

財団法人 油脂工業会館  
第57回 油脂産業論文

持続可能な社会と油脂産業の未来

劣化地を価値に変える  
ポンガミア植栽と次世代の精製・収益化システムによる  
環境親和型油脂産業の提案

ミヨシ油脂株式会社  
食品本部 技術開発部 技術開発二課

まなべ よしたか  
真鍋 宜隆

## 目 次

はじめに	1
第一章 背景	
1-1 進む地球環境の悪化（森林破壊、気候変動、劣化地の増加）	2
1-2 油脂産業を取り巻く状況（食用植物油の需要と生産量の増加）	3
1-3 未来の油脂産業に向けた施策	6
第二章 劣化地におけるポンガミア植栽の可能性	
2-1 ポンガミアとは	7
2-2 油糧作物としてのポンガミアの価値と課題	8
第三章 ポンガミア油の食用油脂化と副産物の活用	
3-1 ポンガミア油の食用油脂化のメリットと実施概要	10
3-2 次世代の溶媒 - 天然深共晶溶媒 (NADES) の活用	11
3-3 NADES・PBCによるカランジン・ポンガモールの除去と精製フロー	12
3-4 NADESからのカランジン・ポンガモールの回収と有効活用	14
3-5 PBCの作製と再生方法	15
第四章 施策実行スケジュールと収益試算	
4-1 施策実行スケジュール	16
4-2 収益計算（5万haを想定）	16
第五章 未来の持続可能な社会に向けて「次世代の環境保全システム」の提案	
5-1 未来の持続可能な社会に必要なもの	20
5-2 ブロックチェーン技術を用いた「地球環境への貢献」価値の最大化	21
5-3 地球と寄り添って生きる未来に向けて、次世代へのESDの推進	22
5-4 未来の油脂産業と持続可能な社会に向けて	24
おわりに	25
参考文献	26

## はじめに

18世紀後半の産業革命で「ものづくり」の機械化が主流となって以降、人類史の発展は目覚ましく、20世紀後半に「情報化社会」へとシフトすることで人々の生活の利便性は飛躍的に向上した。一方で、地球環境については、急速な人口増加と生活水準の向上の裏で、商用地拡大による森林伐採、CO<sub>2</sub>排出による地球温暖化、気候変動による劣化地拡大といった環境破壊が急激に進行している。

こうした状況の中、気候変動抑制に関する国際的枠組みとして1997年に京都議定書、2015年に196カ国が参加するパリ協定が採択され、国際協力が加速している。一方で、世界気象機関（WMO）によると、2024年の世界平均気温が産業革命前の水準と比べて1.55°C上回っており、パリ協定で目標としていた「1.5°C」水準を早くも超える値となった<sup>1)</sup>。これまで以上に効果的な施策を実行する必要がある。

油脂を取り巻く状況に目を向けると、人口増加および一人当たりの植物油の消費量増加にともない生産量は右肩上がりである一方で、供給面では森林減少への影響や農地拡大の制限、気候変動による収穫量の不安定化、規制による制限など多くの課題があげられる。

筆者は一刻も早くこの状況を打破し、次世代に向けて持続可能な社会を築き、継承していかなければならないと考える。

本論文では、強靱な生命力をもち、収油率の高い油糧作物ポングミアに着目し、劣化地での植栽とNADES精製による食用油脂化を通じて、環境悪化の抑制と食糧需要の両立を目指す。さらに、MAT収益システムによる環境貢献の価値化と、ESDと連動した次世代向けの取り組みを通じて、「次世代の環境保全システム」を提案する。これにより、世界中の誰もが参加できる持続的な取り組みへと発展させ、未来の地球環境を取り戻す道筋を示すとともに、持続可能な未来を支える新たな油脂産業モデルの構築を図る。

## 第一章 背景

### 1-1 進む地球環境の悪化（森林破壊、気候変動、劣化地の増加）

国連食糧農業機関（FAO）によると、世界の森林面積は1990年以降の30年間で約1億7800万ha減少しており、これは日本の面積の約5倍に相当する。特に南アメリカ、アフリカの熱帯地域、東南アジアで顕著である。森林破壊が起こる要因としては、農地・放牧開発、商用伐採・違法伐採、焼畑農業など農林業関連の原因が大きい。FAOによると2000年から2018年の森林減少のうち約90%が穀物と家畜にかかる農地の拡大を主要因としており、まさしく我々人類の活動の産物である。森林破壊が地球環境におよぼす影響は、気候変動への影響、生物多様性への打撃、洪水リスクの高まり、感染症の拡大など多岐にわたる。

こうした森林破壊を背景に気候変動も急速に進行している。気候変動の主要因は大気中のCO<sub>2</sub>濃度の上昇であり、産業革命以降増加の一途である。1860年と比べると世界の年間CO<sub>2</sub>排出量は約10倍、大気中のCO<sub>2</sub>濃度は280ppmから420ppmと1.5倍になっており、2024年には世界平均気温が産業革命前の水準と比べて1.55℃上回り過去最高水準を記録した<sup>2) 3)</sup>。

森林破壊と同時に土壌の劣化も深刻な問題となっている。土壌の劣化とは土壌の機能や生産性が低下した状態のことであり、土壌の侵食、酸性化、汚染、養分不均衡、塩類集積など様々な要因で引き起こされる。FAOによると、食糧生産に重要な地球上の土壌の33%以上がすでに劣化しており、2050年までに90%以上の土壌が食糧生産に適さない土地になる可能性が訴えられている<sup>4)</sup>。国連砂漠化防止条約

(UNCCD)によると、2019年時点で地球上の推定1.22~1.5億haが劣化地として報告されており、今後も増え続けると予想されている(図1、図2)<sup>5)</sup>。この土地劣化は、人口増加、農地・放牧地の急速な拡大、気候変動などの要因が複合的に影響して起こるが、特に砂漠化地や塩類集積地の再生は難しく、「劣化地の放棄→劣化地以外の土地を利用し続ける→栄養の偏りなどで土地劣化が進行」といった負の連鎖が発生する。さらに土地劣化自体が気候変動の大きな原因の一つであるため、「土地劣化⇔気候変動」の悪循環は相乗的に加速する<sup>6)</sup>。

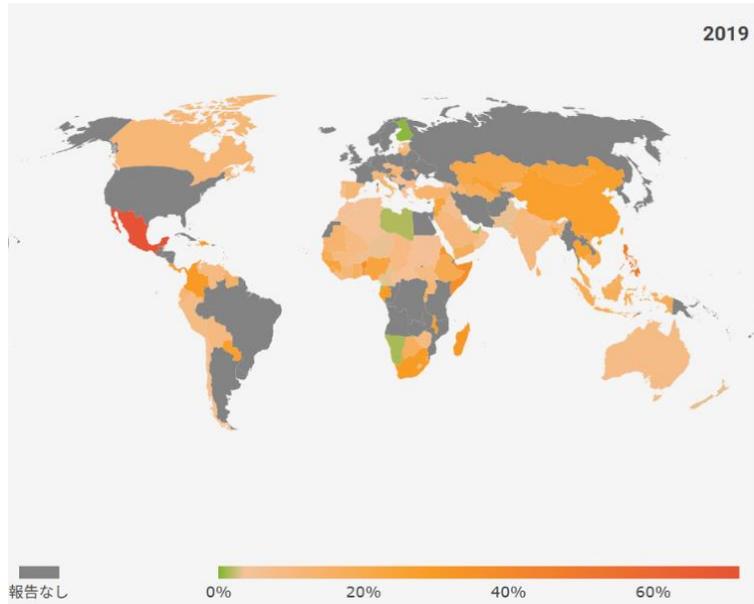


図1 世界の劣化地の割合<sup>5)</sup>



図2 地域ごとの劣化地の割合<sup>5)</sup>

### 1-2 油脂産業を取り巻く状況（食用植物油の需要と生産量の増加）

我々油脂産業業界を取り巻く状況に目を向けると、人口増加に伴い、植物油の需要と生産量の増加が見えてくる。国連世界人口推計では、世界人口は2024年に82億人となり、2080年には103億人に達すると予測されている。特にアフリカを中心とした9カ国では人口増加が非常に早く、2024年から2054年の間に人口は倍増すると予測されている（図3）<sup>7) 8)</sup>。

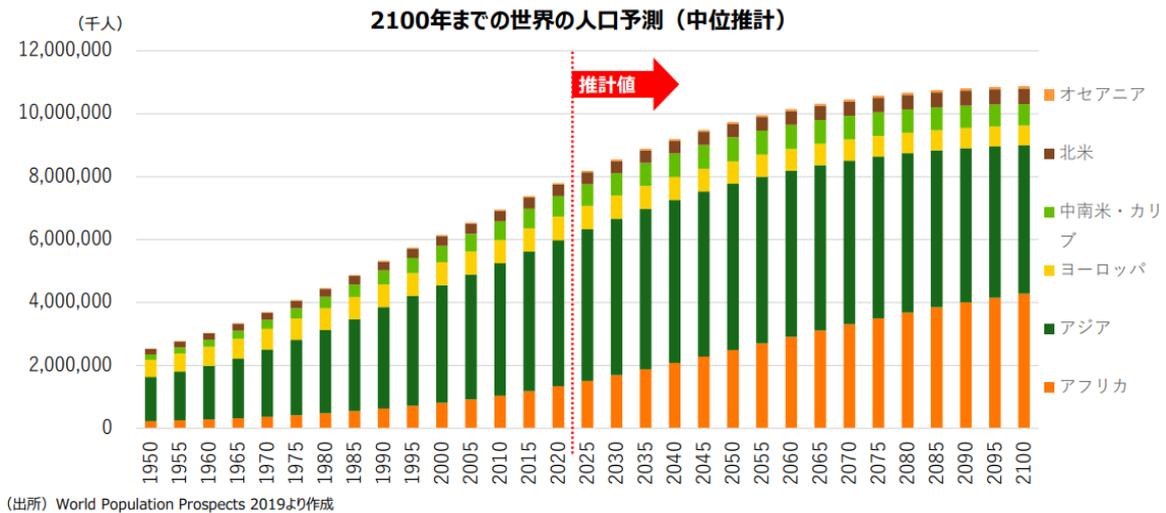


図3 2100年までの世界の人口予想<sup>8)</sup>

人口増加や経済発展に伴い、一人あたりの食用植物油の消費量は堅調に増加しており、特に低中所得国と一部の新興国では高所得国に匹敵するレベルになってきている。2034年までにインドは13kg/年に、中国やブラジルは27kg/年に達するとされている。アフリカなどの後発発展途上国（LDCs）においても都市化と所得増加に伴い、食習慣は植物油の含有量の多い加工食品の消費にシフトし、一人当たりの消費量は7.7kg/年に拡大すると予測されている（図4）<sup>9)</sup>。

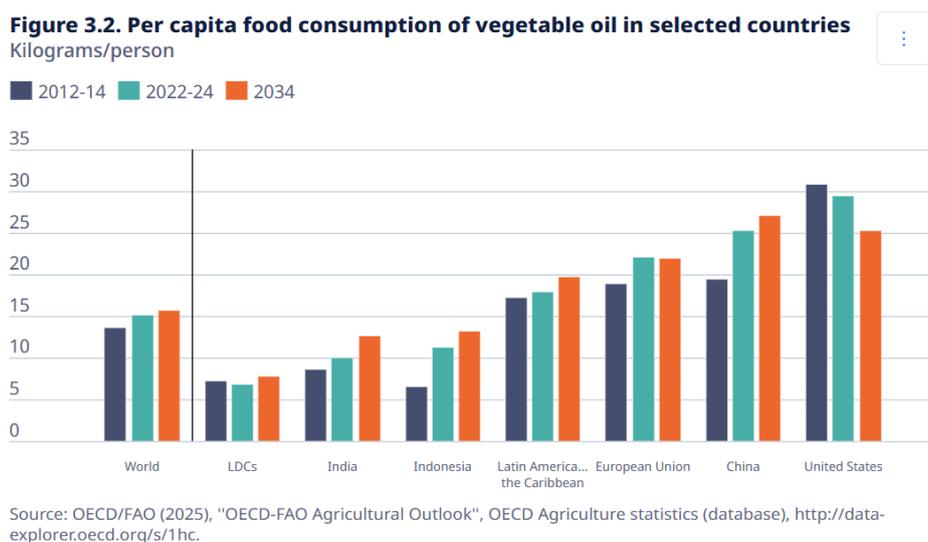


図4 食用植物油の一人当たりの年間消費量（kg/人）<sup>9)</sup>

こうした植物油の需要増加を背景とし、植物油の生産量も増加が続いている。世界の植物油生産量に関して、2023年の生産量は約2.3億tと、2003年比で2倍以上の驚異的な伸びを示しており（図5）、2030年には2.8~2.9億tへ達すると予測されている。主軸の油種としては、生産量が最も多いパーム油は約8100万tで全体の35%、次いで大豆油が約6200万tで全体の27%を占めている。世界人口の増加、植物油の需要増加を背景に、増産トレンドは今後も継続すると予想される<sup>10) 11)</sup>。

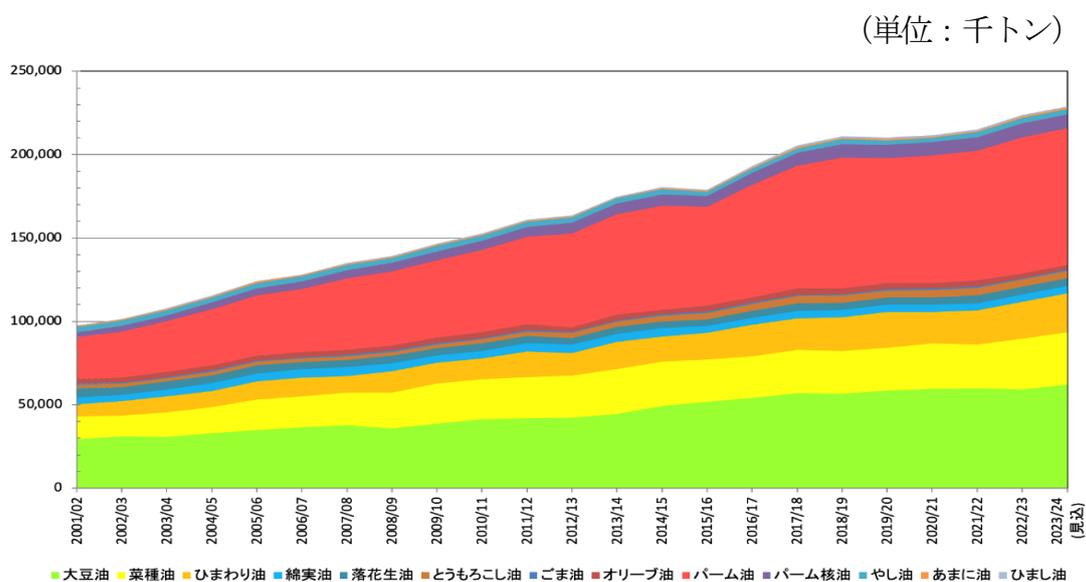


図5 植物油の生産量<sup>10)</sup>

一方で、近年の植物油の爆発的な増産にともなう農地拡大は、地球環境に大きな影を落としている。代表的な油糧作物である大豆やパームの現状をみてみよう。ここ半世紀、大豆農園は主にアマゾン地帯を切り開いて増加しており、2019年にはブラジルは生産量世界1位となった。アマゾンにおける森林破壊の約80%が大豆生産によるものであり、2000年から2017年の間に推定283万haの森林が破壊されている<sup>12) 13)</sup>。さらに深刻なのが、パーム農園増加にともなう森林伐採である。2001年から2015年の間にパーム農園は世界的に2240万ha拡大しており、パームの栽培適正地であるインドネシアでは53%が、マレーシアでは57%が森林を伐採して作られている（図6）<sup>14)</sup>。

Forest area replaced by oil palm in Indonesia and Malaysia (2001-15)

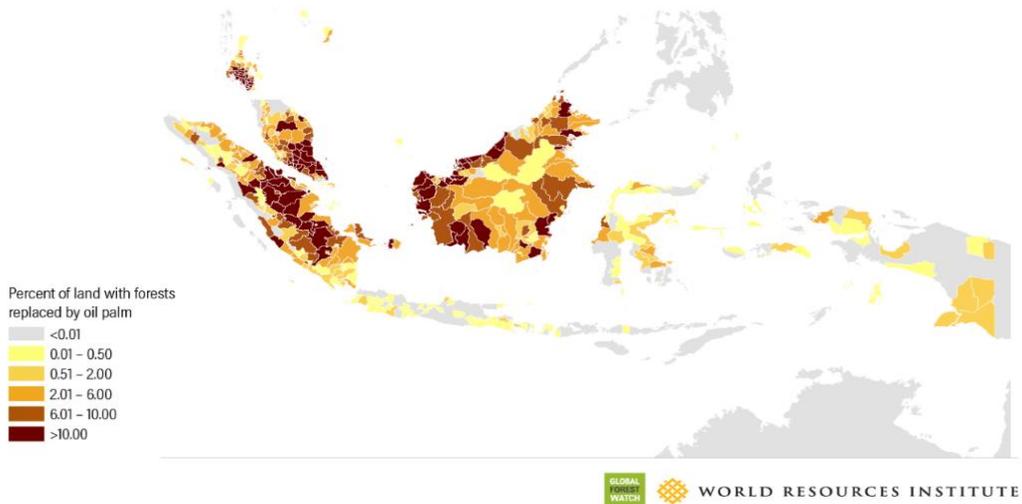


図6 パーム農園による森林伐採（インドネシア・マレーシア）<sup>14)</sup>

また、この地域には温室効果ガスを高濃度に含んでいる熱帯泥炭地が広がっており、近年の開発や森林火災により「炭素の貯蔵庫」から「炭素の放出源」へ転じている<sup>15)</sup>。インドネシアのパーム油生産では、2015年から2022年の間に年間平均2.2億tに相当するCO<sub>2</sub>の排出報告もある。これはインドネシアの年間総排出量（12.3億t）の約20%に相当する量である<sup>16)</sup>。

こうした状況を受け、「森林・土地利用に関するグラスゴー・リーダーズ宣言」にて145カ国が森林保全とその回復促進の取組を強化している。またEUでは欧州森林破壊防止規則（EUDR）が公表され、大豆やパーム油に対して森林デューデリジェンス（生産過程で森林破壊を引き起こさないことの確認）が企業に義務化される。このように、これ以上の農地拡大、森林伐採は非常に困難となってきている<sup>8) 17)</sup>。

### 1-3 未来の油脂産業に向けた施策

進行する環境破壊と増え続ける食料・油脂需要の中で、これからの未来の油脂産業の施策として、大規模植栽が可能であり環境負荷の少なく、パーム油に代わる油糧作物を用いた産業が構築できないか検討を行った。そしてこの条件に当てはまる施策として筆者は、【劣化地でのポンガミア植栽による持続可能な次世代の食用油脂産業の実装モデル】を提案する。

## 第二章 劣化地におけるポンガミア植栽の可能性

### 2-1 ポンガミアとは

ポンガミア（英名 *Pongamia pinnata*、和名クロヨナ）は、マメ科の被子植物で、主にインドや東南アジア、オーストラリアなどで自生している（図7）。



図7 ポンガミア<sup>18)</sup>

高さ8~25mの樹木で、樹齢は50年以上。4~7年で結実。1株あたり10~24kg/年の種子が得られる。耐塩性、耐アルカリ性、湛水耐性が強く、年間降水量500~2500mmの地域で生育でき、成木では年平均気温1~50℃まで耐えられる<sup>19)</sup>。根粒菌と共生することで大気中の窒素を窒素栄養源として成長するため、窒素肥料を必要としない。劣化地での植生適正が高いため、同じ根粒菌共生植物である大豆と比べても、土壌への窒素固定による優れた土壌改善効果が期待できる<sup>20)</sup>。加えてポンガミアのCO<sub>2</sub>固定量は、樹齢3~5年の若木で1.1~3.7t/ha/年、10~18年の木で6~25t/ha/年、20年以上の成熟林では55~92t/ha/年であり<sup>21)</sup>、劣化地での植栽により、新たなCO<sub>2</sub>の固定を創出できる。

ポンガミアの主根は太く長く、側根は数が多く非常によく発達するため土壌の侵食防止や砂丘固定に有効とされ<sup>22)</sup>、スリランカでは防風林としても植えられている。よって、農地に適さない、いわゆる劣化地での育成が可能であり、劣化地の修復にも非常に有効である。また、最初の数年間で急速に成長し、育成のためのメンテナンスはほとんど必要としないため、大規模植栽も容易であると考えられる<sup>19) 23)</sup>。パームの産地の一つであるインドネシアでは約1400万haの劣化地があり、劣化度合が重い

300万haも含め、ポンガミアの植栽に適していると考えられ<sup>24)</sup>、劣化地での試験的植栽が実施されている<sup>18) 25)</sup>。このように、ポンガミアを劣化地で植栽することにより、森林保全、劣化地の削減・防止、気候変動抑制など地球環境への貢献が期待できる(図8)。

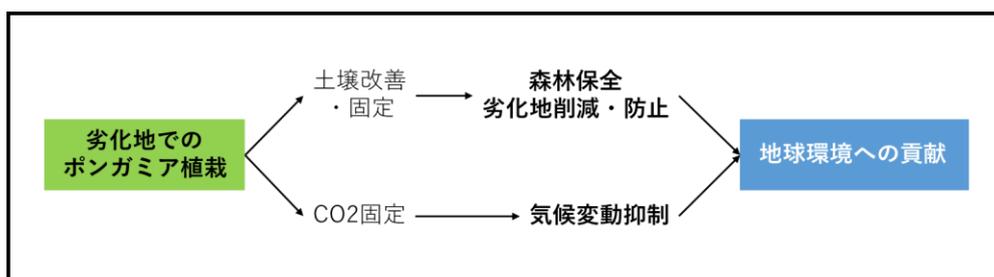


図8 劣化地でのポンガミア植栽の可能性

## 2-2 油糧作物としてのポンガミアの価値と課題

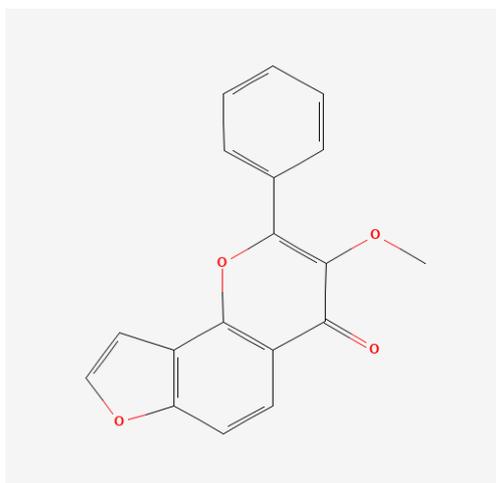
種子中の油分は30~40%、油の収量は2~10t/ha/年ともいわれ、パームに匹敵する油糧作物である(図9)<sup>26)~28)</sup>。脂肪酸組成はオレイン酸51.5%、リノール酸16%、パルミチン酸11.6%、ステアリン酸7.5%、 $\alpha$ リノレン酸2.6%、その他10.8%。不飽和脂肪酸が60%以上で、比較的オリーブ油や菜種油と似た組成である<sup>29)</sup>。精油後の風味は、クセがなくほんのりナッツやバター調の風味を呈する<sup>30) 31)</sup>。



図9 ポンガミアの種子<sup>22)</sup>

一方でポンガミア油中には食用に適さない成分であるカランジンが1.6%程度、ポンガモールが0.7%程度含有されている。カランジンはフラノフラボノールに属する化合物であり、殺虫・ダニ駆除効果や除草効果があるため、さまざまな害虫や害草を標的とする生物農薬として利用されている【カランジン： $C_{18}H_{14}O_4$ 、分子量292.29g/mol（図10）】。また、ポンガモールはフラボノイドに属し、抗酸化作用、抗炎症作用、抗菌作用、抗真菌作用があり、特定のがん細胞の増殖を抑制する可能性も示唆されている【ポンガモール： $C_{18}H_{14}O_4$ 、294.3g/mol（図10）】<sup>29) 32)</sup>。油糧植物として高いポテンシャルをもつポンガミアを食用油脂に利用する場合、これらの成分除去が課題と考える。

カランジン



ポンガモール

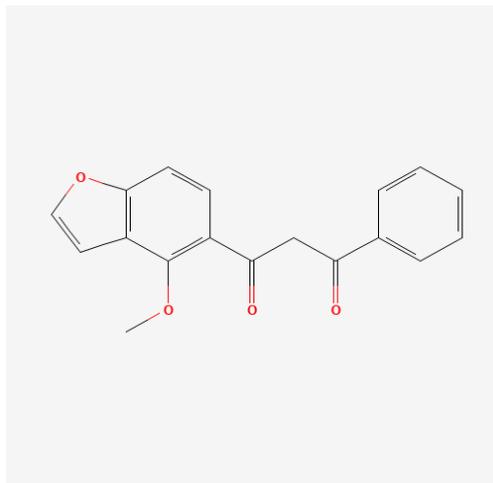


図10 カランジンおよびポンガモールの構造式<sup>33) 34)</sup>

## 第三章 ポンガミア油の食用油脂化と副産物の活用

### 3-1 ポンガミア油の食用油脂化のメリットと実施概要

前章で述べたように、ポンガミア油はカランジンやポンガモールを含有するため、食用油脂としての利用が制限される。一方でカランジンは、天然由来の有機農薬として使うことができ、単なる有害成分ではなく、有望な副産物資源としての評価も高まっている<sup>36)</sup>。すなわち、適切な精製技術を導入して、分離さえできれば、劣化地を再生しながら油脂および有機農薬という価値のある素材の同時生産が可能となり、持続可能かつ高付加価値な油脂産業モデルの構築が期待できる。

さらに、ポンガミア油はオレイン酸と飽和脂肪酸をバランスよく含むため、栄養バランスと調理適正を兼ね備えている。似た組成の油としてオリーブ油があるが、近年の旺盛な需要に対して供給は限られており、価格も非常に高い。ポンガミア油であれば、大量生産ができ、比較的安価に供給できると考える。パーム油と比べてオレイン酸の割合が高いため、健康志向の油脂として十分な競争力もあるといえる。

ポンガミア油の食用油脂化の取り組みとしては、Terviva 社らは 2023 年にエタノール抽出により精製したポンガミア油について、GRAS (Generally Recognized As Safe) をアメリカ食品医薬品局 (FDA) に通知した (GMR No. 1153) が、2024 年に評価取り下げとなっている<sup>36) 37)</sup>。本通知ではカランジンおよびポンガモール濃度は 150ppm 未満だが、より低減させることが課題と考えられる。

本章では、次世代のクリーン溶媒ともいわれる天然深共晶溶媒 (NADES) およびポンガミアバイオ炭 (PBC : Pongamia Biochar) を利用したポンガミア油の食用油脂化を提案する。これによりカランジン濃度 5ppm 未満まで精製し、食用油脂として十分なレベルを担保する。NADES はターゲット物質に対する高い抽出率を持つだけでなく、抽出物の高純度再回収も可能なため、副産物の利用にも有効である (図 11)。以下にその詳細を述べる。

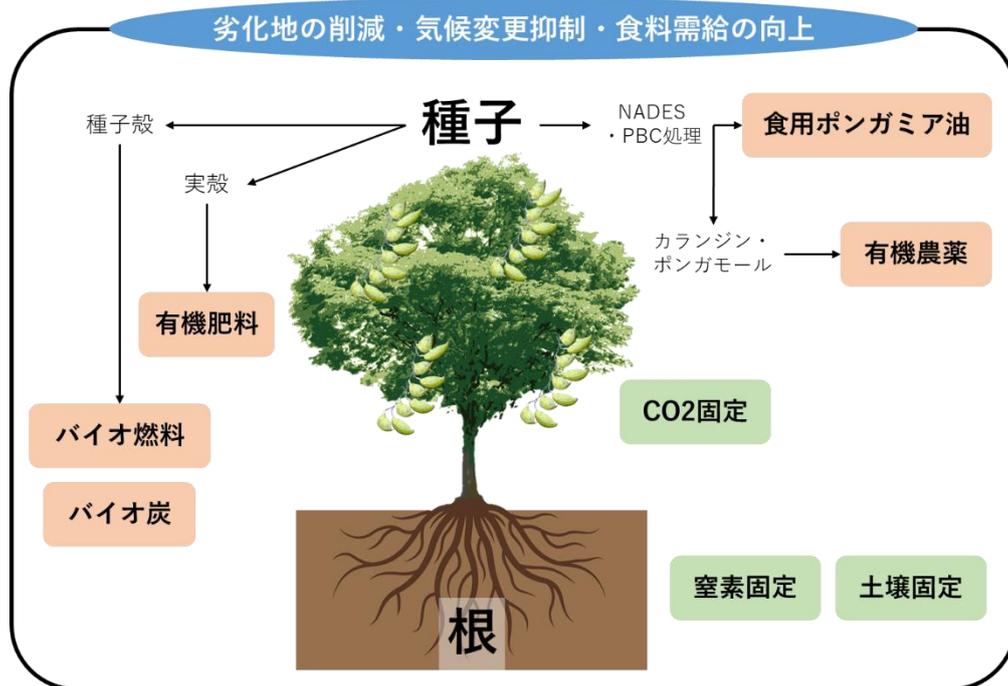


図 11 劣化地でのポンガミア植栽および食用油脂化のメリット

### 3-2 次世代の溶媒 - 天然深共晶溶媒 (NADES) の活用

古くから油脂の精製や油溶成分の抽出にはメタノールやヘキサンなどの溶媒が使用されてきたが、それ自体の毒性が高く、高揮発性、低分解性のため環境への負荷が非常に大きいことが問題となっている。そうした状況の中、低コスト、低毒性、低環境負荷、高利便性を兼ね備えた次世代の溶媒として、深共晶溶媒 (DES : Deep Eutectic Solvent) が注目されている。DES とは、水素結合ドナー性の化合物 (HBD) と水素結合アクセプター性の化合物 (HBA) を一定の割合で混合するだけで生成できる「室温で液体」になる化合物である。任意の物質を溶解できるため、分離・抽出溶媒として優れている。原理上は HBD と HBA の組み合わせだけで任意の特性を持った溶媒を自由に作り出せるため、ターゲット物質の高効率抽出など、目的に応じた最適な溶媒を作り出すことができる。従来の溶媒 (エタノール、メタノール、ヘキサン、ブタンなど) と比べて、低毒性、低揮発性、難燃性、高熱安定性といった特徴を持ち、同様の特性を持つイオン液体と比べても、低毒性、低コスト、低環境負荷とメリットが大きい。

さらに DES の中でも、生物由来の一次代謝産物である有機酸、糖、アルコール、アミン、アミノ酸などの2種類以上の化合物から構成されるものを天然深共晶溶媒 (NADES : Natural Deep Eutectic Solvent) という。これらの構成成分は、生分解性が高く、食品添加物や栄養素としてすでに使用実績をもつため、安全性の高い溶媒といえる。DES の初期の報告は2001年<sup>38)</sup>であり、NADES は2011年以降に広がり始めた比較的歴史の浅い技術であるが、次世代のクリーン溶媒として注目されており、食品や医薬用途での利用が期待される<sup>39)~44)</sup>。

### 3-3 NADES・PBCによるカランジン・ポンガモールの除去と精製フロー

#### <NADESによるカランジン・ポンガモールの除去>

NADESによるターゲット物質の抽出において、ターゲット物質に対する極性の近似、HBAとHBDの最適なモル比による表面張力の低下、抽出時の温度と時間などが重要とされているが、その試験例は未だ少なく限定的である<sup>43) 44)</sup>。NADESを用いたポンガミア油からのカランジンおよびポンガモールの抽出に至っては、まだ試験例がないため、油からフェノール類やポリフェノール類をDESおよびNADESで抽出した例(注1)を参考に条件を設定する。設定した初期条件は「NADES(キシリトール/塩化コリン/水(Xyl/ChCl/水)=2:1:3) : ポンガミア油=1:1で調合、40°C1時間反応」とし、ラボ試験でNADESの配合・抽出条件をブラッシュアップ、必要に応じて超音波処理を入れることで抽出率95%を想定する。なお、分子量および構造が似ているカランジンとポンガモールの抽出率は大きく変わらないと考えられるため主に含有濃度の高いカランジンに焦点を当てて考える。カランジンの初期濃度16000ppmとし、NADES工程を2回実施することで、40ppmまで低下させる(図12)。

(注1) [DESおよびNADESによる参考抽出例]

◇綿実油からゴシポールの抽出:

DESのスクリーニングで95%以上抽出可能な組成を同定<sup>45)</sup>

◇オリーブオイルからオレアセインとオレオカンタールの抽出:

ChCl/グリセリン、30°C20分、92%以上抽出<sup>46)</sup>

◇バージンオリーブオイルからのフェノール化合物の抽出:

NADES(キシリトール/塩化コリン/水(Xyl/ChCl/水)=2:1:3) : バージンオリーブオイル=1:1、30°C~40°C1時間、90%以上抽出<sup>47)</sup>

### <PBC吸着によるカラジン・ポンガモールの除去>

仕上げとしてPBC吸着によりカラジン・ポンガモールの除去を行う。フェノール類・ポリフェノール類等の除去例（注2）を参考に、PBC 20g/ℓ油、60°C90分で除去率90%を想定する。この工程でカラジン濃度を4ppmまで低下させる（図12）。なお、PBCはポンガミア殻から製造することで廃棄物を削減・再利用するが詳細は「3-6」にて述べる。

（注2） [活性炭・バイオ炭を用いた参考除去例]

◇ゴシポールの除去：25°C30分で95%以上除去<sup>48)</sup>

◇植物油中の色素（クロロフィル、カロテン、キサントフィルなど）の除去：  
活性炭5%、60°C90分で除去率96.5%<sup>49)</sup>

◇バイオ炭では排水中のフェノール類の除去：除去率90%まで確認<sup>50)</sup>

### <ポンガミア油の精製フロー>

ポンガミア油の精製フローは、通常の油脂精製にカラジン・ポンガモール除去工程を組み込んで、下記の流れで行う（図12）。

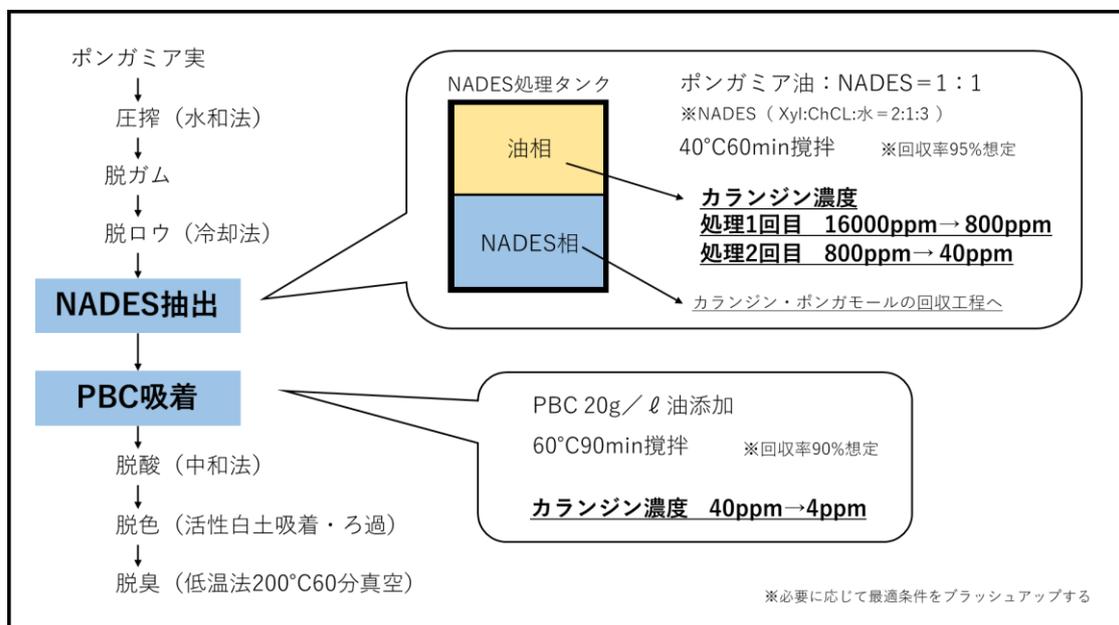


図12 精製フローとNADES・PBCによるカラジン・ポンガモールの除去<sup>45) ~49)</sup>

### 3-4 NADES からのカラジン・ポンガモールの回収と有効活用

#### <NADES からのカラジン・ポンガモールの回収>

NADES からのカラジン・ポンガモールの取り出しは、加水による沈殿法を利用する。NADES からの有用成分回収に多用される方法であり、水を加えることで溶媒抽出後の目的物質を沈殿・分離させる。NADES に加水し、静置後に遠心分離して結晶化したカラジン・ポンガモールを回収する（73.5%~95%の回収率<sup>51)~53)</sup>。これを2回実施することで回収率90%以上を想定する。これによりカラジン結晶は10kg/t以上回収可能となる。また、加水したNADES相は再濃縮（50°C・真空）することで再利用する。再生したNADESは専用タンクにて、適正濃度を管理する（図13）。

#### <副産カラジン・ポンガモールの有効活用>

カラジンやポンガモールは、一般的に医薬品や有機農薬用途として利用されている。医薬品については純度や法律の規制ハードルが高いため、有機農薬での利用を考える。有機農薬はネットでも販売されておりカラジン2%：1900円/kg、アザジラクチン95%：7600円~9500円/kgなどがある<sup>54) 55) 56)</sup>。特にインドでは、オーガニックの農薬事例として、化学農薬の代替になる成分アザジラクチンが天然化合物として含有されているニーム油が販売されている。ポンガミアの生育地帯が集中しており身近なことから、カラジンの農薬需要も旺盛と考えられるため、インドでの販売を想定する。

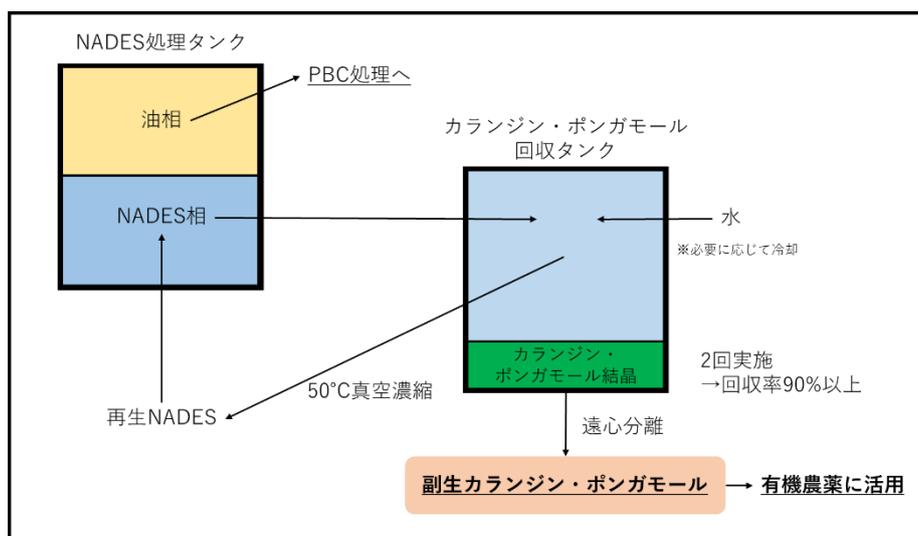


図13 NADES からのカラジン・ポンガモールの回収<sup>51)~53)</sup>

### 3-5 PBCの作製と再生方法

ポンガミアから油を圧搾した際に実殻や油粕が大量に発生するため、これを活用してPBCを作製する。実殻および油粕を400~500°Cで無酸素加熱・粉碎しPBCを作製、必要に応じて賦活処理も実施する。熱源には、同じく実殻および油粕から作製したバイオコークスを活用する<sup>57)</sup>。精製で使用したバイオ炭の再生は(注3)を参考に、300°C3.5時間で再生率90~95%を想定し、2~3回再生利用、最後に土壌改良剤として使用する(図14)。炭には土壌改良効果があり、土壌の透水性、保水性、通気性といった物理的作用のほか、pH調整やリンなどの栄養素を供給する効果がある<sup>58)~60)</sup>。ポンガミアからのバイオ炭作製・活用と土壌改良への利用により、ポンガミアに固定されたCO<sub>2</sub>を無駄なく循環でき、カーボンクレジットの評価向上も期待できる。

(注3) [活性炭の再生例]

◇バイオ炭再生：300°Cの熱再生で再生効率99%以上<sup>61)</sup>

◇クエルセチン(カランジンに近い分子量のフラボノール)を対象とした活性炭再生：300°Cでの熱再生で再生効率約95%以上<sup>62)</sup>

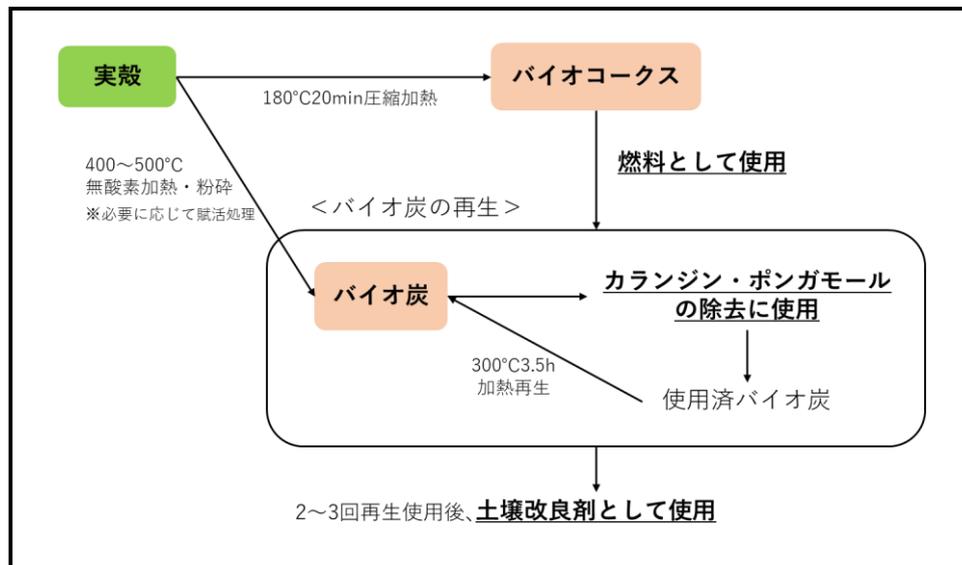


図14 PBCの作製と再生方法<sup>57) 58) 61) 62)</sup>

## 第四章 施策実行スケジュールと収益試算

### 4-1 施策実行スケジュール

まずはラボスケールでポンガミア油の収量、精製効率、副生カラジン・ポンガモール量の最適条件を確認する。ポンガミア植栽は10haレベルの試験運用から始め、500～5000haのプレ商業レベルにスケールアップを図る。最終的には、フル商業レベルの5万haを目標とする（精製規模20万t/年の大規模工場を想定）。本事業は、インドネシアの政府・企業が主体となり、現地での土地の確保と運用を行う。さらに日本の政府・企業が連携してイニシャルコストの一部資金調達、植栽や精製技術のサポートを実施する。インドネシア政府はFOLU Net Sink 2030<sup>63)</sup>を掲げており、すでに劣化地修復に取り組みは始めている。また日本とも二国間クレジット制度の取り決めを進めているため<sup>64)</sup>両国での連携も難しくないと考える。本章では、インドネシアにてフル商業レベルの5万ha規模を想定した際の収支シミュレーションを行う。

### 4-2 収益計算（5万haを想定）

ポンガミア植栽5万haスケールでの運用に際して、事業試算の前提条件（表1）、想定価格（表2）を設定した。これをもとに、収入の算出（表3）、支出の算出（表4）を行った結果、合計収入は10年目までは4.350億\$/年、10年目以降は4.665億\$/年を、合計支出は、10年目までは2.539億\$/年、10年目以降は2.087億\$/年を見込む。よって、最終的な収支は、10年目までは1.811億\$/年（収益率41.6%）、10年目以降は2.578億\$/年（収益率55.3%）となった（表5）。ここに運賃等が乗ってくるが、事業の収益率としては十分成り立つレベルである。その後、収益の一部で新たな植栽地の拡大を図り、さらにポンガミア植栽に関する研究・教育も推進していく。

表1 事業試算の前提条件

農地面積		5万 ha ※大規模精油規模（油処理量500～1000t/日）想定より設定
ポンガミア本数		2500万本（500本/ha） ※想定植樹間隔：4m×5mより算出
ポンガミア油量		20万 t（4t/ha） ※粗油5t/ha <sup>25）～27）</sup> 、精油歩留80%より算出
副生カランジン・ポンガモール量		5175t（103.5kg/ha） ※カランジン量80kg/ha（粗油中1.6%） <sup>28）</sup> より算出 ※ポンガモール量35kg/ha（粗油中0.7%） <sup>29）</sup> より算出 ※回収率90%より算出
年間CO <sub>2</sub> 固定量	1～10年目	15万 t（3t/ha） ※1～6t/ha（樹齢3～10年） <sup>30）</sup> より算出
	10～20年目	90万 t（18t/ha） ※6～25t/ha（樹齢10～18年） <sup>30）</sup> より算出
精製工場規模		20万 t/年（667t/日） ※300日/年稼働を想定
電気量	圧搾	16.875GWh（337.5kWh/ha） ※27kWh/実t <sup>65）</sup> 、実12.5kg/ha <sup>30）</sup> より算出
	精製	5.6GWh（140kWh/ha） ※28kWh/油t <sup>65）</sup> 、粗油5t/ha <sup>25）～27）</sup> より算出
従業員	農園	5000人 ※10ha/人を想定
	工場・管理・販売	600人 ※約1.1t/人を想定
販売手数料・管理費		売上価格の10% ※販売品・カーボンクレジット等の手数料・管理費を想定

※土地はインドネシア政府の協力の下、非林業区（APL）を活用するため、賃料や購入費はかからないとする

表2 想定価格

ポンガミア油価格		1000\$/t ※パーム油並みの価格を想定
副生カランジン・ポンガモールの価格		44.33\$/kg ※販売中の農薬（カランジン2%）12.7\$/kg <sup>50</sup> 、 副生物中のカランジン割合約70%、 卸売価格を小売価格の20% <sup>50</sup> 、原材料費20%を想定
環境貢献価値の価格		42\$/t ※カーボンクレジット30\$+認証プレミアム12\$を想定 ※EU25~30\$/t CO <sub>2</sub> <sup>60</sup> 、日本30~37\$/t CO <sub>2</sub> <sup>60</sup> 、 米国7~20\$/t CO <sub>2</sub> <sup>70</sup> を参考 ※認証プレミアムで40%上乗せ <sup>71</sup> を参考
ポンガミアの苗価格		2\$/本 ※ポンガミア300円/本を想定 ※コンテナ苗（樹齢1~4年、苗長20~25cm）：スギ214円/ 本、カラマツ172円/本、トドマツ260円/本 <sup>72</sup> を参考
ポンガミア農園の土地整備、 道路整備、収穫・運送機器費		2622\$/ha ※土地整備（除草・伐根・整地など）：481\$/ha <sup>73</sup> を参考 ※道路整備：141\$/haを想定：3526\$/km <sup>70</sup> 、40m/ha <sup>74</sup> を参考 ※収穫・運送機器：2000\$/haを想定：4万\$/20ha/1~2台
精製工場建設費	基礎設備	6億\$ ※600~700t/年規模のパーム油精製工場建設費 4.5~6.4億\$ <sup>75</sup> を参考
	NADES 設備	1.2億\$ ※既存設備の20%の費用を想定（特殊な設備なし）
NADES 原料価格	キシリトール	5.33\$/kg ※キシリトール600~1100円/kg <sup>76</sup> を参考
	塩化コリン	4.8\$/kg ※塩化コリン95~190\$/25kg <sup>80</sup> を参考
	NADES	2.576\$/kg ※NADES（キシリトール：塩化コリン：水=2：1：3）を想定
維持・管理費	ポンガミア苗	10年目までは初期コストの5%、 それ以降は10%
	農園運送・設備	
	精製工場	
精製費	通常精製	25\$/t ※RED パーム油までの精製コスト14~30\$/t <sup>82</sup> を参考
	NADES	5\$/t ※通常精製の20%の費用を想定（特殊な操作なし）
NADES 減少分費		0.1288\$/kg ※5%/毎ロスを想定
電気代（インドネシア）		0.732\$/kWh ※インドネシアの産業用電気価格1200ルピア/kWh <sup>83</sup> を参照
人件費（インドネシア）		400\$/月 ※インドネシアの製造業平均収入192\$/月 <sup>84</sup> 、最低賃金 324\$/月 <sup>85</sup> + 上昇傾向から想定

※1\$=150円換算

※蒸気はポンガミア実殻・油粕から作製したバイオマス燃料で賄う

表3 収入

収益明細	年間収益	
	10年目まで	10年目以降
ポンガミア油の販売金額	2.000億\$	2.000億\$
副生カランジン・ポンガモールの販売金額	2.287億\$	2.287億\$
環境貢献価値の販売金額	630万\$	3780万\$
収入(計)	4.350億\$	4.665億\$

表4 支出

費用明細		年間支出		
		10年目まで	10年目以降	
初期費用 (減価償却 10年想定)	ポンガミアの苗費用	500万\$	—	
	ポンガミア農園の土地整備、道路整備、収穫・運送機器費	1311万\$	—	
	精製工場建設費	基礎設備	6000万\$	—
		NADES費	1200万\$	—
	NADES初期原料費 (10日分)	キシリトール	1183万\$	—
		塩化コリン	533万\$	—
NADES		1716万\$	—	
運用費用	維持・管理費 (10年目まで5%、 それ以降10%)	ポンガミア苗	250万\$	500万\$
		農園運送・設備費	500万\$	1000万\$
		精製工場費	3600万\$	7200万\$
	精製費	通常精製	500万\$	500万\$
		NADES	100万\$	100万\$
	NADES減少分費(5%/毎)		2574万\$	2574万\$
	光熱費		1645万\$	1645万\$
	人件費		2688万\$	2688万\$
販売手数料・管理費用		4350万\$	4665万\$	
支出(計)		2.539億\$	2.873億\$	

表5 収支

		10年目まで	10年目以降
収支/年	収入	4.35億\$	4.665億\$
	支出	2.539億\$	2.087億\$
	収支	1.811億\$	2.578億\$

## 第五章 未来の持続可能な社会に向けて「次世代の環境保全システム」の提案

### 5-1 未来の持続可能な社会に必要なもの

第四章までに述べた「劣化地でのポンガミア植栽と食用油脂化」により、地球環境に対して大きな貢献が期待できる。一方で、未来の持続可能な社会の実現のためには、単発的な実施や慈善活動の範疇では決して達成することはできない。より持続的で有効性の高い取り組みへと進化させることが必須である。そこで必要なものはなにか？筆者は「地球環境への貢献」に対する十分な価値化と、環境保全を当然とする根本的な意識改革であると提言する。そして、これらが揃って初めて、真の地球との共生を実現することができると思う。

本章では未来の持続可能な社会の創造に向けて、多属性トークン（MAT：Multi-Attribute Token）による環境貢献価値の最大化とESD（Educational for Sustainable Development）推進による意識改革を主軸とした、次世代の環境保全システムを提案する（図15）。

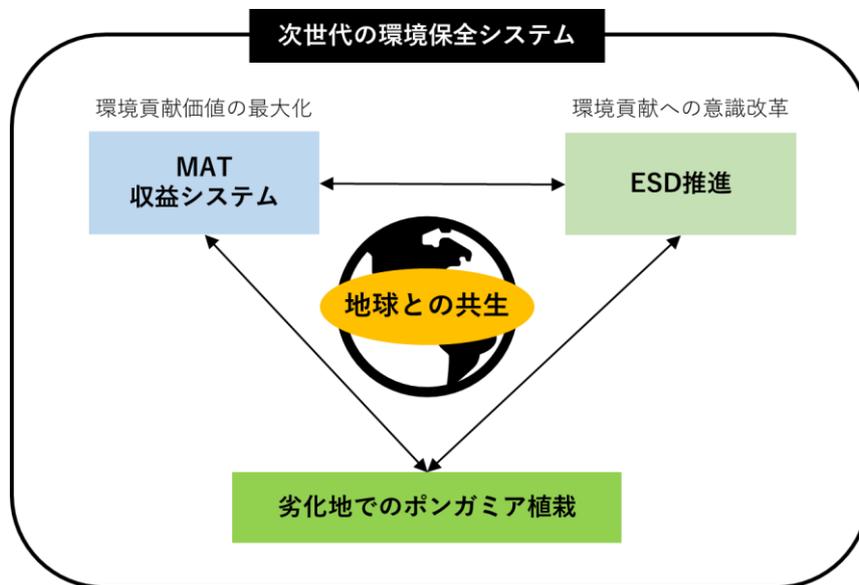


図15 次世代の環境保全システム

## 5-2 ブロックチェーン技術を用いた「地球環境への貢献」価値の最大化

ここ数年でスタンダード化しているカーボンクレジットと実証実験が始まったブロックチェーン技術+ $\alpha$ （属性の付与）を組み合わせることで、MATによる環境貢献価値の最大化を図る次世代の収益化システムを提案する。

「地球環境への貢献」の価値化の代表的なものとして、カーボンクレジットがあげられる。カーボンクレジットとは、温室効果ガスの排出削減量や吸収量を認証し、「クレジット」として取引可能な形にしたものであり、企業はそれを購入することで自社の排出量を相殺することが可能である。日本では2013年からJ-クレジット制度が導入、2023年からは東京証券取引所で「カーボン・クレジット市場」が開設され、スタンダードな取り組みとなりつつある。一方で、クレジットの信頼（品質と透明性）の確保が課題となっている。現状は企業規模での大規模な取引が主流であり個人の参画ハードルの高さも普及の課題と言える<sup>86)</sup>。「地球環境への貢献」の価値の最大化を考えた場合、①クレジットの信頼性確保に加え、②株式市場なみの流動性の確保、③カーボンクレジット以外の環境貢献価値の付加が必要だと考える。これらを実現するために、ブロックチェーン技術を活用したMATによる環境貢献の価値化を提案する。

まず、①クレジットの信頼性確保と②流動性の確保のために、ブロックチェーン技術の活用を提案する。ブロックチェーン技術とは、取引記録などのデータを「ブロック」という単位で生成し、それを「チェーン」のように連結して記録・管理する技術であり、改ざんが極めて困難とされる。資産や権利をデジタルデータとしてブロックチェーン上で表現することを「トークン化」といい、クレジットをトークン化することで、高い透明性とセキュリティを兼ね備えた上で、仮想通貨のように世界中で24時間取引、即現金化が可能となる<sup>87)</sup>。国内外でのカーボンクレジットのトークン化はまだ始まったばかりだが、実証実験も盛んであり、近い将来にスタンダード化され有効な手法として活用できると考える。

次に、②さらなる流動性の確保と③環境貢献価値の最大化を図るために多属性トークンの活用を提案する。トークンには、非代替性トークン（NFT：non-fungible token）と代替性トークン（FT：fungible token）があり、NFT化は高い証明性はあるが高コスト、FT化はコスト効率はよいが低品質が問題とされている。そのため近年のトークン化では、NFTとFTを一緒に併用するマルチトークン（MT：The Multi-Token

Standard、規格 ERC-1155) が推奨されている<sup>88)</sup>。具体的には、唯一性が価値となるプロジェクト ID や認証書は NFT に、高い流動性が求められる CO<sub>2</sub>削減量などは FT (1 トークン=1tCO<sub>2</sub>削減など) として MT 化することでトレーサビリティと市場流動性を両立できる。一方でこの MT にはカーボンクレジットに帰属しない環境貢献価値は反映されていない。そこでカーボンクレジットの MT に付加価値となる属性を付与した MAT を構築することで、環境貢献価値の最大化を図り収益性を向上する施策を提案する。具体的には、ポンガミアによる CO<sub>2</sub>固定をカーボンクレジットとし指標ごとに NFT 化および FT 化し、さらに森林伐採ゼロ、劣化地の削減・防止・活用、化学肥料・農薬の最小化、精製工程での既存溶剤不使用などの ESG 価値を属性として付与し MAT を構成する。MAT 化によりカーボンクレジットだけでなく「地球環境への貢献」すべてを紐づけることで、その価値を最大限に高めて、収益の最大化を図ることができる (図 16)。

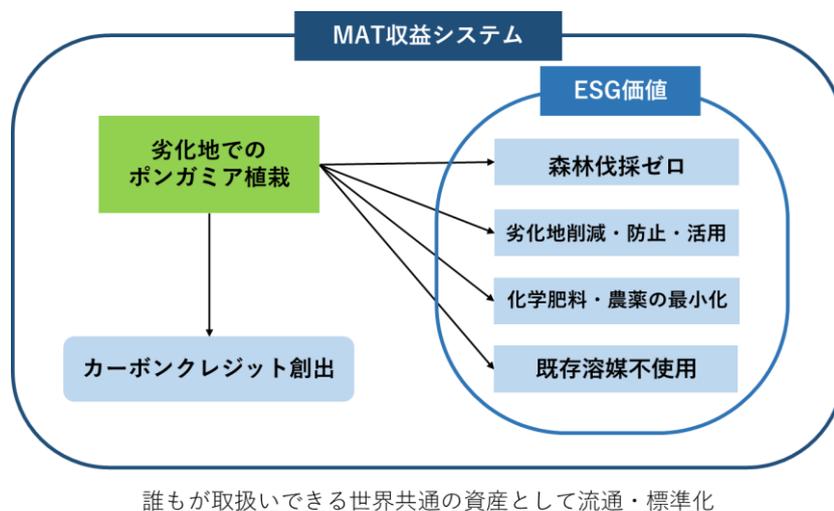


図 16 MAT 収益システム

### 5-3 地球と寄り添って生きる未来に向けて、次世代へのESDの推進

未来の持続可能な社会の実現は、「地球環境への貢献」の収益化だけでは達成することはできない。最も大切なのは、地球に住んでいる我々一人ひとりの意識改革である。「環境保全が大切」では不十分であり、「環境保全が当たり前」でなくてはならない。こうした考えを次世代の子どもたちに伝え、育むことは我々の使命であり、

その取り組みとして、近年 ESD の推進が注目されている。ESD とは、持続可能な開発のための教育を意味する。持続可能な社会の創り手を育む教育活動のことであり、環境・社会・経済などにおける現代社会の問題を自らの問題として捉え、解決に向けて行動変容を促すことを目的とする<sup>89)</sup>。現在、ESD for 2030 のロードマップがユネスコより公表されており、これにも合致する 2 つの施策を下記に提案する。

### 施策① ポンガミアの植栽による体験型学習

まず全国の小学校、中学校、高等学校を中心に応募を募り、参加校で初期コスト資金を出して、劣化地のポンガミア植栽地域に「ポンガミア教育区画」を設ける。学校やクラス単位でポンガミアの植栽区分を仕分けし、各学校の ESD に活用する。各区分のポンガミアの樹高や状態、現地の気温や降水量、湿度などのデータは、ドローンや衛星、現地オペレーターを活用したリモートセンシングで取得し共通クラウドで共有化したものを使用する。これらのデータをもとに、生徒自らが自分の区画の育成状況や炭素吸収量の予測、植栽・保全を行った区画でのカーボンクレジット等の MAT 化・収益化を実施する。各区画で得られたポンガミア油の一部は参加校の給食に使用することで生徒自身の携わった活動を食体験にも転換する。また、MAT の収入の一部で再植栽を行い「ポンガミア教育区画」を拡大させる。これらの教育学習の中で、生物学・地理学・農学・統計学など既存の学習はもちろんのこと、子供たち自らが環境保全活動を実施・体感し、さらに MAT を用いて実際に「社会を動かす」ことを主体的に学ぶことができる。なお、現地で発生する費用は「ポンガミア教育区画」で得られたポンガミア油および MAT 収益の一部を充てるが、主に実の回収と油の精製費、運賃のため十分まかなうことができると考える。

### 施策② ポンガミアの出生時ギフト計画

出生時に政府または自治体が劣化地にポンガミアを植栽し、「植樹証と MAT」を戸籍情報と一緒に無償発行させる。樹木が生み出すポンガミア油および MAT 収益を積立て、成人（18 歳）以降の好きなタイミングで環境に関する投資・進学・起業などの用途に使用できる仕組みを提案する。ポンガミアの樹齢は 50 年以上あり、成人以降も保持し続けることも可能。アプリを通して、自身のポンガミアの成長情報や CO<sub>2</sub> 吸収量グラフ、炭素価格や油脂相場、温暖化などの気候変動に関する情報も同時に確認

できるようにすることで、物心ついたころからの環境保全教育を行う。また成人以降に使用可能となった資金を自治体が認定する環境保全事業へ投資すると税制優遇を受けられるようにすることで、持続的な活動を支援する仕組みを作る。出生というライフイベントと結びつけることで、次の世代へのグリーン資産を可視化し、子どもの環境リテラシー、金融リテラシーを育む施策にできると考える。

日本でのモデルケースを標準とし、将来的には海外での子ども政策としても提案していくことで、全世界での活動を推進する。

#### 5-4 未来の油脂産業と持続可能な社会に向けて

持続可能な社会の実現に向けて、現在世界中でさまざまな取り組みが進められている。そして、特に地球環境への大きな影響力を持つ油脂産業、つまり我々こそ、先頭に立って推進していかなければならない。「劣化地でのポンガミア植栽と食用油脂化」に対して、さらに本章で述べた「MAT 収益システム」および「次世代への ESD の推進」を組み込むことで、より貢献度の高い持続的な「次世代の環境保全システム」を構築できると考える。これこそ、我々の未来にふさわしい持続可能な社会の油脂産業モデルになると確信している（図 17）。

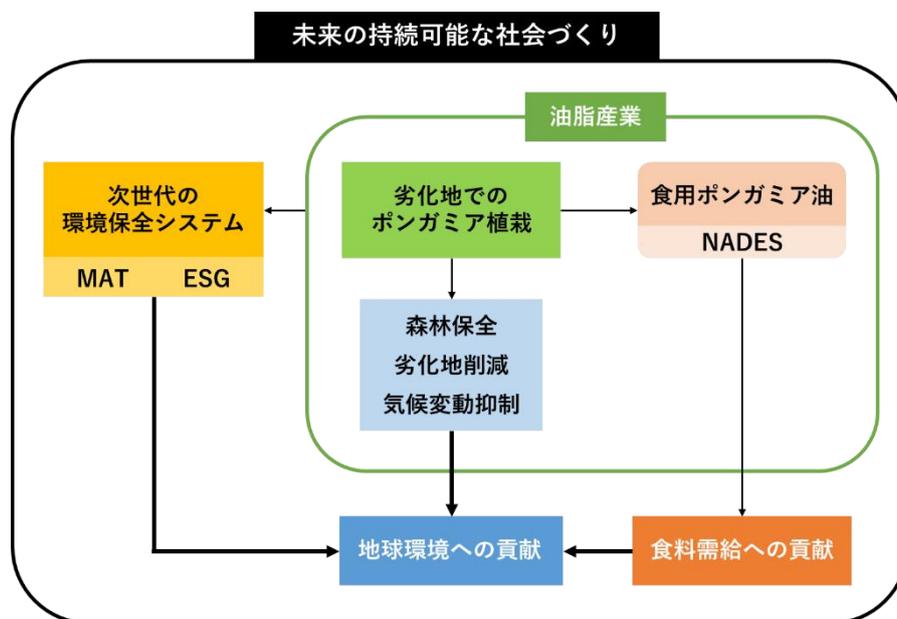


図 17 劣化地でのポンガミア植栽による未来の持続可能な社会づくり

## おわりに

本論文では、森林伐採、気候変動、土地劣化といった深刻な地球環境の悪化と増加し続ける旺盛な植物油需要に対する解決策として、劣化地でのポンガミア植栽と食用油脂化に焦点を当てた。ポンガミアの持つ強靱で柔軟な生命力と高油分油糧作物としてのポテンシャルを活用することで、劣化地の削減・進行防止・活用が実現できる。また、NADESによる新たな精製システムを構築することで、低環境負荷工程での食用油品質担保が可能となる。さらに、MATによる次世代の環境貢献価値の収益化システム、未来の子どもたちへのESD推進による意識改革により、未来の持続可能な社会を構築することができると思う。将来的に世界の劣化地の5% (750万 ha) でポンガミア農園を展開することができれば、3000万 t/年の食用油の供給が見込める。これはパーム油生産量の約36%、大豆油生産量の約48%に当たる量であり、これからも増え続ける植物油需要の大きな希望になると考えている。品種改良によりさらなる高油分・多結実品種化ができれば、主要油糧作物としての地位も盤石にできるであろう。

我々の唯一の住処である「地球」と共存・共栄していける未来を創造することは、現代に生きるわれわれの使命である。本論文は「未来の持続可能な社会」を構築するための数多くの施策の一つに過ぎないが、油脂産業が直面する旺盛な消費需要への対応、農地開拓による深刻な環境負荷を同時に解決する、次世代の油脂産業モデルになると確信している。

※出展記載のないイラストはイラスト AC より取得・加工して作成

## 参考文献

1) 気候ネットワーク、【レポート】世界の平均気温が初めて産業革命前より 1.5°C 以上高い気温に、2025.01.30

<https://beyond-coal.jp/documents/2024-as-warmest-year-on-record/>

2) 全国地球温暖化防止活動推進センター、1-05 地球全体の二酸化炭素濃度の経年変化

<https://www.jccca.org/download/13269>

3) ウェザーニュース、地球温暖化のウソ？ ホント？ (8) “産業革命以降” CO<sub>2</sub>が大量に増えたって本当？、2024年6月22日

<https://weathernews.jp/news/202406/180235/>

4) 農業メディア | Think and GROWRICCI、農地土壌劣化について。世界各国で危機感高まる土壌劣化、2020年7月31日

<https://www.kaku-ichi.co.jp/media/crop/earth-building/soil-deterioration>

5) 国際連合砂漠化対処条約、国土総面積に占める劣化した土地の割合

<https://data.unccd.int/land-degradation?grouping=UNCCD&region=aprL8rz>

6) 環境省、土地劣化と再生に関する評価報告書 政策決定者向け要約 (SPM) の解説

[https://www.iges.or.jp/jp/publication\\_documents/pub/presentation/jp/11299/IPBES-ldr-spm-briefingslides-j.pdf](https://www.iges.or.jp/jp/publication_documents/pub/presentation/jp/11299/IPBES-ldr-spm-briefingslides-j.pdf)

7) 国際連合広報センター、世界の人口は今世紀中にピークを迎える、と国連が予測、2024年7月22日

[https://www.unic.or.jp/news\\_press/info/50542/](https://www.unic.or.jp/news_press/info/50542/)

8) 日本植物油協会、「植物油の視点・食料安全保障について」

<https://www.maff.go.jp/j/zyukyu/anpo/attach/pdf/kentoukai-49.pdf>

9) 経済協力開発機構、OECD-FAO 農業見通し 2025-2034、2025年7月15日

[https://www.oecd.org/en/publications/oecd-fao-agricultural-outlook-2025-2034\\_601276cd-en/full-report/oilseeds-and-oilseed-products\\_42c09daa.html](https://www.oecd.org/en/publications/oecd-fao-agricultural-outlook-2025-2034_601276cd-en/full-report/oilseeds-and-oilseed-products_42c09daa.html)

10) 一般社団法人日本植物油協会、植物油の生産

[https://www.oil.or.jp/kiso/seisan/seisan02\\_01.html](https://www.oil.or.jp/kiso/seisan/seisan02_01.html)

11) S&P Global、供給と持続可能性がパーム油業界にとって重要な課題、2023年3月30日

<https://www.spglobal.com/commodity-insights/en/news-research/blog/agriculture/033023-supply-vs-sustainability-a-key-challenge-for-palm-oil-industry>

12) Cruelty.Farm、動物農業と森林伐採：私たちの森林を保護するための持続可能なソリューション

<https://cruelty.farm/ja/>

13) SWI swissinfo.ch、大豆による森林破壊を止められるか、2020年7月8日

<https://www.swissinfo.ch/jpn/business/>

14) WORLD RESOURCES INSTITUTE、農業に関連した森林破壊、2024年4月4日更新

<https://gfr.wri.org/forest-extent-indicators/deforestation-agriculture#limitations-and-future-prospects>

15) ウータン・森と生活を考える会、熱帯泥炭地と気候変動

<https://hutangroup.org/tropicalpeatland>

16) SEI、インドネシアのパーム油輸出と森林伐採、2024年10月8日

<https://www.sei.org/features/indonesian-palm-oil-exports-and-deforestation/>

17) 農林水産省、EUの森林減少防止に関する規則への対応について

<https://www.maff.go.jp/j/shokusan/export/EUDR.html>

18) 株式会社ATOM、バイオ燃料用植物（ポンガミア）の栽培

<https://atom-japan.co.jp/program/next-generation-biofuels/>

19) 鳥取大学乾燥地研究センター、保有植物クロヨナ

[https://www.alrc.tottori-u.ac.jp/plant/plant\\_child/Millettia\\_pinnata.html](https://www.alrc.tottori-u.ac.jp/plant/plant_child/Millettia_pinnata.html)

20) 株式会社おひさま総合研究所、根粒菌と窒素の関係！土壌の健康を保つ方法、2022年7月7日

<https://chibanian.info/15012025-30/>

21) Chen A., et al, "The biofuel producing legume tree, Pongamia pinnata, offers strong potential for carbon 2 sequestration" ResearchGate, 2025

[https://www.researchgate.net/publication/392526564\\_The\\_biofuel\\_producing\\_legume\\_tree\\_Pongamia\\_pinnata\\_offers\\_strong\\_potential\\_for\\_carbon\\_sequestration](https://www.researchgate.net/publication/392526564_The_biofuel_producing_legume_tree_Pongamia_pinnata_offers_strong_potential_for_carbon_sequestration)

22) Savita S., et al, "A Review on Pongamia Pinnata (L.) Pierre: A Great Versatile Leguminous Plant" Nature and Science, 8-11, p 130-139, 2010

[https://www.doc-developpement-durable.org/file/Culture/Arbres-Bois-de-Rapport-Reforestation/FICHES\\_ARBRES/Millettia%20pinnata/A%20review%20on%20Pongamia%20Pinnata.pdf](https://www.doc-developpement-durable.org/file/Culture/Arbres-Bois-de-Rapport-Reforestation/FICHES_ARBRES/Millettia%20pinnata/A%20review%20on%20Pongamia%20Pinnata.pdf)

23) WINROCK INTERNATIONAL、ポンガミア・ピンナタ - 油糧種子の窒素固定木

<https://winrock.org/pongamia-pinnata-a-nitrogen-fixing-tree-for-oilseed/>

24) Budi L., et al, "Pongamia: A Possible Option for Degraded Land Restoration and Bioenergy Production in Indonesia" forests, 12, 1468, 2021

<https://www.mdpi.com/1999-4907/12/11/1468>

25) ABC NEWS、鉱業大手のリオティントは、バイオ燃料の可能性を求めて在来のポンガミアの木を栽培しています

<https://www.abc.net.au/news/rural/2025-06-03/rio-tinto-growing-pongamia-trees-for-biofuel-potential/105310666>

26) Jinxia F., et al, "Fuel Properties of Pongamia (Milletia pinnata) Seeds and Pods Grown in Hawaii" ACS Omega, 6, 13, p 9222-9233, 2021; doi:

10.1021/acsomega.1c00635

<https://pub.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8028162/#ref17>

27) 株式会社P2X、次世代バイオ燃料用植物ポンガミア

<https://p2x-japan.co.jp/about-pongamia/>

28) FOUR PRIDE、PONGAMIA 特徴

<https://www.fourpride.com/pongamia.html>

29) Lekha C. M., et al, "Biodiesel Production Using Karanja (Pongamia pinnata) and Jatropha (Jatropha curcas) Seed Oil" Handbook of Plant-Based Biofuels, p 255-266, 2008; doi:10.1201/9780789038746.ch18

[https://www.researchgate.net/publication/289508369\\_Biodiesel\\_Production\\_Using\\_KaranjaPongamia\\_pinnataand\\_Jatropha\\_JatrophaCurcas\\_Seed\\_Oil](https://www.researchgate.net/publication/289508369_Biodiesel_Production_Using_KaranjaPongamia_pinnataand_Jatropha_JatrophaCurcas_Seed_Oil)

30) テルヴィーヴァ、日本国特許庁、公表特許公報、JP 2023-521035 A 2023.5.23

<https://patentimages.storage.googleapis.com/a3/6e/fd/0d90482b487e41/JP2023521035A.pdf>

31) TERVIVA、Pongamia is a platform

<https://patentimages.storage.googleapis.com/a3/6e/fd/0d90482b487e41/JP2023521035A.pdf>

32) NEWSCAST、世界ポンガモール市場調査：2031年までCAGR3.80%で成長予測、2025年3月21日

<https://newscast.jp/news/9627000>

33) National Library of Medicine、Karanjin

<https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Karanjin>

34) National Library of Medicine、Pongamol

<https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Pongamol>

35) H&I グローバルリサーチ株式会社、カランジンの世界市場 2025：種類別（純度99%、その他）、用途別分析、2025年5月16日

<https://www.global-data.jp/global-karanjin-market-qyr24mkt100089/>

36) “U.S. Food and Drug Administration、GRN No. 1153  
Pongamia bean oil”

<https://www.hfpappexternal.fda.gov/scripts/fdcc/index.cfm?id=1153&set=GRASNotices>

37) CIRS、A Comprehensive Overview of FDA GRAS Updates in the First Half of 2025、2025年6月27日

<https://www.cirs-group.com/en/food/a-comprehensive-overview-of-fda-gras-updates-in-the-first-half-of-2025>

38) Andrew P. A., et al, “Preparation of novel, moisture-stable, Lewis-acidic ionic liquids containing quaternary ammonium salts with functional side chainsElectronic supplementary information (ESI) available: plot of conductivity vs. temperature for the ionic liquid formed from zinc chloride and choline chloride (2:1)” Chemical Communications, 19, 2001

<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/12240264/>

39) hielscher、高効率抽出のための深部共晶溶媒

<https://www.hielscher.com/ja/extraction-with-deep-eutectic-solvents.htm>

- 40) 城田 秀明, “深共晶溶媒” ふんせき, vol4, p 99-100, 2025  
<https://bunseki.jsac.jp/wp-content/uploads/2025/04/p99.pdf>
- 41) Chem-Station, 深共晶溶媒 Deep Eutectic Solvent, 2018年8月24日  
<https://www.chem-station.com/chemglossary/2018/08/deep-eutectic-solvent.html>
- 42) 馬場由成ら, “月刊ファインケミカル” vol10, 2024  
<https://prtmes.jp/main/html/rd/p/000000189.000117216.html>
- 43) Yang L., et al, “Natural Deep Eutectic Solvents: Properties, Applications, and Perspectives” *Journal of Natural Products*, 81, 3, 2018  
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC5913660/>
- 44) 伊藤雅隆, 深共晶溶媒を用いた医薬品原薬の溶解および共結晶化, *Drug Delivery System*, 38-3, 2023  
[https://www.jstage.jst.go.jp/article/dds/38/3/38\\_210/\\_pdf/-char/ja](https://www.jstage.jst.go.jp/article/dds/38/3/38_210/_pdf/-char/ja)
- 45) Shweta S., et al, “Screening of neoteric solvents for gossypol extraction from cottonseed oil” *Chemical Papers*, 78, 8, p 5005-5017, 2024; doi: 10.1007/s11696-024-03448-9  
<https://www.chemicalpapers.com/?id=7&paper=12176>
- 46) Aránzazu G., et al, “Extraction of phenolic compounds from virgin olive oil by deep eutectic solvents (DESs)”, *Food Chemistry*, 197, Part A, p 554-561, 2016,  
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26616988/>
- 47) Elisa R. J., et al, “Phenolic compounds from virgin olive oil obtained by natural deep eutectic solvent (NADES): effect of the extraction and recovery conditions” *J Food Sci Technol*, 58, 2, p 552-561, 2020; doi: 10.1007/s13197-020-04567-3  
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7847883/>
- 48) Kuk M., et al, “GOSSYPOL REMOVAL BY ADSORPTION FROM COTTONSEED MISCELLA” *Journal of the American Oil Chemists’ Society*, 8, 12, p 905-909, 2005  
<https://www.ars.usda.gov/research/publications/publication/?seqNo115=174360>
- 49) Abba C., et al, “Bleaching of Neutral Cotton Seed Oil Using Organic Activated Carbon in a Batch System: Kinetics and Adsorption Isotherms” *Processes*, 6, 3, 22, 2018

[https://www.researchgate.net/publication/323505604\\_Bleaching\\_of\\_Neutral\\_Cotton\\_Seed\\_Oil\\_Using\\_Organic\\_Activated\\_Carbon\\_in\\_a\\_Batch\\_System\\_Kinetics\\_and\\_Adsorption\\_Isotherms](https://www.researchgate.net/publication/323505604_Bleaching_of_Neutral_Cotton_Seed_Oil_Using_Organic_Activated_Carbon_in_a_Batch_System_Kinetics_and_Adsorption_Isotherms)

50) Fatouma M. A. L., et al, "Materials Derived from Olive Pomace as Effective Bioadsorbents for the Process of Removing Total Phenols from Oil Mill Effluents" *Molecules*, 28, 11, 4310, 2023

<https://www.mdpi.com/1420-3049/28/11/4310>

51) Emanuelle L. P. D., et al, "Deep Eutectic Solvents as Efficient Media for the Extraction and Recovery of Cynaropicrin from *Cynara cardunculus* L. Leaves" *Int. J. Mol. Sci.*, 18, 11, p 2276, 2017

<https://www.mdpi.com/1422-0067/18/11/2276>

52) Nujamee N., et al, "Applications of Deep Eutectic Solvents in the Recovery of Bioactive Compounds from Brewer Spent Grains" *Food Reviews International*, 40, 9, 2024

<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/87559129.2023.2274485>

53) Yao H., et al, "Green and efficient extraction of rutin from tartary buckwheat hull by using natural deep eutectic solvents" *Food Chemistry*, 221, p 1400-1405, 2017

<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27979107/>

54) ExportersIndia.com、Karanjin、2025年8月25日閲覧

<https://www.exportersindia.com/indian-suppliers/karanjin.htm>

55) AgriLife、Derisom WP®Botanical BioPesticide for sucking pest control

[https://www.agrilife.in/products/stress\\_derisom\\_wp.php](https://www.agrilife.in/products/stress_derisom_wp.php)

56) ExportersIndia.com、Azadirachtin、2025年8月25日閲覧

<https://www.exportersindia.com/indian-suppliers/azadirachtin.htm>

57) 自然電力株式会社、バイオマスを使ったエコなエネルギー「バイオコークス」とは？ そのメリットと課題を解説、2022年11月24日

<https://shizen-hatch.net/2022/11/24/bio-coke-carbon-dioxide/>

58) Feng X., "A review of biochar functionalized by thermal air oxidation" *Environmental Functional Materials*, 1, 2, p 187-195, 2022

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2773058122000011>

59) 農林水産省、バイオ炭の農地施用をめぐる事情、2025年4月

<https://www.maff.go.jp/j/seisan/kankyo/attach/pdf/biochar-1.pdf>

60) 池澤加工株式会社、バイオ炭で土壌改良！成功事例とその効果、2024年11月9日

<https://ikezawa-kako.com/column/detail/20241106093821>

61) Shengquan Z., et al, "Adsorption and regeneration on iron-activated biochar for removal of microcystin-LR" Chemosphere, 273, 129649, 2021

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653521001181?via=ihub>

62) Tamara K., et al, "Development of Environmentally Safe Pharmaceutical Treatment Technology of Urban Territories Wastewater" MATEC Web of Conferences, 193, 02022, 2018

<https://www.matec->

[conferences.org/articles/mateconf/pdf/2018/52/mateconf\\_esci2018\\_02022.pdf](https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/pdf/2018/52/mateconf_esci2018_02022.pdf)

63) Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, FOLU Net Sink

<https://www.menlhk.go.id/program/folu-net-sink/>

64) 環境省、二国間クレジット制度（JCM）に関する日本とインドネシアの相互承認取決めの署名について、2024年11月18日

[https://www.env.go.jp/press/press\\_04057.html](https://www.env.go.jp/press/press_04057.html)

65) Muhammad A. N., et al, "Analysis of Palm Biomass as Electricity from Palm Oil Mills in North Sumatera" Energy Procedia, 47, p 166-172, 2014

[https://www.researchgate.net/publication/260030898\\_Analysis\\_of\\_Palm\\_Biomass\\_as\\_Electricity\\_from\\_Palm\\_Oil\\_Mills\\_in\\_North\\_Sumatera](https://www.researchgate.net/publication/260030898_Analysis_of_Palm_Biomass_as_Electricity_from_Palm_Oil_Mills_in_North_Sumatera)

66) doingmachinery.com、50-1000tpd連続パーム油精製機、2021年1月27日

[https://www.palmoil extractionmachine.com/product/palm\\_oil\\_refinery\\_process/continuous\\_palm\\_oil\\_refining\\_651.html](https://www.palmoil extractionmachine.com/product/palm_oil_refinery_process/continuous_palm_oil_refining_651.html)

67) AgFunder、欧州の森林炭素クレジットの需要が供給を上回るため、競争と価格の高騰が予想される、2025年7月15日

<https://agfundernews.com/competition-price-jumps-expected-as-demand-outpaces-supply-of-european-forest-carbon-credits>

- 68) Environmental-Finance.com、欧州の自然ベースの炭素クレジット市場の出現、  
2024年2月7日  
<https://www.environmental-finance.com/content/market-insight/the-emergence-of-european-nature-based-carbon-credit-markets.html>
- 69) 飯田俊平、森林由来 J-クレジットの創出・活用の促進について、J-クレジット  
オムニバスセミナー、2024年12月18日  
<https://www.kanto.meti.go.jp/seisaku/recycle/jcredit/data/shiryou4.pdf>
- 70) 株式会社 exroad、【25年7月】カーボンクレジット価格ガイド | Jクレ・海外・  
ETS、2025年8月4日更新  
[https://www.exroad.jp/column/price/#2\\_Joint\\_Crediting\\_MechanismJCM](https://www.exroad.jp/column/price/#2_Joint_Crediting_MechanismJCM)
- 71) Alex P., "Meeting the Moment Renewing Trust in Carbon Finance" State of the  
Voluntary Carbon Market 2025  
<https://3298623.fs1.hubspotusercontent-na1.net/hubfs/3298623/SOVCM%202025/Ecosystem%20Marketplace%20State%20of%20the%20Voluntary%20Carbon%20Market%202025.pdf>
- 72) 北海道山林種苗協同組合、造林用苗木価格表 令和7年 標準価格表  
<https://dobyouso.or.jp/prices/>
- 73) Scribd, Inc.、パームオイルの予算案予算計画 (RAB)  
<https://www.scribd.com/document/725063978/Contoh-RAB-kelapa-sawit>
- 74) PT. Mitra Media Nusantara、アブラヤシ農園における技術的な道路維持管理、  
2021年8月22日  
<https://www.news.infosawit.com/news/11193/teknis-merawat-jalan-di-kebun-kelapa-sawit>
- 75) M.B. Azwan, et al, "Assessment of electric vehicle and photovoltaic  
integration for oil palm mechanisation practise" Journal of Cleaner Production,  
140, 3, p 1365-1375, 2017  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652616316146/>
- 76) ProMedia Teknologi、Investasi Rp 1 Triliun, Pabrik Refinery Minyak Goreng  
Bakal Hadir di Bulungan、2024年2月5日

<https://www.prokal.co/kalimantan-utara/1774085793/investasi-rp-1-triliun-pabrik-refinery-minyak-goreng-bakal-hadir-di-bulungan>

77) THE TIMES OF INDIA、GEF India to invest Rs 375 cr in edible oils refinery in Hyderabad、2025年7月30日

<https://timesofindia.indiatimes.com/city/hyderabad/gef-india-to-invest-rs-375-cr-in-edible-oils-refinery-in-hyderabad/articleshow/122982494.cms>

78) 山内貞次、低カロリー甘味料の動向

<https://www.jasnet.or.jp/4-shuppanbutu/pickup/11.05.pdf>

79) 古西義正、甘味料（砂糖ならびに各種機能性甘味料）の動向

<https://www.jasnet.or.jp/4-shuppanbutu/pickup/12.08.pdf>

80) Alibaba.com、塩化コリン価格中国工場卸売天然ビタミン食品添加物塩化コリン98%、2025年8月24日閲覧

[https://www.alibaba.com/product-detail/Choline-Chloride-Price-China-Factory-Wholesale\\_1600275181545.html?spm=a2700.7724857.0.0.52984ecbY0qd0R](https://www.alibaba.com/product-detail/Choline-Chloride-Price-China-Factory-Wholesale_1600275181545.html?spm=a2700.7724857.0.0.52984ecbY0qd0R)

81) RBH、From Seed To Harvest: Site Visit To Lahad Datu、2023年7月6日

[https://stream-asset.stockbit.com/stream\\_85139\\_5e113fd6-2ee5-4ac9-b1d0-a0e093e52ee0\\_1.pdf](https://stream-asset.stockbit.com/stream_85139_5e113fd6-2ee5-4ac9-b1d0-a0e093e52ee0_1.pdf)

82) Anyang Best Complete Machinery Engineering Co., Ltd、粗パーム油再生プラントの設立コスト

<https://www.palmoilmillplant.com/related-products/palm-oil-refinery-plant-cost.html>

83) 独立行政法人エネルギー・金属鉱物資源機構、インドネシア：政府 2019年第1四半期には消費者への電力料金変更はない、2019年1月17日

[https://coal.jogmec.go.jp/info/docs/190117\\_47.html](https://coal.jogmec.go.jp/info/docs/190117_47.html)

84) TRADING ECONOMICS、インドネシア製造業の平均月給

<https://jp.tradingeconomics.com/indonesia/wages-in-manufacturing>

85) TRADING ECONOMICS、インドネシアの最低月給

<https://jp.tradingeconomics.com/indonesia/minimum-wages>

86) 株式会社森未来、カーボンクレジットとは？いつからある？仕組みや種類、日本の市場をわかりやすく解説！、2024年3月18日

<https://www.etree.jp/content/10045/>

87) Pacific Meta、ブロックチェーン技術でカーボンクレジットはどう変わる？クレジットや国内外の先行事例も紹介！、2025年5月23日

<https://pacific-meta.co.jp/magazine/business/139870/>

88) shogosu、カーボンクレジットのトークン化インフラ「Toucan」とは、2023年7月5日

[https://note.com/shogo\\_inamoto/n/ndc165d4574cc](https://note.com/shogo_inamoto/n/ndc165d4574cc)

89) 文部科学省、持続可能な開発のための教育 (ESD : Education for Sustainable Development)

<https://www.mext.go.jp/unesco/004/1339957.htm>