

持続性を考慮した自然エネルギー機器のライフサイクルアセスメントの評価尺度

80022833 日野 光輝 指導教員 長島 昭

1. 背景

1990年代後半以降、「持続的な発展(Sustainable Development)」が、社会経済および工学の分野で、重要なキーワードとなっている。環境に配慮する為にも、人間の生活を向上させる為にも、相互に協調し持続的な発展を実現する必要がある。

現在の社会は、エネルギー・資源が枯渇性資源から供給されている事の認識が薄いまま、大量消費社会を形成している。省エネルギー社会への移行とともに、エネルギー供給面での対応も必要である。エネルギー供給面では、オイルショック以降、単一エネルギー源に頼る危険性が指摘されエネルギー源の多様性が求められている。また、温室効果ガスの排出等、環境問題の配慮も求められている。

エネルギー源の多様性への対応、環境問題解決の一つとして自然エネルギー利用がある。

自然エネルギーの多くは、未利用エネルギーであり、今後、急速に利用をすすめるには、様々な面での検討が必要である。検討方法の一つとして、ライフサイクルアセスメント(LCA)が用いられている。LCAは、ある機器の材料採掘から、使用、廃棄までの一つのサイクルが評価範囲である。

従来のLCAを用い化石燃料利用と自然エネルギー利用を評価した場合、自然エネルギーは高コストで製造時のエネルギー消費が多いという指摘がある。将来のエネルギーシステムの効率化を検討するには従来のLCAでは不十分である。持続的な発展には社会を支えるエネルギー供給の持続が不可欠であるが従来のLCAでは考慮されていない。

持続性を考慮した評価尺度を用いて、自然エネルギー機器を評価し、自然エネルギー利用が持続的な発展に寄与できるかを検討する必要がある。

2. 目的

従来のLCAが考慮できない持続性を評価する為、持続性の変化を表現できる評価尺度 UE(Usable Energy)を提案する。自然エネルギー機器が備える、また備えなくてはならない持続性を、「エネルギー供給の持続性」「資源の最小利用、有効利用の持続性」「機器の効率的な建設、利用の持続性」の3つとし、それらをUEにより数値表現する。そして、機器全体、自然エネルギー機器システム全体の持続性を評価する為、Sustainable Life-Cycle Assessment(SLCA)を提案する。

3. 持続性を考慮した新評価尺度

持続性の評価尺度として、エネルギーを単位とした、UE [GJ/yr]を提案する。

先に挙げた3つの持続性がUEを構成し、それぞれ、UE1を「人間に与える恩恵の持続性」とし、UE2を「資源の持続性」とし、UE3を「機器の持続性」と定義した。

UEによって、個々の自然エネルギー機器を評価し、自然エネルギー機器システムの持続性を、ある期間ごとに表現する持続性評価指標LSを定義し、この手法をSLCAとした。

3.1 人間に与える恩恵の持続性 UE1

UE1を、人間社会に供給するエネルギー量と定義する。

エネルギー機器は、持続的にエネルギーを人間に与える事が要求される。エネルギー機器が取り出したエネルギー全て

を利用する事は不可能であり、機器が自然エネルギーから人間が利用できる形態でエネルギー供給した実供給量を算出する。その値をUE1とする。

3.2 資源の持続性 UE2

資源の持続性をUE2とし、2つの項に分割して考慮し、UE2.1を「資源サイクル実現に必要なエネルギー」とし、UE2.2を「リサイクル可能性の損失」とした。

資源の持続性は、天然資源の最小利用、有効利用を考える必要がある。この2つの利用を本研究では、2つのレベル「資源全体」と「機器の素材」に分けて考える。

資源全体レベルでは、資源の一連の流れ全体で、最小利用、有効利用を満たす為、資源供給の最適化が必要である。

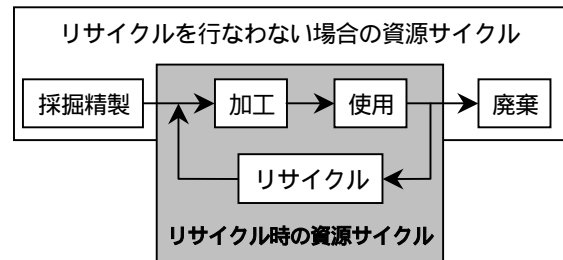


図1 資源の一連の流れと資源サイクル

天然資源が枯渇に近づく、採掘・精製に必要なエネルギーは増加すると考えられる。また、廃棄量の増加によって廃棄のエネルギーも増大する。しかし、天然資源を全く使わない事が良く完全なリサイクルが理想であるという考え方は、リサイクルエネルギーが増加する為、現実的でない。

資源サイクルのエネルギー使用量を最小化した最適な資源サイクルを考えるため、素材の生産量(天然資源精製とリサイクル)と、リサイクル率と、エネルギー消費との関係を大胆に仮定した。この仮定を用いて資源サイクル実現に必要なエネルギーが最小化できるリサイクル率を求め、 Rc_{opt} とした。

機器の素材レベルで、最小利用、有効利用を実現するには、素材使用量の削減と、最適な資源サイクルを妨げない事が必要である。

無意味に資源を利用する事は無駄なエネルギー消費であり持続性を失う。つまり資源の持続性には資源利用の最小化が必要である。素材を利用は資源サイクルを実現する事であり、それにはエネルギーが必要であり、UE2.1を「資源サイクル実現に必要なエネルギー」とした。

リサイクルが有効な資源に対しリサイクルを実施しない事は資源サイクル実現のエネルギーを増加させる為、UE2.2を「リサイクル可能性の損失」とした。

以上の定義より、UE2が増加すると持続性を失う。

3.2.1 資源サイクル実現に必要なエネルギー-UE2.1

ある資源の天然資源精製、廃棄、リサイクルに必要なエネルギーを、それぞれ E_f, E_d, E_c [GJ/素材生産t]とし、資源サイクル1回を実現するのに必要なエネルギーを E_{lim} [GJ/素材生産t]とし、(1)式を定義した。

$$E_{lim} = (1 - Rc)(E_f + E_d) + E_c Rc \quad (1)$$

E_{lim} に、機器を構成する素材の重量を乗し、その値を、使用期間中に分配する為、UE1をもとに産高比例法を用いて分配しUE2.1とした。

3.2.2 リサイクル可能性の損失 UE2.2

リサイクルにより天然資源精製エネルギー消費が削減できる資源をリサイクルせず廃棄したとする。廃棄したことで、将来のリサイクルによるエネルギー削減効果を失う。将来のリサイクルによるエネルギーの削減可能量 E_{pc} は、最適な資源サイクル時の $E_{lim}, E_{lim,opt}$ を用いて(2)式のように定義した。

$$E_{pc} = (E_f + E_d - E_{lim,opt}) R_{c,opt} / (1 - R_{c,opt}) \quad (2)$$

UE2.2 は、 E_{pc} に1年の資源損失量を乗じたものとする。

3.2.3 UE2 全体

UE2.1, UE2.2 を、機器を構成する素材全体に拡張し、総和を UE2 とする。

3.3 機器サイクルの持続性 UE3

機器の効率的な建設によりエネルギー消費を削減でき持続性が向上する。建設等に必要エネルギーを UE3 とする。

プラントの材料加工、輸送、組み立てに必要なエネルギーの和を E_{build} とし、産高比例法を用いて使用期間中に分配し UE3 とした。UE3 も UE2 と同様に最小化することが持続性向上につながる。

3.4 システム全体の持続性 SLCA 評価

UE1 は増加により持続性が向上する。一方、UE2, UE3 は減少により持続性が向上する。これらを統合化し、ある自然エネルギー機器全体の持続性を評価する指標、持続性評価指標 $I.S.$ 定義した。

$I.S.p$ をシステム全体の UE1 の前年からの増加率とし、 $I.S.n$ をシステム全体の UE2+UE3 の前年からの増加率とし、ある年 t の持続可能性指標 $I.S.(t)$ を、(3)式のように定義した。

$$I.S.(t) = I.S.p(t) - I.S.n(t) \quad (3)$$

$I.S.$ が正の時、持続可能状態であり、 $I.S.$ が負の時、持続不可能状態である。

4. 最適な資源サイクル

R_c および、天然資源精製、廃棄、リサイクル各対象の重量に対する E_f, E_d, E_c の変化を仮定した。将来、素材生産と用途停止が同量となるとし、その時を安定化時とする。安定化時に期待される、素材年生産量に対し、どのリサイクル率が、資源サイクル実現のエネルギー最小化を図れるか検討し、 $R_{c,opt}$ を算出した。

リサイクルが一般に行なわれている鉄鋼、アルミニウム (Al)、銅の $R_{c,opt}$ 算出を行なった。主な条件および結果を表1に示す。また、鉄鋼の算出に用いたグラフを図2に示す。

表1 最適な資源サイクル時のリサイクル率算出結果

素材	安定化時生産量	現在の R_c	$R_{c,opt}$
鉄鋼	現状値	0.7	0.66
Al	現状の3倍	0.54	0.92
銅	現状の1.5倍	0.66	0.86

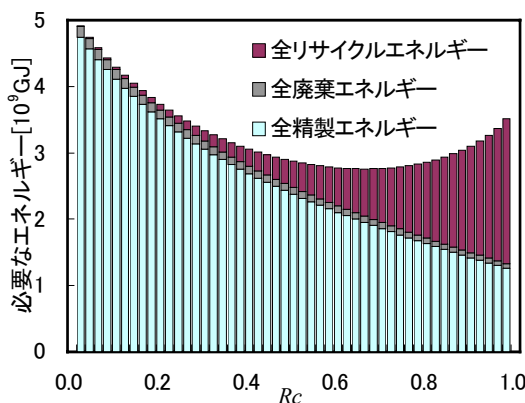


図2 R_c と鉄鋼に必要なエネルギー

なお、 R_c が1近くになっても、精製が必要なのは、回収時の不純物混入による目減り分を補う為である。Al と銅の $R_{c,opt}$ が、現在の R_c に比べ増加するのは、一般的には E_f が E_c に比べて大きい事による。本研究では、さらに低品質天然資源の利用に伴う、採掘エネルギー増加も大きな要因である事を示した。

5. 新評価尺度を風力発電機器に適用

現在、風力発電機器の定格出力が大出力化しており、製造が、数百kW から、千kW 級へ移行している。そこで、400kW タイプ、1000kW タイプ、2つの出力の風力発電機器で現状の UE を算出し、稼働台数を仮定し、高出力化に伴う持続性の変化を評価した。

2タイプ の定格出力以外の値は全く同じ値をとり、製造が、400kW タイプから、1000kW タイプに移行すると仮定し、稼働台数と持続性評価指標 $I.S.$ の変化を図3に示す。

大出力に移行する間、 $I.S.$ は常に負である為、持続不可能状態である。大出力化に伴い設備が大型化した一方で、効率の上昇、素材生産に必要なエネルギーの減少という技術的要素、リサイクル率の向上といった社会的システム改革が伴わなければ、持続性の向上は見込めない事がモデルによって示された。

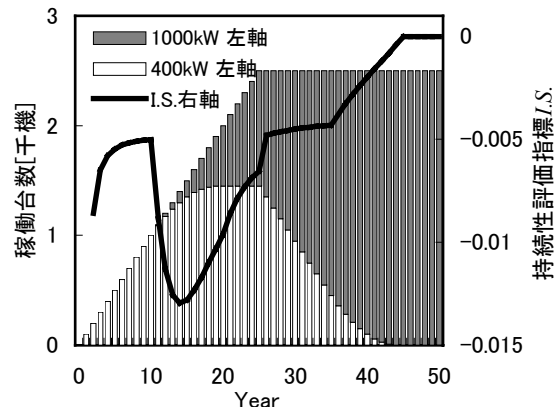


図3 稼働台数と $I.S.$ の変化

6. 考察

最適な資源サイクルの仮定の有効範囲は、線形に近似した項があるため、素材生産量は、現在の素材生産量の0.1から4倍程度であり、リサイクル率 R_c は、 $0.04 < R_c < 0.96$ 程度である。現在リサイクル率が低い資源には適用が困難である。また、大幅な製造量、リサイクルシステム(特に回収)の変化があった場合、検討の余地がある。

このモデルを用いると、素材によって UE2.2 が大きな値をとり、一つの素材の利用が $I.S.$ に大きな影響を与える事がある。特に UE2.2 の影響項である、最適な資源サイクルの検討を綿密に行なう必要がある。

UE では、自然エネルギー機器の持続性向上の評価検討が可能だが、他のエネルギー機器との比較は困難である。

$I.S.$ を用いると、他の自然エネルギー機器システムとの比較は可能であるが、化石燃料エネルギー機器等との比較は困難であり、新たな持続性表現項を導入する必要がある。

7. 結論と今後の課題

自然エネルギーの持続性を表す評価尺度 UE および統合化指標 $I.S.$ を定義し、持続性の変化を評価できる事を示した。

化石燃料システムとの比較を行なう為の評価項目の追加、資源の持続性表現の検討が今後の課題である。