

# パーム産業における未利用バイオマスの有効利用と 最適なプロセス開発

## Optimum Process Development for Utilization of Unused Biomass in Palm Oil Industry

小 熊 崇 大 資源・エネルギー・環境事業領域事業開発部  
本 村 和 也 資源・エネルギー・環境事業領域事業開発部 主査  
山 下 雅 治 資源・エネルギー・環境事業領域事業開発部 主査  
河 西 英 一 資源・エネルギー・環境事業領域事業開発部 主査  
中 山 竜太郎 技術開発本部技術基盤センター化学工学グループ

パーム油は安価な食用・材料油として生産が拡大される一方、排出される多量の廃棄物により、パーム産業自体の持続可能性が危ぶまれている。筆者らはパーム産業から排出される廃棄物を利用すべく、再生可能エネルギーとして転化するプロセスを開発した。本プロセスを安定的・合理的に運用することで、適切な廃棄物処理による環境負荷低減と、パーム産業の持続可能性に貢献できる。本稿では、マレーシアにおいてパイロット機から実機スケールのプラントを建設し、連続運転を行い、プロセス評価した結果を報告する。

The palm oil industry is expanding production as it is an inexpensive food and material oil; however, there are doubts regarding its sustainability due to the large amounts of waste generated. We have developed an optimal treatment process that converts palm industry waste into a renewable energy source. We constructed a demonstration plant to evaluate and verify our process on a commercial scale in Malaysia. This can contribute to reducing environmental impact through appropriate waste treatment and to improving the sustainability of the palm oil industry.

### 1. 緒 言

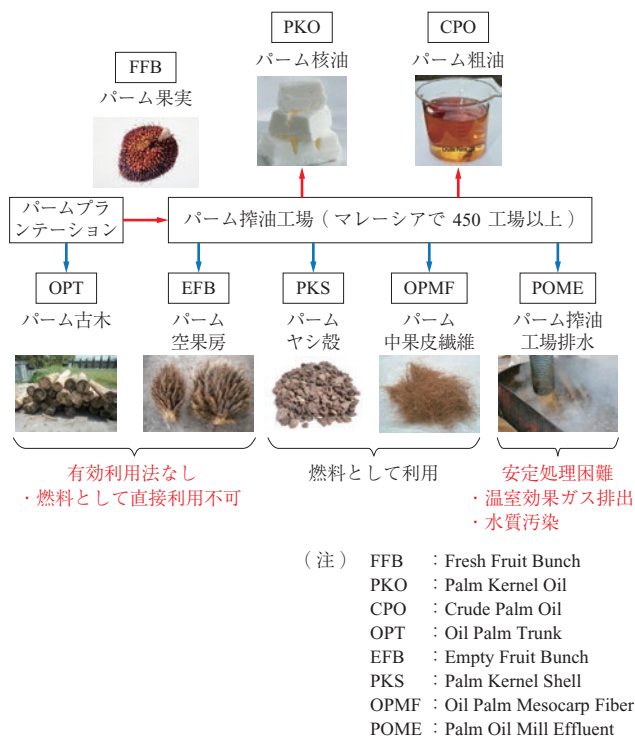
パーム油は世界に流通する植物油の約3分の1を占め、安価で大量生産が可能なことから、調理油や食品添加物などの食用油、洗剤や化粧品用の材料油、そしてバイオディーゼルなどの燃料油としての利用が拡大している。パームヤシはアフリカ原産だが、油抽出率の高さから赤道直下の国々へ移植され、現在はインドネシア、マレーシアで世界のパーム油総生産量の85%<sup>(1)</sup>を占める。発展途上国の人口増加や、オレオケミカルの発展による用途の拡大によって、パーム油の需要はますます増加しており、今後も増産傾向が続くと考えられている。

一方、パームヤシの育成からパーム搾油の拡大による環境汚染を懸念する声も年々大きくなっている。欧州では、パームヤシの拡大が間接的に温室効果ガスを増やす要因として、パーム油の燃料としての利用を段階的に禁止する方針を打ち出している。パーム油産業の持続可能性を向上するため、非営利活動法人のRoundtable on Sustainable Palm Oil(持続可能なパーム油のための円卓会議:RSPO)は、生産・流通・消費の過程を監視し、農園での生産および搾

油工場以降のサプライチェーンのそれぞれで認証を行っている。マレーシア、インドネシア政府もそれぞれMSPO(Malaysian Sustainable Palm Oil)、ISPO(Indonesian Sustainable Palm Oil)といった独自の認証制度を設けているが、パーム油産業の持続可能性を担保するには、課題が山積している。パーム油産業から排出される廃棄物は、多量で処理が難しいことも、持続可能性が問われる一因となっている。

第1図にパーム産業の製品・排出物を示す。パーム油製造工程から排出される廃棄物は、パーム空果房(Empty Fruit Bunch:EFB)、パーム搾油工場排水(Palm Oil Mill Effluent:POME)、パームヤシ殻(Palm Kernel Shell:PKS)、パーム中果皮繊維(Oil Palm Mesocarp Fiber:OPMF)が挙げられる。PKSは、カーボンフリーのバイオマス燃料として排出国内外で利用され、OPMFも排出国内で燃料として利用されている。また、パームプランテーションから排出されている廃棄物には、パーム古木(Oil Palm Trunk:OPT)、パーム枝葉がある。

これらのうちEFB、OPTは有効な利用法がないうえに、排出される量が膨大で、その発生量はマレーシア、インド



第1図 パーム産業の製品・排出物  
 Fig. 1 Waste generated from palm oil industry

ネシアだけで EFB は 5 000 万 t / 年, OPT は 6 500 万 t / 年といわれている。POME は適切な処理がなされないため、腐敗して大気中へ放散されるメタンガスはマレーシア、イ

ンドネシアで約 250 万 t / 年にのぼり, CO<sub>2</sub> 換算では 6 000 万 t / 年以上にもなる。そこで, IHI グループでは, 膨大なパームバイオマスのなかでも, 有効利用法が見いだされていない EFB, POME, OPT のパームバイオマスに着目し, 利用法を検討してきた。第2図に IHI パームバイオマス処理プロセスを示す。IHI グループが開発したプロセスでは, EFB と OPT は改質した後に燃料として有効利用し, POME は適切な排水処理の過程で残油の回収と, バイオガスのエネルギー利用ができるようになる。

## 2. 実施内容

### 2.1 EFB 有効利用法の開発

#### 2.1.1 EFB の概要と利用へ向けて

IHI グループでは, EFB を改質した後にペレット化し, ボイラ向けの再生可能燃料として利活用するプロセスを開発した。EFB ペレット製造プロセスを第3図に示す。EFB は, 油の含まれる果実 (Palm Kernel) を取り除いた後に残るパームの房である。パーム搾油工場では一般的にパーム果実 (Fresh Fruit Bunch : FFB) を 1 時間当たりに処理する量で工場規模を示す。EFB は, FFB 処理量の 20% ほど発生するとされており, たとえば毎時 60 t の FFB を処理する搾油工場では, 毎時約 12 t の EFB が発



第2図 IHI パームバイオマス処理プロセス  
 Fig. 2 IHI palm biomass treatment process



(注) \*1：定格生産能力（／系列）2 t/h（= 10 000 t／年）

第3図 EFBペレット製造プロセス  
Fig. 3 EFB pellet manufacturing process

生ずる。EFBを乾燥した後は燃やすことが可能であるが、土壌由来の栄養分（カリウムなど）が大量に含まれており、燃焼させると酸化され、酸化カリウム（ $K_2O$ ）などが多量に灰中に残る。これらの酸化物は比較的低温で溶融し、ボイラの蒸発管表面への低融点灰付着による伝熱障害を起し、流動層炉では流動媒体と絡み付き、凝集塊（アグロメレーション）を形成するなどのトラブルを引き起こしてしまう。第4図に火炉内に発生したアグロメレーションを示す。このようなトラブルを抑制するため、EFBをバイオマス燃料として用いる際には、カリウムに代表される低融点成分を前処理（脱灰処理）によって除去する必要がある。また、塩素（Cl）は炉壁や伝熱管など

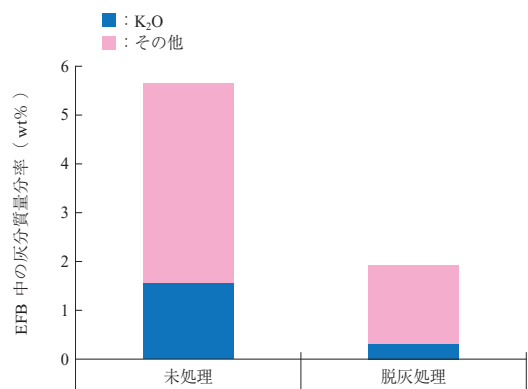
を腐食させるため、カリウムと同様に前処理によって除去することが望ましい。一般的にこれら有害成分の許容量は、バイオマス燃料の専焼と、ほかの燃料との混焼のケースで異なるが、EFBペレットについては、専焼よりも石炭やPKSなどとの混焼のニーズが多いことから、混焼を念頭に各種開発を行ってきた。

### 2.1.2 EFB脱灰プロセスの開発

燃焼時のトラブルを抑制するため、EFBのペレット製造プロセスでは、乾燥、破碎、造粒といった従来のプロセスに加え、脱灰プロセスを新たに導入した（第3図）。脱灰を行っていない通常のEFBと、開発した脱灰処理を行った後のEFBの元素組成を第5図に示す。なお、EFB



第4図 火炉内に発生したアグロメレーション  
Fig. 4 Agglomeration in boiler



第5図 脱灰プロセスによる EFB 中の灰分変化  
Fig. 5 Reduction of ash content by IHI treatment process

ペレット中の低融点成分として、特に問題となるのはカリウムであることから、ここではカリウムに着目している。分析結果から、脱灰処理によって EFB 中に含まれる灰分の総量、カリウム量ともに低減されることが確認された。

また、品質管理への適用を目的として、脱灰後の EFB ペレット中のカリウム量を予測・監視する手法についても検討を行った。

EFB ペレット中のカリウム量を直接測定する方法としては、発光分光分析法などがあるが、コストが掛かるうえにリアルタイムでの測定が困難であるため、品質の監視には不向きである。そこで IHI グループでは、ペレット中の脱灰工程より排出される廃液のカリウムイオン濃度など、連続的な測定が容易なパラメータと EFB ペレット中のカリウム濃度の関係を調べることで、廃液性状からペレット品質を予測するモデルの構築を行った。

脱灰工程では、2 段階の抽出操作を行う。EFB ペレット中のカリウムイオンの変化量と、廃液中カリウム濃度の関係は、以下の (1) ~ (3) 式で表される。したがって、EFB の処理量と廃液量および廃液のカリウムイオン濃度が分かれば、理論的にはペレット中に残存するカリウム濃度を算出することができる。

$$\frac{dC_1}{dt} = \left( \dot{m}\Delta K_1 + F_2 C_2 - F_{out} C_1 - \dot{m} \frac{MC_1}{\rho(1-MC_1)} C_1 \right) / V_1 \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{dC_2}{dt} = \left( \dot{m}\Delta K_2 - F_2 C_2 + \dot{m} C_1 - \dot{m} \frac{MC_2}{\rho(1-MC_2)} C_2 \right) / V_2 \dots\dots\dots (2)$$

$$F_{out} = F_0 + \dot{m} MC_0 - \dot{m} MC_2 \dots\dots\dots (3)$$

- C : カリウム濃度 (kg/m<sup>3</sup>)
- F : プロセス流体流量 (kg/s)
- V : 脱灰槽容量 (m<sup>3</sup>)
- $\dot{m}$  : EFB 流量 (無水) (kg/s)
- MC: 含水率 (-)
- $\Delta K$  : K 溶出量 (無水 EFB 当たり) (-)
- $\rho$  : プロセス流体密度 (kg/m<sup>3</sup>)
- $F_{out}$  は脱灰処理 1 からの廃液
- 添え字

- 1: 脱灰処理の 1 段階目
- 2: 脱灰処理の 2 段階目

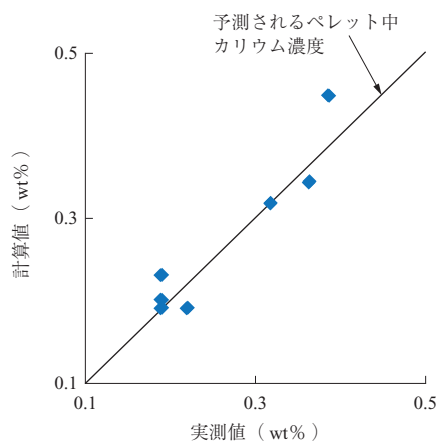
脱灰処理後の EFB 中のカリウム量の測定値と、予測モ

デルにより算出された値を比較した結果を第 6 図に示す。両者はよく一致していることが分かる。以上より、EFB ペレットの品質管理法を確立した。

### 2.1.3 EFB ペレットの燃焼試験

試作した EFB ペレットの品質を評価するため、石英管製の<sup>たて</sup> 堅型バブリング流動層 ( Bubbling Fluidized Bed : BFB ) ラボ燃焼設備において、PKS とのバッチ混焼試験を行った。試作 EFB ペレットを用い、PKS との混焼比を変化させた条件で、流動停止までの時間を測定した。流動層が固まると空気道ができ、炉床圧損が急激に減少するため、炉床圧損を観察することで、流動停止を判断することができる。試験結果を第 7 図に示す。作製した EFB ペレットを PKS に対し熱量ベースで約 70% 混焼した場合 ( Run1 ), 2 時間の連続燃焼でも流動層の停止が起らなかった。一方で、EFB ペレット約 80% の場合 ( Run2 ) では 44 分で炉内の流動が停止した。燃焼後の流動砂を観察したところ、Run1 ではアグロメレーションの痕跡はなかったが、Run2 では砂の塊が観察でき、アグロメレーションが発生したと判断した。

このように、EFB ペレットの混焼率を増加させると、ある点を境に、アグロメレーションが発生するようになる。アグロメレーションが発生しない最大の混焼率 ( 以下、限界混焼率 ) は、炉内温度や EFB ペレットに含まれる低融点成分に関係している。限界混焼率と低融点成分含有量の関係を調査するため、脱灰の程度の異なる複数の EFB ペレットを用いて PKS との混焼試験を実施した。試験の結果、EFB と PKS の混焼においては、燃料中のカリウム量と限界混焼率に強い相関があることが分かった。燃焼温度 1 000℃ におけるカリウム含有量と限界混焼率の関係を第 8 図に示す。

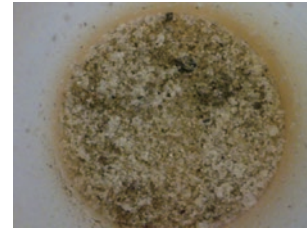


第 6 図 ペレット中カリウム濃度の予測曲線  
Fig. 6 Estimation of pellet potassium content

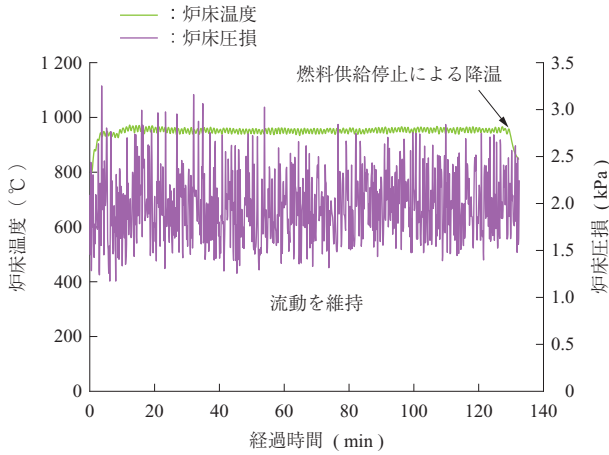
(a) Run1<sup>\*1</sup> 試験後の流動床 (アグロメレーションなし)



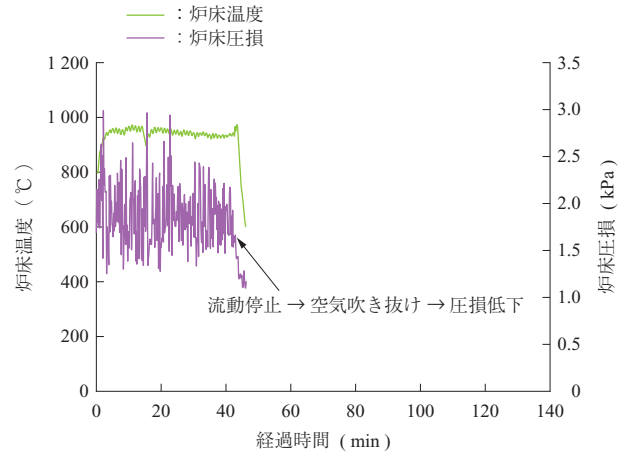
(b) Run2<sup>\*2</sup> 試験後の流動床 (アグロメレーションあり)



(c) Run1<sup>\*1</sup> における炉床温度および炉床圧損のトレンド

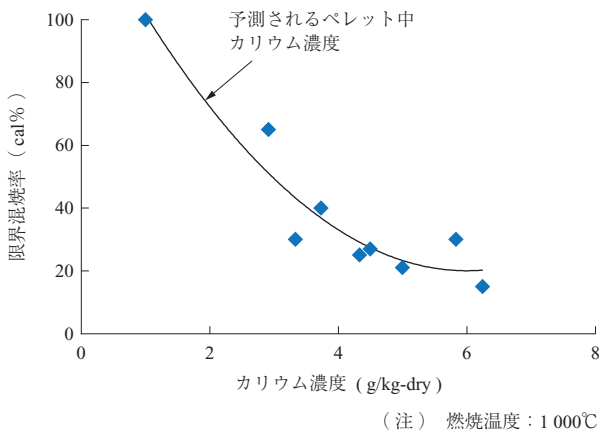


(d) Run2<sup>\*2</sup> における炉床温度および炉床圧損のトレンド



(注) \*1: EFB ペレットを PKS に対し熱量ベースで約 70% 混焼した場合  
 \*2: EFB ペレットを PKS に対し熱量ベースで約 80% 混焼した場合

第 7 図 BFB 炉での連続燃焼試験結果  
 Fig. 7 Continuous combustion test result used BFB



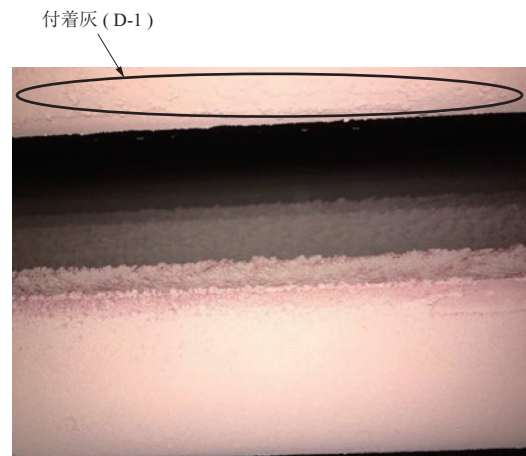
第 8 図 ペレットのカリウム濃度と限界混焼率の関係  
 Fig. 8 Maximum co-firing ratio for K pellet content

この結果から、EFB ペレットの性状に応じて、混焼可能な EFB ペレットの比率が算出できるようになった。

試験の結果を踏まえ、日本国内のお客さまへ IHI が納入した実機の循環流動層 (Circulating Fluidized Bed: CFB) ボイラにて 2 日間の燃焼試験を行い、燃焼評価とアグロメレーション、ファウリングなどの発生を確認した。EFB ペレットの混焼率は 25% とした。燃焼試験後、最終過熱器、2 次再熱器、1 次再熱器、1 次過熱器、節炭

器の各ボイラ水管への灰の付着状況を目視調査した。炉内でアグロメレーションなどが発生した痕跡はなかったが、最終過熱器で焼結灰の付着が確認された。第 9 図に最終過熱器でのスケール発生状況を示す。

この付着灰を分析するため、最終過熱器の最上部および最下部の付着灰を採取した。混焼時に採取された流動砂と飛灰、最終過熱器の最上部および最下部の付着灰を、エネ



第 9 図 最終過熱器でのスケール発生状況  
 Fig. 9 Scale of super-heater in CFB boiler

ルギー分散型 X 線分光器にて元素分析を行った。EFB 混焼率の増加とともに、飛灰中に含まれる酸化カリウムは増加傾向にあった。第 10 図に CFB ボイラ D-1 付着灰の性状調査を示す。また、最終過熱器最上部の付着灰 (D-1) (第 9 図) は、第 10 図に示すとおり、カリウム、カルシウム、硫黄にて蛍光を示し、高い濃度で全体に分布した。最終再加熱器に付着したスケールは主に Si で構成されており、EFB 中のカリウムなどによるものではないと判断した。しかし、今回の試験期間は 2 日間と短く、長期運転でのアグロメレーションやスケールの影響を確認する必要がある。

#### 2.1.4 EFB ペレット販売事業

EFB は脱灰プロセスを経ることで、炉へのダメージが少ないバイオマス燃料となり得る。実機規模の長期燃焼を行うためには、生産量を増やすとともにペレットの品質や流通を管理する必要がある。低灰化ペレットの製造と並行して実証を続けている。一方で、低灰分を安定達成するとともに、ペレットの強度を十分に確保する必要がある。連続製造をとおり、最適な製造パラメータを維持することで、品質を担保していきたい。一方で、IHI グループでは QR コードを活用した EFB ペレットの在庫管理システム

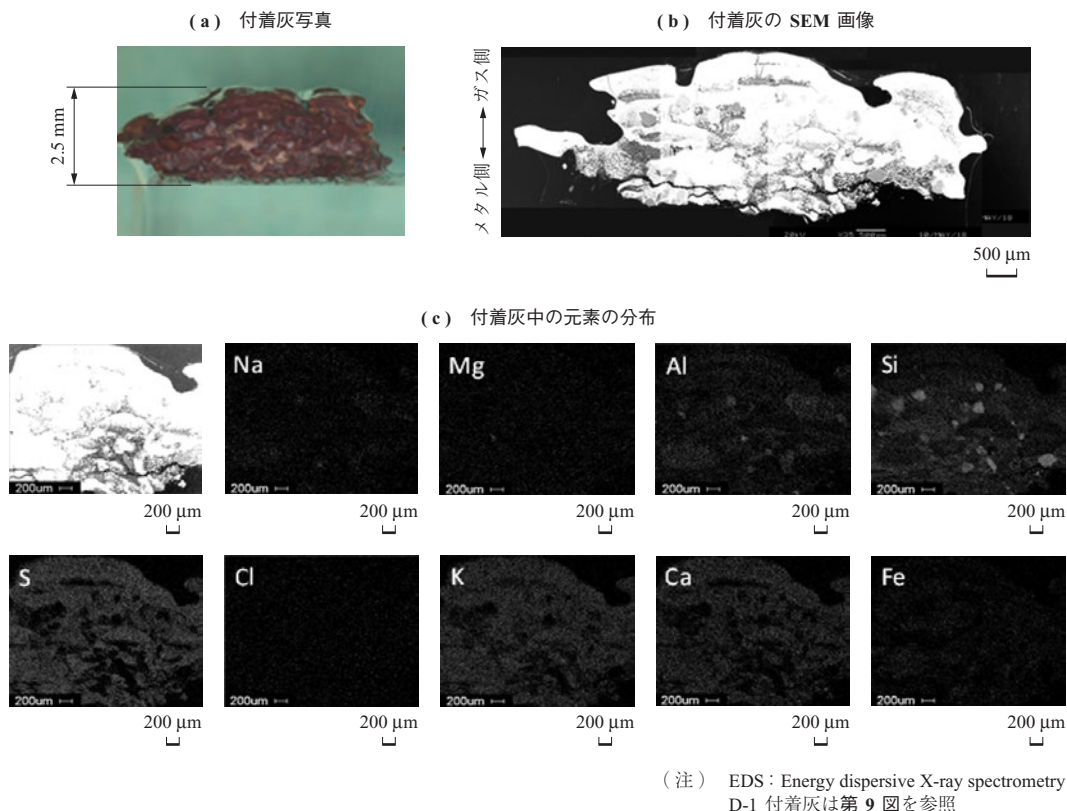
を確立している。生産した EFB ペレットをロット管理することで、サプライチェーンの徹底した管理を行い、安定供給性を高めていく。

### 2.2 POME 処理プロセスの開発

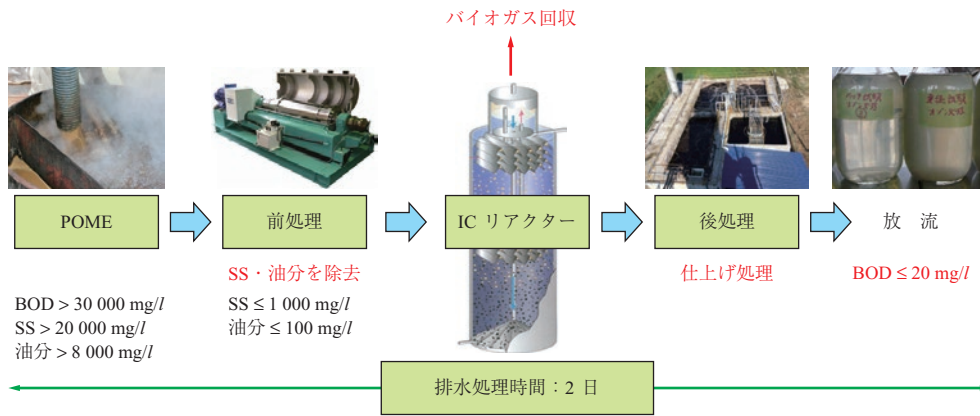
#### 2.2.1 POME 処理プロセスの構成

POME はパーム搾油工場から排出され、30 000 ~ 50 000 mg/l と日本の公共下水の 100 ~ 500 倍高い BOD (Biochemical Oxygen Demand: 生物学的酸素要求量) 値を示す高濃度排水である。POME には搾油過程で取りきれなかったパーム油や、パームバイオマス由来の木質固形分 (Suspended Solid: SS) が多く含まれ、有効な排水処理方法がなく、東南アジアにおいて水質汚染や温室効果ガスの発生源となっている。POME のような高濃度の油と SS を含む排水を処理する場合、油や SS などの不溶解成分を前処理にて除去することが望ましい。

そこで、油や SS を除く前処理と排水処理プロセスについて、ラボ試験を行い、最適なプロセスを検討した。第 11 図に POME 処理プロセスを示す。ラボ試験の結果、POME 処理プロセスは、前処理 (スクリュウデカンタ形遠心分離機 + マイクロバブル加圧浮上設備)、IC リアクター、後処理 (ポリッシングプラント) の 3 段処理を採



第 10 図 CFB ボイラ D-1 付着灰の性状調査 (EDS 測定)  
Fig. 10 Characterization of sampled D-1 ash using EDS data



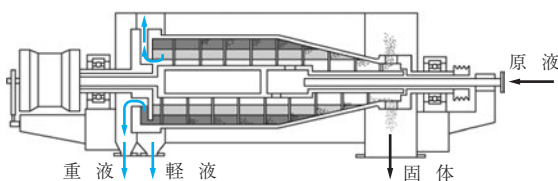
第 11 図 POME 処理プロセス  
Fig. 11 IHI POME treatment process

用した。

前処理は株式会社 IHI 回転機械エンジニアリング (IRM) 製のスクリュウデカンタ形遠心分離機とマイクロバブルを用いた無薬注加圧浮上に決定した。IRM 製のスクリュウデカンタ形遠心分離機は、3 相分離式なので重液、軽液、固体を分離できる高性能の遠心分離機である。第 12 図にスクリュウデカンタ形遠心分離機を示す。POME の場合、排水中に含まれている油分が軽液として排出され、油の回収が可能となる。固体が除かれた POME は重液として排出され、後段の排水処理設備へと送られる。遠心分離後、スクリュウにより圧密されて脱水された固体は、有機肥料としてプランテーションへ還元される。

加圧浮上設備は、既製品のマイクロバブル発生機と浮上タンクを選定して組み合わせた IHI の独自方式である。一般に加圧浮上設備では、凝集剤と呼ばれる薬品を添加し、含まれる固体を凝集させ、大型化した固体に気泡を附着させ浮上分離させるが、本プロセスではマイクロバブルを用いることで、小さな固体に対する泡の附着効率を向上させ、無薬注を実現した。東南アジアでは乾季に水が不足する場合があります。最終放流量を削減して環境負荷を下げるため、後段の好気性処理水を再利用してマイクロバブル水を作製した。

IC リアクターは、排水中に含まれる有機成分をグラ



第 12 図 IRM 製スクリュウデカンタ形遠心分離機  
Fig. 12 IRM screw decanter-type centrifuge

ニュールと呼ばれる微生物塊を用いてメタン発酵することで、有機成分の除去を行うとともに、メタンガスを中心としたバイオガスを回収する。排水処理は、好気呼吸する微生物を用いた活性汚泥法などが一般的であるが、酸素源の確保のため広い面積を曝気する必要があり、相当の電気代を必要とするため、発生した余剰微生物（汚泥）の処分費がかさむ課題がある。一方、IC リアクターを活用したメタン発酵では、曝気を必要としない嫌気条件下で排水処理が行われ、嫌気性微生物の特徴から汚泥の発生量も少ない。また、IC リアクターは、回収したバイオガスにて排水をガスリフトさせる内部循環 (Internal Circulation : IC) 機能を有している。バイオガスの発生量は排水中の有機成分に関連することから、排水濃度が高くなるとバイオガス発生量が増える。ガスリフトの発生頻度が増えることで、動力を使わず、内部循環量の自動調節が可能である。内部循環による攪拌機能の強化と、グラニュールを閉じ込める独自の 2 段セトラ構造により、IC リアクターは嫌気性リアクターとしては最高クラスの COD<sub>Cr</sub> (Chemical Oxygen Demand : 化学的酸素要求量) 容積負荷 25 kg/m<sup>3</sup>・d 以上を達成している。

後処理はエアレータを用いたポリッシングプラントにて好気性排水処理を行う。目標は、マレーシアの将来排水規制値となる BOD < 20 mg/l の達成である。IC リアクターにより排水中の大部分の有機成分は除去されているため、一部の未分解有機成分の除去を目的とした。

## 2.2.2 実証プラントによる POME 処理システムの検討

2.2.1 項で説明したプロセスについて、パイロットスケールにてプロセスを確認後、マレーシア・パハン州に第 13 図のような実機規模の実証試験設備を建設した。実証試験の目的は、次の 3 点である。



第 13 図 POME 処理実証試験設備の外観  
Fig. 13 POME treatment plant overview

(1) 将来の排水処理規制値 (BOD 20 mg/l 以下) の達成

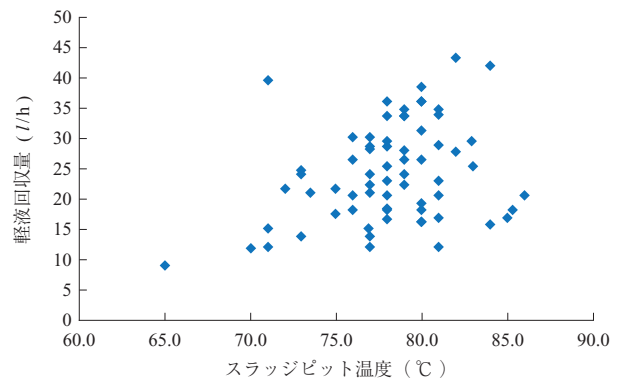
(2) 前処理にて目標油回収量の達成

(3) IC リアクターにて目標バイオガス回収量の達成

(1) ~ (3) を実機規模で達成するため、実証試験設備の設計を行った。パーム搾油工場は、FFB 処理量でおよそ 15 ~ 60 t/h の工場が一般的であり、試験設備の規模は最小の実機スケールである FFB 時間処理量 15 t に対応する設備とした。POME の排出量は、一般的に FFB 処理量の 60% 程度といわれており、定格処理量を 9 m<sup>3</sup>/時間と設定した。実証試験設備は、前処理設備のうち、スクリュウデカンタ形遠心分離機のみ、2018 年 3 月より実証試験を開始した。加圧浮上設備、IC リアクター、ポリッシングプラントを含めたフルシステムの実証試験は、2018 年 11 月から開始した。

### 2.2.3 前処理システムの連続運転

POME 処理システム前処理のうち、スクリュウデカンタ形遠心分離機は、プロセスで取り残した製品油を排水中、またはプロセスの後段から再回収することが可能であり、単独での事業性が見込まれる。その事業を早期に進めるため、スクリュウデカンタ形遠心分離機の連続運転を、他設備よりも先行して開始した。スクリュウデカンタ形遠心分離機は、IRM 製の最大遠心加速度約 35 000 m/s<sup>2</sup> の高遠心加速度モデルを採用した。第 12 図に示すとおり、分離液出口が二つあり、対象物を重液と軽液と固体の 3 相に分離できる。本機をマレーシアのパームオイル工場内に据え付け、POME の変動を観察しつつ、油回収および固体除去性能の長期データを取得した。その結果を第 14 図に示す。油の回収量は POME 原水の温度に大きく影響されることが分かった。パーム油の融点は一般に 40℃ 前後であり、組成の約半分を占めるパルミチン酸の融点は 63℃ である。スクリュウデカンタ形遠心分離機は重液 (水) よりも軽い液体 (油) を回収するため、油分



第 14 図 POME 温度と油回収量の関係  
Fig. 14 Oil recovery volume and POME temperature relationship

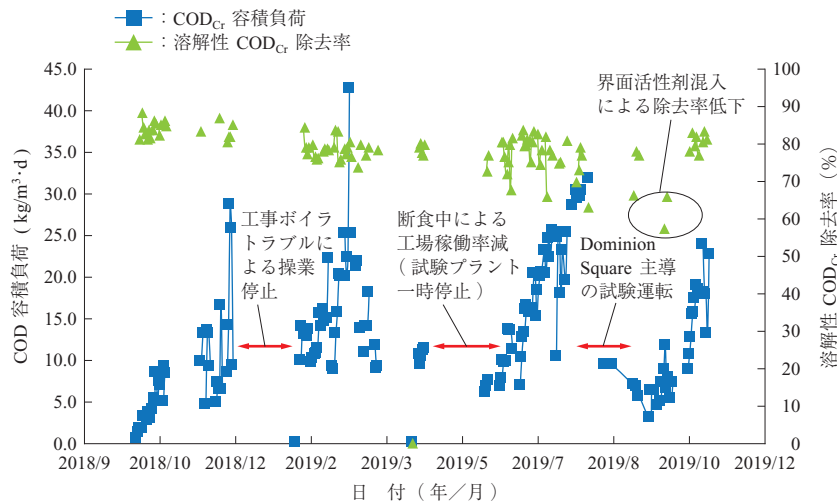
が融解して液体になっていないと回収できない。そのため、排水の温度が油回収量に大きく影響したと考えられる。油回収量は温度の影響を受けるが、それ以上に影響が大きいのは POME 中に含まれる油分濃度である。POME は主に 3 系列のプロセスから排出される合流排水のため、各プロセスの稼働状況によって排水性状が大きく異なることも分かった。スクリュウデカンタ形遠心分離機はこの変動に対応し、油分を回収することができた。

POME 処理システムは、前処理、IC リアクター、後処理の 3 段階で構成されており、フルシステムとは、一連の機器を用いた POME 処理システムを意味する。フルシステムでは、スクリュウデカンタ形遠心分離機による油回収に加え、バイオガスの回収および排水規制値の順守も重要となる。2018 年 11 月の運転開始から、バイオガスの回収量を連続監視し、理論値との比較を行った。また、将来排水規制値の評価には、BOD および簡易測定可能な COD<sub>Cr</sub> を用いた。第 15 図に連続測定結果を示す。IC リアクターの溶解性の COD<sub>Cr</sub> 除去率はおよそ 65 ~ 85% を推移し、平均値は 75% となった。溶解性の COD<sub>Cr</sub> には、難生分解性物質である色素や油が含まれる。一般に、IC リアクターの溶解性 COD<sub>Cr</sub> の除去率は 90% 前後であるが、POME には原料由来の色素が多く含まれるため、低い数値を示したと考えられる。油分は前処理において除ききれなかった成分であり、前処理設備の最適化によって事前に除去することが望ましい。

IC リアクターのバイオガス発生量は、溶解性の COD<sub>Cr</sub> 除去量によって、(4) 式で予測される。

$$\begin{aligned}
 Q_{\text{biogas expected}} &= Q_{\text{inf}} \times \text{COD}_{\text{inf}} \times (\eta_{\text{COD}} / 100) \times 0.35 / C_{\text{CH}_4} \quad \dots (4) \\
 Q_{\text{biogas expected}} &: \text{発生バイオガス量 (m}^3\text{)} \\
 Q_{\text{inf}} &: \text{流入原水量 (m}^3\text{)}
 \end{aligned}$$





第 15 図 IHI-IC リアクターによる POME 処理  
Fig. 15 POME treatment by IHI-IC reactor

$COD_{inf}$  : 流入原水  $COD_{Cr}$  濃度 (mg/l)  
 $\eta_{COD}$  :  $COD_{Cr}$  除去率 (%)  
 $C_{CH4}$  : メタンガス比率 (-)

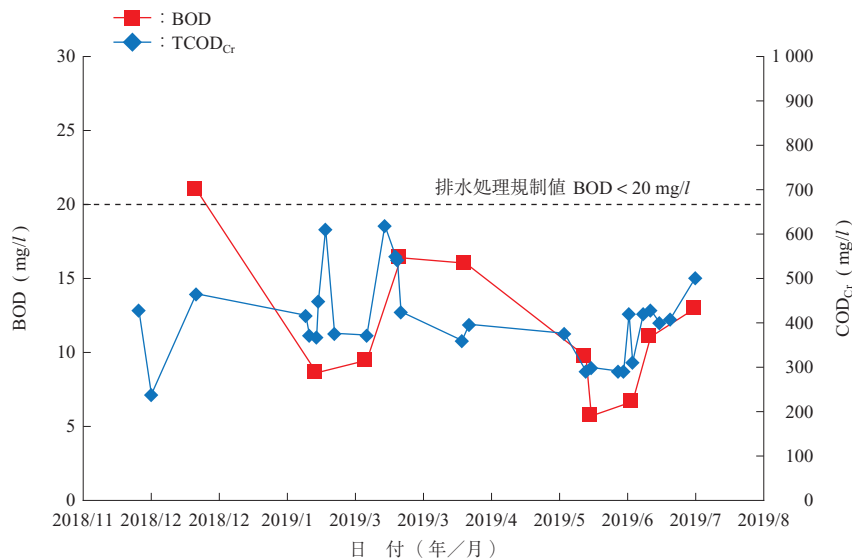
(4) 式にて算出されたバイオガス発生量を理論値とし、IC リアクターで発生したバイオガス量を実測値とし、比較を行った。本設備で発生したバイオガスに含まれるメタンガス濃度は約 80 ~ 85% であり、マレーシアで広がっている嫌気性ラグーンのメタンガス濃度 (50 ~ 60%) よりも高い数値がでた。東南アジアでは、バイオガス由来の圧縮天然ガス (Compressed Natural Gas : CNG) の活用が進められている。CNG を利用する場合、メタンガス濃度が高い方が精製設備を小型化できるため、投資を抑えることができる。以上より、IC リアクターを利用することに

より、排水処理と効率的なバイオガス回収ができることが分かった。

POME 処理設備最大の目標である、後処理後の BOD 値を第 16 図に示す。IHI-IC リアクターの設計最大負荷 25 kg $COD_{Cr}$ /m<sup>3</sup>·d 時のポリッシングプラントの処理水 BOD 値は 6.6 mg/l であった。目標は BOD が安定的に 20 mg/l を下回ることであるが、2019 年 8 月時点で約 7 か月連続で達成している。第 17 図に POME 処理プロセスによる排水浄化を示す。プロセスを経るごとに排水中の汚濁物質が除去されており、処理水を活性炭処理することで、無色透明な処理水を得られた。

#### 2.2.4 マレーシアの将来放流規制値への対応

IHI の POME 処理システムは、排水処理規制値である

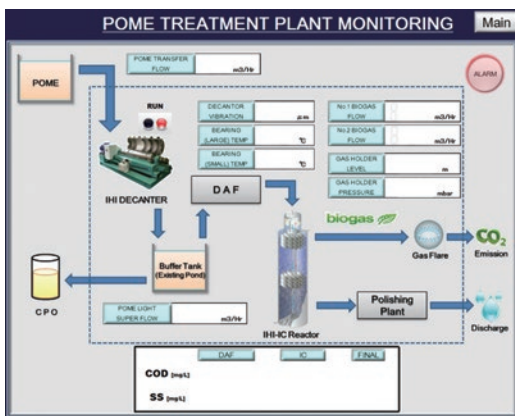


第 16 図 BOD 放流規制値の連続測定  
Fig. 16 Monitoring of final discharge BOD value



第 17 図 POME 処理プロセスによる排水浄化  
Fig. 17 Photograph of treatment by each IHI process

BOD < 20 mg/l を、膜処理を除き、唯一、安定的に達成できるシステムである。一方で、今後にわたり、マレーシアやインドネシアで事業展開を進めるには、維持管理やメンテナンス手法に不安が残る。日本において排水処理設備の管理は、1～3名程度の熟練の担当者と設備全体を管理する担当者が配置されており、ほぼ24時間体制の監視を行っている。熟練の担当者は、ICリアクターや好気性処理の管理値を基に設備の微調整を行い、性能を保全している。一方で、事業展開の場となる東南アジア諸国では、これまで、手の掛からないオープンラグーンシステム（ため池処理）を用いており、排水処理のノウハウや人材育成が進んでいない。これらの課題を解決するため、IHIグループでは連続実証試験をとおして、実証プラントの管理値を洗い直し、簡易的な遠隔管理法を模索している。第18図にI-LIPS (IHI group Lifecycle Partner System) によるPOME処理プラント遠隔監視を示す。そのために、I-LIPSを活用し、第18図のようなモニタリングシステムでプラントの遠隔監視を試みている。将来的には、故障予知、そして遠隔操作・無人運転のレベルまで処理設備の



第 18 図 I-LIPS による POME 処理プラント遠隔監視  
Fig. 18 I-LIPS remote monitoring system for POME treatment plant

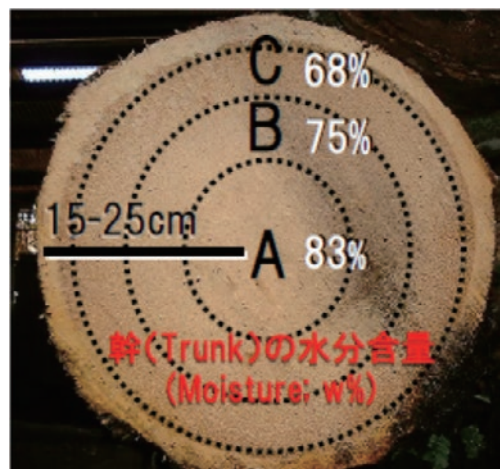
機能を向上させ、手間の掛からない安定的な有価物回収・排水処理装置として、東南アジア諸国において IHI のプレゼンスを高めていきたい。

## 2.3 OPT

### 2.3.1 OPT の概要と利用へ向けて

OPT はパーム果実が実らなくなった年老いたパーム木を意味する。パーム木は草本類に分類され、植林から3年程度で結実を開始する。結実から約20年経過すると、果実の収率が落ち始めることから、一般的に20～25年周期で計画的に伐採される。OPTの断面を第19図に示す。OPTの含水率は、70%以上と樹木と比較して高く<sup>(2)</sup>、含まれる水分はグルコースやスクロース、フルクトースを多く含む糖液である。糖液は容易に腐敗し、悪臭や水質汚染を招くだけでなく、メタンガスをはじめとする温室効果ガスの発生源となる。また、害虫や病原菌の温床としてプランテーションに病気を伝播し、パーム油の生産効率を下げる。OPT原木の残り30%は固形分で、セルロースやデンプンを豊富に含む木質であるが、乾燥させたOPT原木の密度は、平均0.35 g/cm<sup>3</sup>程度で、輸送効率が悪く、そのままでは材料としての利用も難しい。これらの木質残渣をペレット化することで、バイオマス燃料としての利用が検討されてきたが、EFBと同じく、低融点の灰分を多く含むため、そのまま燃料利用ができない。燃料利用するには、EFBと同様に、脱灰プロセスが必要となる。

また、OPTを絞る過程で発生する糖液は、高濃度の廃液として処理コストがかさみ、OPT利活用の障害となっている。OPTに含まれる糖液の有効利用法として、バイオエタノール化や糖精製が研究されてきたが、有効な打開



出 所：国立研究開発法人国際農林水産業研究センター

第 19 図 OPT の断面図  
Fig. 19 Cross section of OPT wood

策はない。そこで IHI グループでは、この糖液の有効利用法として、IC リアクターを活用したバイオガス化を検討した。第 20 図に OPT ペレット・バイオガス製造プロセスを示す。糖液は微生物を利用する IC リアクターにとって、バイオガス化しやすい排水でもあり、これまで培った排水処理設備の経験を活かせると考えた。そこで、IHI グループでは OPT 由来の残渣をバイオマス燃料へ、糖液をエネルギーへそれぞれ有効活用する第 20 図のプロセスを開発した<sup>(3)</sup>。

### 2.3.2 OPT 残渣の有効利用プロセス

IHI グループでは、OPT 残渣の燃料利用へ向けて、浸せき（脱灰）、湿式摩砕、乾燥、造粒のラボ、ベンチレベルでのプロセス開発を行った。OPT には多くの水分が含まれるため、水系の浸せき・洗浄プロセスを利用した。洗浄後の OPT には水分が多く残存するため、破碎には湿式破碎法を採用した。湿式破碎後、乾燥・造粒工程を経て、ペレットを製造した。製造したペレットの品質では一般的なバイオマス燃料の基準を満足するものであった。各プロセスの性能を確認した後、マレーシア・ジョホール州にパイロット規模の実証試験設備を建設した。第 21 図に OPT 処理実証試験設備を示す。

### 2.3.3 OPT 糖液の有効利用プロセス

OPT 残渣の有効利用プロセスと並行して、糖液の有効利用プロセスを検証した。糖液の有効利用には、IC リアクターを中心とした排水処理プロセスを応用し、バイオガス回収と排水浄化を検証した。IC リアクターの性能試験の前段階として、旧式の嫌気性メタン発酵処理方式である

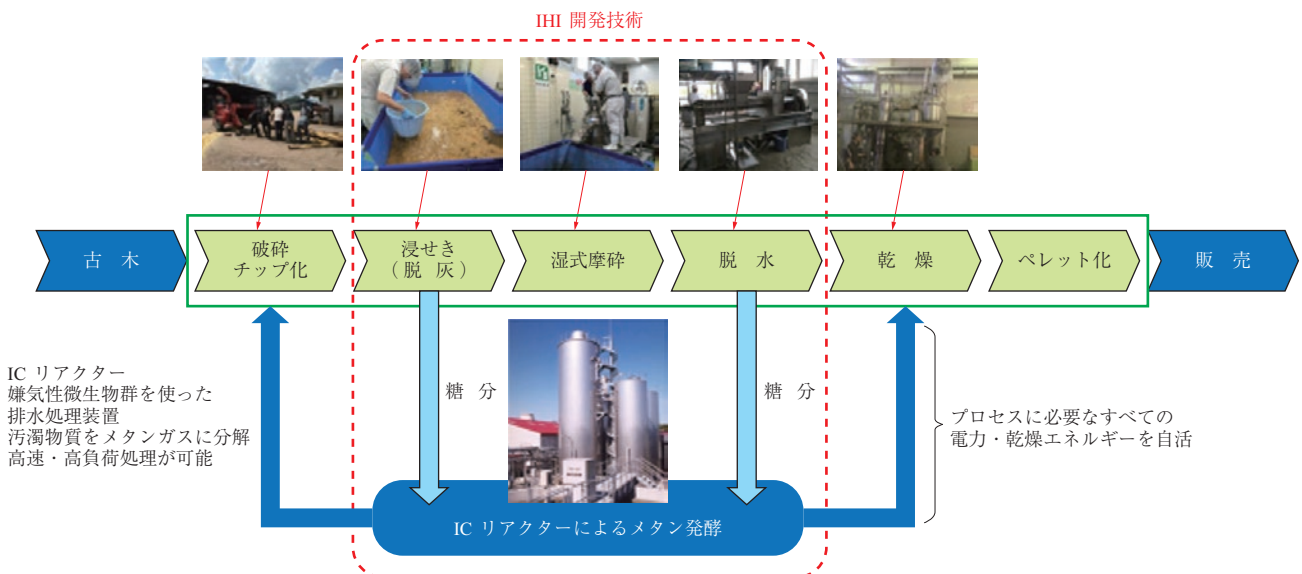


第 21 図 OPT 処理実証試験設備  
Fig. 21 OPT treatment pilot scale plant in Malaysia

UASB ( Up-flow Anaerobic Sludge Bed ) リアクターのラボ機を用い、約 60 日間の試験運転を行った。排水処理の評価には COD<sub>Cr</sub> を用い、バイオガス発生量の評価は、ラボ設備に追加したガスメータと COD<sub>Cr</sub> 除去量から見込まれるバイオガス発生量を比較・検討した。COD<sub>Cr</sub> の除去率は平均 90%、固体を除いた溶解性 COD<sub>Cr</sub> 成分においては平均 95%を達成した。また、負荷に追従したバイオガス発生が確認でき、バイオガス中のメタンガス平均濃度は 75%だった。以上の結果から、OPT の搾汁液は、IC リアクターなどの嫌気性排水処理が適用できることが分かった。嫌気性処理のなかでも、IC リアクターは高負荷・高速処理が可能で、装置が小型化できる。マレーシアでの OPT 糖液処理パイロット試験には IC リアクターを採用した。

### 2.3.4 マレーシアでのパイロット実証試験

ジョホール州に建設した実証設備は 2016 年度よりバイ



第 20 図 OPT ペレット・バイオガス製造プロセス  
Fig. 20 IHI OPT treatment process

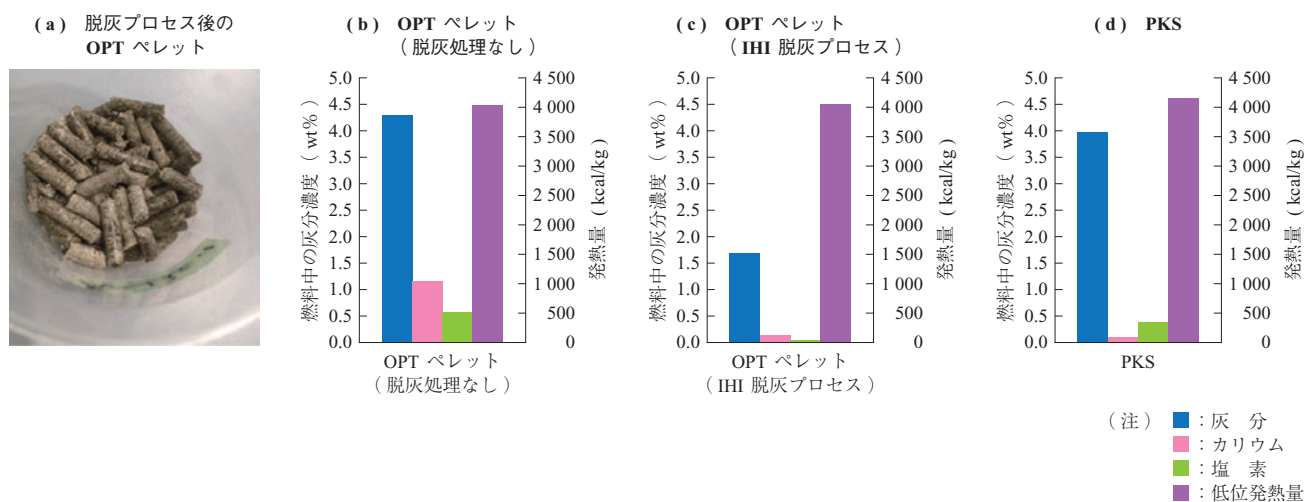
オガス回収からペレット製造設備へと順次稼働した。実証試験設備では、OPT 残渣・糖液それぞれの有効利用プロセスの確認と、スケールアップの効果について検証した。パイロット試験設備で作製したペレットのラボ燃焼試験を行った。第 22 図に OPT ペレットと PKS の性状を、第 23 図に燃焼試験でのアグロメレーションの形成を示す。日本国内に間伐材として用いられることの多いスギと比較すると、アグロメレーション発生質量比は 1.5 倍程度と高くなるが、未洗浄の OPT ペレットと比較して灰分・低融点成分は大きく減少している。パイロットスケールでも脱灰処理を施すことで、木質ペレットに近い品質の OPT ペレットを作製できた。

一方で、糖液の IC リアクター処理の結果を第 24 図に示す。3 か月の連続運転を行った結果、COD<sub>Cr</sub> 容積負荷

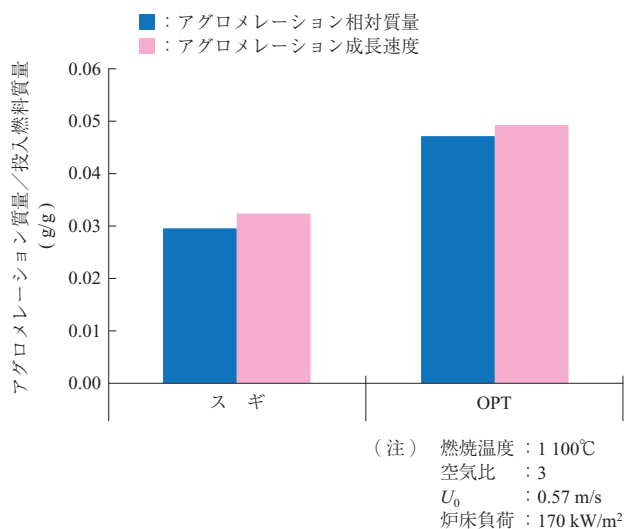
で 12 kgCOD/m<sup>3</sup>・d で糖液の安定処理が達成できた。また、発生したバイオガスの一部はバイオガス発電機に利用した。実証試験では、試験的に 50 kW・h の発電量を確認したが、OPT 処理プロセスにて発生するバイオガスを発電量に換算したところ、年間 1 万 t のペレット製造プロセスを自活できる発電量であり、カーボンフリーなバイオマス燃料を製造するうえで、意義ある結果が得られた。

### 3. IHI パームソリューション

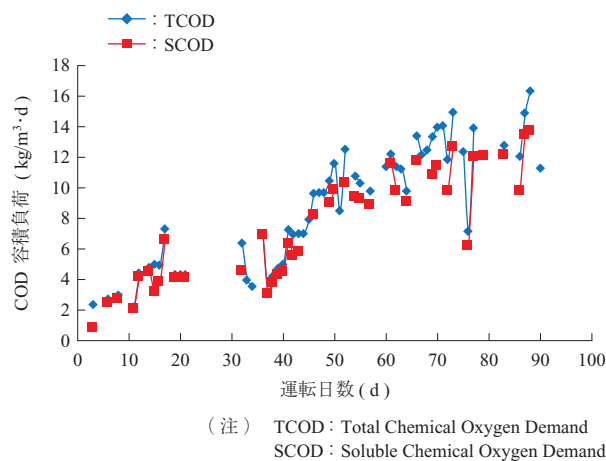
IHI グループは、EFB, POME, OPT の 3 種のパームバイオマスの処理方法を開発した。東南アジアでは、内資外資の多様な企業がこれらのバイオマスの有効利用法を検討しているが、IHI のみが 3 機種を有している。これまでの技術検討と市場調査により、3 機種のいずれも、実現の



第 22 図 脱灰プロセス後の OPT ペレット性状  
Fig. 22 OPT pellet properties after IHI process



第 23 図 OPT ペレットの燃焼試験  
Fig. 23 OPT pellet combustion test results



第 24 図 IC リアクターによる OPT 糖液の排水処理  
Fig. 24 OPT juice treatment by IC reactor

見込みがある。これら3機種は別々のプロセス開発のもと、発展した技術であるが、コラボレーションも可能であることが分かってきた。

たとえば、搾油工場より排出された EFB は油分が多く含まれ、それを圧搾・遠心分離回収することで、高効率な油回収が可能である。油分を除いた EFB はペレット化し、油回収は POME の前処理技術を応用できる。EFB から回収した油は非食油として、バイオディーゼルなどの燃料油として利用できる。

また、ペレット化技術は EFB、OPT で共通する項目も多い。共通プロセスが確立できれば、燃料需要に対し EFB-OPT の相互利用で対応できる見込みである。加えて、ペレットプロセスの開発過程で、EFB と OPT の材料利用の可能性を見いだしている。

EFB や OPT の処理プロセスから排出される廃液は、POME 処理プロセスと合流させることでも処理可能である。EFB-POME-OPT のトータルソリューションプラントでは、POME 処理設備から発生したバイオガスを利用して、EFB、OPT といったバイオマス燃料を低環境負荷で製造することも可能である。

このように、それぞれのプロセスを統合させることで、投資効率を高めるだけでなく、再生可能エネルギーを効率的に生み出し、パーム産業の持続可能性に貢献できる。

#### 4. 結 言

パーム産業より排出される EFB、POME、OPT のバイオマスの有効利用法が開発できた。EFB と OPT を適切に処理することで、東南アジアに広がる環境汚染や温室効果ガス発生を抑制し、カーボンニュートラルなバイオマス燃料として CO<sub>2</sub> の排出削減に貢献できる。POME は排水

処理とともに、残油を回収することで工場の生産性向上に貢献し、回収したバイオガスを小規模分散なエネルギー源として利用可能である。IHI では、パーム搾油産業と連携しながら、未利用バイオマスによるエネルギー製造プロセスを組み合わせることで、東南アジアのみならず世界各国へ、再生可能エネルギーを提供していく。

#### — 謝 辞 —

本研究は、多くの関係者のご協力と多くのご助言により実施されました。ラボスケールから実機スケールまで、プラントの構想、設計、建設、維持管理にご協力くださった関係各位、OPT のプロセス開発においては国立研究開発法人国際農林水産業研究センターの皆さまに深く感謝申し上げます。

#### 参 考 文 献

- (1) パーム油と森林：認定特定非営利活動法人 FoE Japan, <http://www.foejapan.org/forest/palm/index.html>, (参照 2019. 9. 5)
- (2) H. Yamada, R. Tanaka, O. Sulaiman, R. Hashim, Z. A. A. Hamid, M. K. A. Yahya, A. Kosugi, T. Arai, Y. Murata, S. Nirasawa, K. Yamamoto, S. Ohara, M. Nor M. Yusof, W. A. Ibrahim and Y. Mori : Old oil palm trunk: A promising source of sugars for bioethanol production, *Biomass and Bioenergy*, Vol. 34, Iss. 11, (2010. 11), pp. 1 608 - 1 613
- (3) 株式会社 IHI 環境エンジニアリング：パームヤシ廃材をサステナブルなバイオマス燃料へ、IHI 技報, Vol. 57, No. 1, 2017 年 3 月, pp. 16 - 19