

## 日本の環境装置産業による環境負荷低減効果について（産業排水処理編）

一般社団法人 日本産業機械工業会  
環境装置部会 環境負荷低減効果調査委員会

### 1. 国内における産業排水処理の変遷

世界の主要都市では、産業革命以降、都市人口の増加に伴って公共下水が発達したが、更なる工業化により河川の自浄作用を超えた過剰の産業排水の問題が顕著となった。

我が国においては明治時代の産業の近代化を皮切りに、時代と共に産業の発展に伴う工業化および都市化が進むにつれて、多量の有機性汚濁を含む排水の発生量が増加の一途を辿った。工場などの排水は河川や湖沼、海域の水質汚濁を引き起こし、1955（昭和30）年頃から、未処理の有害物を含んだ産業排水が主因である水俣湾の水俣病、神通川流域のイタイタイ病など「公害」が顕在化し、深刻な健康被害をもたらしたことが大きな社会問題となった。

このような社会情勢を踏まえて、我が国では高度経済成長期に水質汚濁防止に関する法令が制定され、改正を重ね現在に至っている。我が国における排水処理技術は産業の発展に伴って多種多様な要求に応じており、処理の後には環境基準を満たすように河川や海域への放流を可能としている。

### 2. 国内排水処理技術による環境負荷低減効果

発展途上国においては、急速な産業の発展に伴い水質汚濁が深刻化している地域がある。それまでの緩やかな規制とコスト等の問題から新規のより厳しい排水基準に適合する高度な排水処理技術の導入が進んでいない。その地域では不十分な処理により、環境中へ基準値を超える排水が流出している。一方、一部の産業分野においては工程から排出される高濃度に有機分を含んだ排水を広大な敷地に設けたラグーンと呼ばれる「ため池」で自然分解させる手法が採用されている。排水中の多量の有機分は微生物により嫌気性分解され、メタンガスを含むバイオガスを大気に排出するため、産業分野の温室効果ガス削減に向けた大きな課題となっている。

この課題の解決のために有機分の低減およびバイオガスの大気排出の抑制・有効利用を目的として種々取り組みが行われている。その代表例がラグーンのうち嫌気性池の上部に覆いを設けてバイオガスを回収するカバードラグーンである。しかし、広大な敷地が必要であり、急速な発展を遂げる工業地域ではよりコンパクトで効率よく処理出来る技術が求められる機運にある。

そこで、既存のカバードラグーンを採用している工場をモデルに、日本の技術を導入した場合の温室効果ガス削減についての貢献度について検討を行った。

日本の技術として、一般にUASB（上昇流嫌気性スラッジブランケット）法と称され、メタン生成に関与する微生物を数mm程度のグラニュールと呼ばれる粒体にした汚泥を処理

槽中に高濃度に保持して有機分を処理する方式あるいは浮遊型嫌気性排水処理法によりバイオガスの回収を行い、後段で「担体利用循環型散水ろ床式好気性処理」（以下、循環型散水ろ床）を行う処理フローの導入を仮定した。

また、対象の工場としては、近年生産が拡大しているキャッサバ（タピオカでん粉）工場およびパーム油工場を選定した。

### 3. キャッサバ工場排水について

キャッサバは南米原産のトウダイグサ科イモノキ属の多年生植物である。古くから芋を中心に食用として栽培され、現在はアフリカ、アジア、南米の熱帯を中心に普及している。国際連合食糧農業機関（FAO）によればキャッサバは2018年には世界で約2億8,000万トンが生産され（作付面積約2,500万ha）、そのうちアフリカが約6割の1億7,000万トン（同約1,900万ha）を占め、アジアが約8,100万トン（同約380万ha）、南米が約2,500万トン（180万ha）とこの3地域でほぼ100%に達する（図1）。

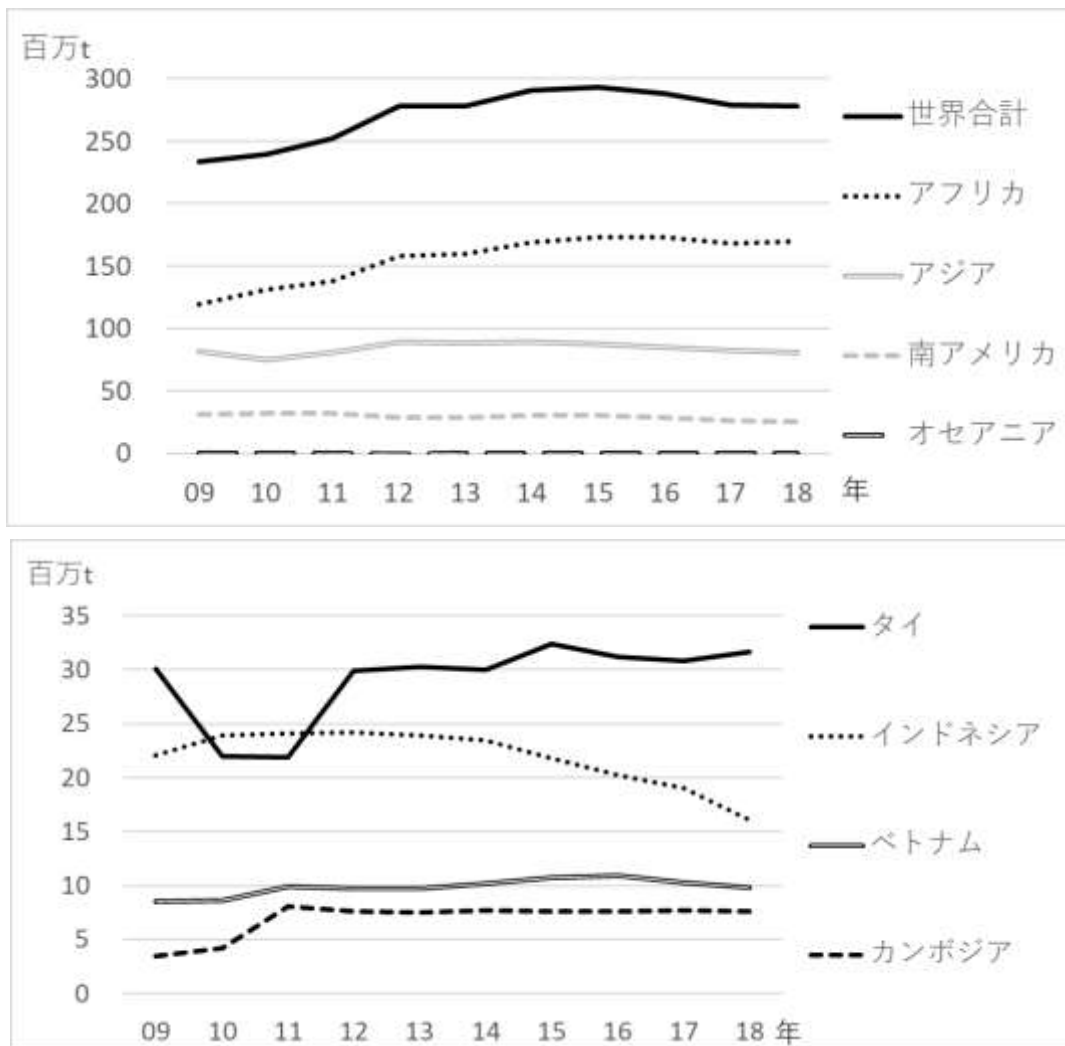


図1. 世界およびアジアの主要な地域におけるキャッサバ生産量の10年間の推移（国際連合食糧農業機関（FAO）公表値より作成）

キャッサバは植物全体にシアン系の毒を有することや、腐りやすく保存が難しいことから生食用は限定的であり、産業利用での加工利用が主となっている。加工利用の主な用途は工業用でん粉、チップ・ペレット、バイオエタノールであり、主にアジアを中心に取引されている。アジアにおいてはタイが生産量の4割に相当する約3,200万トンを生産しており、次いでインドネシア（約1,600万トン）、ベトナム（約1,000万トン）、カンボジア（約800万トン）と続く。タイやインドネシアにおいてはキャッサバ加工品のうち、6~7割程度がでん粉（タピオカでん粉）利用であり<sup>（農畜産業振興機構）</sup>、主に中国や日本などへ輸出している。日本において、でん粉は食品のみならず、医薬・化粧品や製紙など各種工業で利用されている。

キャッサバからでん粉を作る際の製品収率は20%程度であり<sup>（農畜産業振興機構）</sup>、洗浄、皮むき、粉碎、ふるい、分離、乾燥という加工の工程で加工残さ（皮・欠片、搾りかす）や洗浄排水やでん粉排水といったキャッサバ加工排水が排出される。加工残渣に関して一部は家畜飼料やバイオエタノール原料等として有効利用されているほか、排水についても一部ではカバードラグーン等により、バイオガスを回収し工場内で乾燥用のガスボイラや所内電力向けのガス発電に利用している<sup>（環境科学会誌論文）</sup>。しかしながら、前述のとおり中小工場を中心にラグーン内の嫌気性池の上部を覆わずに大気に直接排出したりする事例もまだ多いとみられる。タイ国においては金融支援や税制優遇、環境規制強化などの取り組みにより、90%以上のキャッサバでん粉工場がバイオガス回収法が導入されているが、現状では理論値の4割程度しか回収できていないという報告もある<sup>（タイ国論文）</sup>。キャッサバ加工排水は有機分を多量に含んでおり、排水中の有機分濃度を示す化学的酸素要求量COD<sub>Cr</sub>の値は20,000mg/L程度となる例も多い<sup>（環境科学会誌論文）</sup>（日本における海域及び湖沼に排出される排水の一律排水基準はCOD<sub>Mn</sub>160mg/L<sup>（環境省HP）</sup>）。

### 3.1 モデルケースでの温室効果ガス削減の効果試算

ここでキャッサバを日量500トン処理する大規模キャッサバでん粉工場を例にとり、カバードラグーンでバイオガスを回収している現況ケースと日本の技術を導入してバイオガスをより効率的に回収し有効利用するモデルケースとで比較を行い、日本の技術の適用による温室効果ガス削減の貢献度を以下にて算出する。試算の結果、設定した現状に比べ1日当たり80トン弱も削減となり、年間で300日稼働した場合、2万3,000トン程度の温室効果ガス削減効果が見積もられる。

環境科学会誌論文などの数値を基に次のとおり算出を行った。工場の操業時間を1日8時間、年間300日と設定し、現況ケースでは図2のように排水は全てラグーンを経由して河川等の公共水域に放流され、排水中の有機分はラグーン内の嫌気性池でバイオガス（メタン濃度60%、二酸化炭素濃度40%）に変換されるとする。

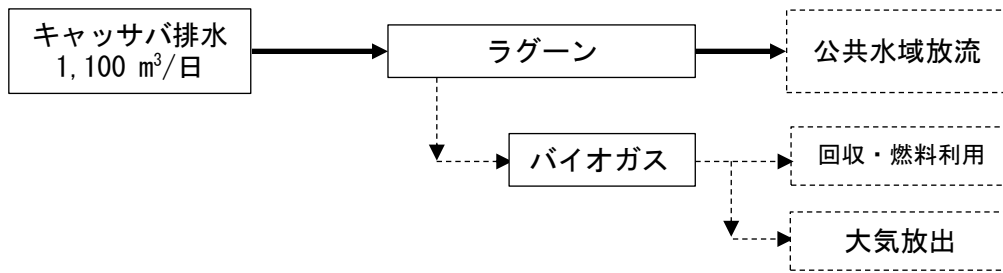


図 2. 現況ケースの排水処理状況（矢印太線：水処理、破線：ガス）

1) 現況ケースで発生する温室効果ガス

(1) 排水の発生量

現況ケースにおいて発生する排水

$$\text{排水発生量} = \text{原料あたり発生排水量} \times \text{処理能力}$$

項目	単位	数値	根拠
原料 t あたり発生排水量	m <sup>3</sup> /t	2.2	環境科学会誌論文 P. 63 図 10
処理能力	t/日	500	設定値

排水の発生量は以下となる。

項目	単位	数値
排水発生量	m <sup>3</sup> /日	1,100

(2) メタン (CH<sub>4</sub>) の理論発生量

現況ケースにおける、ラグーン内で排水中の有機分の嫌気性発酵に伴うメタン発生量

$$E_{CH_4 \text{ 全体}} = \text{排水発生量} \times \text{排水のCOD濃度} \times \text{COD分解効率} \times \text{メタン理論発生量} \times 10^{-6}$$

項目	単位	数値	根拠
排水発生量	m <sup>3</sup> /日	1,100	
排水の COD 濃度	mg/L	20,000	環境科学会誌論文 P. 63 表 3
COD 分解効率	%	75	設定値
メタン理論発生量	NL/kgCOD	350	理論値

現況ケースにおいて排水中の有機分の嫌気性発酵に伴うメタン発生量は以下となる。

項目	単位	数値
$E_{CH_4 \text{ 全体}}$	Nm <sup>3</sup> /日	5,775

(3) 現況でのメタンガス利用による GHG 削減量

(2) で算出したメタンガス理論発生量のうちエネルギーとして回収出来る熱量

$$\text{回収熱量}_{(現況)} = E_{CH_4 \text{ 全体}} \times \text{メタン回収利用率} \times \text{メタン発熱量} \times \text{エネルギー効率}$$

ここで、メタン回収利用率はについて文献を調査したがまとまった数値はなかった。そこで当委員会にて数値を設定した。

項目	単位	数値	根拠
メタン回収利用率	%	40	当委員会の設定値
メタン発熱量	MJ/Nm <sup>3</sup>	35.739	国交省ガイドライン P. 178 (メタン濃度 100%)
エネルギー効率		0.8	設定値

現況ケースでのメタンガス利用による回収熱量は以下となる。

項目	単位	数値
$\text{回収熱量}_{(現況)}$	メタンガス理論発生量のうちエネルギーとして回収出来る熱量	MJ/日 66,046

また、回収した熱量を重油炊きボイラの熱源に利用したと仮定した場合の GHG 削減量(二酸化炭素換算)は次のとおり算出した。

$$\text{回収熱量}_{(現況 \cdot CO_2 \text{ 換算})} = \text{回収熱量}_{(現況)} \times C \text{ 重油の排出係数 (MJ あたり)}$$

項目	単位	数値	根拠
C 重油の排出係数 (MJ あたり)	tCO <sub>2</sub> /MJ	0.000074	次のとおり

$$C \text{ 重油の排出係数 (MJ あたり)} = C \text{ 重油の標準炭素排出係数 (発熱量あたり)} \times 44/12 \times 10^{-6}$$

項目	単位	数値	根拠
C 重油の標準炭素排出係数 (発熱量あたり)	tC/TJ	20.17	標準発熱量一覧表
二酸化炭素の分子量	g-CO <sub>2</sub> /mol	44	
炭素の原子量	g-C/mol	12	

現況ケースでのメタンガス利用による回収熱量は CO<sub>2</sub> 換算で以下となる。

項目	単位	数値
$\text{回収熱量}_{(現況 \cdot CO_2 \text{ 換算})}$	現況におけるバイオガス利用による GHG 削減量	tCO <sub>2</sub> /日 4.9

(4) 発生メタンの大気放出

(2) で算出したメタンガス理論発生量のうち、利用していない残りの 60% を大気放出しているとした場合のメタンの大気放出量

$$E_{CH_4(現況 \cdot CO_2 \text{ 換算})} = E_{CH_4 \text{ 全体}} \times (100 - \text{メタン回収利用率}) \\ \div \text{標準状態体積} \times \text{メタンの分子量} \times GWP_{CH_4} \times 10^{-3}$$

項目	単位	数値	根拠
メタン回収利用率	%	40	前述の設定値
標準状態体積	L/mol	22.4	
メタンの分子量	g-CH <sub>4</sub> /mol	16	
$GWP_{CH_4}$	CH <sub>4</sub> の温暖化係数	tCO <sub>2</sub> / tCH <sub>4</sub>	28 AR5

現況ケースにおいて大気に放出されるメタンは CO<sub>2</sub> 換算で以下となる。

項目	単位	数値
$E_{CH_4(現況 \cdot CO_2 \text{ 換算})}$	現況で一日あたりに大気放出されるメタン (CO <sub>2</sub> 換算)	tCO <sub>2</sub> /日 69.3

(5) 現況ケースで発生する正味の温室効果ガス

温室効果ガスの算出に当たっては、メタンの大気放出とエネルギー回収の差で求めた。

$$E_{GHG(現況)} = E_{CH_4(現況 \cdot CO_2 \text{ 換算})} - \text{回収熱量}_{(現況 \cdot CO_2 \text{ 換算})}$$

項目	単位	数値
$E_{CH_4(現況 \cdot CO_2 \text{ 換算})}$	現況で一日あたりに大気放出されるメタン (CO <sub>2</sub> 換算)	tCO <sub>2</sub> /日 69.3
$\text{回収熱量}_{(現況 \cdot CO_2 \text{ 換算})}$	現況におけるバイオガス利用による GHG 削減量	tCO <sub>2</sub> /日 4.9

現況ケースで発生する温室効果ガスの正味の排出量は以下となる。

項目	単位	数値
$E_{GHG(現況)}$	現況ケースにおける正味の温室効果ガス排出量	tCO <sub>2</sub> /日 64.4

2) モデルケースで発生する温室効果ガス

一方で図 3 のように日本の技術を取り入れ、UASB から発生したメタンガスを全量エネルギーとして回収出来るとする。

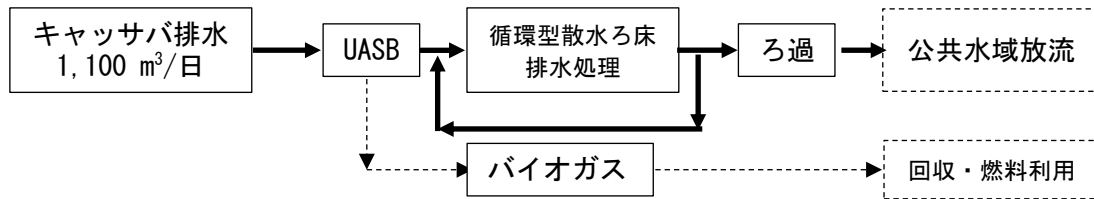


図3. モデルケースのキャッサバ排水処理フロー（矢印太線：水処理、破線：ガス）

(1)メタン (CH<sub>4</sub>) の理論発生量

「1) 現況ケースで発生する温室効果ガス」と計算は同様。

(2)モデルケースでのメタンガス利用による GHG 削減量

(1)で算出したメタンガス理論発生量のうちエネルギーとして回収出来る熱量

$$\text{回収熱量}_{(\text{モデル})} = E_{\text{CH}_4 \text{ 全体}} \times \text{メタン発熱量} \times \text{エネルギー効率}$$

項目	単位	数値	根拠
メタン発熱量	MJ/Nm <sup>3</sup>	35.739	国交省ガイドライン P.178 (メタン濃度 100%)
エネルギー効率		0.8	設定値

モデルケースでメタンガス利用による回収熱量は以下となる。

項目	単位	数値
回収熱量 <sub>(モデル)</sub>	メタンガス理論発生量のうちエネルギーとして回収出来る熱量	MJ/日 165,114

また、回収した熱量を重油炊きボイラの熱源に利用したと仮定した場合の GHG 削減量 (二酸化炭素換算) は次のとおり算出した。

$$\text{回収熱量}_{(\text{モデル} \cdot \text{CO}_2 \text{ 換算})} = \text{回収熱量}_{(\text{モデル})} \times C_{\text{重油の排出係数}} (\text{MJ あたり})$$

項目	単位	数値	根拠
C 重油の排出係数 (MJ あたり)	tCO <sub>2</sub> /MJ	0.000074	次のとおり

$$C_{\text{重油の排出係数}} (\text{MJ あたり}) = C_{\text{重油の標準炭素排出係数}} (\text{発熱量あたり}) \times 44/12 \times 10^{-6}$$

項目	単位	数値	根拠
C 重油の標準炭素排出係数 (発熱量あたり)	tC/TJ	20.17	標準発熱量一覧表
二酸化炭素の分子量	g-CO <sub>2</sub> /mol	44	
炭素の原子量	g-C/mol	12	

モデルケースでメタンガス利用による回収熱量は CO<sub>2</sub> 換算で以下となる。

項目	単位	数値
回収熱量 (モデル・CO <sub>2</sub> 換算)	モデルケースにおけるバイオガス利用による GHG 削減量	tCO <sub>2</sub> /日 12.2

(3) 電力消費に伴う発電由来の二酸化炭素排出

ポンプ等の補機類の動力で必要となる電力について、消費に伴い化石燃料由来の二酸化炭素が排出されるため次のとおり算出した。

a. UASB のポンプの消費電力量

UASB で使用されるポンプの消費電力量

$$\text{ポンプ動力} = 0.163 \times \text{水量 } Q(\text{m}^3/\text{min}) \times \text{揚程 } H(\text{m}) / \text{ポンプ効率 } \eta$$

項目	単位	数値	根拠
水量 Q	m <sup>3</sup> /min	0.764	排水発生量 1,100 (m <sup>3</sup> /日) / 24/60
揚程 H	m	5	設定値
ポンプ効率 $\eta$		0.75	設定値

モデルケースにおける UASB のポンプの消費電力量は以下となる。

項目	単位	数値	備考
ポンプ動力	kWh/日	20	24 時間 365 日稼働と仮定

b. 循環型散水ろ床の消費電力量

循環型散水ろ床の消費電力量は次の式で算出した。

$$\text{循環型散水ろ床の消費電力量} = \text{流量当たりの消費電力量} \times \text{一日当たりの排水発生量}$$

項目	単位	数値	根拠
流量当たりの消費電力量	kWh/m <sup>3</sup>	0.13	以下、参照
一日当たりの排水発生量	m <sup>3</sup> /日	1,100	

※流量当たりの消費電力量については、高知市下知水再生センターおよび須崎市終末処理場の視察結果を基に検討した。視察において得られた消費電力原単位は 0.105kWh/m<sup>3</sup> であった。このうち循環ポンプ（流入+返送）の寄与分は 0.050kWh/m<sup>3</sup>（返送率 夏季：100%、冬季：200%）あり、今回の検討では返送率 200%とすることから、循環ポンプの寄与分の増加を 0.050 × 0.5 = 0.025kWh/m<sup>3</sup> と仮定。冬季の水温低下はないものとし、計算に使用する原単位を通年で 0.105 + 0.025 = 0.13kWh/m<sup>3</sup> とした。



よってモデルケースにおける循環型散水ろ床の消費電力量は以下となる。

項目	単位	数値
循環型散水ろ床の消費電力量	kWh/日	143

c. 補機類の消費電力量

上述の a および b の合計値として、モデルケースにおける消費電力量を算出した。

補機類の電力消費量 = ポンプ動力 + 循環型散水ろ床の消費電力量

項目	単位	数値
ポンプ動力	kWh/日	20
循環型散水ろ床の消費電力量	kWh/日	143

補機類の消費電力量は以下となる。

項目	単位	数値
補機類の消費電力量	kWh/日	163

補機類の消費電力由来の二酸化炭素発生量は次のとおり算出される。

$$E_{GHG(\text{モデル} \cdot \text{電力} \cdot \text{CO}_2 \text{ 換算})} = \text{補機類の消費電力量} \times \text{電力量変換係数} \\ \times \text{C重油の排出係数 (MJあたり)} \times 10^{-3}$$

項目	単位	数値	根拠
補機類の消費電力量	kWh/日	163	
電力変換係数	MJ/MWh	3,600	
C重油の排出係数 (MJあたり)	tCO <sub>2</sub> /MJ	0.000074	次のとおり

$$\text{C重油の排出係数(MJあたり)} = \text{C重油の標準炭素排出係数(発熱量あたり)} \times 44/12 \times 10^{-6}$$

項目	単位	数値	根拠
C重油の標準炭素排出係数 (発熱量あたり)	tC/TJ	20.17	標準発熱量一覧表
二酸化炭素の分子量	g-CO <sub>2</sub> /mol	44	
炭素の原子量	g-C/mol	12	

モデルケースにおける補機類の消費電力量由来の温室効果ガス排出量は以下となる。

項目	単位	数値	
$E_{GHG}$ (モデル・電力・CO <sub>2</sub> 換算)	モデルケースにおける補機類の消費電力量 (CO <sub>2</sub> 換算)	tCO <sub>2</sub> /日	0.04

(4) モデルケースで発生する正味の温室効果ガス

温室効果ガスの算出に当たっては、補機類の消費電力由来の温室効果ガス発生量とエネルギー回収の差で求めた。

$$E_{GHG}(\text{モデル}) = E_{GHG}(\text{モデル} \cdot \text{電力} \cdot \text{CO}_2 \text{換算}) - \text{回収熱量}(\text{モデル} \cdot \text{CO}_2 \text{換算})$$

項目		単位	数値
$E_{GHG}(\text{モデル} \cdot \text{電力} \cdot \text{CO}_2 \text{換算})$	モデルケースにおける補機類の消費電力量(CO2換算)	tCO <sub>2</sub> /日	0.04
$\text{回収熱量}(\text{モデル} \cdot \text{CO}_2 \text{換算})$	モデルケースにおけるバイオガス利用によるGHG削減量	tCO <sub>2</sub> /日	12.2

モデルケースで発生する温室効果ガスの正味の排出量は以下となる。

項目		単位	数値
$E_{GHG}(\text{モデル})$	モデルケースにおける正味の温室効果ガス量	tCO <sub>2</sub> /日	-12.2

3) 現況ケースとモデルケースの比較

現況ケースで発生する温室効果ガス及びモデルケースを導入した場合の温室効果ガス削減効果から次のとおり現況ケースとモデルケースの温室効果ガス排出量を算出した。

$$\text{削減出来る温室効果ガス量} = E_{GHG}(\text{現況}) - E_{GHG}(\text{モデル})$$

項目		単位	数値
$E_{GHG}(\text{現況})$	現況ケースにおける正味の温室効果ガス量	tCO <sub>2</sub> /日	64.4
$E_{GHG}(\text{モデル})$	モデルケースにおける正味の温室効果ガス量	tCO <sub>2</sub> /日	-12.2

現況ケースに対してモデルケースを当てはめると、次のように温室効果ガス量が削減出来る。

項目	単位	数値
削減出来る温室効果ガス量	tCO <sub>2</sub> /日	76.6

なお、この計算を年間で300日稼働した場合で試算すると次のとおり現況ケースでは年間の排出量が19,325トン、モデルケースでは-3,650トンとなることから年間で約23,000トンの削減が見込まれる(図4)。

$$\begin{aligned} \text{削減出来る温室効果ガス量(年間)} &= \text{現況ケースにおける正味の温室効果ガス量(年間)} \\ &\quad - \text{モデルケースにおける正味の温室効果ガス量(年間)} \end{aligned}$$

項目	単位	数値	根拠
現況ケースにおける正味の温室効果ガス量（年間）	tCO <sub>2</sub> /年	19,325	$E_{GHG}$ （現況） × 300 日/年
モデルケースにおける正味の温室効果ガス量（年間）	tCO <sub>2</sub> /年	-3,650	$E_{GHG}$ （モデル） × 300 日/年

項目	単位	数値
削減出来る温室効果ガス量（年間）	tCO <sub>2</sub> /年	22,975

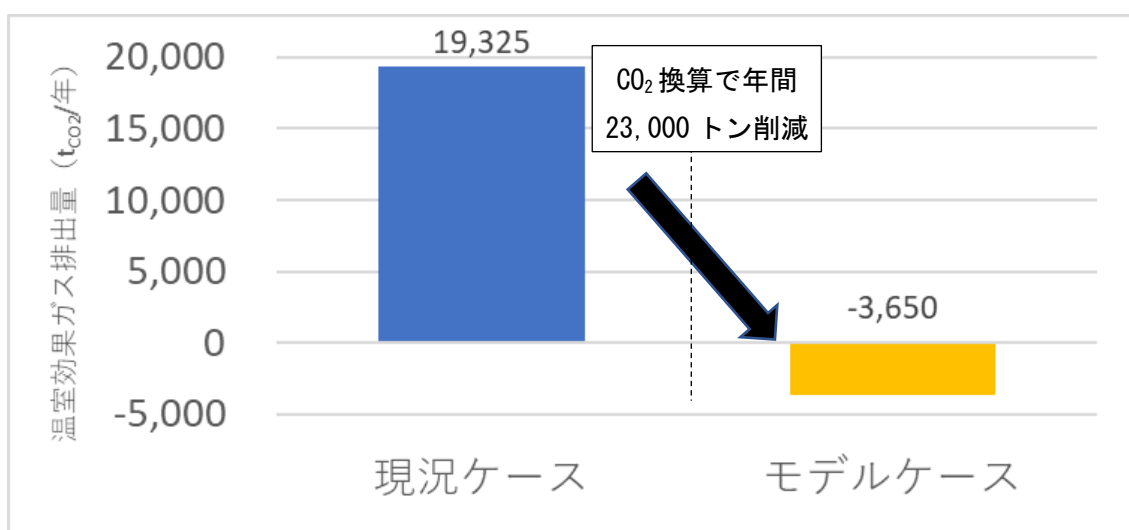


図 4. ラグーンでの処理から UASB によりメタンガスを全量回収し、循環型散水ろ床と組み合わせた設備への代替による温室効果ガス削減効果（処理能力 500t/日）

### 3.2 アジア・オセアニア地域のキャッサバ生産地（タイを除く）での温室効果ガス削減効果

ここで、現状にてキャッサバを国内で生産・加工しているが、メタンガスの回収が進んでいないと考えられるアジア・オセアニア地域（タイを除く）のキャッサバ生産地での温室効果ガス削減効果を試算する。対象国として、バイオガス回収が進んでいるタイ国を除外したアジア・オセアニアとし、キャッサバ生産量は年間で 5,500 万トン程度とされることから、同様に計算を行った。その結果、570 万トン余りの温室効果ガス削減効果が見積もられた。

#### (1) 排水の発生量

各種文献を基にアジア・オセアニア地域のキャッサバ生産地でのキャッサバ生産量から排水の発生量を次のとおり算出した。

$$\text{排水発生量} = \text{年間キャッサバ生産量} \times \text{でん粉利用割合} \times \text{原料tあたり発生排水量}$$

項目	単位	数値	根拠
年間キャッサバ生産量 (アジア・オセアニアタイ)	t/年	55,000,000	FAO 統計(アジア・オセアニアタイ) 2009-2018 年平均を基に設定
でんぷん利用割合	%	68	(独) 農畜産業振興機構 「インドネシアのでん粉事情」
原料 t あたり発生排水量	m <sup>3</sup> /t	2.2	環境科学会誌論文 P.63 図 10

排水の発生量は以下となる。

項目	単位	数値
排水発生量	m <sup>3</sup> /年	82,280,000

## (2) 温室効果ガス削減量

アジア・オセアニアにおいても前述試算と同条件として、モデルケースに当てはめて排水量の比例計算とすると、次のとおり現況ケースでは年間の排出量が 480 万トン余り、モデルケースでは-90 万トンとなることから年間で約 570 トンの削減が見込まれる (図 5)。

$$\text{削減出来る温室効果ガス量} = \text{現況ケースにおける正味の温室効果ガス量 (年間)} \\ - \text{モデルケースにおける正味の温室効果ガス量 (年間)}$$

項目	単位	数値	根拠
現況ケースにおける正味の温室効果ガス量 (年間)	tCO <sub>2</sub> /年	4,818,278	$E_{GHG(現況)} \times \text{年間排水発生量 (アジア・オセアニアタイ)}$ ÷ 一日当たりの排水発生量 (大規模工場)
モデルケースにおける正味の温室効果ガス量 (年間)	tCO <sub>2</sub> /年	-910,160	$E_{GHG(モデル)} \times \text{年間排水発生量 (アジア・オセアニアタイ)}$ ÷ 一日当たりの排水発生量 (大規模工場)

項目	単位	数値
削減出来る温室効果ガス量	tCO <sub>2</sub> /年	5,728,438

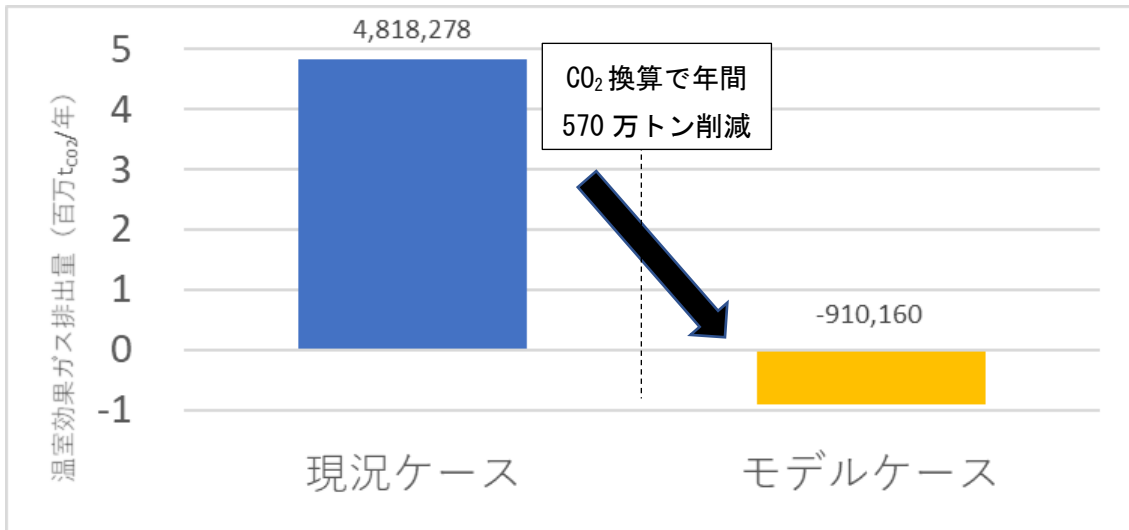


図5. ラグーンでの処理から UASB によりメタンガスを全量回収し、循環型散水ろ床と組み合わせた設備への代替による温室効果ガス削減効果（アジア・オセアニア地域（タイ除く））

#### 4. パーム油排水について

パーム油はアブラヤシの果実から生産される。アブラヤシは植物性油脂において、単位生産面積当たりの油の生産性が極めて高い<sup>(日本植物油協会)</sup>ことから、近年パーム油の生産量が拡大の一途にある<sup>(国際連合食糧農業機関 (FAO))</sup>。現在はインドネシアとマレーシアを中心に高温多湿の熱帯地域で栽培されており、パーム油の世界の生産量 7,100 万トン/年 (2018 年) のうち、両国だけで 8 割以上 (6,000 万トン) を占める (図 6)。

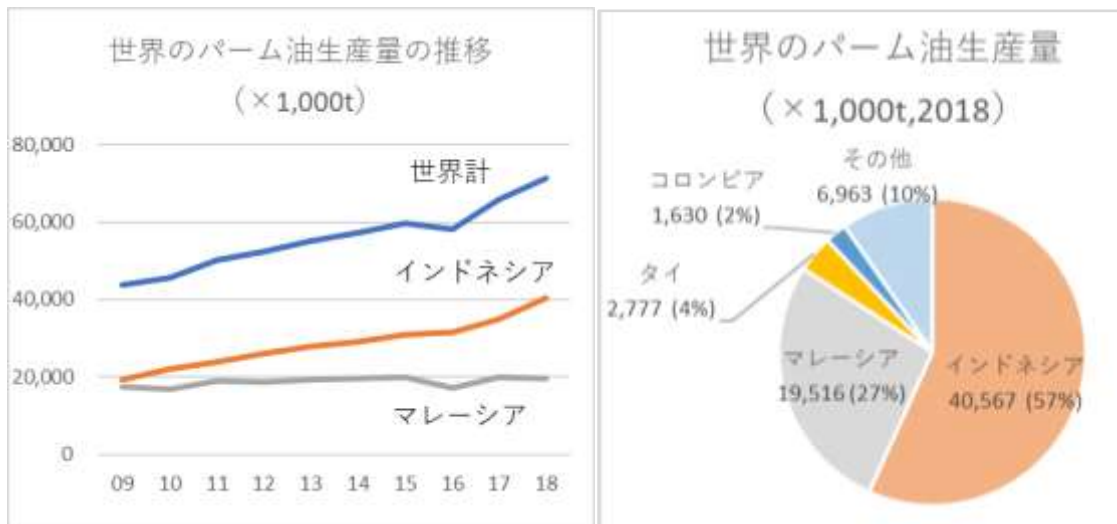


図 6. 世界のパーム油生産の推移と 2018 年における生産比率

パーム油は常温で固体の油脂で、主な利用は食用油やマーガリンなどの食用のほか、石けん、近年ではエンジンや発電所の燃料としても利用される。日本においては菜種油に次ぐ、二番目に供給量の多い植物油であり<sup>(日本植物油協会)</sup>、全量輸入に頼っている。特に FIT 制度におけるバイオマス発電の優遇からパーム油を発電燃料とする計画が多発した。しかし、パーム油生産における持続可能性と倫理性からの制約が厳しく求められ、その動静が注目を浴びている。

原料であるアブラヤシの果実 (FFB : Fresh Fruit Bunches) からパーム油 (CPO : Crude Palm Oil) を生産するにあたり、加熱工程や精製工程等で発生する高濃度の油分やその他の有機物、懸濁物質を含んだ排水 (POME : Palm Oil Mill Effluent) が間欠的に発生する。排水に含まれる油分は油水分離で一部は回収され工程に戻されるが、未回収の油分、その他の有機物、懸濁物質を高濃度に含む排水は後工程の排水処理へと送られる。

POME の高い有機成分を背景に、処理に当たっては一般的にラグーンが用いられており、処理水は河川に放流されたり、有機栄養源の利用を目的として農園還元されたりしている。パーム油工場での排水処理では多くがラグーン上部に覆いを設けず、バイオガスをそのまま大気に放出しているとみられる。これはパーム油工場が加工工程から発生する空房 (EFB : Empty Fruit Bunch) や繊維質 (MF : Mesocarp Fiber)、殻 (PKS : Palm Kernel Shell) といった副産物を燃料利用することで隣接するアブラヤシ農園と共に電力供給の自立を可能としていることから、電力の送電網の整備が進んでおらず、バイオガスを回収

しても売電にメリットが得難い事情があることが原因の一つであると考えられる。送電網から比較的近傍にある一部の工場ではバイオガスを回収して発電する事例もあるほか、環境基準の強化に伴い排水処理に活性汚泥法等を採用する工場も今後増えていくとみられるがコスト高に繋がるため急速に普及するかは不透明である。

パーム油工場排水（POME）は油分やその他の有機分および懸濁物質（SS）を多量に含んでおり、排水中の有機分濃度を示す化学的酸素要求量 COD<sub>Cr</sub> の値は 15,000～100,000mg/L にも上り<sup>（環境省）</sup>（日本における海域及び湖沼に排出される排水の一律排水基準は COD<sub>Mn</sub>160mg/L<sup>（環境省）</sup>）、SS も 5,000～54,000mg/L にもなる（同 200mg/L）。油分についても 150～18,000mg/L が含まれる（同 30mg/L）。

#### 4.1 モデルケースでの温室効果ガス削減の効果試算

ここでパームヤシ果実（FFB）を日量 1,000 トン処理するパーム油工場を例にとり、一部カバードラグーンでバイオガスを回収している現況ケースと日本の技術を導入してバイオガスをより効率的に回収し有効利用するモデルケースとで比較を行い、日本の技術による温室効果ガス削減の貢献度を試算する。試算の結果、設定した現状に比べ 1 日当たり 130 トンも削減となり、年間で 300 日稼働した場合、39,000 トンの温室効果ガス削減効果が見積もられる。

##### 1) 現況ケースで発生する温室効果ガス

環境省報告書および環境省ガイドラインなどの数値を参考に次のとおり算出を行った。工場の操業時間を 1 日 8 時間、年間 300 日と設定し、現況ケースでは図 7 のように排水は全てラグーンを経由して河川等の公共水域に放流されるとした。

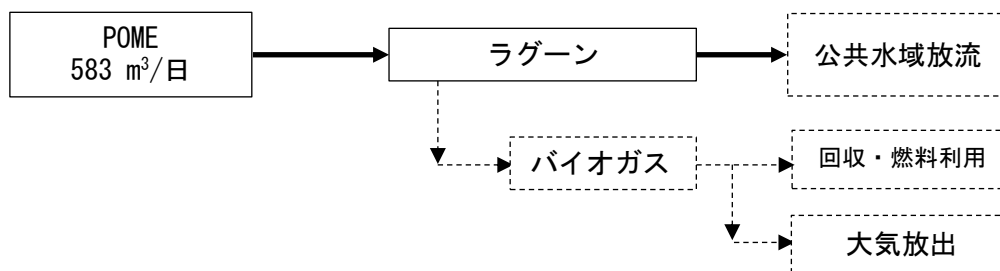


図 7. 現況ケースの POME 処理状況（矢印太線：水処理、破線：ガス）

##### (1) 排水の発生量

現況ケースにおいて発生する排水

$$\text{排水発生量} = \text{パームヤシ果実(FFB)処理量} \\ \times \text{パームオイル工場廃液(POME)のFFBに対する割合} \times \text{POMEの密度}$$

項目	単位	数値	根拠
パームヤシ果実(FFB)処理量	t/日	1,000	設定値
パームオイル工場廃液(POME)のFFBに対する割合	%	58.3	環境省報告書 P.14 図2-5
POMEの密度	m <sup>3</sup> /t	1	設定値

現況ケースにおいて、排水は以下のとおり発生する。

項目	単位	数値
排水発生量	m <sup>3</sup> /日	583

### (2)メタン(CH<sub>4</sub>)の理論発生量

現況ケースにおける、ラグーン内で排水中の有機分の嫌気性発酵に伴うメタン発生量

$$E_{CH_4 \text{ 全体}} = \text{排水発生量} \times \text{排水のCOD濃度} \times \text{COD分解効率} \times \text{メタン理論発生量} \times 10^{-6}$$

項目	単位	数値	根拠
排水発生量	m <sup>3</sup> /日	583	
排水のCOD濃度	mg/L	50,000	環境省ガイドライン P.11 表2-1-1より平均値
COD分解効率	%	75	設定値
メタン理論発生量	NL/kgCOD	350	理論値

排水中の有機分の嫌気性発酵に伴うメタン発生量は以下となる。

項目	単位	数値
$E_{CH_4 \text{ 全体}}$ 排水中の有機分の嫌気性発酵に伴うメタン理論発生量	Nm <sup>3</sup> /日	7,652

### (3)現況でのメタンガス利用によるGHG削減量

(2)で算出したメタンガス理論発生量のうちエネルギーとして回収出来る熱量

なお、メタンの回収利用率については生産地全域についてのまとまった調査数値を求めることはできなかった。そのため、一部調査機関による調査値を採用することとした。

$$\text{回収熱量}_{(現況)} = E_{CH_4 \text{ 全体}} \times \text{メタン回収利用率} \times \text{メタン発熱量} \times \text{エネルギー効率}$$

項目	単位	数値	根拠
メタン回収利用率	%	25	富士経済調査値
メタン発熱量	MJ/Nm <sup>3</sup>	35.739	国交省ガイドライン P.178 (メタン濃度100%)
エネルギー効率		0.8	設定値



モデルケースで回収したメタンガスから得られる熱量は以下となる。

項目		単位	数値
回収熱量 <small>(現況)</small>	メタンガス理論発生量のうちエネルギーとして回収出来る熱量	MJ/日	54,694

また、回収した熱量を重油炊きボイラの熱源に利用したと仮定した場合の GHG 削減量 (二酸化炭素換算) は次のとおりとなる。

$$\text{回収熱量}_{\text{(現況・CO2換算)}} = \text{回収熱量}_{\text{(現況)}} \times C_{\text{重油の排出係数 (MJあたり)}}$$

項目	単位	数値	根拠
C 重油の排出係数 (MJ あたり)	tCO <sub>2</sub> /MJ	0.000074	次のとおり

$$C_{\text{重油の排出係数(MJあたり)}} = C_{\text{重油の標準炭素排出係数(発熱量あたり)}} \times 44/12 \times 10^{-6}$$

項目	単位	数値	根拠
C 重油の標準炭素排出係数 (発熱量あたり)	tC/TJ	20.17	標準発熱量一覧表
二酸化炭素の分子量	g-CO <sub>2</sub> /mol	44	
炭素の原子量	g-C/mol	12	

モデルケースでメタンガスを利用することで削減出来る GHG ガス量は以下となる。

項目		単位	数値
回収熱量 <small>(現況・CO2換算)</small>	現況におけるバイオガス利用による GHG 削減量	tCO <sub>2</sub> /日	4.0

#### (4) 発生メタンの大気放出

(2) で算出したメタンガス理論発生量のうち、利用していない残りの 75% を大気放出しているとした場合のメタンの大気放出量

$$E_{CH_4(\text{現況・CO2換算})} = E_{CH_4 \text{ 全体}} \times (100 - \text{メタン回収利用率}) \\ \div \text{標準状態体積} \times \text{メタンの分子量} \times GWP_{CH_4} \times 10^{-3}$$

項目	単位	数値	根拠	
メタン大気放出率	%	25	設定値	
標準状態体積	L/mol	22.4		
メタンの分子量	g/mol	16		
$GWP_{CH_4}$	CH <sub>4</sub> の温暖化係数	tCO <sub>2</sub> / tCH <sub>4</sub>	28	AR5

したがって、現況ケースで大気に放出されるメタンはCO<sub>2</sub>換算で次のとおりとなる。

項目		単位	数値
$E_{CH_4}$ (現況・CO <sub>2</sub> 換算)	現況で一日あたりに大気放出されるメタン (CO <sub>2</sub> 換算)	tCO <sub>2</sub> /日	114.8

(5) 現況ケースで発生する正味の温室効果ガス

温室効果ガスの算出に当たっては、メタンの大気放出とエネルギー回収の差で算出した。

$$E_{GHG}(\text{現況}) = E_{CH_4}(\text{現況・CO}_2\text{換算}) - \text{回収熱量}(\text{現況・CO}_2\text{換算})$$

項目		単位	数値
$E_{CH_4}$ (現況・CO <sub>2</sub> 換算)	現況で一日あたりに大気放出されるメタン (CO <sub>2</sub> 換算)	tCO <sub>2</sub> /日	114.8
回収熱量 (現況・CO <sub>2</sub> 換算)	現況におけるバイオガス利用によるGHG削減量	tCO <sub>2</sub> /日	4.0

したがって、現況ケースで発生する温室効果ガスの正味の排出量は次のとおりとなる。

項目		単位	数値
$E_{GHG}$ (現況)	現況ケースにおける正味の温室効果ガス排出量	tCO <sub>2</sub> /日	110.7

※四捨五入による表記の都合上、上述の数値と計算結果が小数第一位で一致しない。

2) モデルケースで発生する温室効果ガス

一方で図8のように日本の技術を取り入れ浮遊型嫌気性処理から発生したメタンガスを全てエネルギーとして回収出来るとして、得られる熱量を求める。まずPOMEは長水路型沈殿槽を流れることで排水中の砂を除去(沈砂)し、その後、オイルスキマで油分を回収する。この時、油分除去率は50%とし、回収した油分はプロセスに戻す。

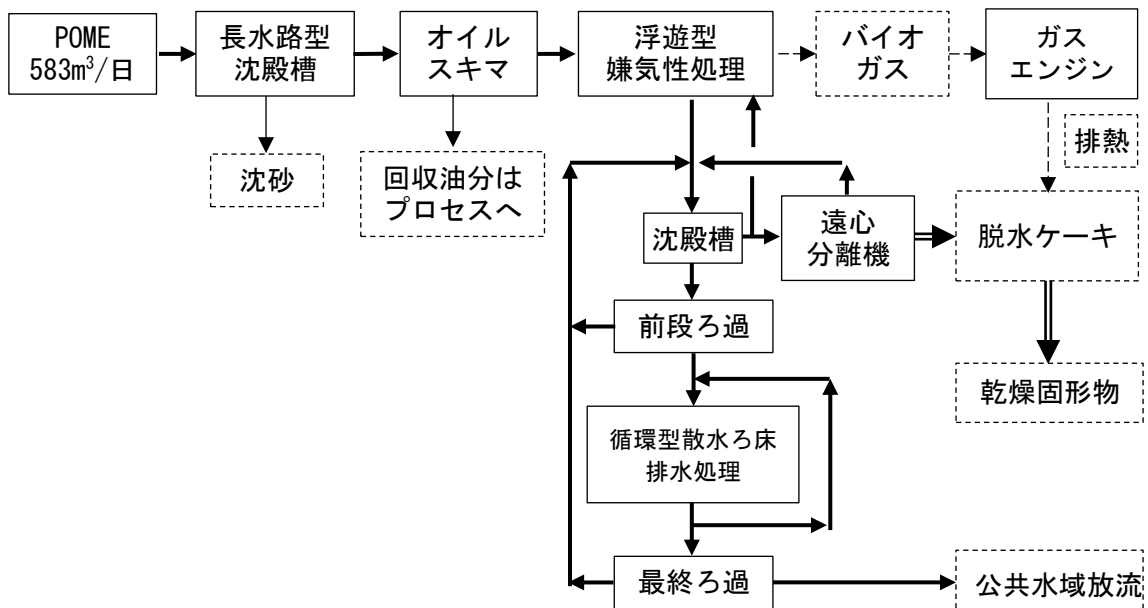


図 8. モデルケースの POME 処理フロー（矢印太線：水処理、破線：ガス、二重線：汚泥）

「1) 現況ケースで発生する温室効果ガス」と同様に次のとおり算出した。

(1) 浮遊型嫌気性処理+担体利用循環型散水ろ床式好気性処理（循環型散水ろ床）

a. オイルスキマからの嫌気槽への流入水

オイルスキマで除去される油分およびオイルスキマ後の油分濃度、嫌気槽へ流入する油分は次のとおり算出した。

$$\text{オイルスキマで除去される油分} = \text{排水発生量} \times \text{油分濃度} \times \text{油分除去率} \times 10^{-3}$$

$$\text{オイルスキマ後の油分濃度} = \text{油分濃度} \times (100 - \text{油分除去率})$$

$$\text{嫌気槽へ流入する油分} = \text{排水発生量} \times \text{オイルスキマ後の油分濃度} \times 10^{-3}$$

項目	単位	数値	根拠
排水発生量	m³/日	583	
油分濃度	mg/L	6,000	環境省ガイドライン P.11 表 2-1-1 より平均値
油分除去率	%	50	設定値

したがって、それぞれ以下のとおりとなる。

項目	単位	数値
オイルスキマで除去される油分	kg/日	1,749
オイルスキマ後の油分濃度	mg/L	3,000
嫌気槽へ流入する油分	kg/日	1,749

また、嫌気槽に流入する COD や SS は次のとおり算出した。

$$\text{嫌気槽へ流入するCOD} = \text{排水発生量} \times \text{COD濃度} \times 10^{-3}$$

$$\text{嫌気槽へ流入するSS} = \text{排水発生量} \times \text{SS濃度} \times 10^{-3}$$

項目	単位	数値	根拠
排水発生量	m <sup>3</sup> /日	583	
COD 濃度	mg/L	50,000	環境省ガイドライン P.11 表 2-1-1 より平均値
SS 濃度	mg/L	18,000	環境省ガイドライン P.11 表 2-1-1 より平均値

よって、嫌気槽に流入する COD や SS は以下となる。

項目	単位	数値
嫌気槽へ流入する COD	kg/日	29,150
嫌気槽へ流入する SS	kg/日	10,494

b. 浮遊型嫌気性排水処理

浮遊型嫌気性排水処理で分解する COD および SS は次のとおり算出した。

$$\text{嫌気処理で分解するCOD} = \text{嫌気槽へ流入するCOD} \times \text{COD分解効率}$$

$$\text{嫌気処理で分解するSS} = \text{嫌気槽へ流入するSS} \times \text{SS分解率}$$

項目	単位	数値	根拠
COD 分解効率		0.75	設定値
SS 分解率	%	70	設定値

浮遊型嫌気性排水処理で分解する COD および SS は次のとおりとなる。

項目	単位	数値
嫌気処理で分解する COD	kg/日	21,863
嫌気処理で分解する SS	kg/日	7,346

c. 沈殿槽からの汚泥引き抜き

沈殿槽から引き抜き汚泥の発生量は次のとおり算出した。

$$\text{引き抜き汚泥の発生量(乾重量)} = \text{嫌気槽へ流入するSS} - \text{嫌気処理で分解するSS}$$

$$\text{引き抜き汚泥の発生量(湿重量)} = \text{引き抜き汚泥の発生量(乾重量)}$$

$$\div \text{引き抜き汚泥濃度} \times \text{引き抜き汚泥の比重} \times 10^3$$

項目	単位	数値	根拠
嫌気槽へ流入する SS	kg/日	10,494	
嫌気処理で分解する SS	kg/日	7,346	
引き抜き汚泥濃度	mg/L	18,000	設定値
引き抜き汚泥の比重	t/m <sup>3</sup>	1	設定値

沈殿槽から引き抜き汚泥の発生量は次のとおりとなる。

項目	単位	数値
引き抜き汚泥の発生量（乾重量）	kg-dry/日	3,148
引き抜き汚泥の発生量（湿重量）	t-wet/日	175

d. 汚泥の脱水

沈殿槽からの引き抜き汚泥を脱水したことで得られる脱水ケーキは次のとおり算出した。

$$\begin{aligned} \text{脱水ケーキの発生量(乾重量)} &= \text{引き抜き汚泥の発生量(乾重量)} \times \text{SS回収率} \\ \text{脱水ケーキの発生量(湿重量)} &= \text{脱水ケーキの発生量(乾重量)} \\ &\quad \times 100 / (100 - \text{脱水汚ケーキ泥の含水率}) \times 10^{-3} \end{aligned}$$

項目	単位	数値	根拠
引き抜き汚泥の発生量（乾重量）	kg-dry/日	3,148	
SS回収率	%	97	設定値
脱水ケーキの含水率	%	75	設定値

脱水ケーキの発生量は以下となる。

項目	単位	数値
脱水ケーキの発生量（乾重量）	kg-dry/日	3,054
脱水ケーキの発生量（湿重量）	t-wet/日	12.2

脱水時に発生する脱水ろ液の発生量および脱水ろ液中のSSは以下のとおり算出した。

$$\begin{aligned} \text{脱水ろ液の発生量} &= (\text{引き抜き汚泥の発生量(湿重量)} - \text{脱水ケーキの発生量(湿重量)}) \\ &\quad \div \text{脱水ろ液の比重} \end{aligned}$$

$$\text{脱水ろ液中のSS} = \text{引き抜き汚泥の発生量(乾重量)} - \text{脱水ケーキの発生量(乾重量)}$$

$$\text{脱水ろ液中のSS濃度} = \text{脱水ろ液中のSS} \div \text{脱水ろ液の発生量} \times 10^3$$

項目	単位	数値	根拠
引き抜き汚泥の発生量（湿重量）	t-wet/日	175	
脱水ケーキの発生量（湿重量）	t-wet/日	12.2	
脱水ろ液の比重	t/m <sup>3</sup>	1	設定値
引き抜き汚泥の発生量（乾重量）	kg-dry/日	3,148	
脱水ケーキの発生量（乾重量）	kg-dry/日	3,054	

したがって、脱水時に発生する脱水ろ液の発生量等は次のとおりとなる。

項目	単位	数値
脱水ろ液の発生量	m <sup>3</sup> /日	163
脱水ろ液中の SS	kg-dry/日	94
脱水ろ液中の SS 濃度	mg/L	581

e. 高速ろ過(前段ろ過)と循環型散水ろ床

沈殿槽から高速ろ過に流入する処理水は次のとおり算出した。

高速ろ過(前段ろ過)への流入水量

=排水発生量 - 脱水ケーキの発生量(湿重量) ÷ 引き抜き汚泥の比重

項目	単位	数値	根拠
排水発生量	m <sup>3</sup> /日	583	
脱水ケーキの発生量 (湿重量)	t-wet/日	12.2	
引き抜き汚泥の比重	t/m <sup>3</sup>	1	設定値

したがって、高速ろ過に流入する処理水は以下となる。

項目	単位	数値
高速ろ過(前段ろ過)への流入水量	m <sup>3</sup> /日	571

なお、高速ろ過に流入する処理水中の COD、BOD 濃度は当委員会にて設定した前提条件に基づいて処理されるとする。

処理水中の全 COD のうち溶解性 COD の比率を 20%、COD と BOD (生物学的酸素要求量) の比率を 2.5:1 とする。なお、高速ろ過の BOD 除去率は 30%、沈殿槽から流出する排水中の SS 濃度は 300mg/L とする。

高速ろ過 (前段ろ過) の処理水を循環型散水ろ床で処理する際、散水ろ床の処理水を循環して 3 倍希釈し処理を行うこととすると、散水ろ床への流入 BOD 濃度は 1/3 となる。この時、高速ろ過 (前段ろ過) への流入水量は散水ろ床の処理まで同じとし、水量損失はないものとする。

(2) メタン (CH<sub>4</sub>) の理論発生量

「1) 現況ケースで発生する温室効果ガス」と計算は同様。

(3) モデルケースでのメタンガス利用による GHG 削減量

(2) で算出したメタンガス理論発生量のうちガスエンジンから回収される温水のエネルギー量は次のとおり算出した。

$$\text{回収熱量}_{(\text{モデル・温水})} = E_{\text{CH}_4 \text{ 全体}} \times \text{メタン発熱量} \times \text{ガスエンジンのエネルギー効率 (熱)}$$

項目	単位	数値	根拠
メタン発熱量（メタン濃度 100%）	MJ/Nm <sup>3</sup>	35.739	国交省ガイドライン P.178
ガスエンジンのエネルギー効率（熱）		0.4	設定値

ガスエンジンから回収される温水のエネルギー量は以下となる。

項目	単位	数値
<i>回収熱量</i> <sub>(モデル・温水)</sub> メタンガス理論発生量のうちガスエンジンから回収される温水のエネルギー量	MJ/日	109,388

また、得られた温水を利用した場合の GHG 削減量（CO<sub>2</sub> 換算）は次のとおり算出した。

$$\text{回収熱量}_{(\text{モデル・温水} \cdot \text{CO}_2 \text{ 換算})} = \text{回収熱量}_{(\text{モデル・温水})} \times C \text{重油の排出係数 (MJ あたり)}$$

項目	単位	数値	根拠
C 重油の排出係数（MJ あたり）	tCO <sub>2</sub> /MJ	0.000074	次のとおり

$$C \text{重油の排出係数(MJ あたり)} = C \text{重油の標準炭素排出係数(発熱量あたり)} \times 44/12 \times 10^{-6}$$

項目	単位	数値	根拠
C 重油の標準炭素排出係数（発熱量あたり）	tC/TJ	20.17	標準発熱量一覧表
二酸化炭素の分子量	g-CO <sub>2</sub> /mol	44	
炭素の原子量	g-C/mol	12	

モデルケースでのメタンガス利用のうち、温水利用による GHG 削減量で以下となる。

項目	単位	数値
<i>回収熱量</i> <sub>(モデル・温水・CO<sub>2</sub>換算)</sub> モデルケースでガスエンジン温水利用による GHG 削減量	tCO <sub>2</sub> /日	8.1

また、(2)で算出したメタンガス理論発生量のうちガスエンジンからで発電出来るエネルギー量および GHG 削減量（CO<sub>2</sub> 換算）は次のとおり算出した。

$$\text{回収熱量}_{(\text{モデル} \cdot \text{電力})}$$

$$= E_{\text{CH}_4 \text{ 全体}} \times \text{メタン発熱量} \times \text{ガスエンジンのエネルギー効率 (電力)}$$

$$\text{回収熱量}_{(\text{モデル} \cdot \text{電力} \cdot \text{CO}_2 \text{ 換算})} = \text{回収熱量}_{(\text{モデル} \cdot \text{電力})} \times C \text{重油の排出係数 (MJ あたり)}$$

項目	単位	数値	根拠
メタン発熱量（メタン濃度 100%）	MJ/Nm <sup>3</sup>	35.739	国交省ガイドライン P. 178
ガスエンジンのエネルギー効率（電力）		0.4	設定値
C 重油の排出係数（MJ あたり）	tCO <sub>2</sub> /MJ	0.000074	次のとおり

$C$  重油の排出係数(MJ あたり) =  $C$  重油の標準炭素排出係数(発熱量あたり)  $\times$  44/12  $\times 10^{-6}$

項目	単位	数値	根拠
C 重油の標準炭素排出係数（発熱量あたり）	tC/TJ	20.17	標準発熱量一覧表
二酸化炭素の分子量	g-CO <sub>2</sub> /mol	44	
炭素の原子量	g-C/mol	12	

モデルケースでのメタンガス利用のうち、ガスエンジンで発電出来るエネルギー量および発電した電気を利用した場合の GHG 削減量で次のとおりとなる。

項目		単位	数値
回収熱量 <small>(モデル・電力)</small>	メタンガス理論発生量のうち ガスエンジンで発電出来るエ ネルギー量	MJ/日	109,388
回収熱量 <small>(モデル・電力・CO<sub>2</sub>換算)</small>	モデルケースでガスエンジン 発電利用による GHG 削減量	tCO <sub>2</sub> /日	8.1

#### (4) 電力消費に伴う発電由来の二酸化炭素排出

ポンプ等の補機類の動力で必要となる電力について、消費に伴い化石燃料由来の二酸化炭素が排出されるため次のとおり算出する。

##### a. 遠心分離機の消費電力量

遠心分離機の消費電力量は次の式で算出した。

遠心分離機の消費電力量 = 遠心分離機の動力  $\times$  1 日当たりの稼働時間

項目	単位	数値	根拠
遠心分離機の動力	kW	9.0	設定値
1 日当たりの稼働時間	h/日	24	設定値

遠心分離機の消費電力量は以下となる。

項目	単位	数値
遠心分離機の消費電力量	kWh/日	216



b. 循環型散水ろ床の消費電力量

循環型散水ろ床の消費電力量は次の式で算出した。

$$\text{循環型散水ろ床の消費電力量} = \text{流量当たりの消費電力量} \times \text{高速ろ過への流入水量}$$

項目	単位	数値	根拠
流量当たりの消費電力量	kWh/m <sup>3</sup>	0.13	以下、参照
高速ろ過への流入水量	m <sup>3</sup> /日	571	

※流量当たりの消費電力量については、高知市下知水再生センターおよび須崎市終末処理場の視察結果を基に検討した。視察において得られた消費電力原単位は0.105kWh/m<sup>3</sup>であった。このうち循環ポンプ（流入+返送）の寄与分は0.050kWh/m<sup>3</sup>（返送率 夏季：100%、冬季：200%）あり、今回の検討では返送率200%とすることから、循環ポンプの寄与分の増加を0.050×0.5=0.025kWh/m<sup>3</sup>と仮定。冬季の水温低下はないものとし、計算に使用する原単位を通年で0.105+0.025=0.13kWh/m<sup>3</sup>とした。

したがって、循環型散水ろ床の消費電力量は次のとおりとなる。

項目	単位	数値
循環型散水ろ床の消費電力量	kWh/日	74

c. 補機類の消費電力量

上述の a および b の合計値として、モデルケースにおける消費電力量を算出した。

$$\text{補機類の電力消費量} = \text{遠心分離機の消費電力量} + \text{循環型散水ろ床の消費電力量}$$

項目	単位	数値
遠心分離機の消費電力量	kWh/日	216
循環型散水ろ床の消費電力量	kWh/日	74

したがって、補機類の消費電力量は以下となる。

項目	単位	数値
補機類の消費電力量	kWh/日	290

また、補機類の消費電力由来の二酸化炭素発生量は次のとおり算出した。

$$E_{GHG(\text{モデル} \cdot \text{電力} \cdot \text{CO}_2 \text{ 換算})} = \text{補機類の消費電力量} \times \text{電力量変換係数} \\ \times C_{\text{重油の排出係数 (MJあたり)}} \times 10^{-3}$$

項目	単位	数値	根拠
補機類の消費電力量	kWh/日	290	
電力変換係数	MJ/MWh	3,600	
C重油の排出係数 (MJあたり)	tCO <sub>2</sub> /MJ	0.000074	次のとおり

$$C \text{重油の排出係数(MJあたり)} = C \text{重油の標準炭素排出係数(発熱量あたり)} \times 44/12 \times 10^{-6}$$

項目	単位	数値	根拠
C重油の標準炭素排出係数 (発熱量あたり)	tC/TJ	20.17	標準発熱量一覧表
二酸化炭素の分子量	g-CO <sub>2</sub> /mol	44	
炭素の原子量	g-C/mol	12	

モデルケースにおける補機類の消費電力量由来の温室効果ガス排出量は以下となる。

項目	単位	数値	
$E_{GHG}$ (モデル・電力・CO <sub>2</sub> 換算)	モデルケースにおける補機類の消費電力量 (CO <sub>2</sub> 換算)	tCO <sub>2</sub> /日	0.1

(5) モデルケースで発生する正味の温室効果ガス

温室効果ガスの算出に当たっては、補機類の消費電力由来の温室効果ガス発生量とエネルギー回収の差で算出した。

$$E_{GHG(\text{モデル})} = E_{GHG(\text{モデル} \cdot \text{電力} \cdot \text{CO}_2 \text{換算})} - (\text{回収熱量}_{(\text{モデル} \cdot \text{温水} \cdot \text{CO}_2 \text{換算})} + \text{回収熱量}_{(\text{モデル} \cdot \text{電力} \cdot \text{CO}_2 \text{換算})})$$

項目	単位	数値	
$E_{GHG}$ (モデル・電力・CO <sub>2</sub> 換算)	モデルケースにおける補機類の消費電力量 (CO <sub>2</sub> 換算)	tCO <sub>2</sub> /日	0.1
回収熱量 (モデル・温水・CO <sub>2</sub> 換算)	モデルケースでガスエンジン温水利用による GHG 削減量	tCO <sub>2</sub> /日	8.1
回収熱量 (モデル・電力・CO <sub>2</sub> 換算)	モデルケースでガスエンジン発電利用による GHG 削減量	tCO <sub>2</sub> /日	8.1

モデルケースでの正味の温室効果ガス量は以下となる。

項目	単位	数値	
$E_{GHG}$ (モデル)	モデルケースにおける正味の温室効果ガス量	tCO <sub>2</sub> /日	-16.1

### 3) 現況ケースとモデルケースの比較

現況ケースで発生する温室効果ガス及びモデルケースを導入した場合の温室効果ガス削減効果から次のとおり現況ケースとモデルケースの温室効果ガス排出量を算出した。

$$\text{削減出来る温室効果ガス量} = E_{GHG(\text{現況})} - E_{GHG(\text{モデル})}$$

項目		単位	数値
$E_{GHG(\text{現況})}$	現況ケースにおける正味の温室効果ガス量	tCO <sub>2</sub> /日	110.7
$E_{GHG(\text{モデル})}$	モデルケースにおける正味の温室効果ガス量	tCO <sub>2</sub> /日	-16.1

現況ケースにモデルケースを適用すると以下のように温室効果ガス量が削減出来る。

項目	単位	数値
削減出来る温室効果ガス量	tCO <sub>2</sub> /日	126.8

なお、この計算を年間で300日稼働した場合でも次のとおり試算した。

$$\text{削減出来る温室効果ガス量(年間)} = \text{削減出来る温室効果ガス量} \times \text{工場の年間稼働日数}$$

項目	単位	数値	根拠
削減出来る温室効果ガス量	tCO <sub>2</sub> /日	126.8	
工場の年間稼働日数	日/年	300	設定値

したがって、年間で削減出来る温室効果ガス量は次のとおりとなる。

項目	単位	数値
削減出来る温室効果ガス量(年間)	tCO <sub>2</sub> /年	38,051

### 4) 脱水ケーキの乾燥汚泥燃料化

パーム油工場では、前述のとおり空房（EFB）や繊維質（MF）、殻（PKS）といった副産物もすでに燃料として利用している。ここで、沈殿槽からの引き抜き汚泥から得られた脱水ケーキについて考える。脱水ケーキは廃棄物として処分するとその処理にあたり環境負荷に繋がる。つまり焼却処分するには熱量が低いため補助燃料が必要であるし、そのまま埋立て処分すれば嫌気性分解に伴い新たなメタンガスが発生する。そこで、乾燥させてその他の副産物と同様に燃料利用する可能性を試算する。

脱水ケーキの熱量はPOMEの発熱量と同等とし、含水率も同じ75%とすると、低位発熱量は4,000kJ/kg弱と自燃はしない。

#### a. 副産物の持つエネルギー量

パーム油工場が発生する副産物が持つエネルギー量を次のとおり算出した。

EFB・MF・PKSのエネルギー利用から得られる熱量(CO<sub>2</sub>換算)

$$= \text{パームヤシ果実(FFB)処理量} \times \sum (\text{各副産物のFFBに対する割合} \times \text{各副産物の発熱量}) \\ \times C \text{重油の排出係数 (MJあたり)}$$

項目	単位	数値	根拠
パームヤシ果実(FFB)処理量	t/日	1,000	設定値
空房(EFB)のFFBに対する割合	%	21.0	環境省報告書 P.14 図2-5
EFBの発熱量(gベース)	kJ/g-dry MJ/t	18.5 18,500	エネルギー・資源学会誌 P.1
繊維(MF)のFFBに対する割合	%	14.4	環境省報告書 P.14 図2-5
MFの低位発熱量	MJ/t	11,480	北総研資料 P.7
殻(PKS)のFFBに対する割合	%	6.4	環境省報告書 P.14 図2-5
PKSの低位発熱量	MJ/t	14,550	北総研資料 P.7
C重油の排出係数(MJあたり)	tCO <sub>2</sub> /MJ	0.000074	次のとおり

$$C \text{重油の排出係数(MJあたり)} = C \text{重油の標準炭素排出係数(発熱量あたり)} \times 44/12 \times 10^{-6}$$

項目	単位	数値	根拠
C重油の標準炭素排出係数 (発熱量あたり)	tC/TJ	20.17	標準発熱量一覧表
二酸化炭素の分子量	g-CO <sub>2</sub> /mol	44	
炭素の原子量	g-C/mol	12	

次のとおり熱量が得られると考えられる。

項目	単位	数値
EFB・MF・PKSのエネルギー利用から得られる熱量(CO <sub>2</sub> 換算)	tCO <sub>2</sub> /日	478.4

#### b. 脱水ケーキの乾燥

脱水ケーキの低位発熱量は次のとおり算出した。

$$\text{脱水ケーキの低位発熱量} = \{ \text{POMEの高位発熱量} \times (100 - \text{脱水ケーキの含水率}) / 100 \\ - 600 \times (9 \times \text{水素比率} \times (100 - \text{脱水ケーキの含水率}) / 100 + \text{含水率}) \\ / 100 \} \times \text{熱量単位変換係数}$$

項目	単位	数値	根拠
POME の高位発熱量	kcal/kg	5,800	環境省報告書 P.91 表 7-12
脱水ケーキ（乾燥汚泥）の含水率	%	75 20	設定値（乾燥前） 設定値（乾燥後）
水素比率	%	5.35	環境省報告書 P.91 表 7-12
含水率	%	75	設定値
熱量単位変換係数	kJ/kcal	4.2	

各含水率における脱水ケーキの低位発熱量は以下となる。

項目	単位	数値
脱水ケーキの低位発熱量（含水率 75%）	kJ/kg	3,896.7
乾燥汚泥の低位発熱量（含水率 20%）	kJ/kg	18,013.3

また、脱水ケーキの乾燥に必要な熱量は次の通り算出した。

$$\begin{aligned} & \text{脱水ケーキの乾燥(含水率75\%から20\%まで)に必要な理論熱量} \\ & = (\text{含水率75\%の脱水ケーキの含水量} - \text{含水率20\%の乾燥汚泥の含水量}) \\ & \quad \times (30^\circ\text{Cの水の蒸発熱}) \times 10^{-3} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{脱水ケーキの乾燥(含水率75\%から20\%まで)に必要な正味の熱量} \\ & = \text{脱水ケーキの乾燥(含水率75\%から20\%まで)に必要な理論熱量} / \text{熱効率} \end{aligned}$$

項目	単位	数値	根拠
脱水ケーキの含水量（含水率 75%）	t	9.16	次のとおり
乾燥汚泥の含水量（含水率 20%）		0.76	
工場の室温（汚泥中水分の温度）	°C	30	設定値
30°Cの水の蒸発熱	kJ/kg	2,556.3	蒸気表
乾燥工程の熱効率		0.8	設定値

$$\begin{aligned} \text{含水率XX\%の脱水ケーキの含水量} & = \text{脱水ケーキの発生量(乾重量)} \times \text{脱水ケーキの含水率} \\ & \quad / (100 - \text{脱水ケーキの含水率}) \times 10^{-3} \end{aligned}$$

項目	単位	数値	根拠
脱水ケーキの発生量（乾重量）	kg-dry/日	3,054	
脱水ケーキ（乾燥汚泥）の含水率	%	75	設定値（乾燥前）
		20	設定値（乾燥後）

脱水ケーキの乾燥（含水率 75%から 20%まで）に必要な熱量は次のとおりとなる。

項目	単位	数値
脱水ケーキの乾燥（含水率 75%から 20%まで）に必要な理論熱量	MJ/日	21,467
脱水ケーキの乾燥（含水率 75%から 20%まで）に必要な正味の熱量	MJ/日	26,834

c. 乾燥汚泥の含有熱量

乾燥により含水率が 20%まで低減された乾燥汚泥の含有熱量を次の通り算出した。

$$\text{乾燥汚泥の含有熱量(含水率 20\%)} = \text{乾燥汚泥の低位発熱量(含水率 20\%)} \\ \times \text{乾燥汚泥の湿重量(含水率 20\%)} \times 10^{-3}$$

項目	単位	数値	根拠
乾燥汚泥の低位発熱量（含水率 20%）	kJ/kg	18,013.3	
乾燥汚泥の湿重量（含水率 20%）	t-wet/日	3.8	次のとおり

$$\text{乾燥汚泥の湿重量(含水率 20\%)} = \text{乾燥汚泥の発生量(乾重量)} \\ \times 100 / (100 - \text{乾燥汚泥の含水率}) \times 10^{-3}$$

項目	単位	数値	根拠
乾燥汚泥の発生量（乾重量）	kg-dry/日	3,054	
乾燥汚泥の含水率	%	20	設定値

含水率 20%の乾燥汚泥の含有熱量は以下となる。

項目	単位	数値
乾燥汚泥の含有熱量（含水率 20%）	MJ/日	68,760

d. モデルケースでの正味の回収エネルギー量

モデルケースにおいて、乾燥汚泥をエネルギー利用すると考えた場合の正味の回収エネルギー量を次のとおり算出した。

$$\begin{aligned} & \text{モデルケースでの正味の回収エネルギー量} \\ = & \text{モデルケースで一日あたりにガスエンジンから回収される温水のエネルギー量} \\ & + \text{モデルケースで一日あたりにガスエンジンで発電出来るエネルギー量} \\ & + \text{乾燥汚泥の含有熱量(含水率 20\%)} \\ & - \text{脱水ケーキの乾燥(含水率 75\%から 20\%まで)に必要な正味の熱量} \end{aligned}$$

項目	単位	数値
モデルケースで一日あたりにガスエンジンから回収される温水のエネルギー量	MJ/日	109,388
モデルケースで一日あたりにガスエンジンで発電出来るエネルギー量	MJ/日	109,388
乾燥汚泥の含有熱量（含水率 20%）	MJ/日	68,760
脱水ケーキの乾燥（含水率 75%から 20%まで）に必要な正味の熱量	MJ/日	26,834

したがって、モデルケースでの正味の回収エネルギー量は以下となる。

項目	単位	数値
モデルケースでの正味の回収エネルギー量	MJ/日	260,702

ここで、モデルケースでの正味の回収エネルギー利用量を次のとおり CO<sub>2</sub> 換算した。

モデルケースでの正味の回収エネルギー量(CO<sub>2</sub> 換算)

= モデルケースでの正味の回収エネルギー量 × C 重油の排出係数 (MJ あたり)

項目	単位	数値	根拠
モデルケースでの正味の回収エネルギー量	MJ/日	260,702	
C 重油の排出係数 (MJ あたり)	tCO <sub>2</sub> /MJ	0.000074	次のとおり

C 重油の排出係数(MJ あたり) = C 重油の標準炭素排出係数(発熱量あたり) × 44/12 × 10<sup>-6</sup>

項目	単位	数値	根拠
C 重油の標準炭素排出係数 (発熱量あたり)	tC/TJ	20.17	標準発熱量一覧表
二酸化炭素の分子量	g-CO <sub>2</sub> /mol	44	
炭素の原子量	g-C/mol	12	

モデルケースでの正味の回収エネルギー量 (CO<sub>2</sub> 換算) は以下となる。

項目	単位	数値
モデルケースでの正味の回収エネルギー量 (CO <sub>2</sub> 換算)	tCO <sub>2</sub> /日	19.3

e. モデルケースの脱水ケーキの燃料化も含めた正味の GHG 発生量

モデルケースにおける、脱水ケーキの乾燥およびエネルギー回収も含めた場合の GHG 発生量は次のとおり算出した。

モデルケースの脱水ケーキの燃料化も含めた正味のGHG発生量

= E<sub>GHG (モデル・電力・CO<sub>2</sub> 換算)</sub> - モデルケースでの正味の回収エネルギー量 (CO<sub>2</sub> 換算)

項目	単位	数値
$E_{GHG}$ (モデル・電力・CO <sub>2</sub> 換算)	モデルケースにおける補機類の消費電力量 (CO <sub>2</sub> 換算)	tCO <sub>2</sub> /日 0.1
モデルケースでの正味の回収エネルギー量 (CO <sub>2</sub> 換算)		tCO <sub>2</sub> /日 19.3

モデルケースにおける脱水ケーキの乾燥およびエネルギー回収も含めた場合の GHG 発生量は次のとおりとなる。

項目	単位	数値
モデルケースの脱水ケーキの燃料化も含めた正味の GHG 発生量	tCO <sub>2</sub> /日	-19.2

f. 現況とモデルケース（脱水ケーキの燃料化も含む）の比較

モデルケースにおいて脱水ケーキの燃料化も含めた場合の現況からの GHG 削減効果を次のとおり算出した。

$$\begin{aligned} & \text{削減出来る温室効果ガス量 (脱水ケーキの燃料化も含む)} \\ & = E_{GHG}(\text{現況}) - \text{モデルケースの脱水ケーキの燃料化も含めた正味のGHG発生量} \end{aligned}$$

項目	単位	数値
$E_{GHG}(\text{現況})$	現況ケースにおける正味の温室効果ガス排出量	tCO <sub>2</sub> /日 110.7
モデルケースの脱水ケーキの燃料化も含めた正味の GHG 発生量		tCO <sub>2</sub> /日 -19.2

モデルケースにおける脱水ケーキの燃料化も含めた場合の現況からの GHG 削減効果は以下となる。

項目	単位	数値
削減出来る温室効果ガス量 (脱水ケーキの燃料化も含む)	tCO <sub>2</sub> /日	129.9

なお、この計算を年間で 300 日稼働した場合では次のとおり現況ケースでは年間の排出量が 33,220 トン、モデルケースでは-5,761 トンとなることから、モデルケースにおける脱水ケーキの燃料化も含めた場合の現況からの GHG 削減効果は約 39,000 トンの削減が見込まれる (図 9)。

$$\begin{aligned} \text{削減出来る温室効果ガス量(年間)} & = \text{現況ケースにおける正味の温室効果ガス量 (年間)} \\ & - \text{モデルケースにおける正味の温室効果ガス量 (年間)} \end{aligned}$$

項目	単位	数値	根拠
現況ケースにおける正味の温室効果ガス量 (年間)	tCO <sub>2</sub> /年	33,220	$E_{GHG}(\text{現況})$ × 300 日/年
モデルケースにおける正味の温室効果ガス量 (年間)	tCO <sub>2</sub> /年	-5,761	$E_{GHG}(\text{モデル})$ × 300 日/年



項目	単位	数値
削減出来る温室効果ガス量（脱水ケーキの燃料化も含む、年間）	tCO <sub>2</sub> /年	38,981

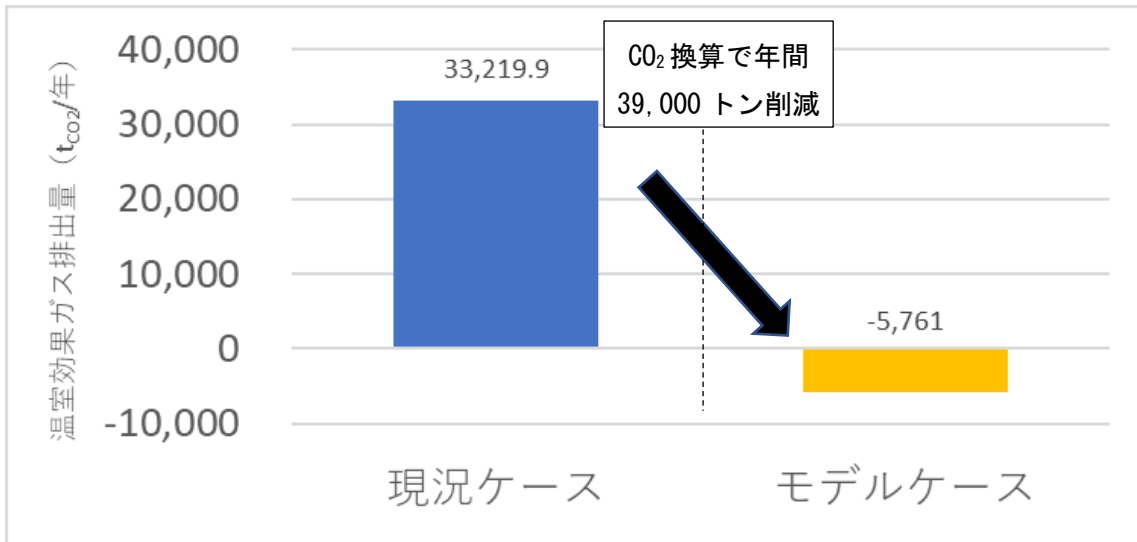


図9. ラグーンでの処理から浮遊型嫌気性発酵処理によりメタンガスを全量回収し、循環型散水ろ床を組み合わせ、脱水ケーキの乾燥燃料化を行うことによる温室効果ガス削減効果（処理能力1,000t/日）

工場等で利用出来るメタンガスからの回収エネルギーは乾燥に使用する分減少してしまうが、エネルギー総量としては増える。さらに廃棄物処分を抑制でき新たなエネルギー源として利用できるため、総合的に環境負荷低減に寄与すると考えられることから、脱水ケーキを乾燥することが望ましいと考えられる。

#### 4.2 世界のパームヤシ生産地での温室効果ガス削減効果

中規模工場での試算を基に世界のパームヤシ生産地での現況ケースとモデルケースにおける温室効果ガス削減量を比例計算で試算し、日本の技術を導入した場合の効果を算出する。世界の生産量は年間で7,000万トン程度とされることから、同様の条件で処理するものとして排水量から試算を行った。その結果、年間で3,800万トン弱（1日当たり12万6千トン）の温室効果ガス削減効果が見積もられた。

##### (1) 排水の発生量

ここで、パームヤシ果実(FFB)処理量は以下で求める。

$$\text{パームヤシ果実(FFB)処理量} = \frac{\text{年間パーム油生産量} / 300 \times 100}{\text{パーム原油(CPO)のパームヤシ果実(FFB)に対する割合}}$$

項目	単位	数値	根拠
年間パーム油生産量	t/年	70,000,000	FAO 統計 2018 年を基に設定
パーム原油 (CPO) のパームヤシ果実 (FFB) に対する割合	%	24	環境省報告書 P. 14 図 2-5

現況ケースにおいて発生する排水量を求めると、

排水発生量 = パームヤシ果実(FFB)処理量

× パームオイル工場廃液(POME)のFFBに対する割合 × POMEの密度

項目	単位	数値	根拠
パームヤシ果実 (FFB) 処理量	t/日	972,222	上記計算による
パームオイル工場廃液 (POME) の FFB に対する割合	%	58.3	環境省報告書 P. 14 図 2-5
POME の密度	m <sup>3</sup> /t	1	設定値

現況ケースにおいて、排水は次のとおり発生する。

項目	単位	数値
排水発生量	m <sup>3</sup> /日	566,806
排水発生量 (年間)	m <sup>3</sup> /年	170,041,667

## (2) 温室効果ガス削減量

世界の生産地においても前述試算と同条件として、モデルケースを当てはめて排水量の比例計算とすると、次のとおり現況ケースでは年間の排出量が 3,200 万トン余り、モデルケースでは-560 万トンとなることから世界全体の削減量は年間で約 3,800 万トンの削減が見込まれる (図 10)。

削減出来る温室効果ガス量 = 現況ケースにおける正味の温室効果ガス量 (年間)

– モデルケースにおける正味の温室効果ガス量 (年間)

項目	単位	数値	根拠
現況ケースにおける正味の温室効果ガス量 (年間)	tCO <sub>2</sub> /年	32,297,164	$E_{GHG(現況)} \times \text{年間排水発生量 (世界)}$ ÷ 一日当たりの排水発生量 (中規模工場)
モデルケースにおける正味の温室効果ガス量 (年間)	tCO <sub>2</sub> /年	-5,600,994	$E_{GHG(モデル)} \times \text{年間排水発生量 (世界)}$ ÷ 一日当たりの排水発生量 (中規模工場)

項目	単位	数値
削減出来る温室効果ガス量	tCO <sub>2</sub> /年	37,898,158

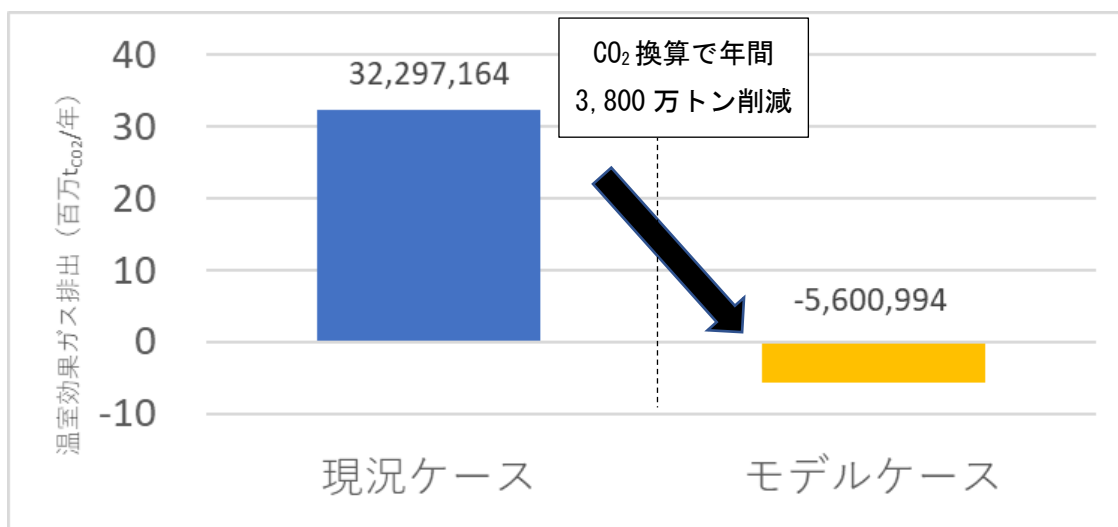


図 10. ラグーンでの処理から浮遊型嫌気性発酵処理によりメタンガスを全量回収し、循環型散水ろ床を組み合わせ、脱水ケーキの乾燥燃料化を行くことによる温室効果ガス削減効果（世界全体）

上述のキャッサバ排水及びパーム油排水の年間削減量の試算を基に、2017年のインドネシアおよびマレーシアにおける温室効果ガス排出量や2016年のASEAN諸国の二酸化炭素排出量の削減ポテンシャルを計算した所、3%程度の削減効果が見込まれた（図 11, 12）。

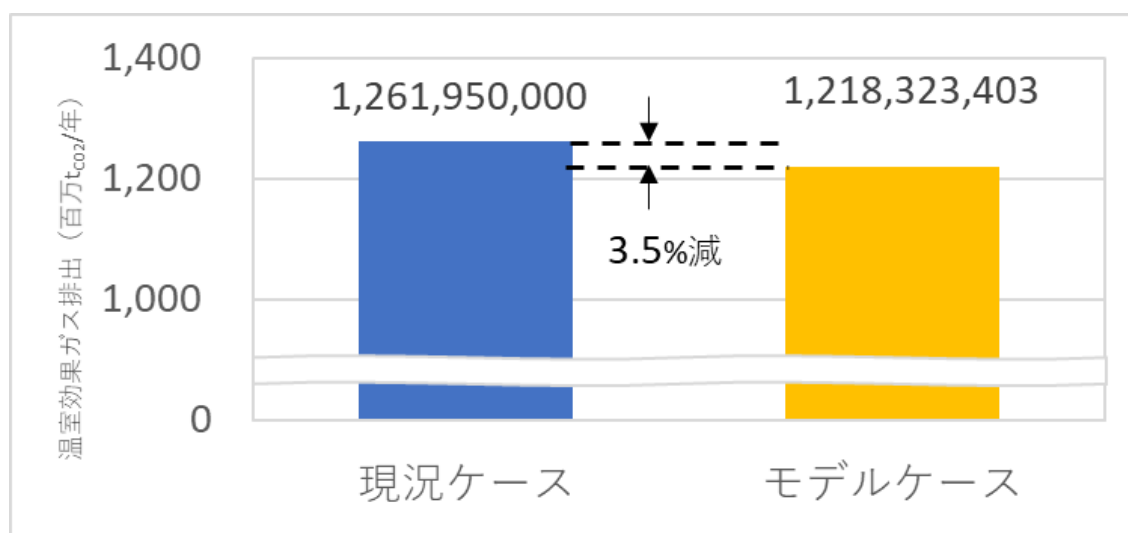


図 11. キャッサバ排水およびパーム油排水の処理における温室効果ガス削減ポテンシャル（2017年のインドネシアおよびマレーシアにおける温室効果ガス排出量での比較、Climate Watch 公表値より作成）

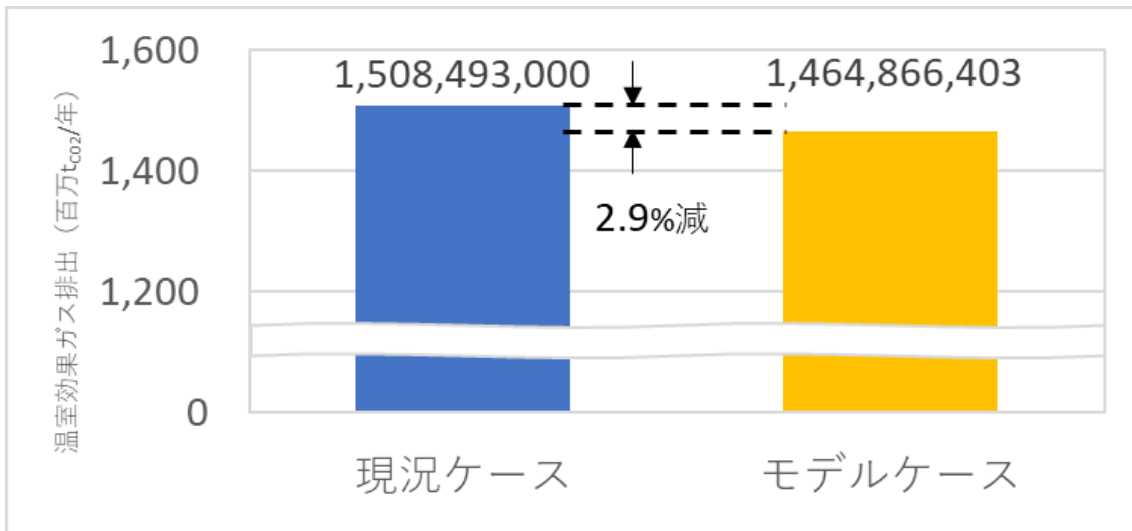


図 12. キャッサバ排水およびパーム油排水の処理における温室効果ガス削減ポテンシャル（2016年のASEAN諸国の二酸化炭素排出量での比較、世界銀行調査より作成）

この2種の産業排水に対しエネルギー回収型の排水処理を行っているにも拘らず、現在は積極的にエネルギー利用されていない状況がある。そこに我が国の技術を利用すれば、大きくはないが温室効果ガスの削減に貢献できる。インドネシア、マレーシア及びASEAN諸国において最も盛んな産業から手始めることで、本産業でのさらなる波及効果を期待できる。そして現地国に適した処理技術と低コストの維持管理を採用して各種産業への普及を試みる必要がある。

以上

<出典・温室効果ガス等の計算根拠>

参考資料：

- ・ 気候変動に関する政府間パネル（IPCC）第5次評価報告書（AR5）  
<https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>
- ・（独）農畜産業振興機構「インドネシアのでん粉事情」  
[https://www.alic.go.jp/joho-d/joho08\\_000200.html](https://www.alic.go.jp/joho-d/joho08_000200.html)
- ・（独）農畜産業振興機構「東南アジア（タイ、ベトナム）のタピオカでん粉需給動向」  
[https://www.alic.go.jp/joho-s/joho07\\_001555.html](https://www.alic.go.jp/joho-s/joho07_001555.html)
- ・（独）農畜産業振興機構「タイのタピオカでん粉の生産と流通について(2)～タピオカ製品とその需給～」  
<https://www.alic.go.jp/starch/world/report/200903-02.html>
- ・ 金井ら；キャッサバの加工および残渣・排水の再資源化における物質フロー分析, *環境科学会誌* 30 (2) : 57-66 (2017) (環境科学会誌論文)  
[https://www.jstage.jst.go.jp/article/sesj/30/2/30\\_300203/\\_pdf](https://www.jstage.jst.go.jp/article/sesj/30/2/30_300203/_pdf)
- ・ Suwanasri, K. et al., (2015). Biogas - Key Success Factors for Promotion in Thailand. *Journal of Sustainable Energy and Environment*. 25-30.  
[https://www.researchgate.net/publication/281831678\\_Biogas\\_-\\_Key\\_Success\\_Factors\\_for\\_Promotion\\_in\\_Thailand](https://www.researchgate.net/publication/281831678_Biogas_-_Key_Success_Factors_for_Promotion_in_Thailand)
- ・ 環境省「一律排水基準」  
<https://www.env.go.jp/water/impure/haisui.html>
- ・ 一般社団法人日本植物油協会「植物油の基礎知識 植物油の道-植物油の生産から消費まで-」  
<https://www.oil.or.jp/kiso/seisan/>
- ・ 国際連合食糧農業機関 FAO STAT <http://www.fao.org/faostat/en/#data>
- ・ 国土交通省「下水汚泥エネルギー化技術ガイドラインー平成 29 年度版ー」  
(国交省ガイドライン)  
<http://www.mlit.go.jp/common/001217263.pdf>
- ・ 資源エネルギー庁「エネルギー源別標準発熱量一覧表」(標準発熱量一覧表)  
[https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total\\_energy/pdf/stte\\_016.pdf](https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total_energy/pdf/stte_016.pdf)
- ・ 環境省 平成 26 年度我が国循環産業海外展開事業化促進業務「インドネシア国におけるパームオイル工場廃液の燃料化事業調査報告書」(環境省報告書)  
[https://www.env.go.jp/recycle/circul/venous\\_industry/pdf/env/h26/11\\_1.pdf](https://www.env.go.jp/recycle/circul/venous_industry/pdf/env/h26/11_1.pdf)
- ・ 環境省「粗パーム油製造工場における排水対策ガイドライン」  
(環境省ガイドライン)  
<https://www.env.go.jp/en/water/wq/ine/pdf/tool/guideline-jp.pdf>
- ・ 永富ら(2008)エネルギー・資源学会誌, Vol. 29, No. 5「マレーシアにおけるパーム残渣のエネルギー利用と技術競合に関するシステム分析」 (エネルギー・資源学会誌)

[http://jser.gr.jp/journal/journal\\_pdf/2008/journal200809\\_1.pdf](http://jser.gr.jp/journal/journal_pdf/2008/journal200809_1.pdf)

- ・ 地方独立行政法人 北海道立総合研究機構 「発電用バイオマスの輸入について～PKS の供給可能量に関する一考察～」(北総研資料)

<https://www.hro.or.jp/list/forest/research/fpri/dayori/1801/1801-3.pdf>

- ・ Gordon J. Van Wylen and Richard E. Sonntag, *Fundamentals of Classical Thermodynamics*, English/SI version 3d ed., New York, 1986, pp. 635-651 (蒸気表)
- ・ バイオマス産業社会ネットワーク(BIN)第179回研究会 株式会社 富士経済「発電用「農作物の収穫に伴って生じるバイオマス」のサステナビリティ確保に関するポイント」

<https://www.npobin.net/research/data/179thFunahashi.pdf>

- ・ Climate Watch Greenhouse Gas Emissions (Data Source:(ポツダム気候影響研究所)

<https://www.climatewatchdata.org/countries/IDN?source=PIK>

- ・ 世界銀行 CO2 emissions

<https://data.worldbank.org/indicator/EN.ATM.CO2E.KT>

- ・ 国土交通省下水道革新的技術実証事業 国土技術政策総合研究所委託研究「無曝気循環式水処理技術実証研究」パンフレット