

# 新国富指標を用いた小水力発電事業の 持続可能なアセット評価手法の考察

宗広 裕司<sup>1</sup>・松井 哲夫<sup>2</sup>・芳賀 淳<sup>3</sup>・山本 憲司<sup>4</sup>  
キーリー アレクサンダー 竜太<sup>5</sup>・馬奈木 俊介<sup>6</sup>

<sup>1</sup> 法人正会員 株式会社長大 海外営業統轄部 (〒104-0054 東京都中央区勝どき 1-13-1)  
E-mail: munchiro-y@chodai.co.jp

<sup>2</sup> 法人正会員 株式会社長大 新エネルギー技術部 (〒104-0054 東京都中央区勝どき 1-13-1)  
E-mail: matui-t@chodai.co.jp

<sup>3</sup> 法人正会員 株式会社長大 社会創生事業本部 (〒104-0054 東京都中央区勝どき 1-13-1)  
E-mail: haga-j@chodai.co.jp

<sup>4</sup> 法人正会員 株式会社長大 新エネルギー技術部 (〒104-0054 東京都中央区勝どき 1-13-1)  
E-mail: yamamoto-kn@chodai.co.jp

<sup>5</sup> 九州大学 工学研究院環境社会部門/都市研究センター (〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744)  
E-mail: keeley.ryota.alexander.416@m.kyushu-u.ac.jp

<sup>6</sup> 九州大学 都市研究センター長 (〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744)  
E-mail: managi@doc.kyusyu-u.ac.jp

水資源の豊富な我が国にとって、水力発電は最も安定した電源の一つであり、特に小水力発電はクリーンで再生可能なエネルギーかつ大規模な投資が不要であることから、今後さらなる普及が期待される。

しかしながら、現在までの我が国における水力発電への取組みは出力 1,000kW 以上の開発が主流であり、1,000kW 未満とりわけ地域資源として活用しやすい 200kW 未満の開発は、その資源賦存量を考慮すると取組みが遅れている。

本稿では、地域資源（アセット）としての小水力発電事業を多面的・客観的な指標により数値化・見える化の為のツールとして、ノーベル経済学賞受賞者である故ケネス・アロー教授他が経済学上望ましい指標として開発された「新国富指標」の活用を試みた。

「新国富指標」により事業の取組みを数値化することで、対象事業が当該地域にもたらす多様な豊かさを金銭的価値として測定し、対象事業の持続可能な資産価値の評価が可能になり、小水力発電事業のさらなる普及につながると考える。

**キーワード：**小水力発電、再生可能エネルギー、新国富指標、アセットマネジメント、地域振興

## 1. はじめに

### (1) 国内における再生可能エネルギーに係る動向

2020 年 10 月、菅前内閣総理大臣の所信表明演説において、「2050年カーボンニュートラル」が宣言された。

次期エネルギー基本計画においては、再生可能エネルギーを最大限導入することとし、2050年へ向けて取り組むべき政策を示している。また、2021年4月には「2030年度に13年度比で温暖化ガス排出を46%削減」という野心的目標を掲げ、直後に開催された日米首脳会談、気候変動サミットにおいて全世界に向けて表明した。

2021年10月に就任した岸田内閣総理大臣も上記の目

標は堅持していく意向を表明しており、この新たな目標達成に向けては再生可能エネルギーの拡大、とりわけ太陽光発電の上積みが有力視されている。

一方、2020年末に中国で発症し全世界に拡大した新型コロナウイルスは、我が国の人命や地域経済に甚大な影響を与え続けている。

今後、新型コロナウイルス感染症を想定した「新しい生活様式」の実践が進むことで、テレワークやワーケーションが浸透し、2拠点居住や都市から地方への移住者の増加など、過疎化が進む山村の見直しや多様性のある地域づくりが求められる。

そのため、地域における水・食・エネルギーの自立の

重要性が増してきており、これら地域資源（アセット）の持続可能な活用に向けた仕組みづくりが必要となる。

## (2) 小水力発電への期待と課題

上記背景に鑑み、水資源の豊富な我が国にとって、水力発電は最も安定した電源の一つであり、特に小水力発電はクリーンで再生可能なエネルギーかつ大規模な投資が不要であることから、今後さらなる普及が期待される。

しかしながら、現在までの我が国における水力発電への取組みは出力 1,000kW 以上の開発が主流であり、1,000kW 未満とりわけ地域資源として活用しやすい 200kW 未満の開発は、その資源賦存量を考慮すると取組みが遅れている。

FIT の整備で事業性が担保されやすくなったものの、系統連系の問題、許認可手続きの課題、地元の合意形成や事業主体形成の重要性、開発期間短縮のための事業計画の重要性など、小水力発電特有の障壁・課題が依然として残っている<sup>1,2)</sup>。

## 2. 新国富指標とは

2012年、持続可能な発展を進めるための会合「国連持続可能な開発会議（リオ+20）」で「新国富報告書 2012」が公開され、報告書の中で、持続可能性の判断基準 GDP に代わる経済指標として、「新国富指標」が提示された。

### (1) 新国富指標を構成する要素

新国富指標は、三つの資本群（経済生産活動に供する人工資本、教育や健康などの人的資本、そして環境資源を包括する自然資本の価値）により構成され、地域における多面的な豊かさ（Well-being）を総合的に金銭単位で表す。

従って、新国富指標が大きいことは、他国・地域との比較において、相対的に豊かさの規模が大きいことを表すものである（図-1 参照）。



図-1 新国富指標を構成する3つの資本

## 3. 新国富指標による小水力発電事業の評価手法の検討

小水力発電事業は、地域資源（アセット）に対して、大きな付加価値を与えるものである。

例えば、少子高齢化による担い手不足に伴い、老朽化した農業用水路において「相乗り発電」による小水力発電の開発と共に地域の水インフラを再生することで、持続可能な地域資源（アセット）の維持に貢献できる。上記の例のように、小水力発電事業は、発電による収益等のみならず、地域振興という点においても付加価値を有するものと言える。

しかし、上記に示すような地域にもたらす付加価値に対する評価は、これまでの発電事業に係る指針・ガイドラインには存在しなかった。

そこで、持続可能性を測る指標として国・自治体レベルでの導入が進んでいる新国富指標を活用した小水力発電事業の評価手法の検討を実施した。新国富指標はわれわれの豊かな社会・経済を生み出す資本全体を貨幣価値ベースで推計した指標であり、ノーベル賞受賞者である故ケネス・アロー氏、パーサ・ダスグプタ氏といった現代経済学の権威である面々が参画し、推進された国連「富の計測プロジェクト」を起点として発展してきた指標であり、環境や教育、経済インフラなど、さまざまな要素を金銭的な価値に換算して総合的に経済の豊かさを測ることを目的としているものである。本稿著者の1名（馬奈木）がセンター長を務める九州大学都市研究センターは、新国富指標に関する報告書の第3弾となる最新版 Inclusive Wealth Report 2018 の事務局となり、中心的に執筆を行っている。新国富指標により、地域における多面的な豊かさを金銭単位で表すことで、小水力発電事業による地域振興への評価に対して数値化することを考えた。新国富指標による評価は、地域振興への付加価値の高い小水力発電事業の評価においては、親和性が高いため有効な手段であると考えられる。

また、今後 FIT 制度改正により、1,000kW 未満の小水力発電事業は FIT 適用要件として、「地域一体型要件」が定められたことから、小水力発電事業における地域振興の指標化は重要なものとなることが予測される。

そこで、本論文においては、小水力発電事業が当該地域にもたらす価値を新国富指標を用いて、多様な豊かさを金銭的価値として測定し、対象事業の持続可能な資産価値を評価するための手法について検討する。

### (1) 小水力発電事業における新国富指標による評価のための評価エレメントの抽出

まずは、小水力発電事業における新国富指標による評価を実施するための評価エレメントを抽出した（表-1 参

照)．ここでは、新国富指標のフレームワークに従い、小水力発電事業実施に関わる初期投資とそれに伴う工事・施工、O&M費用、その他事業実施地域への利益還元等を人工資本、人的資本、自然資本の三つの資本に分け、CO<sub>2</sub>削減効果等エネルギー事業特有の項目についても主要なものについて調整項目の評価エレメントとして抽出している。

表-1 小水力発電事業における評価エレメント

資本の種類	エレメント	実施例備考
人工資本	水力発電設備の導入	取水堰、導水設備、ヘッドタンク、建屋、水車発電機、放水設備等
	既設インフラ設備への貢献	既設水路への除塵装置設置、ダム放流水を活用した発電設備の導入
人的資本	雇用の創出(SPC設立等)	プロジェクト実施のための新規法人・事業部の設立に伴う雇用効果
	地域雇用の創出(O&M、電気主任技術者等)	地元企業、地元住民による除塵業務や保安管理等のO&Mの実施
自然資本	発電所建設に伴う樹木の伐採等	多くの場合導水設備の導入、建屋設置において発生
調整項目	域内経済効果(建設工事、設備調達等による域内の総合的な経済効果)	地元建設業者による施工の実施、域内企業からの発電設備等の調達、波及効果による域内経済効果も含む
	再エネ創出によるCO <sub>2</sub> 削減効果	再エネの発電によるCO <sub>2</sub> 削減への貢献をカーボンクレジット市場や電力証書市場を基に算出
	自然資本再生/創出活動	樹木伐採箇所等における植林活動による自然資本の再生/創出。CO <sub>2</sub> 削減効果の高い樹木の植林によるカーボンクレジットの創出や生態系サービスの価値を含む
	売電収益の活用による地元への利益還元	事業区費や環境保全活動等促進のための寄付等
	環境学習機会の創出	学習の場とするような設計の実施
	地域の防災対策向上への貢献	災害拠点を想定した発電機の採用

## (2) 評価エレメントに対する算定手法の検討

費用便益分析(Cost-benefit analysis, CBA)は、投資意思決定のための一般的な信頼できる手法である<sup>3,4)</sup>。投資案の便益と費用を明らかにして見積もり、そして、

さまざまな財務指標を算出することで、投資家は価値あるものかどうかを判断することができる。

エネルギーの平準化コスト(Levelized Cost of Energy: LCOE)は、エネルギー技術割引後および正規化されたユニットコストを特定するために広く使用されている。LCOEは、さまざまな運用期間の各エネルギー技術について、一定期間の比較を行うための一貫した基準を示すものである。LCOEは次の簡単な次式で導くことができる<sup>5)</sup>。

$$LCOE = \frac{NPV \text{ of total cost over lifetime}}{NPV \text{ of Electricity produced over lifetime}} = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{I_t + M_t + F_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}} \quad (1)$$

NPV=正味の現在価値

LCOE=電力平均生涯平準化コスト

$I_t$  = t年目の投資支出

$M_t$  = t年目の運用・保守コスト

$F_t$  = t年目の燃料費

$E_t$  は、t年目の発電量

r=割引率

n = システムの経済的寿命

LCOEは、割引率に相当する投下資本のリターンを含め、収益がコストと等しくなるようなプロジェクトに必要な電力価格である。電力価格がこれより高ければ資本利益率が高くなり、低ければ資本利益率が低くなるか、損失が生じることになる。しかしLCOEには、政府のインセンティブや補助金、CO<sub>2</sub>排出削減などの環境へのプラス/マイナスの影響、システム全体のコストや節減などから成る外部社会コスト(図-2参照)が含まれていない<sup>6,7)</sup>。

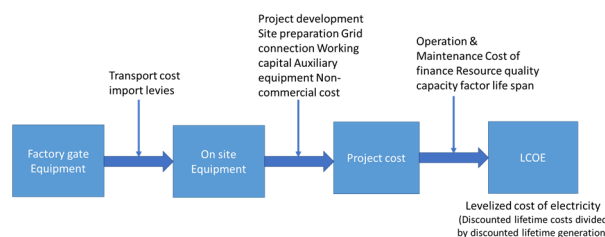


図-2 再生可能エネルギーの発電コスト指標と境界線 (IRENA, 2012)

すべての外部性を勘案するために、社会的コストが支出に含まれると仮定する。その結果、予想される財産の所得と社会的福利は、強い市場を仮定した場合、経済的減価を介し、生涯を通じて調整される実現支出と等しくなるはずである。一方、富の創造に関する3つの資本モ

デル<sup>8,9)</sup>によれば、全サイクルの富の所得と社会的幸福は、人工資本、人的資本、自然資本の包括的な富のストック式として表すことができる。

したがって本分析では、新国富の枠組みの下で、小水力発電の生涯支出をストック変化に変換することにより、小水力発電によるエネルギー生成の包括的コストが、生涯発電による平均的な富の創出に等しいと仮定することができ、これを新国富のストック変化として表現する。小水力発電の設備投資による有形無形の利益を評価するために、元の LCOE を平準化包括的エネルギーコスト (Levelized Inclusive Cost of Energy: LICOE) として調整する。LICOE は簡単に表すと次のような式になる。

$$LICOE = \frac{NPV \text{ of adjusted Inclusive Wealth}}{NPV \text{ of Electricity produced over lifetime}} = \frac{W(K,H,N,t)+adjustments}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}} \quad (2)$$

W は人工資本、人的資本、自然資本の包括的な富として表現される社会的幸福の時間的変化

K は人工資本

H は人的資本

N は自然資本

調整項目 (*adjustments*) には、表-1 の評価エレメントにおいて挙げられている、地域の経済誘発効果、炭素損害などの社会的コスト、植林等による自然資本の再生・創出等が含まれる。

文献<sup>8,9)</sup>によると、経済の持続可能な発展のための  $t$  時点での一時的な幸福は、包括的な富に等しいという意味で、次式のように表される。

$$W(K, H, N, t) = V(t) = \int_t^{\infty} U(C_{\tau}) e^{-r(\tau-t)} d\tau \quad (3)$$

形式的には、新国富の時間的変化は次式のとおりである。

$$W(K, H, N, t) = \frac{dW(K, H, N, t)}{dt} = p_K \frac{dK}{dt} + p_H \frac{dH}{dt} + p_N \frac{dN}{dt} + p_K \frac{\partial V}{\partial t} \quad (4)$$

ここで、 $p_K$ 、 $p_H$  および  $p_N$  は、それぞれ、人工資本、人的資本、自然資本のシャドープライスである (幸福度の変化が経時的に変化する場合を除く)。シャドープライスは、基本的には、当該資本の追加ユニットの一時的な幸福に対する限界的な寄与である。これらは以下のように定義される

$$p_K \equiv \frac{\partial V}{\partial K}, p_H \equiv \frac{\partial V}{\partial H}, p_N \equiv \frac{\partial V}{\partial N} \quad (5)$$

焦点となっている経済において、人工資本、人的資本、自然資本およびその他のフロー変数が将来どのように変化するかを予測したもので、実際にはシャドープライス

は、各資本に付けられた重み係数として機能し、その結果、富の尺度、すなわち、新国富の指数 (Inclusive Wealth Index: IWI) が得られる。

$$IWI = p_K K + p_H H + p_N N \quad (6)$$

IWI は、人間が持続的に発展していく中で、自然資本の抽出と製造された富の創出を測定するものである。実際、IWI と W は互換性があり、福祉経済学の理論に基づいた持続可能性の優れた指標として適用され、持続可能な経済を実現するためにどのような資本を投資すべきかについて、豊かな政策的意味合いを提供するものである<sup>8-11)</sup>。新国富の概念の実用化は、当初の国家レベルの指標への着目から地域や地方での評価へと蓄積され始めている<sup>12,13)</sup>。ここでは、IW フレームワークを LICOE のプラントレベルに適用し、以下のような実証的な測定を行えるものとする。

#### a) 人工資本

人工資本は、製造された資本または再現可能な資本とも呼ばれ、これには、民間企業の物理的なインフラ、土地、財産、設備、住宅などが含まれる。小水力発電所の人工資本の計算は、通常の LCOE と同様、各期に発生する減価償却費を差し引いた総投資額と初期の資本ストック  $K(0)$  を足したものを資本としている。形式的には、 $t$  における人工資本ストックは次式のように表される。

$$K(t) = K(0)(1+r)^t + \sum_{t=1}^n \frac{I_t}{(1+r)^t} \quad (7)$$

$I(t)$  と  $r$  は、 $t$  での投資と割引率を表す

#### b) 人的資本

小水力発電所の人的資本は、管理や保守のために直接雇用される従業員の教育達成度から得られる生涯所得と幸福度として算出される。文献<sup>6-12)</sup>に従い、小水力発電所の生涯雇用による所得は、教育シャドープライスによって推定される。

$$p_H(t) = \int_0^{T(t)} w(\tau) e^{-r\tau} d\tau \quad (8)$$

$w(\tau)$  は  $t$  時点での賃金、 $e^{-r\tau}$  は連続複利の割引率である。

#### c) 自然資本

小水力発電によるエネルギー生成は、初期の資本コストとメンテナンスコストに依存し、燃料コストはかからない。他方、小水力発電の建設事業は、事業に付随するインフラのために木を伐採することによる森林破壊をもたらすことも多い。ここでは、小水力発電事業に関連す

る2種類の自然資本の損失と減価を下記により算出する。

#### (c.1) 森林

ここでは、森林伐採による木材資源の損失を推定する。この特定資本の量は、総伐採林面積に面積当たりの木材密度と総量のうち、商業的に利用可能な割合を乗じたものに等しい。シャドープライスの算出については、文献<sup>15)</sup>に従い、国内の平均丸太価格に林業のレンタル価格を乗じたものを森林の価格とした。

#### (c.2) 森林からの非木材の便益

森林資本は、木材生産という形でサービスを提供するだけでなく、多くの生態系サービスをもたらす。生態学の文献では、森林のうちの幸福に寄与する部分のみを計上すべきであると強調されているが、ここでは、自然林を考慮してこれらの非木材森林の利益を算出する。非木材森林の一時的な社会的福利に対する単位利益は、Ecosystem Service Valuation Database (ESVD) データベースから得られる<sup>16)</sup>。これを $P$  (JPY/ha/year) で表す。この値を、全森林面積に占める各森林タイプのシェアで重み付けし、この利益を資本資産価値に換算する。つまり、NTFB森林財産損失の価値は次式のように算出される。

$$\sum_{t=\tau}^{\infty} \frac{P\dot{Q}_t\gamma}{(1+r)^{t-\tau}} = \frac{1+r}{r} P\dot{Q}\gamma \quad (9)$$

$\dot{Q}$ は、小水力発電所の建設によって失われる自然林の面積である。個人が利益を得るためにアクセスする総森林面積の割合を $\gamma$ と仮定する。

#### d) 調整

上記の資本資産ではカバーされないものの、社会的福利の変化に寄与する評価エレメントについては調整項目として扱う。主な調整項目として地域経済誘発効果、CO<sub>2</sub>削減効果、そして植林等による自然資本の再生・創出効果を対象とする。

##### (d.1) 地域経済誘発効果

地域の経済誘発効果は、小水力発電所建設による需要主導型の効果を産業連関モデルに当てはめて推計する。つまりは、地元建設業者による施工の実施、域内企業からの発電設備等の調達、域外企業からの調達による地域への波及効果による域内経済効果も含むものとなる。小水力発電事業の実施において地域振興の重要性が高まっている中、産業連関モデルの適用については、小水力発電所建設による地域的、地域間的な影響を推定することができるため事業評価のための有用な指標となる。

##### (d.2) CO<sub>2</sub>削減

文献<sup>8,9)</sup>に従うと、炭素損害は社会的福利のほぼ外生的な変化とみなすことができ、ここでは小水力発電での再エネ創出によるCO<sub>2</sub>削減効果をカーボンクレジット市場や電力証書市場を基に算出し、調整項目とする。

##### (d.3) 自然資本再生/創出活動

小水力発電事業においては、樹木伐採箇所等における植林活動による自然資本の再生・創出活動を行う事業者も少なからず出てきている。ここでは、CO<sub>2</sub>削減効果の高い樹木の植林によるカーボンクレジットの創出や生態系サービスの価値を含む自然資本の再生・創出活動を(3)の手法に基づいて算出し調整項目とする。

##### (d.4) その他の調整項目

上記の主要な調整項目の他、表1に挙げてあるように、売電収益を活用した地元への利益還元（具体的には事業区費の支払いや環境保全活動等促進のための寄付等）の実施、学習の場とするような設計の実施を行い環境学習機会を創出すること、災害拠点を想定した発電機の採用による地域の防災能力向上への貢献等の項目が、特に地域振興に係る重要な項目であると考えられる。これらの項目については、資本としての推計が難しい点もあり、取り組みが行われているか否か（行われる予定か否か）の定性的な情報を基に指標の中に取り組みることが考えられる。

## 4. 今後の展望

本稿では、国家レベルの指標から地域や地方での評価へと蓄積され始めている新国富の概念を小水力発電事業に応用し、持続可能性のみならず地域振興の要素も加えた新たな評価フレームワークを提示している。今後は、実際に事業主体からデータを収集し、本フレームワークを用いて評価を行い新国富指標により事業の取組みを数値化することで、対象事業が当該地域にもたらす多様な豊かさを金銭的価値として測定し、対象事業の持続可能な資産価値の評価が可能になり、小水力発電事業のさらなる普及につながると考える。

### 参考文献

- [1] Inoue H, Keeley A.R. Barriers and Obstacles to Development of Mini-Hydro Energy in Japan: From the Perspectives of Project Developers. Journal of the Japan Institute of Energy 2018. 97, 245-251.
- [2] Keeley A. R. Matsumoto, K. I. Relative significance of determinants of foreign direct investment in wind and solar energy in developing countries-AHP analysis. Energy policy 2018. 123, 337-348.

- [3] Mudasser M, Yiridoe EK, Corscadden K. Cost-benefit analysis of grid-connected wind-biogas hybrid energy production, by turbine capacity and site. *Renew Energy* 2015. 80:573e82.
- [4] Wiskerke WT, Dornburg V, Rubanza CDK, Malimbwi RE, Faaij APC. Cost/benefit analysis of biomass energy supply options for rural smallholders in the semi-arid eastern part of Shinyanga Region in Tanzania. *Renew Sustain Energy Rev* 2010. 14:148e65.
- [5] Breyer C, Gerlach A. Global overview on grid-parity. *Prog Photovolt Res Appl* 2013. 21:121e36.
- [6] IRENA "Renewable energy technologies: Cost analysis series." *Concentrating solar power 4.5* (2012).
- [7] 発電コスト検証ワーキンググループ, 2015. 長期エネルギー需給見通し小委員会に対する発電コスト等の検証に関する報告.
- [8] Arrow, Kenneth J., et al. "Sustainability and the measurement of wealth." *Environment and development economics* 17.3 (2012): 317-353.
- [9] Managi, S., & Kumar, P. (2018). *Inclusive wealth report 2018*. Taylor & Francis.
- [10] Dasgupta, P. (2009). The welfare economic theory of green national accounts. *Environmental and Resource Economics*, 42(1), 3-38.
- [https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic\\_policy\\_subcommittee/mi-toshi/cost\\_wg/pdf/cost\\_wg\\_01.pdf](https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/mi-toshi/cost_wg/pdf/cost_wg_01.pdf)
- [11] Heal, Geoffrey, and Bengt Kriström. "National income and the environment." *Handbook of environmental economics* 3 (2005): 1147-1217.
- [12] Ikeda, S., Tamaki, T., Nakamura, H., & Managi, S. (2017). Inclusive wealth of regions: the case of Japan. *Sustainability Science*, 12(6), 991-1006.
- [13] Agarwal, Priti, and Aparna Sawhney. "Sustainability and comprehensive wealth accounting: the case of India." *Environment, Development and Sustainability* 23.3 (2021): 3762-3786.
- [14] Klenow, Peter J., and Andres Rodriguez-Clare. "The neoclassical revival in growth economics: Has it gone too far?." *NBER macroeconomics annual* 12 (1997): 73-103.
- [15] Peters, C. M., & World Bank. (1996). *The ecology and management of non-timber forest resources*. The World Bank.
- [16] Van der Ploeg, Sander, Rudolf S. De Groot, and Yafei Wang. "The TEEB Valuation Database: overview of structure, data and results." *Wageningen, the Netherlands. : Foundation for Sustainable Development* (2010).

Visit through: