

第5章 バイオエネルギーの持続可能性指標評価ツールの開発

林 岳

森林総合研究所 井上 泰子

ナイジェリア大学ヌスカ校 ジェームス・C・オボンナ

1. はじめに

バイオエネルギーは再生可能なエネルギーとして今後ますますの利用拡大が見込まれているが、その原料を地域に賦存するバイオマスに依存するため、その利用の仕方いかんでは、資源の浪費や非持続可能な形でバイオエネルギー利用となる可能性がある。そのため、それぞれの地域の実情に即した持続可能なバイオエネルギーを導入することが求められる。これまでバイオエネルギーの持続可能性を評価しようとする動きとしては、国際バイオエネルギー・パートナーシップ（Global Bioenergy Partnership : GBEP）から国または地域レベルで適用可能な持続可能性指標（以下、GBEP 指標）が公表され⁽¹⁾、いくつかの国で適用されている。その際、過去に導入したりこれから導入しようとするバイオエネルギーの持続可能性評価が必要となるが、持続可能性にはさまざまな側面があり、基本的には環境、経済、社会の三つの軸で持続可能性を検討することが一般的である。GBEP 指標においても環境、経済、社会の側面について、それぞれ八つ、合計 24 の指標が提案されており、これらを用いて各国または地域の持続可能性を評価することが推奨されている（GBEP, 2011）。

しかし、このような指標を用いた持続可能性評価では、いくつかの論点が指摘されている。一つは、それぞれの指標の重要度は国ごとまたは地域ごとに大きくことなることである。例えば、水資源が希少な国においては、水を大量に使用してバイオエネルギーの原料作物を生産することは、持続可能な水利用に影響を与え、バイオエネルギーが持続可能な発展に貢献しないかもしれないが、比較的降雨に恵まれ、水資源に余裕がある地域では、持続可能な発展に貢献するということも考えられる。このように、持続可能性を評価するための複数の指標を用意しても、それぞれの指標の重要度は大きく異なるのが普通であり、各国においてどの指標がどれだけ重要なのかを明らかにしなければならない。二つ目の論点として、さまざまなステークホルダーごとに、持続可能性の指標でもその重要度の評価が異なる点である。バイオエネルギーは原料生産からエネルギーへの加工、流通、消費といったサプライチェーンのほか、政策分野でも多くのステークホルダーが関与しており、それぞれのステークホルダーごとに考えている持続可能性のイメージも異なるのが通常である。そのため、持続可能性指標による評価でもステークホルダーごとに異なる視点や認識を持っているはずである。前述の GBEP 指標も、あくまで各国で共通の指標であり、

GBEP 指標を適用する際も、これをそのまま適用するのではなく、それぞれの国や地域における特有の事情やデータの利用可能性を十分に考慮した上で、GBEP 指標に一定の修正や改変を行うことが望まれる。

以上の論点を踏まえると、バイオエネルギーの持続可能性評価には、それぞれの国ごとにステークホルダーの意見を踏まえた、指標の重要度のウェイト付けが必要ということになる。つまり、バイオエネルギーの普及導入には、どのようなバイオエネルギーがどのような側面でどのくらい持続可能な発展の実現に貢献するのかを、それぞれの地域の実情に合わせた形で評価する必要がある。上記のような持続可能性指標のウェイト付けを行うことによって、ステークホルダーが考える指標の重要度を数値化して定量的に評価することができる。

そこで本稿では、農林水産政策研究所(政策研)が国際再生可能エネルギー機関(IRENA)及び国際農林業研究センター(JIRCAS)と共同で開発した GBEP 指標を元にした持続可能性評価ツールについて紹介し、ガーナとナイジェリアにおけるバイオエネルギーの導入を事例に、ステークホルダーの意見を踏まえたウェイト付けを行った結果を報告する。

2. IRENA でのプロジェクトと評価ツール開発の経緯⁽²⁾

(1) IRENA「バイオマス残渣のエネルギーとしての付加価値化プロジェクト (Valo-BRES)」

アフリカでは、農産物加工部門の規模が非常に大きく、大量の農産廃棄物が発生している。これらの廃棄物は、次世代バイオ燃料、電力、熱等さまざまな形でエネルギー源として利用可能である。一方で、アフリカの国々では慢性的な電力不足に悩まされており、産業界では独自にディーゼル発電機を導入したり、小規模な地域電力供給システムに電力供給を頼ったりしている状況である。このように、アフリカ諸国では、農産廃棄物からのエネルギー供給には明らかに大きな潜在的能力があるものの、政策的なインセンティブがないことや、農産廃棄物の潜在的価値に気づいていないこと等もあり、これまで商業的に実施されているプロジェクトはほとんど見られない。これらのエネルギー供給の課題を克服し、環境と経済に便益をもたらす革新的な方法の一つに、農産廃棄物をエネルギー源として利用することで農産物を高付加価値化し、農産加工物のバリューチェーンを最大化することがある。

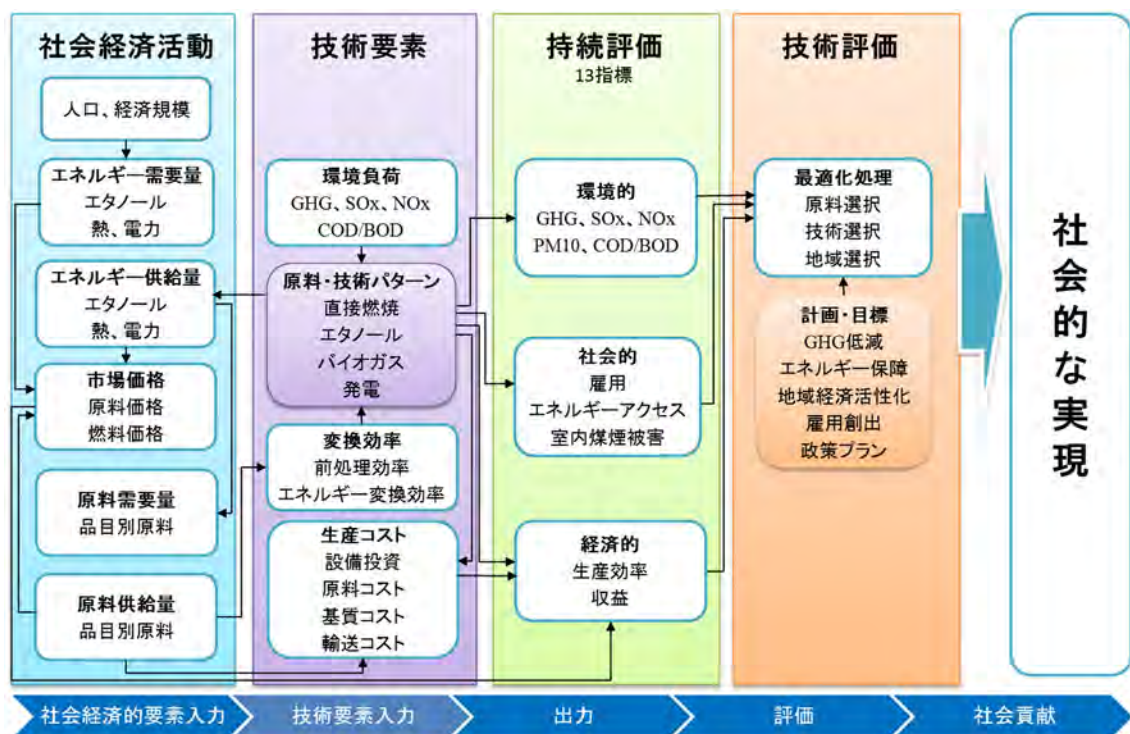
このような背景から、IRENA ではアフリカ諸国を対象として「バイオマス残渣のエネルギーとしての付加価値化 (Valorisation of Biomass Residues as an Energy Source (Valo-BRES))」というプロジェクトを実施してきた。このプロジェクトは、日本政府の支援のもと、アフリカにおける上記のような状況を改善するため、以下の3点を目的として行われている。

- (1) 技術的・経済的に最善の方策を導くため、コスト情報等各農産廃棄物種に応じたバイオエネルギー変換技術選択肢を提供

(2) 持続可能な農産廃棄物のエネルギー利用に向けた投資を誘発するために、国レベルでの技術選択肢の包括的評価を通じた国レベルの政策的支援・インセンティブの枠組みを構築

(3) 現場レベルでのさまざまなプラントの詳細な調査・分析を通じた、バイオエネルギー生産事業者レベルでの投資機会の特定化

プロジェクトは、第1図のような4段階の枠組みになっている。ここにあるとおり、第1段階では、各地域の地域情報を収集することである。これには人口や経済規模といった基礎情報のほか、エネルギー価格、バイオマスの価格、バイオマスの供給量・需要量といった情報も収集される。第2段階はバイオマスの変換技術に関する情報の収集である。具体的にはエネルギーへの変換効率や生産コスト等のほか、温室効果ガス（GHG）排出量や大気汚染物質（SO₂, NO_x, PM 等）排出量等環境への影響も含まれる。第3段階としては、インパクト評価である。この段階では、国または地域単位での GHG, SO₂, NO_x, PM 等の排出量といった環境への影響、雇用、エネルギーアクセス、健康への影響等社会的な影響、そして所得機会といった経済的影響の3側面で、バイオエネルギーを利用することによる持続可能性が国または地域単位で評価される。最後の第4段階として、第3段階での結果を踏まえ、どの地域で、どのようなバイオマスを使って、どのような種類のバイオエネルギーに変換すべきなのかについて、目的に応じた最適な選択肢が決定するという仕組みである。



第1図 IRENA Valo-BRES のフレームワーク

資料：IRENA 内部資料をもとに著者作成。

IRENA では、上記のプロジェクトにおける目的達成のため、途上国におけるバイオエネルギー導入支援に向け、それぞれの国においてどのようなバイオマスを原料として、どのような変換技術を用いて、どの種類のバイオエネルギーを生産するのが経済面、環境面、社会面から総合的に判断して最も適切なのかの情報を提供できるツールを開発することを計画していた。しかしながら、IRENA にはいまだ学術的な知見や研究蓄積が少ないため、国連食糧農業機関（FAO）等、ほかの国際機関、各国の大学や研究機関にツール開発の協力を依頼した。その一環で政策研にもバイオマス賦存量を評価する資源量評価ツールとバイオエネルギーの持続可能性評価ツールの開発への協力要請があった。また、日本国内では、JIRCAS に対しても、途上国におけるデータ収集等の面で IRENA 側からの協力要請があり、IRENA と JIRCAS そして政策研の 3 組織が共同で開発作業を行うこととなった。

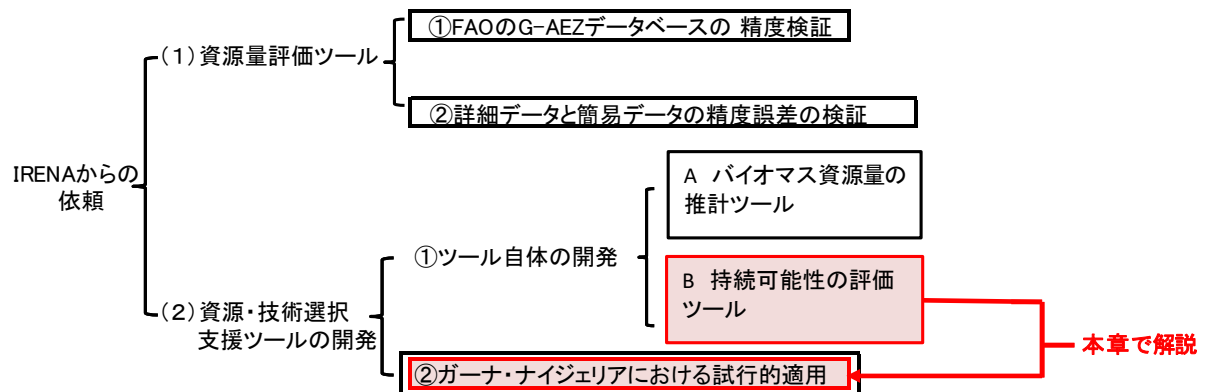
（２）政策研に求められた役割

IRENA から政策研へ依頼があった事項は大きく分けて二つある。第 1 に、資源量評価ツールの検証である。2013 年に IRENA は、9 種類のバイオマス（エネルギー作物、収穫残渣、加工残渣、畜産廃棄物、都市廃棄物、薪、木材伐採残渣、木材加工残渣、木質系廃棄物）について、現在及び 2030 年における資源量を評価した（IRENA, 2014）。資源量の評価にあたっては、2030 年における、食料需要、単収、エネルギー需要、農産物生産適地図、農産物残渣発生係数を主要な入力データとして、「農地は食料生産に優先的に利用され、食料生産後の余剰農地においてのみエネルギー作物が生産される」という仮定のもと試算を行った。しかしながら、この評価の問題点は、主要変数の多くを FAO 食料需給見通し、Global Agro-Ecological Zone (G-AEZ) 等外部のデータベースに依存していることであり、それぞれの手法が持つ仮定・前提条件を IRENA 独自の用途に応じて変更することができない点である⁽⁴⁾。この点の改善のため、IRENA では、FAO が開発した G-AEZ のデータを使いつつ、新たに IRENA 独自で GIS を導入し、対象作物の追加・変更、環境保全地域の設定といった各種前提条件の変更が可能な資源量評価手法を構築する計画である。その一部の開発作業について、政策研に協力依頼があった。

第 2 の依頼事項は、資源・技術選択支援ツールの開発である。IRENA では地域の再生可能エネルギーの資源評価から技術の選定、プロジェクトの構築、バイオマスの提供者とのマッチングや実施プロセスの流れを一体的に支援するツール（ガイドライン、チェックリスト等の集合体）である「プロジェクト・ナビゲータ」を構築している。これまでに風力発電に関する作業を進めてきたが、現在、バイオエネルギーに関する作業を行っているところであり、このバイオエネルギーの「プロジェクト・ナビゲータ」の中心となる資源及び技術の選択を支援するツールを開発することが求められていた。この「資源・技術選択支援ツール」は、大きく分けて二つの要素から構成される。第 1 に農業生産、農地面積、気象条件、人口、GDP、エネルギー統計等の基礎統計及び、現地での聞き取り調査の結果を組み合わせることで、利用可能なバイオマス資源量を推計する部分である（第 1 図）。第

2 に、地域に存在する多様なバイオマス資源のうち、利用可能なバイオマスの種類とエネルギー利用技術の組み合わせごとに、経済・環境・社会といった持続可能性の観点から地域に与えるインパクトを定量的に評価し指標化することで、最適な技術の組み合わせの選択を支援するための情報を提供する持続可能性評価ツールである。本稿で触れるのは、このうちの後者の持続可能性評価ツールの部分であり、これは、(1) ツール自体の開発、(2) 開発したツールのガーナ及びナイジェリアにおける試行的適用の二つの小課題がある。

政策研では、IRENA 側からの要請に応える形で、これらの課題を遂行した。その結果のうち、一部は政策研の新たな価値プロジェクト研究資料（農林水産政策研究所，2016）の中にとりまとめたが、本稿では農林水産政策研究所（2016）に掲載された内容も含め、改めて全体を紹介する。



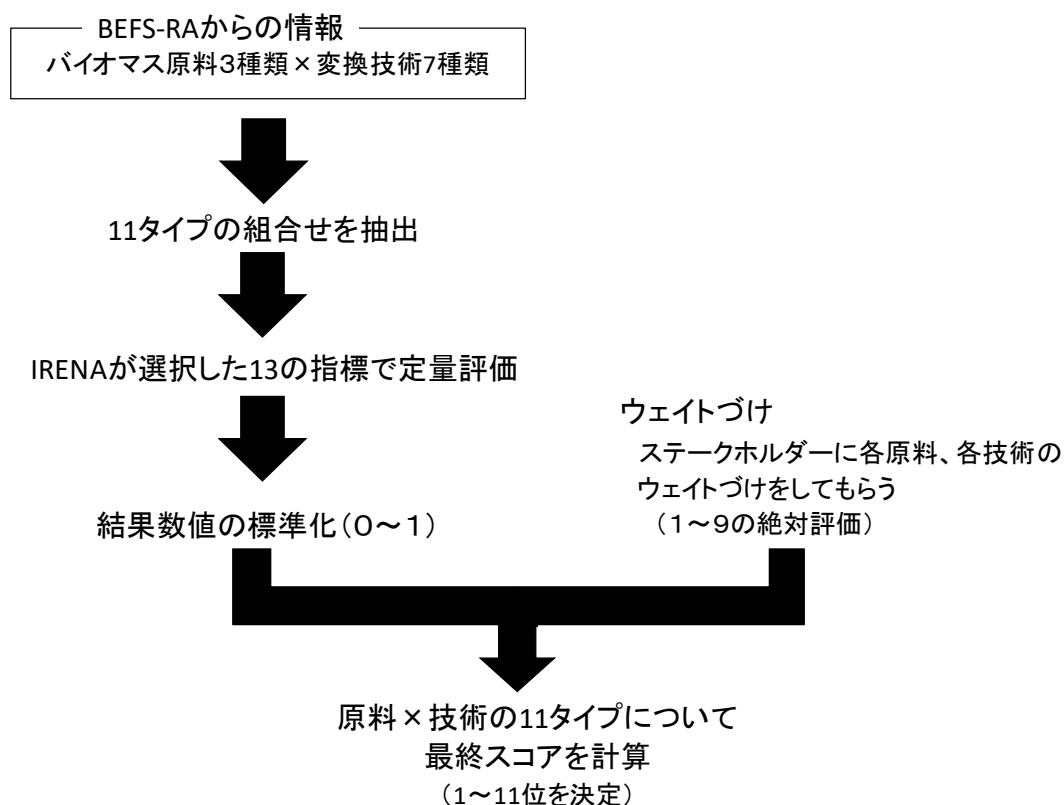
第 2 図 IRENA からの依頼事項と本章の関係

3. 持続可能性評価ツールの概要

(1) 評価フレームワーク

持続可能性評価ツールでは、IRENA が選択した 11 の持続可能性指標による評価結果を統合化し、最終的にどのような原料をどのようなバイオエネルギーに変換するのが最も持続可能なかをスコア化して評価し、最適な資源・技術の選択を明らかにする。

IRENA 側では、FAO の BEFS-RA というバイオエネルギーに関するデータベースを活用したいという意向があり、これに対応するため、BEFS-RA にある 3 種類の原料（Agricultural residue, Energy crops, Wood resources）を七つの技術（Charcoal, Briquette, Biogas, Gasification, Vegetable oil, Combustion, Liquid Fuel）で変換する場合を想定してモデルを構築する（第 3 図）。この場合、想定される原料と技術の組み合わせは農産廃棄物が 6 技術，資源作物が 1 技術，木質資源が 4 技術の合計 11 通りの組み合わせがあり，この 11 通りの組み合わせに対してスコア付けするツールとなる。



第3図 持続可能性評価ツールのイメージ

①適用可能な指標の抽出

IRENAにより、評価に適用する13指標が取り上げられているので、各原料・変換技術の持続可能性をこれら13指標で評価する。

②評価結果の標準化

①で算出された評価値は指標ごとに全く異なる単位の数値で表されているので、これら数値を指標化して、一定の範囲内(0~1)の値に変換する。

③ウェイト付け

①で算出した指標にウェイトを付ける。ステークホルダーにそれぞれの指標の重要性を示したウェイト付けをしてもらう。

④原料、技術、燃料ごとの選択肢の評価

標準化された評価結果とウェイトを乗じ、原料、技術、燃料のカテゴリーごとのそれぞれ選択肢のウェイト付け標準化スコアを推計する。

⑤最終スコアの推計

原料と技術の11通りの組み合わせについて、ウェイト付け標準化スコアを乗じて組み合わせごとの最終スコアを推計する。

算出された結果を用いて原料×技術の組み合わせに対して順位付けができる仕組みである。

（２）持続可能性評価へのウェイト付け

本研究では、持続可能性指標のウェイトの算出に、多基準分析（MCA）という手法を用いる。MCA は多様な代替的行動を評価する手法で、幅広いステークホルダーの意見を反映し、多角的な視点からの評価ができるのが特徴である。この手法は、（１）定量データ、定性データ双方を含む多様なデータセットを取り扱うことができること、（２）共同的計画や意思決定環境の構築に利用しやすいこと、（３）理論的技術的に強固な背景を持ちつつもその仕組みは簡素で直感的であること等から、基準や指標を構築するのにふさわしい手法と認められている（Mendoza and Prabhu, 2003）。さらには、バイオエネルギー供給システムが、原料や製造技術の選択、流通手段、エネルギー種等多くの複雑性と利害関係者を有することから、MCA はバイオエネルギーに関する意思決定のための重要な要素を分析するのに最も適した手法であるとも指摘されている（Buchholz et al., 2009）。これらのことから、本研究では、MCA が GBEP 指標に基づく評価に最も適切かつ有効な手法の一つであると考ええる。

MCA をバイオエネルギー分野の持続可能性に適用した研究事例はこれまでに数多く存在し、Scott et al. (2012) と Huang et al. (2011) がバイオエネルギー及び再生可能エネルギーへの MCA 適用研究事例をレビューしている。既存研究の中では、複数のステークホルダーの関与を取り扱ったり（Buchholz et al., 2009, Elghali et al., 2007, Turksim et al., 2011）、一部は最も持続可能で最適なバイオエネルギーの選択肢、若しくは少なくとも最悪の選択肢を抽出するために（Turksim, et al., 2011, Sultana and Kumar, 2012）、また一部は指標間の相互関係を解明するために MCA を適用している（Mendoza and Prabhu, 2003）。このように、MCA はこれまでもバイオエネルギーの事例に幅広く適用されていることから、本研究で開発するツールでもこの手法を適用する。

さらに、MCA にはそれぞれの選択肢で一対比較を行う階層分析法（AHP）その発展型であるネットワーク分析法（ANP）、選択肢を絶対評価する加重加算方式（WSM）等、いくつかの具体的手法がある。これらの具体的手法の中では、AHP や ANP 等、より正確な評価ができる複雑な手法が適用されることが多いが、WSM の利点は最も簡単な方法で手法の適用に高度な知識を必要としない点や、回答するステークホルダーにとっても、一対比較を行う AHP ほど回答に負担がかからない点等が挙げられる。そのため、MCA に精通していない者でも比較的容易に理解が可能なので、WSM を基本としたツールとすることで、専門家だけでなく、政策担当者等にも活用の幅が広がると考えられる。そこで、本研究では、これら MCA の手法のうち、WSM を用い、WSM を基本とした持続可能性評価ツールのフレームワークを構築することにした。ただし、適用する国の状況や評価する指標の数に応じて、適用する具体的手法については、適宜変更できるようにする。

4. ガーナへの適用

(1) はじめに

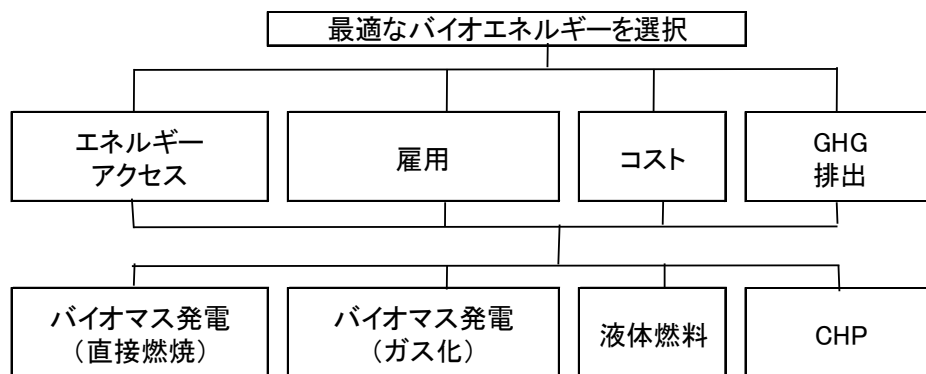
本節では、前節までに紹介した持続可能性評価ツールをガーナにおいて試行的適用した結果を報告する。IRENA では JIRCAS の協力のもと、西アフリカ 4 か国（ナイジェリア、カメルーン、セネガル、ガーナ）を対象とした試行的適用を検討していたが、この中でガーナのみを対象としたのは、以下の 4 点の理由による。第 1 に、ガーナではほかの対象国に比べても農産加工業が盛んであり、農産廃棄物の発生量が多く、バイオエネルギーへの利用可能性も高いことである。第 2 に、調査実施予定時期の 2015 年頃に西アフリカ諸国でエボラ出血熱が発生し、ガーナ以外の対象国では現地調査が困難になったためである。第 3 に、JIRCAS のアフリカ連絡拠点がガーナの首都アクラにあり、現地情報を収集しやすい環境にあったことである。さらに、第 4 の理由として、現地の公用語が英語であり、質問票の現地語への翻訳や現地調査時の通訳雇用が不要であったことである。

(2) ガーナの概要とバイオエネルギーの利用状況

ガーナは西アフリカに位置する人口約 2600 万人、面積 23 万 9000km² の国である。主要農産物はチョコレートの原料となるカカオである。ガーナにおけるエネルギー状況について、ガーナでは現在電化率はおおよそ 70% で農村部を中心にいまだ系統電力が整備されていない地域が残っている。特に人口密度が低い北部の農村地帯においては、電化率が低く、この地域の電化率は 35% 程度に留まっている（国際協力機構ガーナ事務所、2012）。このため、ガーナ政府は、2020 年までに電化率を 100% とする政策目標を掲げ、また総発電量の 10% を再生可能エネルギーで担うことを目標としている。これらの目標のもと、2011 年 11 月には「再生可能エネルギー法」が可決され、再生可能エネルギーに関する各種規制や規範作りを行っているところである。また、地術的な側面では、各国の支援のもとで大規模な太陽光発電や風力発電及び小水力発電の整備が行われている。バイオマスについては、ガーナの 1 次エネルギー供給に占める伝統的エネルギー⁽³⁾ の割合は約 70% であり、一方で最終エネルギー消費に占める電力の割合は 6% に満たない（国際協力機構ガーナ事務所、2012）。ガーナには熱帯雨林地帯もあり、平均気温が高い等、気候的条件も良好な条件であることから、国内の木材資源のエネルギーとしての潜在的能力は非常に高い。しかしながら、これら伝統的バイオエネルギーの利用は、室内煤煙による健康問題やバイオマスの収集にかかる女性・児童労働の問題等の各種社会問題をもたらしているほか、特に木質系バイオエネルギーは森林破壊を引き起こしており、持続可能なバイオマス資源の利用が特に重要な課題となっている。国際協力機構ガーナ事務所（2012）によると、ガーナにおける近代的バイオエネルギーの導入に関しては、木材加工残渣や穀殻からの発電、ヒマワリ油のディーゼル発電機での使用が検討されているが、いずれも実験・計画段階であり、実用化には至っていない。

（３）持続可能性ツールの改良

ガーナでの試行的適用に際して、持続可能性評価ツールはガーナのバイオエネルギー利用の実情に応じて改変されている。具体的には、まず指標を当初の 11 指標から、ガーナでのデータ収集可能性や将来のバイオエネルギー導入政策等を鑑み、エネルギーアクセス、雇用、費用、GHG 排出量の 4 指標に絞った。前節で解説したとおり、ウェイト付けを行う MCA には階層分析法（AHP）、加重加算方式（WSM）いくつかの具体的手法がある。このうち AHP は、指標同士を 1 対 1 で比較し、優劣の度合いを評価してもらう手法である。AHP は一対比較を行うことから、それぞれの指標で正確な優劣評価ができるという利点がある反面、指標数が多いと評価の回数が増加し、回答者に負担がかかるという欠点がある。今回のガーナへの適用では、指標数が当初の 13 指標から 4 指標に大幅に削減されたことから、回答者の負担が軽減されたことから、AHP の適用が可能となった。そのため、ガーナでは WSM ではなく AHP を採用して指標のウェイト付けを行った。



第4図 バイオエネルギー選択の階層構造

次に、バイオエネルギーについては、これも現地のバイオエネルギー利用状況を鑑み、直接燃焼バイオマス発電、ガス化バイオマス発電、液体燃料、電熱併給（CHP）の4タイプを設定し、階層構造を第4図のとおりとした。

本研究における試行的評価では、ガーナにおけるバイオエネルギーの導入について、ステークホルダーとしてバイオエネルギー関係者に質問票を配布し、各指標のウェイトを回答してもらっている。質問票の配布地域とその生態的特徴については、第5図に示したとおりである。質問票の配布は沿岸部地域から内陸地域にわたる5地域で実施され、それぞれが生態的特徴により分類される。また、ステークホルダーとしての具体的なバイオエネルギー関係者とは、国家政策担当者、地方政府政策担当者、研究者・専門家、工場経営者・管理者、原料供給・流通業者、原料製造者・農家、その他の7種を想定した。

ウェイトの推計に必要なステークホルダーへの一対比較評価のためのアンケートは、IRENA が現地のコンサルタントに依頼し、第1表のとおり五つの生態ゾーンで合計65人のステークホルダーに質問票を配布し、回答してもらった。

配布した質問票には、回答者がどのような属性のステークホルダーかを回答してもらっ

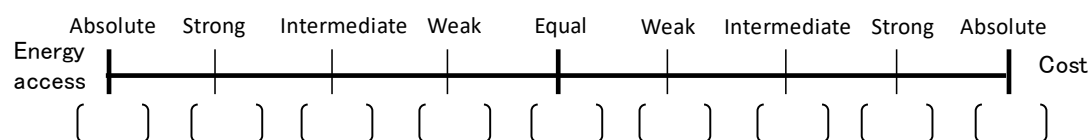
た後、それぞれの指標間の重要性を一对比較で回答してもらった。一对比較は第5図のとおりに、例えばエネルギーアクセスと雇用の指標の間で「絶対にエネルギーアクセスが重要」から「どちらも同程度」、さらに「絶対に費用が重要」までを9段階の中から選択肢を回答してもらう方式を採った。さらに、バイオエネルギー種についても、各指標の観点からみて、あるバイオエネルギーともう一つのバイオエネルギーはどちらがどれだけ重要かを尋ねた。例えば「エネルギーアクセスの観点から見て、バイオマス発電と固形バイオマスはどちらがどの程度重要か」を質問し、指標間一对比較と同様の9段階で回答してもらった。

第1表 質問票配布地域の概要

生態地域	地域の生態的特徴	主要産物	バイオエネルギー原料として見込まれるもの	代表都市	サンプル概数
沿岸サバナ地帯	沿岸地域	漁業	とうもろこし葉茎	アクラ	5
熱帯雨林地帯	森林、プランテーション	カカオ(ココア)	木材加工残渣(枝葉), キャッサバ皮, とうもろこし葉茎, パーム残渣	タコラディ	2
落葉樹林地帯	森林、プランテーション	カカオ(ココア)	木材加工残渣(枝葉), キャッサバ皮, とうもろこし葉茎, パーム残渣	クマシ	32
遷移地帯	落葉樹林からサバナへの遷移地帯	カカオ(ココア), キャッサバ	キャッサバ皮, とうもろこし葉茎	スニャーニ	10
ギニアサバナ地帯	サバナ	トウモロコシ, ソルガム, キビ, 塊茎(ホドイモ), ササゲ	ソルガム茎, キビ茎, とうもろこし葉茎	タマレ	16
合計					65

2. Please select which of these two factors is more important, and how the factor is important than the other.

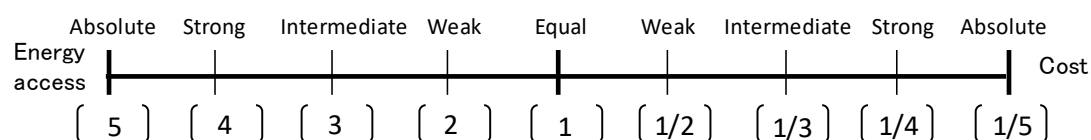
2-2 Of the two criteria “Energy access” and “Cost”, which is more important with respect to sustainable bioenergy and how much more?



第5図 一对比較の質問例

今回の質問票では、四つ指標と四つのバイオエネルギー種があるので、指標の一対比較で 6 回 (=4×3÷2)，指標ごとのバイオエネルギー種同士の一対比較が 6 回×4 指標の 24 回，合計 30 回の一対比較を回答者にしてもらったことになる。回答者にとってはかなりの負担かもしれないが，木下（2000）によると，AHP では最大で 7 要素までが望ましいとしており，本研究における 4 指標，4 バイオエネルギー種での AHP 適用は問題ないものと考えている。

AHP ではステークホルダーに回答してもらった各指標の重要比較結果を数値化する。上記第 5 図の例で示すと，一対比較の「どちらも等しく重要 (Equal)」の回答を 1，「エネルギーアクセスが若干重要 (Weak)」という回答を 2 とし，順に「ほどほど重要 (Intermediate)」を 3，「かなり重要 (Strong)」を 4，「非常に重要 (Absolute)」を 5 とする。逆にコストのほうがより重要とした回答は上記の逆数として，「コストが若干重要 (Weak)」から「非常に重要 (Absolute)」までを順に 1/2, 1/3, 1/4, 1/5 とする (第 6 図)。



第 6 図 回答の数値化

これと同様にほかのすべての一対比較の回答結果も数値化し，これを第 2 表のような表形式に表して各列の数値の和を計算する。この表では a_{12} から a_{34} までの六つの数値を上記第 6 図から転載し，その逆数を対角要素に入力するだけでよい。続いて，計算された列和で各数値を除して比率を計算する。これにより，各指標の相対化が行われ，算出した数値の列和は 1 となる (第 3 表)。そして，この第 3 表の数値の行ごとの平均がそれぞれの指標のウェイトとなる。

このようなウェイトの算出方法は最も簡便な方法であり，ほかにも AHP によるウェイトの算出方法はいくつか存在する。今回最も簡便な方法を採用したのは，WSM と同様，IRENA スタッフや現地の政策担当者でも利用できるように，なるべく高度な専門的知識を必要としない手法となることを心がけたためである。

第2表 回答数値の行列化と列和の算出

質問票の 右側の項目	質問票の左側の項目			
	Energy access	Labour opportunity	Cost	GHG emission
Energy access	1	a_{12}	a_{13}	a_{14}
Labour opportunity	$1/a_{12}$	1	a_{23}	a_{24}
Cost	$1/a_{13}$	$1/a_{23}$	1	a_{34}
GHG emission	$1/a_{14}$	$1/a_{24}$	$1/a_{34}$	1
列和	Σa_1	Σa_2	Σa_3	Σa_4

資料：木下（2000）をもとに著者作成。

第3表 回答数値の相対化

	Energy access	Labour opportunity	Cost	GHG emission	ウェイト (=行平均)
Energy access	$1/\Sigma a_1$	$(1/a_{12})/\Sigma a_2$	$(1/a_{13})/\Sigma a_3$	$(1/a_{14})/\Sigma a_4$	w_e
Labour opportunity	$a_{12}/\Sigma a_1$	$1/\Sigma a_2$	$(1/a_{23})/\Sigma a_3$	$(1/a_{24})/\Sigma a_4$	w_l
Cost	$a_{13}/\Sigma a_1$	$a_{23}/\Sigma a_2$	$1/\Sigma a_3$	$(1/a_{34})/\Sigma a_4$	w_c
GHG emission	$a_{14}/\Sigma a_1$	$a_{24}/\Sigma a_2$	$a_{34}/\Sigma a_3$	$1/\Sigma a_4$	w_g
列和	1.00	1.00	1.00	1.00	

$$w_e = \{1/\Sigma a_1 + (1/a_{12})/\Sigma a_2 + (1/a_{13})/\Sigma a_3 + (1/a_{14})/\Sigma a_4\}/4$$

$$w_l = \{a_{12}/\Sigma a_1 + 1/\Sigma a_2 + (1/a_{23})/\Sigma a_3 + (1/a_{24})/\Sigma a_4\}/4$$

$$w_c = \{a_{13}/\Sigma a_1 + a_{23}/\Sigma a_2 + 1/\Sigma a_3 + (1/a_{34})/\Sigma a_4\}/4$$

$$w_g = \{a_{14}/\Sigma a_1 + a_{24}/\Sigma a_2 + a_{34}/\Sigma a_3 + 1/\Sigma a_4\}/4$$

資料：木下（2000）をもとに著者作成。

同様の計算方法で、エネルギーアクセス、雇用、コスト、GHG 排出のそれぞれの観点から見たバイオエネルギー種4種のウェイト $w_1 \sim w_4$ を導出する。そして最終的なウェイト W ，すなわち統合されたスコアは、以下の行列式で表される。

$$W = \begin{pmatrix} w_{1e} & w_{1l} & w_{1c} & w_{1g} \\ w_{2e} & w_{2l} & w_{2c} & w_{2g} \\ w_{3e} & w_{3l} & w_{3c} & w_{3g} \\ w_{4e} & w_{4l} & w_{4c} & w_{4g} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w_l \\ w_e \\ w_c \\ w_g \end{pmatrix}$$

ここで、添え字の1～4は各バイオエネルギー種を、添え字のe, l, c, gはそれぞれエネルギーアクセス、雇用、コスト、GHG 排出の観点から見ていることを示す。これにより、それぞれの指標の観点から見た各種バイオエネルギーのウェイトと、指標自体のウェイトの双方を考慮したスコア付けが可能となり、スコアを見ることでどのバイオエネルギー種が最も望ましいかを判断することができる。

（４）結果と考察

はじめに、第４表には各持続可能性指標に対するウェイトの推計結果を示している。これを見ると、エネルギーアクセスが最もウェイトが高く、続いて雇用機会、経済性、GHG排出の順になっている。このことから、ガーナでは、バイオエネルギーの持続可能性の実現に際しては、エネルギーアクセスが最も重視されていることがわかる。

第４表 各持続可能性指標に対するウェイト

	指標ウェイト
エネルギーアクセス	0.438
雇用機会	0.276
経済性	0.186
GHG排出	0.101

次に、各バイオエネルギー種による各持続可能性指標の項目への貢献度に関するウェイトの推計結果が第５表に示されている。これを見ると、全般的に高い貢献度であると評価されているのは、液体燃料である。直接燃焼発電については、エネルギーアクセスへの貢献度は高く評価されているものの、それ以外の評価はあまり高くない。また、CHP やガス化発電については、相対的に評価が低くなっている。このことから、ガーナのバイオエネルギーのステークホルダーの間では、液体燃料の評価が高いことが窺える。

第５表 各バイオエネルギー種の持続可能性への貢献度

	エネルギー アクセス	雇用創出	経済性	GHG排出
直接燃焼発電	0.400	0.243	0.240	0.157
ガス化発電	0.165	0.206	0.208	0.292
液体燃料	0.295	0.351	0.353	0.375
CHP	0.140	0.200	0.199	0.176

最後に、第４表と第５表の結果を行列式にて乗じることで算出される総合的な貢献度は、第６表に掲げた。これを見ると、各指標の重要度とそれぞれの指標が評価する持続可能性の各側面への貢献度を踏まえた総合的なウェイトでも液体燃料が最も高い評価を得ており、続いて直接燃焼発電、ガス化発電、CHP の順になっている。この結果から示唆されることは、ガーナのバイオエネルギーのステークホルダーからは、持続可能なバイオエネルギーを導入しようとする際には、液体燃料が最も有望であると評価されていることがわかる。一方で、ガス化発電や CHP については、あまり評価されていない。これは、ステークホルダーによる評価では、これらのバイオエネルギーによる持続可能性への貢献が大きくないとの判断とも言えるが、一方で、これらの技術は、いまだガーナでは導入事例が多くな

く、バイオエネルギーのステークホルダーであっても、これらのバイオエネルギーについて精通していないためとも考えられる。このような結果が得られた背景については、現地のバイオエネルギーの導入状況等を鑑み、慎重に分析する必要がある。

第6表 各エネルギー種の持続可能性への貢献度（総合）

	総合ウェイト
直接燃焼発電	0.303
ガス化発電	0.197
液体燃料	0.329
CHP	0.171

（5）まとめ

本節では、持続可能性評価ツールをガーナにおいて試行的適用した結果を紹介してきた。ガーナへの試行的適用によって、ツールとしての有効性を確認するとともに、ガーナでは、持続可能なバイオエネルギーとして、液体燃料が最も有望であると評価されていることが示された。このような形で持続可能性の評価に各国の事情を考慮して指標を選択したり、ステークホルダーの考えを反映したりすることで、それぞれの地域の実情に応じたバイオエネルギーの評価が可能となる。

ガーナにおける試行的適用の課題としては、持続可能性指標のウェイト付けに持ち至れたステークホルダーへのアンケートの回答数が 65 と少なく、統計的な解析を行うまでには至らない点である。そのため、次節で紹介するナイジェリアにおける試行的適用においては、ガーナの事例よりも大幅にサンプル数を増加させることにした。

5. ナイジェリアへの適用

（1）ナイジェリアのバイオエネルギーの利用状況⁽⁵⁾

ナイジェリアはアフリカで最大の人口を誇る国で、人口 1 億 8 千万人のうち、80%超が 40 歳未満という若齢社会である。国土の北部から南部にかけてあらゆる植生を誇っており、豊かな自然が広がる国であるとともに、石油の埋蔵も確認されている。ただその埋蔵量は多くなく、40 年もすれば枯渇すると言われている。

アフリカ諸国においてエネルギー安全保障と食料安全保障の問題は大変重要な課題である。ナイジェリアでも農村地域は貧しい上、失業率も高く、農業に対する政府からの助成はなく、儲かる仕事ではない。信頼できる統計がないことや汚職の問題もあり、ナイジェリアでは政府が行う様々なインセンティブ施策も上手く機能していない。食料安全保障を達成するためには、十分な収入、雇用の創出、また、安定した市場も必要である。

そこで、食料安全保障達成のためにバイオエネルギーを活用することが想定されている。バイオエネルギー生産によって作物需要が創出され、農産物価格そして収益性も上がる。それが農業への投資を呼び込み、それにより耕作面積の拡大や生産量の増加にもつながり、

食料の利用可能性が高まることになる。さらに、バイオエネルギーによって新たな雇用が創出され、購買力も上がることで食料の購買力も高まり、飢餓の減少につながるはずである。

このようなナイジェリアの状況から、バイオエネルギーには大きな期待が寄せられている。そのためには、バイオエタノール生産技術の開発が必要である。技術開発には産学連携が必要となるが、最大の問題は産業基盤がないことで、基本的な技術の開発・導入のほかに、人材育成やインフラの整備も重要な課題である。

ナイジェリアにおいてバイオエネルギーは、エネルギー安全保障にとって最も実行可能で、かつ持続可能な選択肢となっている。ナイジェリアに限らず、多くのアフリカ諸国は、未利用の広大な土地、若く安い労働力があるので、バイオエネルギー生産に比較優位を有していると考えられる。

ナイジェリアのバイオエネルギー消費を見ると、その半分以上が薪炭である。しかし、薪炭は低効率で大気汚染も多く、利用者の呼吸器系の問題も深刻で、森林破壊の原因にもなっている。バイオガスは高い潜在性があるが、発生する廃棄物の大部分が分別されておらず、原料となるバイオマスのみを収集することができないため、現在大規模には行われてない。バイオディーゼル（BDF）は大きな市場があるが、現在はすべて輸入に依存している。BDFの原材料としてパーム油、落花生油、大豆油があるが、高価なので原料として使用できない状況である。また、非食用のジェトロファからの BDF 生産があるが、パイロット農場が一つあるのみである。栽培しやすい微細藻類からの BDF 生産はかなり有望だが、まだ商業化には至っていない。

バイオエタノールについては、石油に混ぜて使用するものも含め、無水エタノールを大量に輸入している。エネルギー作物としては、キャッサバのほか、サトウキビやトウモロコシ等もあるが大変高価で、コスト的に原料として適さない。その点、キャッサバは生産コストが低い上、でんぷん製造工程での廃棄物もエタノール生産の原料となる。このため、ナイジェリアでは、バイオエタノールが今後導入すべきバイオエネルギーとして注目されている。

（２）ウェイト付けの手法

ナイジェリアへの適用については、持続可能性評価ツールの当初の手法である WSM を使用する。この WSM は、Mendoza and Prabhu（2003）でも採用されているが、ある目的（ここでは持続可能なバイオエネルギーの導入）に対して、いくつかの基準（ここでは持続可能性指標）の重要度を、複数段階の絶対値、例えば「1：とても重要」から「10：全く重要ではない」の 10 段階で尋ねる方式である。

WSM ではステークホルダーに持続可能性指標の重要度を絶対値で尋ねる。本研究では、ある持続可能性指標 i についてその重要度を 1～9 の段階で絶対評価してもらい、ステークホルダー全員による評価値の算術平均 a_i を算出する。次に Mendoza and Prabhu(2003) に倣い、すべての指標の a_i を合計した $\sum a_i$ を求め、指標 i のウェイトを以下の式から算出する。

$$w_i = a_i / \sum a_i \quad (1)$$

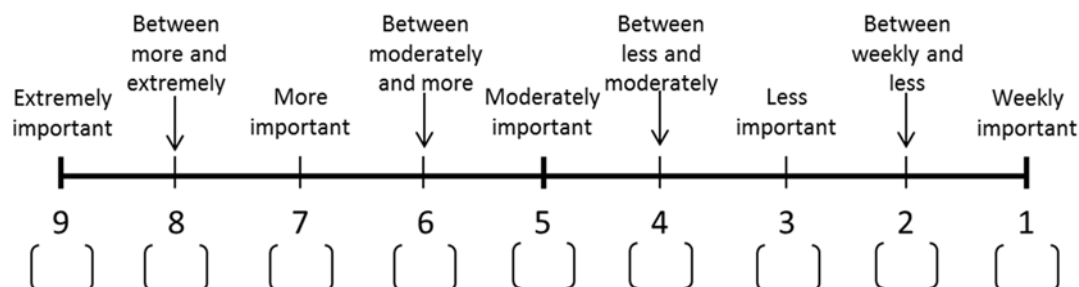
（３）条件設定と分析データ

本研究では、ナイジェリアの実情に合わせ、分析対象とするバイオエネルギーの種類をバイオエタノール、バイオガス、改良型かまど、電熱併給（CHP）の４種類とした。また、これらの持続可能性を評価するための指標として、（１）水利用と効率性、（２）土地利用と土地利用変化、（３）食料価格と供給、（４）雇用、（５）生産性、（６）インフラと流通の６指標を取り上げる。これらのバイオエネルギー種は、ナイジェリアでのデータ収集を委託したコンサルタントであった著者がナイジェリアで導入可能性の高いバイオエネルギー技術として選択したもので、持続可能性指標についても、コンサルタントが GBEP 指標の中の 24 指標から選択した。選択した六つの指標を持続可能性の 3 分野と照らし合わせて見ると、該当する指標は水利用と効率性が環境分野に、土地利用と土地利用変化、食料価格と供給、雇用が社会分野に、生産性とインフラと流通が経済分野の指標に該当し、環境、社会、経済それぞれの分野から二つずつ指標が選ばれている。

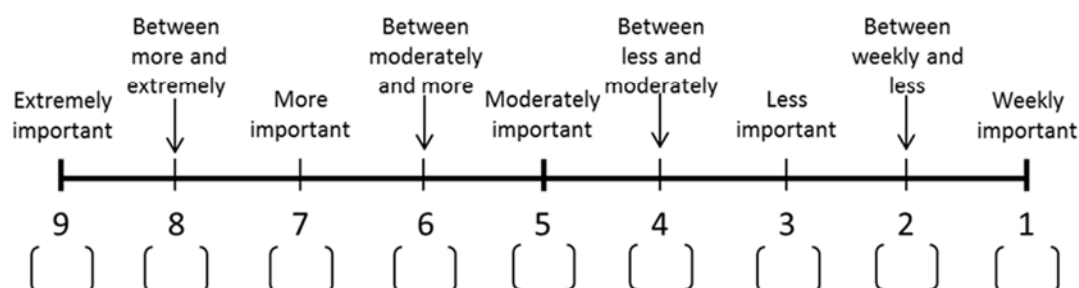
ステークホルダーによるウェイト付けには、ナイジェリア国内各地のステークホルダーを対象にしたアンケート調査により収集したデータを用いる。アンケートではそれぞれの指標の重要度を 1～9 の値の絶対評価で回答してもらうほか、それぞれのバイオエネルギー種が六つの指標で表される持続可能性の側面に対して、どのくらい貢献しているのかを尋ねた（第 7 図）。

4. Please select how important following criteria are to produce any kind of bioenergy.

4-1 Water use and efficiency (WU)



5-1 From your point of view, how much significantly **Bioethanol (BIE)** will contribute to water use and efficiency (WU) of the bioenergy sustainability indicator?



第7図 アンケート票の質問例

アンケート調査は2017年11月から12月にかけて行われ、合計330人のステークホルダーに対してアンケート票が配付され、そのうち280サンプルを回収した。分析はこのうちの有効回答244サンプルを用いて行った。ステークホルダーごとのサンプル数内訳は、研究者・専門家が39、国の政策担当者32、地方の政策担当者33、キャッサバ加工関係者22、財政関係者25、原料供給者4、市民団体25、エタノール生産者1、農家40、その他23となっている。ガーナより多くのサンプルを回収することで、統計的な解析が可能となった。

それぞれのバイオエネルギー種のウェイトは、本研究で取り上げる四つのバイオエネルギー種が、六つの指標で評価される持続可能性の各側面にどのくらい貢献するかとともに、六つの指標の重要度の差を考慮して以下の(2)式のとおり算出される。

$$\begin{pmatrix} W_{BET} \\ W_{BGS} \\ W_{ICS} \\ W_{CHP} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{WU}^{BET} & C_{LU}^{BET} & C_{FP}^{BET} & C_{JO}^{BET} & C_{PR}^{BET} & C_{IF}^{BET} \\ C_{WU}^{BGS} & C_{LU}^{BGS} & C_{FP}^{BGS} & C_{JO}^{BGS} & C_{PR}^{BGS} & C_{IF}^{BGS} \\ C_{WU}^{ICS} & C_{LU}^{ICS} & C_{FP}^{ICS} & C_{JO}^{ICS} & C_{PR}^{ICS} & C_{IF}^{ICS} \\ C_{WU}^{CHP} & C_{LU}^{CHP} & C_{FP}^{CHP} & C_{JO}^{CHP} & C_{PR}^{CHP} & C_{IF}^{CHP} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} W_{WU} \\ W_{LU} \\ W_{FP} \\ W_{JO} \\ W_{PR} \\ W_{IF} \end{pmatrix} \quad (2)$$

ただし、Wはウェイト、Cは貢献度の評価を指し、添え字のBET、BGS、ICS、CHPはそれぞれバイオエタノール、バイオガス、改良型かまど、CHPのバイオエタノール技術を、WU、LU、FP、JO、PR、IFはそれぞれ水利用、土地利用変化、食料価格と供給、雇用、生産性、インフラと流通の6指標を表す。なお本分析では、すべてのサンプルを用いたウェイトとともに、男女にサンプルを分けてウェイトを計算した。これは、IRENAでジェンダーによるバイオエネルギーの持続可能性評価に差があるのかを検証したいという意向があったためである。

(4) 結果と考察

第7表には、分析結果のうち各持続可能性指標に対するウェイト W_{LU} から W_{IF} までを求めた結果を示している。これを見ると、男女で大きな差はみられないものの、男性は生産性や雇用といった指標を女性よりも重視し、女性は男性よりも環境分野の指標を重視する傾向がある。また、六つの指標の中では男女とも生産性が最も重要で、インフラと流通が一番重要度が低いという結果となった。なお、アンケート調査の評価について、男女での評価値の違いを統計的に検証したが、いずれの指標についても男女で評価に統計的に有意な差は見られなかった。

第7表 各持続可能性指標に対するウェイト

			男性	女性	全体
環境	水利用と効率性	W_{WU}	0.163	0.168	0.164
	土地利用と 土地利用変化	W_{LU}	0.164	0.167	0.165
社会	食料価格と供給	W_{FP}	0.168	0.168	0.168
	雇用	W_{JO}	0.173	0.169	0.171
経済	生産性	W_{PR}	0.175	0.170	0.173
	インフラと流通	W_{IF}	0.158	0.159	0.158

続いて、各バイオエネルギー種の持続可能性への貢献度の評価結果が第8表～第10表である。これを見ると、男女ともに多くの持続可能性の側面で、バイオエタノールが最も貢献するという結果が得られた。これはバイオエタノールが持続可能性への貢献度が高い

と評価されていることを示す。一方で、改良型かまどについては男女とも評価は低く、ステークホルダーは、改良型かまどは持続可能性へあまり貢献しないと考えていることが窺える。

第 8 表 各バイオエネルギー種の持続可能性への貢献度（男性）

	水利用と 効率性	土地利用 と土地利 用変化	食料価格 と供給	雇用	生産性	インフラと 流通
バイオ エタノール	0.273	0.273	0.269	0.266	0.263	0.256
バイオガス	0.258	0.258	0.262	0.256	0.257	0.255
改良型かまど	0.228	0.237	0.233	0.240	0.235	0.242
CHP	0.241	0.232	0.236	0.239	0.245	0.247

第 9 表 各バイオエネルギー種の持続可能性への貢献度（女性）

	水利用と 効率性	土地利用 と土地利 用変化	食料価格 と供給	雇用	生産性	インフラと 流通
バイオ エタノール	0.269	0.268	0.265	0.261	0.258	0.253
バイオガス	0.258	0.257	0.260	0.262	0.256	0.262
改良型かまど	0.228	0.230	0.235	0.236	0.239	0.243
CHP	0.244	0.245	0.241	0.241	0.247	0.242

第 10 表 各エネルギー種の持続可能性への貢献度（総合）

総合	水利用と 効率性	土地利用 と土地利 用変化	食料価格 と供給	雇用	生産性	インフラと 流通
バイオ エタノール	0.272	0.271	0.267	0.264	0.262	0.255
バイオガス	0.258	0.257	0.262	0.258	0.256	0.258
改良型かまど	0.228	0.235	0.233	0.239	0.237	0.242
CHP	0.242	0.236	0.238	0.239	0.245	0.245

また、アンケート調査の結果から持続可能性への貢献度について男女差を t 検定により検証すると、バイオエタノールによる生産性への貢献及びインフラと流通への貢献について、男女サンプル間でそれぞれ 10%水準、5%水準の統計的有意差が確認できた。さらに CHP のインフラと流通への貢献についても男女サンプル間で 5%水準の統計的有意差が確認できた。このことから、男性のほうが女性よりもバイオエタノールによる食料価格と供給及びインフラと流通への貢献を高く評価していることが明らかになった。また、男性のほうが女性よりも CHP のインフラと流通への貢献を高く評価していることが明らかとなった。

第 7 表～第 10 表の結果を上記の (2) 式に当てはめて算出した各技術の総合ウェイトについては、第 11 表に掲げた。これを見ると、各指標の重要度とそれぞれの指標が評価する持続可能性の各側面への貢献度を踏まえた総合的なウェイトでもバイオエタノールが最も高い評価を得ており、続いてバイオガス、CHP、改良型かまどの順になっている。しかしながら、男女間でウェイトの平均値に統計的に有意な差は認められなかった。この結果から示唆されることは、ナイジェリアにおいて持続可能なバイオエネルギーを導入しようとする際には、バイオエタノールが持続可能性への貢献度が最も高いとステークホルダーから評価されている点である。一方で、国民に身近な存在である改良型かまどは持続可能性への貢献度が低いと評価されている。

第 11 表 各技術の総合ウェイト

	男性	女性	総合
バイオエタノール	0.267	0.262	0.265
バイオガス	0.258	0.259	0.258
改良型かまど	0.236	0.235	0.236
CHP	0.240	0.243	0.241

(5) まとめ

本研究では、ナイジェリアにおけるバイオエネルギーの導入を事例に、GBEP 指標を元にした持続可能性評価指標について、ステークホルダーの意見を踏まえたウェイト付けを行った。ウェイト付けはすべてのステークホルダーによる評価のみならず、ステークホルダーの男女による違いも明らかにした。

分析の結果、今回取り上げた六つの持続可能性指標の中では、ステークホルダーからは生産性をもっとも重要と評価され、インフラと流通をもっとも重要度が低く評価された。また、各バイオエネルギー種による持続可能性への貢献度については、バイオエタノールの貢献度が高く評価されている一方、改良型かまどについてはあまり高く評価されていないことが示された。t 検定によるウェイトの平均値の男女差の検証では、男性のほうが女

性よりもバイオエタノールによる食料価格と供給及びインフラと流通への貢献を高く評価していること、また、男性のほうが女性よりも **CHP** によるインフラと流通への貢献を高く評価していることが明らかとなった。そして、各指標の重要度とそれぞれの指標が評価する持続可能性の各側面への貢献度を踏まえた総合的なウェイトでもバイオエタノールが最も高い評価を得ており、続いてバイオガス、**CHP**、改良型かまどの順になった。

以上の分析結果は、バイオエタノールや **CHP** といった新たな技術への期待度が高いことを示している。ステークホルダーの間では、伝統的かまどを改良型に変更するといった身近なエネルギー技術の改良よりも、バイオエタノールやバイオガスといったこれまであまり普及していない新しい技術を導入する方が国全体の持続可能な発展に貢献すると考えられていることを示している。このことから、このような新たなバイオエネルギーの導入を進めることで、利害関係者の期待に則したバイオエネルギーの導入を進めることができると思われる。よって、政策担当者は改良型かまどの導入等、直接的に国民に恩恵のあるバイオエネルギーの導入を進めるだけでなく、長期的な視野を持ちながら、新技術の導入を進めていくべきであると言える。

最後に、本分析の限界についても触れておく。まずステークホルダー間での評価の違いについては、まだ分析が未了である。ステークホルダーの間での違いを明らかにすることができれば、バイオエネルギーの導入に関して、異なった側面からの示唆を与えることができると思われる。また、技術的な課題としては、サンプルに母集団の代表性が担保されていないことである。今回の分析に用いたサンプルは現地のコンサルタントが任意に抽出したものであり、本分析の結果は必ずしもステークホルダー全体の見方を表すという保証はない点に留意が必要である。

6. おわりに

本章では、IRENA, JIRCAS と政策研が開発した、**GBEP** 指標を元にした持続可能性評価ツールについて紹介し、ガーナとナイジェリアにおけるバイオエネルギーの導入を事例に、ステークホルダーの意見を踏まえたウェイト付けを行った結果を紹介してきた。開発した評価ツールは、**GBEP** の持続可能性指標が定量的な評価を行うことに着目し、**GBEP** 持続可能性指標の個別の指標に対してウェイトを付与することで、ステークホルダーの意見や地域独自の状況を反映させることができる。このようなバイオエネルギーの持続可能性評価指標を用いることで、バイオエネルギー政策における複数の政策オプションがもたらす持続可能性への影響を事前評価することが可能となり、当該国または地域でどのようなバイオエネルギーを導入すべきかについての情報を提供することができる。今回はガーナ、ナイジェリアといったアフリカの途上国において試行的適用を行ったが、持続可能性評価ツール自体は、途上国のみならず、日本を含めた先進国でも適用は可能である。さらに、**GBEP** の持続可能性指標での評価ができるのであれば、地域単位での適用や、特定のバイオエネルギー種での評価も可能である。

なお、ここで紹介した持続可能性評価ツールに関する共同研究の成果については、IERNA の報告書に掲載され、2019 年 1 月に公表された (IRENA, 2019)。

注 (1) GBEP 指標の詳細については、農林水産政策研究所 (2014) を参照のこと。

(2) 第 2 節から第 4 節は、新たな価値プロジェクト研究資料第 3 号『農村における地域資源の活用とその効果ーバイオマスのエネルギー利用を中心としてー』の第 5 章「IRENA との協同によるバイオエネルギー評価ツールの開発」を一部加筆修正して再掲している。この理由は、第 1 に当該資料の原稿締め切りまでに IRENA から現地調査のデータを入手できなかったため、当該研究資料は、ガーナにおける試行的適用の一部分の記述にとどまっており、最終的な結果を掲載していないためである。また、第 2 の理由として、新たな価値プロジェクト研究資料第 3 号の内容と今回新たに行った分析は、どちらも IRENA, JIRCAS, 政策研が協同で行ったプロジェクトの成果であり、一貫するものであるため、プロジェクトの一連の成果をまとめて掲載したほうが良いと判断したためである。

(3) FAO のデータの詳細は FAO (online) を参照のこと。

(4) 伝統エネルギーとは、薪、木炭、農業廃棄物を指す (国際協力機構ガーナ事務所, 2012)。

(5) 本小節は、2019 年 1 月 16 日に開催された政策研セミナー「持続可能なバイオエネルギー生産における我が国の国際貢献」において、ジェームス・C・オボンナ氏が発表した内容を要約してとりまとめたものである。なお、同様の内容は『農林水産政策研究所レビュー』88 号にも「シンポジウム概要紹介」として掲載されている。

[引用文献]

- Buchholz, T., Volk, T.A., Luzadis, V.A. (2009) “Multi Criteria Analysis for Bioenergy Systems Assessments” *Energy Policy* 37 (2) : 484-495.
- Elghali, L., Clift, R., Sinclair, P., Panoutsou, C., Bauen, A. (2007) “Developing a sustainability framework for the assessment of bioenergy systems” *Energy Policy* 35 (12) : 6075-6083.
- FAO (online) “Global Agro-Ecological Zones”,
<http://www.fao.org/nr/gaez/en/> (2019 年 3 月 19 日参照).
- GBEP (2011) “The Global Bioenergy Partnership sustainability indicators for bioenergy”,
http://www.globalbioenergy.org/fileadmin/user_upload/gbep/docs/Indicators/The_GBEP_Sustainability_Indicators_for_Bioenergy_FINAL.pdf (2019 年 3 月 19 日参照).
- Huang, I. B., Jeffrey Keisler, J., Linkov, I., (2011) “Multi-criteria decision analysis in environmental sciences : Ten years of applications and trends” *Science of the Total Environment*, 409 (19) : 3578-3594.
- IRENA (2014) “Global bioenergy supply and demand projections: A working paper for REmap 2030”.
- IRENA (2019) “Sustainable rural bioenergy solutions in Sub-Saharan Africa : A collection of good practices”.
- 木下栄蔵 (2000) 『入門 AHP 決断と合意形成のテクニック』, 日科技連出版社.

- 国際協力機構ガーナ事務所（2012）『ガーナ共和国再生可能エネルギー分野情報収集・確認調査報告書』。
- Mendoza, G. A., Prabhu, R. (2003) "Qualitative multi-criteria approaches to assessing indicators of sustainable forest resource management" *Forest Ecology and management* 174 (1-3) : 329-343.
- 農林水産政策研究所（2016）『新たな価値プロジェクト研究資料第 3 号 農村における地域資源の活用とその効果ーバイオマスのエネルギー利用を中心としてー』。
- 農林水産政策研究所（2014）『温暖化プロジェクト研究資料第 2 号 バイオエネルギーの活用とその評価』。
- Scott, J. A., Ho, W., Dey, P. K. (2012) "A review of multi-criteria decision-making methods for bioenergy system" *Energy* 42 (1) : 146-156.
- Sultana, A., Kumar, A. (2012) "Ranking of biomass pellets by integration of economic, environmental and technical factors" *Biomass and Bioenergy* 39 : 344-355.
- Turcksin, L., Macharis, C., Lebeau, K., Boureima, F., Mierlo, J.V., Bram, S., Ruyck, J.D., Mertens, L., Jossart, J.M., LeenGorissen, L., Pelkmans, L. (2011) "A multi-actor multi-criteria framework to assess the stakeholder support for different biofuel options : The case of Belgium" *Energy Policy* 39 (1) : 200-214.