水産養殖システムの普及展開を、当企業と九州大学が連携して進めて行く新たな体制を構築した。当企業は、ティエンザン省農業農村開発局（DARD）および現地の大手エビ養殖事業者と技術の社会実装に向けた協議を進め、「NEDO・2020 年度エネルギー消費の効率化等に資する我が国技術の国際実証事業(実証要件適合性等調査)」に採択された。

エビ養殖の運用コストの内、電気料金は配合飼料代に次ぐ割合を占めており、その収益性に大きな影響を及ぼしているが、上記の新たな連携においては、過不足ない設備の運転を自律的に行うシステムとすることで当プロジェクトの成果を最大化させるとともに、事業採算性を意識した低コスト化を検討している。具体的には、IoT を利用することで構成設備を制御し、ヘドロをメタン発酵槽に、上澄みを養殖池に戻すタイミングを通知したり、それらを自動で移送する仕組みなど、一つのシステムとして連動した動作を行うことができるかを検証し、運用自動化による電力消費の削減（電力費のコストダウン）を目指す。バイオマス資源の利用に加え、当手法の導入により、養殖事業者は確実に電力費を軽減することができる上、既存の養殖手法と比較して高密度養殖が可能になり、収益性が格段に向上すると考えている。

当プロジェクトの高効率燃料電池発電および先進養殖技術の普及・定着のためには、現地教育と技術移転が不可欠であることは言うまでもないが、技術の導入に係る支援制度が行政によって提供されることが重要である。そこで、当プロジェクト後も、INT とともに、技術に関するワークショップを継続して開催し、我々が提案する新しいエビ養殖法を地域に発信するとともに、ベンチェ省、ティエンザン省の DARD に対し、支援制度の創設に向けた提言を行う。システムの運用に必要なノウハウについては、当プロジェクトの実証サイト（Hoang Vu エビ養殖場）において技術講習会を開催し、現地エビ養殖事業者に技術移転して行くが、専門知識を持たない養殖場スタッフでも対応可能な仕組みを構築すべきであり、ヒアリング等でフィードバックを得て技術の改善を進め、普及時には現地でメンテナンス可能とする。

ビジネスモデルの構築においては、現地養殖事業者の初期投資が軽減されるリースモデルを考えている。初めはメコンデルタ地域を中心に、省エネルギー養殖システムや IoT の導入に理解のあるエビ養殖事業者を確保し、リスクを回避する。零細事業者は設備投資の資金調達が困難であるが、上記リースモデルは、収益性と安定性を伴うビジネス機会を提供するだけでなく、システム運用・保守、更には先進的養殖に関する助言・教育などを包括的に実施するスキームを想定しており、地域住民の生活を支え、地域経済の活性化に寄与するものである。ベトナムでは、バイオマス発電事業を推進するための補助金プログラムも検討されており、事業普及初期の推進支援の可能性も模索して行く。

温室効果ガス排出量の削減について

MBDU と 1 kW バイオガス SOFC を導入した低炭素エビ養殖システム（図 68）の曝気における CO₂ 排出量を、ベンチェでの実証試験結果をベースに見積もった。結果を図 78 に示す。A は下向噴射型曝気装置（図 61(b)）を用いた従来型の養殖、B は下向噴射型の半分を MBDU（図 62）に変えた場合、C は、B に 1 kW バイオガス SOFC を導入した場合、D は、C の曝気装置をすべて MBDU とした場合である。図のように、曝気装置を MBDU に置き換え、1 kW バイオガス SOFC を導入することで (D)、養殖中の曝気に伴う CO₂ 排出[22]を 58%削減できると見積

もられた（当方式をメコンデルタ（MRD）地域のすべてのエビ養殖池に導入したとして概算したCO₂排出削減量は、 $4.68 \times 10^6 \text{ t-CO}_2 \text{ y}^{-1}$ ）。これに加え、バイオマス廃棄物由来のバイオガスをエネルギー利用することで、廃棄物の発酵により大気中に放散されるCH₄の温室効果も削減できるので（CO₂換算で $2.66 \times 10^6 \text{ t-CO}_2 \text{ y}^{-1}$ ）、Dのエビ養殖法がメコンデルタ全域に広まった際のGHG削減量は $7.34 \times 10^6 \text{ t-CO}_2 \text{ y}^{-1}$ となり、これは、ベトナム全体のGHG排出量の2.5%に相当する[23]。

以上は、各養殖池に燃料電池としてはミニマムサイズの1 kWのSOFCを導入すると仮定した場合の試算結果であるが、より実際的には、複数の池に堆積したヘドロを集約的に回収し、ヘドロに加えて周辺バイオマス廃棄物も一括して処理することになるので、バイオガス発生量が増え、養殖場に導入するSOFCは、総出力で数～数十 kW レベルになるであろう。さらに、エビ養殖に比べてより多くのヘドロが発生するナマズ養殖（p51 参照）への適用も考えれば、図 68 のシステムのメコンデルタ地域への普及がベトナム国内のGHG排出量の削減に与えるインパクトは大きい。

エビ養殖池の水質改善技術の今後について

本研究で導入した二つの水質改善技術（MBD および膜ろ過）の内、MBD については、国内特許出願および PCT 出願済み（1 件）であり、膜ろ過についても国内特許を出願し、現在、PCT 出願の準備中である。膜ろ過技術については、エビ養殖池の水質改善への有効性が示されたため、金山省（キエンザン省）のオニテナガエビ業者が膜モジュール（20 万円）を購入した。当モジュールは、100 万匹の稚エビ水槽 10 槽分の水質改善に対応でき、耐用年数は3～5年である。現地での現在の稚エビ養殖では、殺菌剤（次亜塩素酸）および抗生物質を使用して病原性細菌（腸炎ビブリオ菌など）の発生を抑えているが、その生残率は50%程度である。一方、上記膜モジュールの導入により、殺菌剤を投入することなく生残率が大きく向上できれば（現地導入業者も効果を確認済み。）、数千万円の生産高向上が見込まれるため、今後、カントー大学（CTU）水産学部の強力なバックアップの下、普及が進んで行くことが大いに期待される。

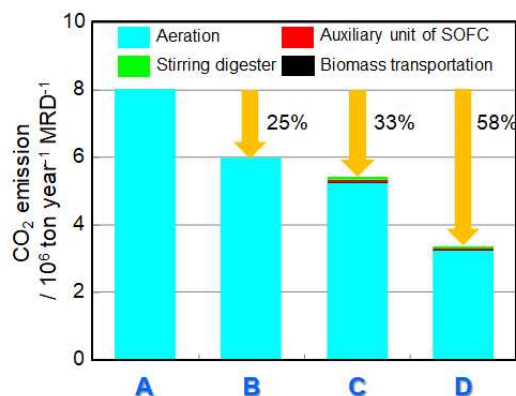


図 78: 図 68 のコンセプトに基づき一般的な養殖池（池面積 0.35 ha、稚エビ投入数 60 万匹、養殖密度 125 匹 m⁻³）に、MBDU および 1 kW バイオガス SOFC を導入した際の、曝気に伴う CO₂ 排出量の削減（メコンデルタ（MRD）全体に導入したとし、2 養殖期間に対して算出）

参考文献

- [1] Statistical Yearbook of Viet Nam 2017.
- [2] ベトナム電力調査 2017、ジェトロ・ハノイ事務所 (2018 年 3 月)
- [3] M. Ni, Is steam addition necessary for the landfill gas fueled solid oxide fuel cells?, *Int. J. Hydrogen Energy* 38 (2013) 16373-16386.
- [4] B.A. Haberman, J.B. Young, Three-dimensional simulation of chemically reacting gas flows in the porous support structure of an integrated-planar solid oxide fuel cell, *Int. J. Heat Mass Transfer* 47 (2004) 3617-3629.
- [5] Y. Shiratori, M. Sakamoto, T. Uchida, H. Le, T. Quang-Tuyen, K. Sasaki, Hydrotalcite-dispersed paper-structured catalyst for the dry reforming of methane, *Int. J. Hydrogen Energy* 40 (2015) 10807-10815.
- [6] Y. Shiratori, M. Sakamoto, Performance improvement of direct internal reforming solid oxide fuel cell fuelled by H₂S-contaminated biogas with paper-structured catalyst technology, *J. Power Sources* 332 (2016) 170-179.
- [7] J.F.B. Rasmussen, A. Hagen, The effect of H₂S on the performance of SOFCs using methane containing fuel, *Fuel Cells* 10 (2010) 1135-1142.
- [8] A. Hagen, J.F.B. Rasmussen, K. Thyden, Durability of solid oxide fuel cells using sulfur containing fuels, *J. Power Sources* 196 (2011) 7271-7276.
- [9] A. Hagen, G.B. Johnson, P. Hjalmarsson, Electrochemical evaluation of sulfur poisoning in a methane-fuelled solid oxide fuel cell: effect of current density and sulfur concentration, *J. Power Sources* 272 (2014) 776-785.
- [10] D.L. Klass, *Encyclopedia of Energy* 1 (2004) 193-212.
- [11] M.M. Ali, N. Dia, B. Bilal, M. Ndongo, *International Journal of Physical Sciences* 13(13) (2018) 206-216.
- [12] M. Takashima, R.E. Speece, Mineral nutrient requirements for high-rate methane fermentation of acetate at low SRT, *Res. Research Journal of the Water Pollution Control Federation* 61(11/12) (1989) 1645-1650.
- [13] M. Ishihara, S. Toyama, K. Yonaha, Biogas production from methane fermentation of sugarcane bagasse, *The Science Bulletin of the Faculty of Agriculture, University of the Ryukyus* 35 (in Japanese) (1988) 45-51.
- [14] Y. Shiratori, M. Sakamoto, T.G.H. Nguyen, T. Yamakawa, T. Kitaoka, H. Orishima, H. Matsubara, Y. Watanabe, S. Nakatsuka, T.C.D. Doan, C.M. Dang, "Biogas power generation with SOFC to demonstrate energy circulation suitable for Mekong Delta, Vietnam", *Fuel Cells*, Wiley Online Library (2019), <https://doi.org/10.1002/fuce.201800184>
- [15] K. Sasaki, K. Haga, T. Yoshizumi, D. Minematsu, E. Yuki, R.R. Liu, C. Uryu, T. Oshima, T. Ogura, Y. Shiratori, K. Ito, M. Koyama, K. Yokomoto, Chemical durability of solid oxide fuel cells: influence of impurities on long-term performance, *J. Power Sources* 196 (2011) 9130-9140.
- [16] N. de Arespachaga, C. Valderrama, C. Mesa, L. Bouchy, J.L. Cortina, Biogas deep clean-up based on adsorption technologies for Solid Oxide Fuel Cell applications, *Chemical Engineering Journal* 255 (2014) 593-603.
- [17] J.B. Hansen, Correlating sulfur poisoning of SOFC nickel anodes by a Temkin isotherm, *Electrochem. Solid-State Lett.* 11 (2008) B178-B180.
- [18] 土壌診断による バランスのとれた土づくり Vol. 3ー土壌診断に基づく改善対策一、財団法人 日本土壌協会、2010 年度
- [19] 特定疾病診断マニュアル、日本水産資源保護協会 農林水産省委託事業 (2008)
- [20] 木村 武志、山野 恵祐、中野 平二、桃山 和夫、平岡 三登里、井上 潔、魚病研究 31 巻 (1996) 93-98.

- [21] M. Pöschl, S. Ward, P. Owende, Evaluation of energy efficiency of various biogas production and utilization pathways, *Appl. Energy* 87 (2010) 3305-3321.
- [22] IGES List of Grid emission factors (2015), Institute for Global Environmental Strategies (IGES).
- [23] The second biennial updated report of Viet Nam to the United Nations framework convention on climate change, Socialist Republic of Viet Nam Ministry of Natural Resources and Environment, 2017

II. 国際共同研究実施上の課題とそれを克服するための工夫、教訓など（公開）

II-(1) プロジェクト全体

技術協力第1期（2015年度）に行った供与機材のカウンターパート研究機関への輸送の際、ベトナム計画投資省とベトナム財務省の連携不足により免税許可が下りず、精密装置を含むプロジェクトに不可欠な機材が、ホーチミンの港に約2ヶ月半、高温多湿の環境下で放置される事態となった。プロジェクト側からは、カウンターパート代表機関およびJICAベトナム事務所を通して、ベトナム関係当局に免税許可の要請を続けたものの、根本的な解決には至らなかった。（PO: 1-1, 2-1）

第4期から5期にかけても同様のことが起こった。2018年度中に、ベンチェ実証サイトにて、高性能が期待できる新しいスタックを導入してバイオガス SOFC システムの発電試験を行い、当システムから MBD への給電テストを開始して課題の抽出にあたる予定であった。しかしながら、2018年11月に日本から発送したスタック（R/D に記載の投入機材）の免税許可が得られず、再三にわたり JICA に交渉に当たっていただいたものの、約10ヶ月、空港に放置される事態となってしまった。2019年9月に、当スタックを用いた発電試験を行ったが、予想される性能からは程遠く、このような場合の対処方法や機材に不具合が生じた場合の補償体制を、日越双方の省庁レベルで確立しておくべきと強く感じた。（PO: 4-7, 4-8）

II-(2) 研究題目1: バイオエネルギーで作動する固体酸化物形燃料電池の開発 （工学グループ、リーダー: 白鳥 祐介）

共同研究を通じ、燃料電池技術に関する相手国研究者の育成に努めているが、上位目標の達成に向けて、プロジェクト終了後も、ベンチェに整備した実証サイトおよびホーチミンに立ち上げた SOFC 研究開発ラボを継続的に運用して行く必要がある。このためには、SATREPS 後の活動において中心的な役割を果たすことができるベトナム人研究者の育成と連携強化のための競争的資金の獲得が不可欠である。前者については、VNUHCM から博士課程の留学生を3名受け入れて人材育成を行ったことで、大いに活性化された（表5参照）。後者については、2019年10月末に、INT および CTU 資源環境学部をカウンターパートとして、助成金への申請を完了した。（PO: 2-1～2-6）

II-(3) 研究題目2: バイオ燃料製造に関する研究および関連調査 （農学グループ、リーダー: 北岡 卓也）

エビ養殖中にヘドロを排出できるように池が改良されたことで、養殖残渣のメタン発酵実験が可能になったことは（エビの生産性も向上）、上位目標の達成に向けて大きな転換点となった。（p30～35、p40～42 参照）（PO: 3-2～3-5）

II-(4) （研究題目番号無し）: SOFC を導入したエネルギー循環システム実証 （工学&農学グループ）

2016年度より、INT が Hoang Vu エビ養殖場従業員1名を、プラントに常駐するオペレーターとして雇用し、当オペレーターの協力の下、遠隔モニタリングシステムを活用してパイロットプラントの運転管理を行った。ベトナム側のみでトラブルに対処できるよう、本邦参画企業が作成した各要素設備の詳細マニュアルを英文化し、これらをベトナム側に提供した上で、各設備に関する技術講習会を実証研究スタート時およびプロジェクト終了時に開催した。（p12～13、p49～50 参照）

ベンチェ実証サイトでは停電が多いため、ガソリンエンジンの非常用発電機を導入し、停電時には、商用電源から自動で非常用電電力源に切り替わるようにした。（p70 参照）

プロジェクトメンバーがリアルタイムにプラントの機器の運転状態をモニタリングできるよう個々に VPN を設置し、各機器の PLC に保存されたデータを日本からアクセスし、収集できるようにした。(p71 参照)

II-(5) 研究題目 3: メコンデルタ地域における SOFC 技術システム普及ロードマップの構築 (普及ロードマップ策定グループ、リーダー: 藤本 稔彦)

燃料電池はベトナムでは全く新しい発電技術であり、特に、我々がターゲットにしているメコンデルタ地域等、途上国の農村部では、燃料電池を単独で普及させることは難しく、地域社会が抱えている課題を十分把握し、それらを解決する技術と組み合わせることで、初めて普及が可能になるものと考えている。そこで、メコンデルタの主要産業であるエビ養殖業および当地域の土地利用についてヒアリング調査を行い、ネットワーキングを進めて行った。この過程で、ローカルな企業との信頼関係を築くことができ、本プロジェクトで実証した技術の現地への実装が始まり、また、SATREPS の上位目標達成に向けた大学間の新たな連携が生まれた。(p74~75 参照)

III. 社会実装(研究成果の社会還元) (公開)

III-(1) 成果展開事例

I-2-(4)-③ (p72) に記載の通り、エビ養殖の持続性向上に資する膜ろ過および MBD については、メコンデルタへの実装例も出てきており、メタン発酵および炭化については、CTU 資源環境学部にて技術移転が行われ、新たな連携が開始された。バイオガス SOFC に関しては、学会賞受賞や各メディアでの報道により、国内外の複数の企業よりコンタクトがあり、現在、新たな連携の準備を進めているところである。(PO: 2-10, 3-5, 4-4, 4-5)

III-(2) 社会実装に向けた取り組み

I-2-(4)の p67~71 および I-2-(5)の p73~77 に詳述しているので、これらを参照されたい。また、本プロジェクトの成果が各種メディアで報道され (表 3 参照)、広く知られることとなったことで、社会実装に向けた新たな連携が日越双方でスタートした。さらに、本プロジェクトで開発・実証した技術の本邦での実装も考え、プロジェクトで得た成果や教訓を、本邦におけるセミナーやワークショップにて、市民、企業、学会関係者、留学生、国際協力従事者に積極的に発信した (表 6 参照)。

IV. 日本のプレゼンスの向上 (公開)

2 年に 1 回開催される欧州最大の SOFC 関連の国際学会 (13th European SOFC & SOE Forum) にて、SATREPS で開発・実証を行ったバイオマス廃棄物利用 SOFC 導入エネルギー循環システムに関する成果を発表し、最優秀賞 (Christian-Friedrich-Schönbein medal (the Best Scientific Contribution)) を受賞した。(2018 年 7 月 6 日 (金))

地域のバイオマス廃棄物を資源として利用した SOFC 導入エネルギー循環システムを提案し、その実証に取り組んでいるプロジェクトの成果が、アノード支持型 SOFC セルの世界最大の供給メーカーである Elcogen 社 (エストニア) のホームページにてケーススタディとして取り上げられ (<https://elcogen.com/case-studies/>)、SOFC 業界に広く知られることとなった。

V. 成果発表等【研究開始～現在の全期間】（公開）

VI. 投入実績【研究開始～現在の全期間】（非公開）

VII. その他（非公開）

以上

VI. 成果発表等

(1)論文発表等【研究開始～現在の全期間】(公開)

①原著論文(相手国側研究チームとの共著)

年度	著者名,論文名,掲載誌名,出版年,巻数,号数,はじめ～おわりのページ	DOIコード	国内誌/ 国際誌の別	発表済 /in press /acceptedの別	特記事項(分野トップレベル雑誌への掲載など、 特筆すべき論文の場合、ここに明記ください。)
2017	Y. Shiratori, T. Yamakawa, M. Sakamoto, H. Yoshida, T. Kitaoka, Q.T. Tran, D.C.T. Doan, M.C. Dang, "Biogas production from local biomass feedstock in the Mekong Delta and its utilization for a direct internal reforming solid oxide fuel cell", Frontiers in Environmental Science 5 (2017) Article 25.	10.3389/fe nvs.2017.00 025	国際誌	発表済	
2017	T.D. Long, T.Q.Tuyen, M. Sakamoto, K. Sasaki, Y. Shiratori, "Modelling of CH4 multiple-reforming within the Ni-YSZ anode of a solid oxide fuel cell", Journal of Power Sources 359 (2017) 507-519.	10.1016/j.j powsour.20 17.05.077	国際誌	発表済	分野トップレベルジャーナル
2017	T.D. Long, A. Kubota, M. Sakamoto, T.Q. Tuyen, K. Sasaki, Y. Shiratori, "Advanced direct internal reforming concepts for solid oxide fuel cells running with biogas", ECS Transactions 78(1) (2017) 2467-2476.	10.1149/07 801.2467ec st	国際誌	発表済	
2017	N.T.G. Huong, T.D. To, M. Sakamoto, T.D.C. Doan, C.M. Dang, T.Q. Tran, K. Sasaki, Y. Shiratori, "Development of Flexible Catalyst Material for Internal Dry Reforming", ECS Transactions 78(1) (2017) 2431-2439.	10.1149/07 801.2431ec st	国際誌	発表済	
2017	T.G.H. Nguyen, D.L Tran, M. Sakamoto, T. Uchida, K. Sasaki, T.D. To, D.C.T. Doan, M.C. Dang, Y. Shiratori, "Ni-loaded (Ce,Zr)O2- δ -dispersed paper-structured catalyst for dry reforming of methane", International Journal of Hydrogen Energy 43 (2018) 4951-4960.	10.1016/j.i jhydene.201 8.01.118	国際誌	発表済	分野トップレベルジャーナル
2018	Y. Shiratori, M. Sakamoto, T.G.H. Nguyen, T. Yamakawa, T. Kitaoka, H. Orishima, H. Matsubara, Y. Watanabe, S. Nakatsuka, T.C.D. Doan, C.M. Dang, "Biogas power generation with SOFC to demonstrate energy circulation suitable for Mekong Delta, Vietnam", Fuel Cells 19, No. 4, Wiley Online Library (2019) 346-353.	10.1002/fu ce.2018001 84	国際誌	発表済	Selected papers from the 13h European SOFC & SOE Forum 2018
2018	T.G.H. Nguyen, M. Sakamoto, T. Uchida, D.C.T. Doan, M.C. Dang, P.H. Tu, K. Sasaki, Y. Shiratori, "Development of paper-structured catalyst for application to direct internal reforming solid oxide fuel cell fueled by biogas", International Journal of Hydrogen Energy 44 (2019) 10484-10497.	10.1016/j.i jhydene.201 9.02.134	国際誌	発表済	分野トップレベルジャーナル

2018	T.D. To, H.G.T. Nguyen, T.C.D. Doan, Y. Shiratori, C.M. Dang, "Hydrothermal synthesis and characterisation of iron cerium oxide nanoparticles for hydrogen sulphide removal application", International Journal of Nanotechnology 15 (2018) 887-899.	10.1504/IJNT.2018.099929	国際誌	発表済	
2019	Tu, P.H., Le, D.N., Dao, T.D., Tran, Q.T., Doan, T.C.D., Shiratori, Y. and Dang, C.M., 2019. "Paper-structured catalyst containing CeO ₂ -Ni flowers for dry reforming of methane." International Journal of Hydrogen Energy.	10.1016/j.ijhydene.2019.10.247	国際誌	in press	分野トップレベルジャーナル
2019	Tu, P.H., Le, D.N., Dao, D.T., Doan, T.C.D. and Dang, C.M., 2019. "Fabrication of nano-catalyst ceria flower and catalyst characterization." Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology, 10(2), p.02"5010.	10.1088/2043-6254/ab1fe7	国際誌	in press	
2019	Tokihiko Fujimoto, Nguyen Huu Chiem, Nguyen Van Cong, Nguyen Xuan Loc, Tran Sy Nam, Nguyen Cong Thuan, Nguyen Duy Can, Le Tran Thanh Liem, Ryuji Nakayama, Yusuke Shiratori, "Restoration Channel and Waterfront Community by Effective Utilization of Local Biomass and Bio-waste Resources under the Concept of "the Most Beautiful Village in Japan": A Case Study of Tan Phu Thanh Village, Hau Giang Province in Mekong Delta, Vietnam", RWC - Hydrological Aspects of Climate Change (2020)		国際誌	in press	2020/02公刊予定

論文数 11 件
うち国内誌 0 件
うち国際誌 11 件
公開すべきでない論文 0 件

②原著論文(上記①以外)

年度	著者名,論文名,掲載誌名,出版年,巻数,号数,はじめ—おわりのページ	DOIコード	国内誌/ 国際誌の別	発表済 /in press /acceptedの別	特記事項(分野トップレベル雑誌への掲載など、 特筆すべき論文の場合、ここに明記ください。)
2016	A. Saimura, Y. Shiratori, T. Kitaoka, "Dual-layered paper-structured catalysts for sequential desulfurization and methane-steam reforming of simulated biogas containing hydrogen sulfide", J. Mater. Sci. 52 (2017) 314-	10.1007/s10853-016-0332-7	国際誌	発表済	
2016	Y. Shiratori, M. Sakamoto, "Performance improvement of direct internal reforming solid oxide fuel cell fuelled by H ₂ S-contaminated biogas with paper-structured catalyst technology", Journal of Power Sources 332 (2016) 170-179.	10.1016/j.jpowsour.2016.09.095	国際誌	発表済	分野トップレベルジャーナル

2019	Pham, T.T., Tu, H.P., Dao, T.D., To, T.D., Doan, D.C.T. and Dang, M.C., 2019. "Fabrication of an anode functional layer for an electrolyte-supported solid oxide fuel cell using electrohydrodynamic jet printing. Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology, 10(1), p.015004.	10.1088/2043-6254/aafda	国内誌	発表済	
------	---	-------------------------	-----	-----	--

論文数 3 件
うち国内誌 1 件
うち国際誌 2 件
公開すべきでない論文 0 件

③その他の著作物(相手国側研究チームとの共著)(総説、書籍など)

年度	著者名,タイトル,掲載誌名,巻数,号数,頁,年		出版物の種類	発表済 /in press /acceptedの別	特記事項

著作物数 0 件
公開すべきでない著作物 0 件

④その他の著作物(上記③以外)(総説、書籍など)

年度	著者名,論文名,掲載誌名,出版年,巻数,号数,はじめ—おわりのページ		出版物の種類	発表済 /in press /acceptedの別	特記事項
2015	才村 綾美、白鳥 祐介、北岡 卓也、“ペーパー構造体触媒による脱硫—炭化水素改質の連続反応”、九州大学超顕微解析研究センター報告、2015年、39巻、156-157		報告書	発表済	

著作物数 1 件
公開すべきでない著作物 0 件

⑤研修コースや開発されたマニュアル等

年度	研修コース概要(コース目的、対象、参加資格等)、研修実施数と修了者数	開発したテキスト・マニュアル類	特記事項
2016	エネルギー循環システム実証サイト(ベトナム・ベンチェ)導入設備の操作実習(対象者:カウンターパート研究者5名、エビ養殖場従業員1名、実施日:2017年2月14日(火))	SATREPS "UF Membrane Filtration System", Operating Guide	当プロジェクトにて現地実証サイトに導入した設備の操作マニュアル(英文)

2016	エネルギー循環システム実証サイト(ベトナム・ベンチェ)導入設備の操作実習(対象者:カウンターパート研究者5名、エビ養殖場従業員1名、実施日:2017年2月14日(火))	SATREPS "Methane Fermentation Facility", Operation Procedure	当プロジェクトにて現地実証サイトに導入した設備の操作マニュアル(英文)
2016	エネルギー循環システム実証サイト(ベトナム・ベンチェ)導入設備の操作実習(対象者:カウンターパート研究者5名、エビ養殖場従業員1名、実施日:2017年2月14日(火))	SATREPS "Carbonizer", Operation Procedure	当プロジェクトにて現地実証サイトに導入した設備の操作マニュアル(英文)
2019	エネルギー循環システム実証サイト(ベトナム・ベンチェ)導入設備の操作実習(対象者:カウンターパート研究者9名、ベトナム企業6名、実施日2019年12月16日(火))	SATREPS "Carbonizer", Operation Procedure_ Revised edition	当プロジェクトにて現地実証サイトに導入した設備の操作マニュアル【改定版】(英文)
2019	エネルギー循環システム実証サイト(ベトナム・ベンチェ)導入設備の操作実習(対象者:カウンターパート研究者9名、ベトナム企業6名、実施日:2019年12月17日(火))	SATREPS "Methane Fermentation Facility", Operation Procedure_ Revised edition	当プロジェクトにて現地実証サイトに導入した設備の操作マニュアル【改定版】(英文)

VI. 成果発表等

(2) 学会発表【研究開始～現在の全期間】(公開)

① 学会発表(相手国側研究チームと連名)(国際会議発表及び主要な国内学会発表)

年度	国内/ 国際の別	発表者(所属)、タイトル、学会名、場所、月日等	招待講演 /口頭発表 /ポスター発表の別
2014	国内学会	白鳥 祐介(九大水素センター/工学研究院)、北岡 卓也(九大農学研究院)、東 修(広大国際協力研究科)、Dang Mau Chien(ベトナム国家大学ホーチミン市校)、Do Thi Thanh Huong(カントー大学)、Huynh Thanh Cong(ホーチミン市工科大学)、Tran Quang Tuyen(九大水素センター)、“高効率燃料電池と再生バイオガスを融合させたエネルギー循環システムの構築”、第23回SOFC研究発表会、東京、2014年12月17日	口頭発表
2016	国際学会	白鳥 祐介(九大水素センター/工学研究院)、坂本美緒(九大水素センター) Tran Long Dang(九大工学府)、喜多修士(九大工学府)、Nguyen Thi Giang Huong(九大工学府)、Tran Quang Tuyen(九大水素センター)、Tin Chanh Duc Doan(ベトナム国家大学ホーチミン市校・ナノテク研究所)、Dang Mau Chien(ベトナム国家大学ホーチミン市校・ナノテク研究所)、“Development of Fuel-Flexible SOFC”、230th ECS Meeting (PRIME2016)、ホノルル、ハワイ、2016年10月3日	口頭発表
2016	国内学会	白鳥 祐介(九大水素センター/工学研究院)、坂本 美緒(九大水素センター)、山川 武夫(九大農学研究院)、吉田 日乃美(九大農学研究院)、北岡 卓也(九大農学研究院)、折島 寛(マグネクス株式会社)、安倍 正樹(マグネクス株式会社)、Tin Chanh Duc Doan(ベトナム国家大学ホーチミン市校・ナノテク研究所)、Dang Mau Chien(ベトナム国家大学ホーチミン市校・ナノテク研究所)、“メコンデルタ産バイオマスからのバイオガス製造とそのSOFC への適用”、第25回SOFC研究発表会、東京、2016年12月16日	口頭発表
2017	国際学会	Thi Giang Huong Nguyen(九大工学府)、Thien Dien To(ベトナム国家大学ホーチミン市校・ナノテク研究所)、坂本美緒(九大水素センター)、Tin Duc Chanh Doan(ベトナム国家大学ホーチミン市校・ナノテク研究所)、M.C. Dang(ベトナム国家大学ホーチミン市校・ナノテク研究所)、Tran Quang Tuyen(九大水素センター)、佐々木 一成(九大水素センター/工学研究院)、白鳥 祐介(九大水素センター/工学研究院)、“Development of Flexible Catalyst Material for Internal Dry Reforming”、15th International Symposium on Solid Oxide Fuel Cells (SOFC-XV)、ハリウッド、フロリダ、アメリカ、2017年7月26日	口頭発表

2017	国際学会	Dang Long Tran (九大工学府)、久保田 篤(九大工学府)、坂本 美緒(九大水素センター)、Quang Tuyen Tran(九大水素センター)、佐々木 一成(九大水素センター/工学研究院)、白鳥 祐介(九大水素センター/工学研究院)、“Advanced Direct Internal Reforming Concepts for Solid Oxide Fuel Cell Running with Biogas”、15th International Symposium on Solid Oxide Fuel Cells (SOFC-XV)、ハリウッド、フロリダ、アメリカ、2017年7月26日	口頭発表
2017	国内学会	白鳥 祐介(九大水素センター/工学研究院)、坂本 美緒(九大水素センター)、Nguyen Thi Giang Huong (九大工学府)、北岡 卓也(九大農学研究院)、山川 武夫(九大農学研究院)、栗原 暁(九大農学研究院)、藤本 穰彦(静岡大学農学部)、折島 寛(マグネクス株式会社)、松原 肇(明和工業株式会社)、渡邊 美信(株式会社中山鉄工所)、中塚 修志(ダイセン・メンブレン・システムズ株式会社)、Tin Chanh Duc Doan(ベトナム国家大学ホーチミン市校・ナノテク研究所)、Chien Mau Dang(ベトナム国家大学ホーチミン市校・ナノテク研究所)、“ベトナムにおける地域バイオマス利用SOFC導入エネルギー循環システムの開発状況”、第26回SOFC研究発表会、東京、2017年12月15日	口頭発表
2018	国際学会	白鳥 祐介(九大水素センター/工学研究院)、坂本 美緒(九大水素センター)、山川 武夫(九大農学研究院)、北岡 卓也(九大農学研究院)、折島 寛(マグネクス株式会社)、松原 肇(明和工業株式会社)、渡邊 美信(株式会社中山鉄工所)、中塚 修志(ダイセン・メンブレン・システムズ株式会社)、Tin Chanh Duc Doan(ベトナム国家大学ホーチミン市校・ナノテク研究所)、Chien Mau Dang(ベトナム国家大学ホーチミン市校・ナノテク研究所)、“Biogas power generation with SOFC to demonstrate energy circulation suitable for Mekong Delta, Vietnam”、13th EUROPEAN SOFC & SOE FORUM、ルツェルン、スイス、2018年7月4日	口頭発表
2018	国内学会	白鳥 祐介(九大水素センター/工学研究院)、坂本 美緒(九大水素センター)、久保田 篤(九大工学府)、山川 武夫(九大農学研究院)、栗原 暁(九大農学研究院)、北岡 卓也(九大農学研究院)、折島 寛(マグネクス株式会社)、渡邊 美信(株式会社中山鉄工所)、松原 肇(明和工業株式会社)、中塚 修志(ダイセン・メンブレン・システムズ株式会社)、Tin Chanh Duc Doan(ベトナム国家大学ホーチミン市校・ナノテク研究所)、Chien Mau Dang(ベトナム国家大学ホーチミン市校・ナノテク研究所)、“SOFCを用いたCO2フリーエビ養殖”、第27回SOFC研究発表会、東京、2018年12月14日	口頭発表
2019	国内学会	Phuc Hoan Tu(九大工学府)、坂本 美緒(九大水素センター)、Tin Chanh Duc Doan(ベトナム国家大学ホーチミン市校・ナノテク研究所)、Chien Mau Dang(ベトナム国家大学ホーチミン市校・ナノテク研究所)、白鳥 祐介(九大水素センター/工学研究院)、“Ni-loaded ceria-zirconia microspheres for biogas reforming”、第45回固体イオニクス討論会、福岡、2019年11月26日	口頭発表

2019	国内学会	白鳥 祐介(九大水素センター/工学研究院)、坂本 美緒(九大水素センター)、久保田 篤(九大工学府)、山川 武夫(九大農学研究院)、栗原 暁(九大農学研究院)、北岡 卓也(九大農学研究院)、藤本 穰彦(静岡大学農学部)折島 寛(マグネクス株式会社)、渡邊 美信(株式会社中山鉄工所)、松原 肇(明和工業株式会社)、中塚 修志(ダイセン・メンブレン・システムズ株式会社)、Tin Chanh Duc Doan(ベトナム国家大学ホーチミン市校・ナノテク研究所)、Chien Mau Dang(ベトナム国家大学ホーチミン市校・ナノテク研究所)、“バイオガスSOFCを導入したメコンデルタにおけるエネルギー循環システム実証”、第28回SOFC研究発表会、東京、2019年12月13日	口頭発表
2019	国際学会	藤本穰彦(静岡大学農学部)、Nguyen Huu Chiem, Nguyen Van Cong, Nguyen Xuan Loc, Tran Sy Nam, Nguyen Cong Thuan(カントー大学環境資源科学部)、Nguyen Duy Can, Le Tran Thanh Liem(カントー大学農村発展学部)、Ryuji Nakayama(JICA Project Office in INT)、白鳥 祐介(九大水素センター/工学研究院)、“Restoration Channel and Waterfront Community by Effective Utilization of Local Biomass and Bio-waste Resources under the Concept of “the Most Beautiful Village in Japan”: A Case Study of Tan Phu Thanh Village, Hau Giang Province in Mekong Delta, Vietnam”、Roorkee Water Conclave 2020, IIT-Roorkee, India, 2020年2月26日～28日	口頭発表

招待講演	0 件
口頭発表	11 件
ポスター発表	0 件

②学会発表(上記①以外)(国際会議発表及び主要な国内学会発表)

年度	国内/ 国際の別	発表者(所属)、タイトル、学会名、場所、月日等	招待講演 /口頭発表 /ポスター発表の別
2014	国際学会	東 修(広大)、白鳥 祐介(九大水素センター/工学研究院)、北岡 卓也(九大農学研究院)、白川 博章(名古屋大環境学研究科)、“Zero emission system for sustainable agriculture in Asia”、AGRO'2014、高知、2014年11月26日	口頭発表
2014	国内学会	才村 綾美(九大生物資源環境科学府)、白鳥 祐介(九大水素センター/工学研究院)、北岡 卓也(九大農学研究院)“ペーパー構造体触媒による脱硫一炭化水素改質連続プロセスの開発”、第65回日本木材学会大会、東京、2015年3月17日	ポスター発表

2015	国内学会	白鳥 祐介(九大水素センター/工学研究院)、“途上国社会への実装を目指した燃料電池システム開発”、ビジネスシヨウ&エコフェア2015「循環型社会システム研究フォーラム」～九大発！再生可能エネルギー研究開発最前線～、福岡、2015年6月17日	招待講演
2015	国際学会	Tran Long Dang(九大工学府)、Tran Quang Tuyen(九大水素センター)、白鳥 祐介(九大水素センター/工学研究院)、“Catalytic and Electrochemical Behaviour of Solid Qxide Fuel Cell Operated with Simulated-Biogas Mixtures”、3rd Regional Conference on Energy Engineering (RCEnE)、インドネシア、2015年11月19日	口頭発表
2015	国際学会	白鳥 祐介(九大水素センター/工学研究院)、“Flexible Structured-Catalyst for Solid Oxide Fuel Cell Technology”、The 5th International Workshop on Nanotechnology and Application (IWNA 2015)、ベトナム、2015年11月13日	招待講演
2015	国際学会	白鳥 祐介(九大水素センター/工学研究院)、“高効率燃料電池と再生バイオガスを融合させた地域内エネルギー循環システムの構築：研究のコンセプトと今後の展開”、SATREPS国際シンポジウム「SATREPS水産養殖技術開発研究プロジェクトネットワーク」、東京、2015年12月19日	招待講演
2015	国内学会	才村綾美(九大生物資源環境科学府)、白鳥 祐介(九大水素センター/工学研究院)、北岡 卓也(九大農学研究院)、“二層積層型ペーパー構造体による脱硫－メタン水蒸気改質の連続反応”、第82回紙パルプ研究発表会、東京、2015年6月5日	ポスター発表
2015	国内学会	才村 綾美(九大生物資源環境科学府)、白鳥 祐介(九大水素センター/工学研究院)、北岡 卓也(九大農学研究院)、“金属酸化物ナノ粒子のオンペーパー合成と脱硫－メタン水蒸気改質による燃料電池用水素製造”、第52回化学関連支部合同九州大会、北九州、2015年6月27日	ポスター発表
2015	国際学会	才村 綾美(九大生物資源環境科学府)、白鳥 祐介(九大水素センター/工学研究院)、北岡 卓也(九大農学研究院)、“Sequential desulfurization and methane steam reforming of simulated biogas by dual-layered paper-structured catalysts”、9th International Paper and Coating Chemistry Symposium 2015、東京、2015年10月30日	ポスター発表
2016	国際学会	甲斐田 拓(九大工学府)、坂本 美緒(九大水素センター)、楽 豪(九大工学府)、Tran Quang Tuyen(九大水素センター)、白鳥 祐介(九大水素センター/工学研究院)、“Paper-structured catalyst for the stable operation of direct-internal reforming SOFC running on biofuels”、12th European SOFC & SOE Forum 2016、Lucerne Switzerland、2016年7月6日	ポスター発表

2016	国際学会	Tran Long Dang(九大工学府)、Tran Quang Tuyen(九大水素センター)、白鳥 祐介(九大水素センター/工学研究院)、“Numerical Evaluation of Direct Internal Reforming SOFC Operated with Biogas”、12th European SOFC & SOE Forum 2016、Lucerne Switzerland、2016年7月6日	ポスター発表
2016	国際学会	Tran Long Dang(九大工学府)、Nguyen Thi Giang Huong(九大工学府)、Tran Quang Tuyen(九大水素センター)、白鳥 祐介(九大水素センター/工学研究院)、“A Novel Approach for the Modeling of Internal Reforming SOFC Operated by CH ₄ -based Fuel”、2016 Asian SOFC Symposium、東京、2016年9月6日	ポスター発表
2016	国際学会	Nguyen Thi Giang Huong(九大工学府)、TRAN QUANG TUYEN(九大水素センター)、Tran Long Dang(九大工学府)、坂本美緒(九大水素センター)、白鳥 祐介(九大水素センター/工学研究院)、“Ni-loaded ceria-dispersed paper-structured catalyst for internal reforming solid oxide fuel cell”、2016 Asian SOFC Symposium、東京、2016年9月6日	口頭発表
2016	国内学会	白鳥 祐介(九大水素センター/工学研究院)、坂本美緒(九大水素センター)、Tran Long Dang(九大工学府)、Nguyen Thi Giang Huong(九大工学府)、Tran Quang Tuyen(九大水素センター)、“バイオガスSOFCの課題とその解決を目指した触媒材料開発”、日本機械学会 2016年度年次大会、福岡、2016年9月14日	口頭発表
2016	国内学会	Tran Long Dang(九大工学府)、坂本美緒(九大水素センター)、Tran Quang Tuyen(九大水素センター)、白鳥 祐介(九大水素センター/工学研究院)、“バイオガス直接供給時の固体酸化物形燃料電池の動作解析”、日本機械学会 2016年度年次大会、福岡、2016年9月14日	口頭発表
2016	国内学会	白鳥 祐介(九大水素センター/工学研究院)、“International cooperation for sustainable development of Mekong delta with fuel cell technology”、Vietnamese-Japanese Students' Scientific Exchange Meeting (VJSE 2016)、福岡、2016年9月17日	招待講演
2016	国際学会	Nguyen Thi Giang Huong(九大工学府)、坂本美緒(九大水素センター)、Tran Quang Tuyen(九大水素センター)、白鳥 祐介(九大水素センター/工学研究院)、“Flexible catalyst material to create a direct-hydrocarbon fuel cell”、Honda Y-E-S Forum 2016、東京、2016年11月19日	ポスター発表
2016	国際学会	Tran Long Dang(九大工学府)、Tran Quang Tuyen(九大水素センター)、白鳥 祐介(九大水素センター/工学研究院)、“A Novel Approach for the Modeling of Solid Oxide Fuel Cell Operated with Biogas”、Honda Y-E-S Forum 2016、東京、2016年11月19日	ポスター発表

2016	国内学会	甲斐田 拓(九大工学府)、坂本 美緒(九大水素センター)、Tran Quang Tuyen(九大水素センター)、佐々木 一成(九大水素センター/工学研究院)、白鳥 祐介(九大水素センター/工学研究院)、“バイオオイルのSOFC への適用を目指した水蒸気改質に関する研究”、第25回SOFC研究発表会、東京、2016年12月15日	ポスター発表
2016	国内学会	甲斐田 拓(九大工学府)、坂本 美緒(九大水素センター)、Tran Quang Tuyen(九大水素センター)、佐々木 一成(九大水素センター/工学研究院)、白鳥 祐介(九大水素センター/工学研究院)“SOFCへの適用を目指したバイオオイル水蒸気改質法に関する研究”、九州大学エネルギー研究教育機構(Q-PIT)、九州大学エネルギーウィーク2017、福岡、2017年1月31日	ポスター発表
2016	国内学会	Tran Long Dang(九大工学府)、Tran Quang Tuyen(九大水素センター)、白鳥 祐介(九大水素センター/工学研究院)、“Modeling of methane multiple reforming for simulating solid oxide fuel cell operated with biogas”、九州大学エネルギー研究教育機構(Q-PIT)、九州大学エネルギーウィーク2017、福岡、2017年1月31日	ポスター発表
2016	国内学会	Nguyen Thi Giang Huong(九大工学府)、Tran Quang Tuyen(九大水素センター)、Tran Long Dang(九大工学府)、坂本美緒(九大水素センター)、白鳥 祐介(九大水素センター/工学研究院)、“Coking tolerant structured-catalyst material for direct-hydrocarbon fuel cell”、九州大学エネルギー研究教育機構(Q-PIT)、九州大学エネルギーウィーク2017、福岡、2017年1月31日	ポスター発表
2017	国際学会	白鳥 祐介(九大水素センター/工学研究院)“Paper-structured catalyst for SOFC to realize direct conversion of biogas into electricity”、The Third International Workshop on Nano Materials for Energy Conversion (NMEC-3)、ホーチミン、ベトナム、2017年5月4日	招待講演
2017	国内学会	白鳥 祐介(九大水素センター/工学研究院)“農工・産学・国際連携によるバイオマス利用エネルギー循環システムの開発”、シンポジウム「農的エネルギーの新展開」、福岡市西区(九州大学伊都キャンパス 椎木講堂)、2017年6月5日	招待講演
2017	国内学会	白鳥 祐介(九大水素センター/工学研究院)“燃料電池の途上国への実装を可能にする廃棄物系バイオマス利用エネルギー循環システム開発”、第56回工業物理化学講習会、福岡県大野城市(九州大学 筑紫キャンパス)、2017年10月13日	招待講演

2017	国際学会	白鳥 祐介(九大水素センター/工学研究院)、“Development of Paper-Structured Catalyst for Biogas Reforming and the Progress of Vietnam-Japan Joint Research on Solid Oxide Fuel Cell”、The 6th International Workshop on Nanotechnology and Application (IWNA 2017)、ファンティエット、ベトナム、2017年11月11日	招待講演
2017	国際学会	Nguyen Q. Minh(九大水素センター/Center for Energy Research University of California, San Diego)、“Applications of Nanomaterials in Solid Oxide Fuel Cell Technology”、The 6th International Workshop on Nanotechnology and Application (IWNA 2017)、ファンティエット、ベトナム、2017年11月11日	招待講演
2017	国内学会	Nguyen Thi Giang Huong(九大工学府)、“Coking tolerant (Ce,Zr)O ₂ -dispersed structured-catalyst material for direct-hydrocarbon fuel cell”、九州大学エネルギー研究教育機構(Q-PIT)、九州大学エネルギーウィーク2018、福岡、2018年1月30日	ポスター発表
2018	国内学会	北岡卓也(九州大学・農学研究院)、紙の伝統と革新、平成30年度新技術移転事業新技術講演会(岐阜)、美濃、2019年2月22日	招待講演
2019	国内学会	江口壽彦(九大生環センター)、山川武夫(九大農院)、北岡卓也(九大農院)、白鳥祐介(九大工院)、日本生物環境工学会2019年千葉大会、千葉県松戸市(千葉大学松戸キャンパス)、2019年9月18日	ポスター発表
2019	国際学会	山川 武夫(九大農学研究院)、松原 肇(明和工業)、清水 浩之(明和工業)、久保田 篤(九大工学府)、坂本 美緒(九大水素センター)、Tran Trung Giang(カントー大学水産学部)、白鳥 祐介(九大水素センター/工学研究院)、“Methane fermentation at shrimp pond in Viet Nam Bến Tre”、第16日韓合同国際シンポジウム(AFELISA)、米子市(米子コンベンションセンターBIG SHIP)、2019年11月7日	口頭発表

招待講演	10 件
口頭発表	6 件
ポスター発表	15 件

VI. 成果発表等

(3) 特許出願【研究開始～現在の全期間】(公開)

① 国内出願

	出願番号	出願日	発明の名称	出願人	知的財産権の種類、出願国等	相手国研究メンバーの共同発明者への参加の有無	登録番号 (未登録は空欄)	登録日 (未登録は空欄)	出願特許の状況	関連する論文のDOI	発明者	発明者 所属機関	関連する外国出願 ※
No.1	2016-168037	2016/8/30	散気装置を含む散気システムとその運転方法	ダイセン・メンブレン・システムズ株式会社	国内特許・PCT、日本	無					中塚修志 平川圭一郎	ダイセン・メンブレン・システムズ株式会社	
No.2	2016-167119	2016/8/29	ペーパー状触媒およびその製造方法、ペーパー状触媒配列体並びに炭化水素の改質方法	国立大学法人九州大学	日本	無					白鳥祐介 Nguyen Thi Giang Huong・坂本美緒 Tran Quang Tuyen	国立大学法人九州大学	
No.3	2019-073275	2019/4/8	散気システムとそれを用いた水生生物の養殖方法	ダイセン・メンブレン・システムズ株式会社	日本	無					中塚修志 平川圭一郎	ダイセン・メンブレン・システムズ株式会社	

国内特許出願数 3 件
公開すべきでない特許出願数 0 件

② 外国出願

	出願番号	出願日	発明の名称	出願人	知的財産権の種類、出願国等	相手国研究メンバーの共同発明者への参加の有無	登録番号 (未登録は空欄)	登録日 (未登録は空欄)	出願特許の状況	関連する論文のDOI	発明者	発明者 所属機関	関連する国内出願 ※
No.1	PCT/JP202/002587	2021/1/26	稚エビ養殖用海水の調製方法	ダイセン・メンブレン・システムズ株式会社	PCT	無					中塚修志	ダイセン・メンブレン・システムズ株式会社	
No.2													
No.3													

外国特許出願数 1 件
公開すべきでない特許出願数 0 件

VI. 成果発表等

(4) 受賞等【研究開始～現在の全期間】(公開)

① 受賞

年度	受賞日	賞の名称	業績名等 (「〇〇の開発」など)	受賞者	主催団体	プロジェクトとの関係 (選択)	特記事項
2014	2015.3.17	優秀ポスター賞	“ペーパー構造体触媒による脱硫－炭化水素改質連続プロセスの開発”	才村綾美 (九大生物資源環境科学府)	日本木材学会	3.一部当課題研究の成果が含まれる	
2015	2015.11.20	ベストペーパー賞	“Catalytic and Electrochemical Behaviour of Solid Oxide Fuel Cell Operated with Simulated-Biogas Mixtures”	Tran Long Dang (九大工学府)	Regional Conference on Energy Engineering in conjunction with 7th International Conference of Thermofluids	1.当課題研究の成果である	
2015	2015.8.31	若手優秀発表賞(ポスター発表)	“二層積層型ペーパー構造体による脱硫－メタン水蒸気改質の連続反応”、	才村綾美(九大生物資源環境科学府)	紙パルプ技術協会	3.一部当課題研究の成果が含まれる	
2015	2016.3.15	学術研究賞	“ペーパー触媒の積層構造を反応場とするバイオガス駆動型燃料電池用水素製造”	才村綾美(九大生物資源環境科学府)	九州大学学生後援会	3.一部当課題研究の成果が含まれる	
2016	2016.11.19	Poster contest, 1st Prize	“A Novel Approach for the Modeling of Solid Oxide Fuel Cell Operated with Biogas”	Tran Long Dang (九大工学府)	Honda Y-E-S Forum 2016 (公財)本田財団	1.当課題研究の成果である	
2016	2016.11.19	Poster contest, 1st Prize	“Flexible catalyst material to create a direct-hydrocarbon fuel cell”	Nguyen Thi Giang Huong(九大工学府)	Honda Y-E-S Forum 2016 (公財)本田財団	1.当課題研究の成果である	

2018	2018.7.6	The Best Scientific Contribution, Christian-Friedrich-Schönbein medal	“Biogas power generation with SOFC to demonstrate energy circulation suitable for Mekong Delta, Vietnam”	白鳥祐介(九大水素センター/工学研究院)	13th EUROPEAN SOFC & SOE FORUM	1.当課題研究の成果である	2年に1回開催され、世界トップレベルの研究者が集う欧州最大のSOFC関連の国際学会にて、300件以上の発表の内、1件のみに与えられる最優秀賞を受賞

7 件

②マスコミ(新聞・TV等)報道

年度	掲載日	掲載媒体名	タイトル/見出し等	掲載面	プロジェクトとの関係 (選択)	特記事項
2014	2014.8.24	Viet Nam News	Organic waste to be turned into renewable energy	Environment	1.当課題研究の成果である	
2014	2014.10.23	日本経済新聞	ベトナムで汚泥発電		1.当課題研究の成果である	
2015	2015.6.16	西日本新聞	九州か全国・世界へ発信-再生可能エネルギーの研究推進-	特集	3.一部当課題研究の成果が含まれる	
2015	2015.9.23	日本経済新聞	温暖化対策 アジア支援		その他	
2015	2015.11.17	ベンチエ省テレビ局 (THBT)			1.当課題研究の成果である	
2015	2015.12.24	日刊水産経済新聞	途上国と養殖技術開発		その他	
2016	2016.9.21	Saigon Online			1.当課題研究の成果である	

2016	2016.12.1	JST News 12月号 TOPICS p15	燃料電池に関するベトナムとの 国際共同研究拠点がオープン ～メコンデルタの持続的発展に 貢献する有機性廃棄物の高効 率利用技術の開発に期待～		1.当課題研究の成果である	
2016	2016.12.19	JSTトピックス(JST HP)	メコンデルタの持続的発展に貢 献する有機性廃棄物の高効率 利用技術の開発に期待		1.当課題研究の成果である	
2016	2016.12.21	ベンチェTV	メコンデルタにおけるエネル ギー循環システム実証サイトの 開所について		1.当課題研究の成果である	
2016	2016.12.21	ベトナム国家大学 ホーチミン市校HP	メコンデルタにおけるエネル ギー循環システム実証サイトの 開所について		1.当課題研究の成果である	
2016	2016.12.21	Ben Tre省Dong Khoi新聞	メコンデルタにおけるエネル ギー循環システム実証サイトの 開所について		1.当課題研究の成果である	
2016	2016.12.22	Viet Nam News	New shrimp breeding model produces power		1.当課題研究の成果である	
2016	2017.2.20	JSTトピックス(JST HP)	ベトナム産バイオマスから製造 されたバイオガスの直接供給 による燃料電池発電に成功！ ～システム簡素化による燃料 電池の途上国展開に期待～		1.当課題研究の成果である	
2016	2017.3.15	日刊工業新聞	ダイセン・メンブレン・システム ズ、水産養殖業向け散気装置 を実証		1.当課題研究の成果である	

2016	2017.3.15	日刊工業新聞(電子版)	ダイセン・メンブレン・システムズ、水産養殖業向け散気装置を実証		1.当課題研究の成果である	
2017	2018.2.21	プレスリリース(九大HP)	東南アジア初の固体酸化物形燃料電池(SOFC)の実証研究を開始～ベトナム・メコンデルタにおいてバイオガスの供給により発電効率53%を達成～		1.当課題研究の成果である	
2017	2018.2.23	日本経済新聞(電子版)	九大、固体酸化物形燃料電池(SOFC)の実証研究を開始		1.当課題研究の成果である	
2017	2018.2.23	国立環境研究所環境展望台国内ニュース	九州大など、ベトナムのエビ養殖場でバイオガスを燃料とするSOFC発電実証を開始		1.当課題研究の成果である	
2017	2018.2.24	NHKニュース			1.当課題研究の成果である	
2017	2018.2.26	エコノハサーチ	九州大学 ベトナムのエビ養殖場内にエネルギー循環システムの実証サイト		1.当課題研究の成果である	
2017	2018.3.1	日経xTEC	バイオガスで燃料電池を稼働、発電効率53%を達成～ベトナムのエビ養殖場内にエネルギー循環システムを構築～		1.当課題研究の成果である	
2018	2018.7	九大広報	農業・水産養殖業から出る有機性廃棄物を資源として用いた世界初のエネルギー循環システムを開発 燃料電池で産業の未来、地域の暮らしを変える	フロントランナー	1.当課題研究の成果である	3,000部発行 2018年8月に開催されたオープンキャンパスにて、訪問者(高校生および父兄)全員に配布

2019	2019.8.2	プレスリリース(九大HP)	ベトナム・メコンデルタにおける 固体酸化物形燃料電池 (SOFC)の実証研究 ～バイオガスの供給により世界 最高レベルの発電効率62.5% を達成～		1.当課題研究の成果である	
2019	2019.8.2	毎日新聞(電子版)	世界最高レベルでバイオガス 発電 エビの養殖池から出る汚 泥を利用		1.当課題研究の成果である	
2019	2019.8.3	毎日新聞(電子版)	バイオガス発電 世界最高級、効率62.5% 九 大チーム、ベトナムの施設で達 成		1.当課題研究の成果である	
2019	2019.8.3	RKB毎日放送	バイオガス発電 世界最高級、効率62.5% 九 大チーム、ベトナムの施設で達 成		1.当課題研究の成果である	
2019	2019.8.9	Facebook: https://www.facebook.com/Friends.of.SATREPS/ Twitter: https://twitter.com/satreps	ベトナム・メコンデルタにおける 固体酸化物形燃料電池 (SOFC)の実証研究 ～バイオガスの供給により世界 最高レベルの発電効率62.5% を達成～		1.当課題研究の成果である	
2019	2019.8.14	日本経済新聞(電子版)	エビ養殖の廃棄物で発電、九 大が燃料電池 効率6割超		1.当課題研究の成果である	

2019	2019.8.17	朝日新聞(電子版)	福岡)燃料電池で世界最高レベルの発電効率 九大など		1.当課題研究の成果である	
2019	2019.8.17	朝日新聞(地方版)	廃棄物活用し高効率発電 九大など ベトナムで実証実験中の燃料電池		1.当課題研究の成果である	
2019	2019.9.9	みなと新聞(電子版)	九大院 エビ養殖池汚泥から電力 発電効率世界最高の6割		1.当課題研究の成果である	
2019	2019.9.11	メディア「EMIRA」	ヘドロや稲わらが原料に！ 九大がベトナムのエビ養殖池でバイオガス発電の高効率化を達成		1.当課題研究の成果である	

33 件

VI. 成果発表等

(5) ワークショップ・セミナー・シンポジウム・アウトリーチ等の活動【研究開始～現在の全期間】(公開)

① ワークショップ・セミナー・シンポジウム・アウトリーチ等

年度	開催日	名称	場所 (開催国)	参加人数 (相手国からの招聘 者数)	公開/ 非公開の別	概要
2014	7月18日	SATREPSプロジェクトJP-TEAM全体会議	JR博多シティ会議室 (日本)	31名 (0名)	非公開	当プロジェクトの実施内容とSATREPS事業の進め方について全参画機関と確認を行った。
2015	8月28日	SATREPS ベトナム・燃料電池 第1回日越合同会議	九州大学 稲盛ホール (日本)	41名 (7名)	非公開	SATREPS事業の促進の為、相手国機関より代表者を招き、各パートの進捗状況および今後の進め方について、日越双方の参画機関と討議・情報共有を行った。
2015	11月16日	Workshop on Applications of Nanotechnology in Agriculture (WANA2015)	ベトナム、ベンチ省	約200名	公開	現地行政官、水産養殖業者および住民に対して、本プロジェクトの開始およびその趣旨について英語およびベトナム語で講演を行った後、日本側専門家とステークホルダー間の技術対話を実施し、開発技術に対する理解を深める活動を行った。
2016	7月22日	SATREPS ベトナム・燃料電池 第2回日越合同会議	九州大学 稲盛ホール (日本)	48名 (8名)	非公開	SATREPS事業の促進の為、相手国機関より代表者を招き、各パートの進捗状況および今後の進め方について、日越双方の参画機関と討議・情報共有を行った。
2016	9月19日	School on Micro-Nanotechnology (MINATEC 2016)	ベトナム国家大学 ホーチミン市校 (ベトナム)	約60名	公開	ホーチミン市工科大学の学生に対して、“Development of structured-catalyst material for biogas-fuelled SOFC”の題目で2時間の集中講義を行った。
2016	10月28日	唐津市水素・再生可能エネルギー導入 促進セミナー	唐津市 (日本)	約100名	公開	市民および企業技術者を対象とした唐津市主催のセミナーにて、“廃棄物系バイオマスの高効率エネルギー利用を目指した燃料電池技術開発”を題目に、SATREPSプロジェクトに関する講演を行った。

2016	12月21日	Workshop on Applications of Nanotechnology in Agriculture (WANA2016)	ベトナム、ベンチエ省	約200名	公開	現地行政官、水産養殖業者および住民に対して、本プロジェクトの進捗状況について英語およびベトナム語で講演を行った後、日本側専門家とステークホルダー間の技術対話を実施し、開発技術に対する理解を深める活動を行った。
2017	4月14日	第45回サイエンスカフェ@ふくおか	BIZCOLI 交流ラウンジ(日本)	約40名	公開	公益財団法人九州経済調査協会(BIZCOLI)主催のセミナーにて、“「燃料電池で地球を救えるか! ?」～アイデアとその実践～」を題目に、SATREPSプロジェクトに関する講演を行った。
2017	5月3日	Short Course in Third International Workshop on Nano Materials for Energy Conversion (NMEC-3)	ベトナム国家大学 University of Science (ベトナム)	約50名	公開	ベトナム国家大学University of Science の学生に対して、“Fuel cell technology for highly efficient biomass utilization”の題目で90分の集中講義を行った。
2017	6月23日	第3回NEXT-FC基盤研究報告会	(九州大学伊都キャンパス(福岡市西区・日本))	約100名	非公開	燃料電池関連企業が集う当報告会にて、“SOFCを導入した有機性廃棄物利用エネルギー循環システム実証”と題し、SATREPSプロジェクトに関する講演を行った。
2017	7月9日	技術マネジメント・クリーンエネルギー研修	(九州大学伊都キャンパス工学研究院(福岡市西区・日本))	約30名	非公開	若手研究者育成のため、本学工学府の学生に対して、“国際技術協力プロジェクトの意義～アイデアとその実践～”という題目で、集中講義を行った
2017	11月12日	Workshop on Applications of Nanotechnology in Agriculture (WANA2017)	ベトナム、ファンティエット省	約120名	公開	現地行政官、水産養殖業者および住民に対して、本プロジェクトの進捗状況について英語およびベトナム語で講演を行った後、日本側専門家とステークホルダー間の技術対話を実施し、開発技術に対する理解を深める活動を行った。
2017	1月25日	第15回ビジネス創造交流会	博多座・西銀ビル13階 NCBリサーチ & コンサルティングセミナー室・福岡市博多区・日本	約30名	公開	九州地区の企業を対象とした西日本シティ銀行主催のセミナーにて、“廃棄物系バイオマスを利用した燃料電池導入エネルギー循環システムについて～有機性廃棄物を燃やさずに電気に変換～”を題目に、SATREPSプロジェクトに関する講演を行った。

2018	5月7日	Workshop on Applications of Nanotechnology in Agriculture (WANA2018)	ベトナム、ベンチエ省	約280名	公開	現地行政官、水産養殖業者および住民に対して、本プロジェクトの進捗状況について英語およびベトナム語で講演を行った後、日本側専門家とステークホルダー間の技術対話を実施し、開発技術に対する理解を深める活動を行った。
2018	7月13日	SATREPS ベトナム・燃料電池 第4回日越合同会議	九州大学 椎木講堂 (日本)	40名 (8名)	非公開	SATREPS事業の促進の為、相手国機関より代表者を招き、各パートの進捗状況および今後の進め方について、日越双方の参画機関と討議・情報共有を行った。
2018	9月26日	ワークショップ「アグリコラボいとしま」	九州大学 椎木講堂 (日本)	55名	公開	九州大学伊都キャンパス周辺の農業関係者(農家、JA、研究者)を対象に、「農工連携による糸島型エネルギー循環システム実証の構想について」の題目で、SATREPSの成果の日本国内への展開について講演および議論を行った。
2018	11月1日	九州大学新技術者説明会	JST 東京本部別館 ホール(日本)	約40名	公開	九州大学産学連携本部主催の九州大学新技術説明会において、「ススが出にくい 紙形状水素製造触媒を開発!」の題目で、SATREPSの成果を基に特許出願を行った技術の紹介を行った。
2018	11月6日	福岡水素エネルギー人材育成センター 平成30年度 技術者育成 セミナー 「水素入門コース」	博多バスターミナル 貸ホール 第9ホール(福岡市博多区・日本)	約30名	公開	水素関連事業に参入あるいはこれから参入を考えている県内外の企業技術者を対象に、「高効率燃料電池と再生バイオガスを融合させた地域内エネルギー循環システムの構築について」の題目で講義を行い、SATREPSにおける我々の取り組みを通して、これからの日本のエネルギーについて議論を行った。

2018	11月21日	QBファンド第6回技術交流会	SRPセンタービル (福岡市早良区・日本)	約30名	公開	九州大学を中心とする九州地域の大学発ベンチャーの創出に取り組んでいるQBキャピタル合同会社主催の技術交流会にて、投資家(福岡の事業会社、銀行など)向けに、「燃料電池とエビ養殖～我が国技術の開発途上国への実装に向けた取り組み～」の題目で、SATREPSプロジェクトに関する講演を行った。
2018	12月4日	Seminar on Climate Change and Sustainable Tropical Agriculture	カントー大学 (カントー・ベトナム)	20	公開	社会実装・ロードマップ策定グループのアウトリーチ活動として、カントー大学大学院農学研究科にて一般公開のセミナーを開催した。
2018	1月11日	第4回NEXT-FC基盤研究報告会	(九州大学伊都キャンパス(福岡市西区・日本))	約150名	非公開	燃料電池関連企業が集う当報告会にて、「バイオ燃料利用SOFCと国際展開」と題し、SATREPSプロジェクトに関する講演を行った。
2018	3月5日	Seminar on Agro-Ecosystem and Land Use	カントー大学 (カントー・ベトナム)	25名	公開	社会実装・ロードマップ策定グループのアウトリーチ活動として、カントー大学農村発展学部にて一般公開のセミナーを開催した。
2018	3月6日	Seminar on Eco-agricultural village, New Rural Villages in Mekong Delta, Vietnam	カントー大学 (カントー・ベトナム)	52名	公開	社会実装・ロードマップ策定グループのアウトリーチ活動として、カントー大学環境・資源科学部に一般公開のセミナーを開催した。
2018	3月6日	Seminar on Eco-agricultural village, New Rural Villages in Mekong Delta, Vietnam	カントー大学 (カントー・ベトナム)	52名	公開	社会実装・ロードマップ策定グループのアウトリーチ活動として、カントー大学環境・資源科学部に一般公開のセミナーを開催した。
2019	8月4日	技術マネジメント・クリーンエネルギー研修	(九州大学伊都キャンパス工学研究院(福岡市西区・日本))	約60名	非公開	若手研究者育成のため、本学工学府の学生に対して、「国際技術協力プロジェクトの意義～アイデアとその実践～」という題目で、集中講義を行った。
2019	8月27-28日	Community Biogas Technology Transfer Workshop	ベトナム、ベンチエ省	約20名	非公開	社会実装・ロードマップ策定グループの技術移転研修としてカントー大学環境・資源科学部の教員とワークショップを開催した。

2019	9月20日	Workshop on Applications of Nanotechnology in Agriculture (WANA2019)	ベトナム、ベンチエ省	約120名	公開	現地行政官、水産養殖業者および住民に対して、本プロジェクトの進捗状況について英語およびベトナム語で講演を行った後、日本側専門家とステークホルダー間の技術対話を実施し、開発技術に対する理解を深める活動を行った。
2019	12月16-17日	Community Biogas Technology Transfer Workshop	ベトナム、ベンチエ省	約20名	非公開	社会実装・ロードマップ策定グループの技術移転研修としてINT、カントー大学環境・資源科学部の教員・学生とワークショップを開催した。
2020	1月10日	第5回NEXT-FC基盤研究報告会	(九州大学伊都キャンパス(福岡市西区・日本))	約150名	非公開	燃料電池関連企業が集う当報告会にて、“バイオ燃料利用SOFCと国際展開”と題し、SATREPSプロジェクトに関する講演を行った。
2020	1月9日	Seminar on Climate Change and Sustainable Tropical Agriculture	カントー大学(カントー・ベトナム)	約20名	公開	社会実装・ロードマップ策定グループのアウトリーチ活動として、カントー大学JICA-CTUプロジェクトにて一般公開のセミナーを開催予定。
2020	1月13日	Seminar on Eco-agricultural village, New Rural Villages in Mekong Delta, Vietnam	カントー大学(カントー・ベトナム)	約50名	公開	社会実装・ロードマップ策定グループのアウトリーチ活動として、カントー大学農村発展学部にて一般公開のセミナーを開催予定。

31 件

②合同調整委員会(JCC)開催記録(開催日、議題、出席人数、協議概要等)

年度	開催日	議題	出席人数	概要
2015	11月17日	SATREPSプロジェクトの概要と進捗、今後の計画の相互理解とR/D変更事項についての承認を行う。	15名	各参画機関が、担当する活動の概要、進捗状況および今後の流れについて説明を行い、情報共有を行った。また、R/D記載事項の変更について承認を行った。

2016	1月17日	SATREPSプロジェクトの概要と進捗、今後の計画の相互理解とR/D変更事項についての承認を行う。	13名	各参画機関が、担当する活動の概要、進捗状況および今後の流れについて説明を行い、情報共有を行った。また、R/D記載事項の変更について承認を行った。
2017	11月29日	SATREPSプロジェクトの概要と進捗、今後の計画の相互理解とR/D変更事項についての承認を行う。	18名	各参画機関が、担当する活動の概要、進捗状況および今後の流れについて説明を行い、情報共有を行った。また、R/D記載事項の変更について承認を行った。
2018	1月8日	SATREPSプロジェクトの概要と進捗、今後の計画の相互理解とR/D変更事項についての承認を行う。	11名	各参画機関が、担当する活動の概要、進捗状況および今後の流れについて説明を行い、情報共有を行った。また、R/D記載事項の変更について承認を行った。
2019	2月27日	JICA終了時評価にて作成された評価レポートの確認と承認を行う。	14名	プロジェクト終了時評価において作成された評価レポートの内容について説明がなされ、主要関係者で内容の確認を行った。その後、相手国代表機関のINTおよびJICAより署名を頂き、承認がなされた。

5 件

研究課題名	高効率燃料電池と再生バイオガスを融合させた地域内エネルギー循環システムの構築
研究代表者名 (所属機関)	白鳥 祐介(九州大学 水素エネルギー国際研究センター/大学院工学研究院)
研究期間	H26採択(平成27年4月1日～令和2年3月31日)
相手国名／ 主要相手国研究機関	ベトナム社会主義共和国／ ベトナム国家大学ホーチミン市校ナノテク研究所、 カントー大学、ホーチミン市工科大学

付随的成果

日本政府、 社会、産業 への貢献	◆ 地球規模対応のグリーンインフラ技術の創出 ◆ 日本企業による成果の事業化 ◆ 農村地域等の活性化と地域間格差の是正 ◆ 我が国への養殖水産品の安定供給 ◆ 下水汚泥処理に悩む大都市圏の環境改善 ◆ バイオマスガス化技術と燃料電池技術の融合
科学技術の 発展	◆ ASEAN諸国等の開発途上国への燃料電池技術の普及 ◆ 産業活動で発生する汚泥の循環利用の促進 ◆ 燃料電池を導入したバイオマス利活用システム ◆ 生態系・生物多様性の保全に資する持続的養殖法 ◆ 養殖生産性の向上に資する水質管理・病害防止技術
知財の獲得、 国際標準化 の推進、生 物資源への アクセス等	◆ 炭素析出耐性を有するペーパー触媒 ◆ 散気装置を含む散気システムとその運転方法 ◆ 稚エビ養殖用海水の調製方法
世界で活躍 できる日本 人人材の育 成	◆ 国際的に活躍可能な日本側の若手研究者の育成(ベトナムへの留学(1年間)、国際学会誌への論文掲載、現地ワークショップ・技術講習会への参加による能力向上)
技術及び人 的ネット ワークの構 築	◆ カントー大学資源環境学部との新たな連携体制の構築 ◆ カントーの起業家(養殖事業)との社会実験の開始 ◆ 現地農業農村開発局(DARD)との協力体制の構築
成果物(提 言書、論文、 プログラム、 マニュアル、 データなど)	◆ バイオガスで作動する固体酸化物形燃料電池システム ◆ 炭素析出耐性を有するペーパー触媒 ◆ 養殖池ヘドロを種汚泥とした加温無しのメタン発酵法 ◆ SOFCおよびマイクロバブルディフューザー(MBD)を導入し、連続的に排出した養殖池ヘドロを燃料としたSOFCの発電電力でMBDを稼働し、曝気を行うエビ養殖法

上位目標

- 高効率燃料電池を導入した地域内エネルギー循環システムの普及による
- ◆ 廃棄物系バイオマスのエネルギー利用の促進による低炭素化
 - ◆ 農村地域などにおける安定的電力利用とそれに伴う生活水準の向上
 - ◆ 持続的養殖による環境負荷低減
 - ◆ ベトナムにおける新産業の創出および我が国の産業競争力の向上

システムの社会経済的・環境的效果の評価、人材育成、専門家会議やワークショップ等の参加型アプローチ等を通して、開発したエネルギー循環システムの優位性がベトナム国内で認知され、国際的なルール作りに活用される。

プロジェクト目標

- ◆ メコンデルタ地域特有のバイオエネルギーで作動する高効率燃料電池の創出
- ◆ メコンデルタ地域への受容性が高いエネルギー循環システムの実証

