特集「インパクトアセスメント」

解説

エコロジカル・フットプリント指標の応用動向と今後の課題：
事後継続的影響管理(PIM)コストの算入について

和田 喜彦

Applications of Ecological Footprint and Some Remaining Issues:
Inclusion of the Prolonged Impact Management (PIM) Costs

Yoshihiko WADA

Synopsis: The Ecological Footprint (EF) was co-invented by William E. Rees and Mathis Wackernagel of the University of British Columbia, Canada in 1991. In recent years, the Ecological Footprint analysis has been well recognized and applied in the areas of public policy, planning as well as environmental education in various parts of the world, especially in Europe, North America, and southern hemisphere. Some countries, including Japan, are planning to monitor their EF each year, just as they monitor their gross domestic products (GDP). In this paper, I first present an overview, calculation methods, as well as the significance of the EF analysis in the context of sustainable development. Then, I examine some examples of Ecological Footprint applications in the USA, Europe and Australia. In the latter part of this paper, I explore a possible improvement in the calculation methods associated with nuclear power generation. I present an innovative new method of calculating the Ecological Footprint of nuclear power generation in order to fully incorporate its 'prolonged impact management (PIM)' costs which continue to incur, for example, in uranium mine sites at least for more than 10,000 years, and in highly radioactive nuclear waste sites for one million years. An EF calculation of the nuclear power generation in Japan was carried out. The tentative results of this case study were astonishing.

Key Words: Ecological Footprint (EF), overshoot, optimum scale of an economy, nuclear power generation, prolonged impact management (PIM)

1. はじめに

エコロジカル・フットプリント (EF) 指標は、1991年にカナダ・ブリティッシュ・コロンビア大学大学院コミュニティ地域計画学研究科のウィリアム・リース教授ならびに、マティース・ワケナゲルによって共同開発された持続可能性 (サステナビリティ) 評価指標である。近年、エコロジカル・フットプリントは、欧米諸国を中心に世界的に注目されつつあり、政策決定を支援するツール、環境教育用教材としても実際に応用されている。我が国でもこの指標を政策面で応用しようとする動きも出ている。このような背景を踏まえ、この指標の概念や意義と計算方法を概観した上で、海外の応用事例を検証し、我が国での応用にとって何らかの示唆を導くことができないか検討を加えた。さらに、この指標が科学的なサステナビリティ評価手法として認知され続け、GDPと同等の地位を獲得するためにはどのような工夫が必要かについて考察した。特に、計算方法の中でも議論が収束していない原子力発電のEF計算方法について検討を行った。

2. 研究の方法

エコロジカル・フットプリントの政策的応用事例について、欧州・豪州の国家および地方自治体を対象に、文献調査、現地での聞き取り調査を実施した。また、原子力発電のEF計測方法については、オーストラリア北部準州にあるウラン鉱山 (レンジャー鉱山とジャベルカ鉱山) を対象として、現地調査を実施し、環境影響管理等について関係者へのインタビューと情報収集を行い、情報の解析を行った。過去の原子力発電のエネルギーコスト計算の研究成果をもとに、最新データを投入して原子力発電にともなう超長期的な環境管理コストを含めたEFの試算を行った。

3. エコロジカル・フットプリントとは

生態系は人間が生きていくために必要な様々な資源 (食料や森林資源など) を再生産している。さらに人間が排出する廃棄物を吸収するなどのサービスを提供している。こうした人間の生活を支えるために必要とされる生態系による資源再生産・廃棄物処理サービス (フロー) は、「生態

系サービス」と呼称されている。生態系サービスを持続的に産み出す生態系（ストック：陸地と水域にあるもの両方）の合計面積がEFの大きさである。

リースは、EFを次のように定義している。

「ある特定の地域の経済活動、またはある特定の物質水準の生活を営む人々の消費活動を永続的に支えるために必要とされる生産可能な土地および水域面積の合計（ある地域で必要とされる資源を永続的に産み出し、且つそこで排出される廃棄物質を継続的に吸収処理するために必要となる生態系・水土の面積の合計〔それらが地域内に存在するか外に存在するかは無関係〕¹⁾」。

以上を要約すれば、エコロジカル・フットプリントとは、経済活動を持続するために生態系に負わせている負荷の大きさを土地・水域の面積で表したものである。

EFは、開発時には、Appropriated Carrying Capacity (ACC) という名称で呼ばれていた。Appropriatedは、「他から持って来られた」、「収奪された」などの意味の英語である。Carrying Capacityは、「環境収容力」、または「環境容量」と訳されるので、全体としては「他から持って来られた環境収容力」である。しかし、この呼称は堅苦しく専門的な印象を与える。計画学を専攻する研究者たちは、学問の研究成果を社会の変革に結びつけるためには、行政の計画官だけでなく一般市民の問題の理解と変革プロセスへの参加が重要だと考えているため、市民にも受け入れ易い代替名称を模索した。その結果、イメージしやすく抵抗感の少ない言葉としてEcological Footprint (EF) が選ばれたという経緯がある。そのような経緯を考慮すれば、EFを「生態系への踏みつけ面積」などと和訳するよりは、「環境収容力要求量」、「環境面積要求量」「生物生産力要求量」などと訳すほうが真意は分かりやすい。ただ、エコロジカル・フットプリントという呼び名が、既に日本でも定着しつつあるので、カタカナ語の乱用という批判もあるが、本稿でもこの呼称を使うこととする。

Source: Wackernagel and Rees, 1996, Figure 2.8 (p. 54)

Figure 1. The Concept of Overshoot

計算されたEFの大きさは、経済活動による生態系サービスへの「需要」である。この需要量は、生産可能な土地水域面積と比較される。すなわち、生態系サービスの供給限界量（環境収容力）である。前者は、需要サイド、後者は、供給サイドであるが、持続的に生態系サービスを利用しようとするれば、需要が供給の限界を超過してはならない。ただし、需要が生態系サービスの供給量の限界を超過する事は一時的にはありえることである。生態学では、需要が供給を一時的に超過することを「オーバーシュート」と呼んでいる²⁾ (Figure1 参照)。

オーバーシュートは、自然資本の元本を取り崩す過程であり、長期的に継続した場合は、いつか「破局（カタストロフィー）」が発生する。破局の到来は簡単には予想できない。オーバーシュートの発生は感知されにくいいため、また、破局の到来時期を予測し難いため、オーバーシュートという現象は極めて危険なものである。エコロジカル・フットプリントは、人間経済活動が生態系の能力に鑑みて、オーバーシュートを発生させずに、環境収容力の範囲内の規模に収まっているかについての判断を行う指標である。生態系サービス需要－供給バランス指標’ともいべき分析ツールである。従来の経済マクロ指標（GDPなど）は、一定期間に市場で取引される財・サービス量を表すだけで、生態系サービスの需要量が供給の限界を超えていないか、均衡が取れているかという視点が全く無い。

4. エコロジカル・フットプリントの意義：経済の適正規模の把握

エコロジー経済学者のハーマン・デイリーは、「持続可能な発展」とは「定常状態」を意味すると主張している³⁾。この定常状態経済は、19世紀イギリスの古典派経済学者であるJ.S.ミルも主張していたこととほぼ同義である。定常状態といっても経済システムの中に流入する物質・エネルギーのスループット（通過）量が「適正規模」において定常状態に留まるという意味であり、倫理観や文化水準や人間関係の豊かさなどの生活の質は向上する。すなわち、「量的増加を伴わない質的改善」である。この定常状態経済というミルの考えは、長い間忘れ去られ続けてきたのだが、デイリーが復活させた。EFは、デイリーの言う経済に流入するスループット量が適正規模であるかどうかを定量的に示す分析ツールとも言える。EFは、マクロ経済の「適正規模」を示し、実際に経済規模が適正規模との比較において、どれだけになっているかを測定する指標である。マクロ経済の規模と生態系の規模との比較を行うという点で、エコロジカル・フットプリントは他の環境影響評価指標にはない特徴を有していると言える。

5. エコロジカル・フットプリントの計算方法

- (1) 実際の計算では、データや計算上の制約から、環境負荷すべてを含むことは困難である。数ある資源の内、まず、生態系が産み出す再生可能資源（バイオマス資源）の消費を計上する。（Table 1の①、②、③、および⑥。尚、①は「耕作地」、②は「牧草地」、③は「森林地」、⑥は「海洋・淡水域」と呼ぶ。）
- (2) 非再生資源の化石燃料については、「二酸化炭素吸収地」として計上する。（Table 1の④）非再生資源の金属資源については、その加工のためのエネルギー（化石燃料）消費として間接的に計上する。（Table 1の④。尚これを「エネルギー地」と呼称することもある。）
- (3) バイオマス資源生産能力の阻害となっている土地面積も加える。（Table 1の⑤。これを「生産能力阻害地」と呼称する。）
- (4) 域内での「純消費」に係わる土地水域面積を計算。国（地域）外で生産されたモノでも、貿易を通して輸（移）入され、域内で消費されたモノについては、その国（地域）の責任としてその土地水域面積を加算する（バーチャル・ランド、バーチャル・オーシャン）。逆に域内で生産されたモノでも輸（移）出され、域外で消費されたモノの生産に係わった土地水域面積は除外する。
- (5) 食物連鎖の上位に位置する生物種の消費に関するEFは、第一次生産者（Primary Producers = 緑色植物や植物プランクトンなど）の生産量に換算して面積を産出する。食物網が複雑で、食物連鎖が長い水産資源の場合、以下の式で必要一次生産量（Primary Producer Required, PPR）を求め、PPRの値を水域の生産性で除すことで面積を算出する⁴⁾。

$$(\text{必要一次生産量, PPR}) = \{(\text{漁獲量} + \text{混獲量})/9\} \times 10^{(\text{TL}-1)}$$

漁船の格納スペースには限界があるため、目的魚以外の魚種が網に掛かった場合（＝混獲）は海洋投棄される。国連農業食糧機関（FAO）によれば、混獲率の世界平均値は、27%で無視できない率であるが、場合によっては800%になるものもある（エビトロール漁）。漁獲量と混獲量の合計を9で除するのは、水分を含む漁業資源量を炭素量に変換するためである。TLとは、食物連鎖の栄養段階を示し、植物プランクトンのような第一次生産者のTLは1で、動物プランクトンのTLは2となる。TL-1とは、第一次生産者からの変換回数を示す。動物プランクトンの変換回数は1回となる。水棲生物の場合、食物連鎖の変換効率は、10%である⁵⁾。魚たちは自らのからだを維持するために、自らのからだの10倍の重量分の栄養段階一つ下の魚種またはプランクトンを食しているのだ。栄養段階が3の魚種は、第一次生産者から数えて、変換回数が2回であるため、その魚種の消費量に10の2乗（＝100）を掛けることによ

て、その魚種を育てるために必要となった植物プランクトン量（PPR）が算出できる。

- (6) エコロジカル・フットプリントと生産可能な土地・水域面積との比較

地球上の生産可能な土地（水域）面積の合計は113億ha（沙漠、高山、遠洋などを除外）である。その内訳は、耕作地：15億ha、牧草地：35億ha、森林地：39億ha、生産能力阻害地：2億haであり、陸地計が90億haである。漁場：23億haを加えると113億haとなる。一人当たり面積は1.8haとなる。

現在は、土地生産性が違う土地を単純に加算することによる歪みを補正するための工夫がなされており、全世界の生産可能な土地水域の平均的な生産力を持った仮想的な土地を、世界標準の単位として利用することが普通である。この単位は、グローバル・ヘクタール（global hectare）と呼び、「gha」という略号を使う。すなわち、1グローバル・ヘクタールとは：世界平均の土地生産性を持つ土地1ヘクタールのことである。2001年時点での、生物生産力は耕作地：33億gha、牧草地：17億gha、森林地：51億gha、生産能力阻害地：4億gha、陸地計：105億gha、漁場：8億gha、合計113億ghaである。生物生産力（バイオキャパシティー）の一人当たり面積は、1.81 gha（内訳は、耕作地：0.53 gha、牧草地：0.27 gha、森林地：0.81 gha、生産能力阻害地：0.07gha、陸地計：1.68gha、漁場：0.13 gha）である⁶⁾。

- (7) エコロジカル・フットプリントは総合指標と言えるのか

EFの実際の計算では全ての環境負荷を含んでいるわけではないので、総合指標とは言えないという批判もある。これに対しての筆者の考えは次の通りである。土地・水域の生物生産力は、土壌・水域中の無機物、有機物、微生物など様々な要素の機能の総体的な結びつきの結果としての総合的能力を表している。EFは、生態系の持つ総合的能力に対する需要量を計測する指標である。その意味で、エコロジカル・フットプリントは、総合的指標と言って良いと筆者は考えている。

Table 1. Land Categories of Ecological Footprint Analysis

① Cropland: Land necessary for production of food, forage, tobacco, rush, cotton, etc.
② Grazing Land: Land necessary for production of grass for forage, wool, etc.
③ Forest Land: Land necessary for production of furniture, construction materials, paper, etc.
④ Energy Land/CO ₂ Land: Land necessary for absorption of CO ₂ emitted from burning fossil fuels.
⑤ Built-up Land: Infrastructure for housing, transportation, industrial production, mining, waste sites, and hydroelectric power
⑥ Fishing Ground: Aquatic areas necessary for fish and other aquatic living organisms to survive.

6. エコロジカル・フットプリントの応用事例

① グローバル・フットプリント・ネットワーク (GFN) の活動

2003年、ワケナゲルが代表理事としてグローバル・フットプリント・ネットワーク (GFN) が米国・カリフォルニア州に設立された。この民間研究機関は、EFの計算方法の標準化と世界的な普及をめざしている。GFNは、約150カ国のEF計算を行っている。GFNは、計算手法検討委員会を持っており、計算方法の改善点を毎年更新している。計算結果は、WWFなどの協力を得つつ『生きている地球報告書』として隔年毎に発表される。これはウェブサイトでも閲覧できる。2006年版によれば、人類全体としてのEFは、地球の生物生産力を約25%オーバーシュートしている⁷⁾。

欧州版・アジア版などの地域版も発行され、欧州版には、欧州委員会委員長のバロツソ氏が、またアジア版には、インドネシアの元環境大臣のサミル氏が序文を寄せるなど、この指標が政治的主流（メインストリーム）からも篤い支持を得ていることがうかがえる。2006年には、GFNとイタリア・シエナ大学の共催による「フットプリント・フォーラム・2006」と称する国際会議がシエナ近郊で開かれ、世界各地から百数十人が集まり、各国での応用事例などについて議論を深めた。2007年5月には、ウェールズでの国際学会が予定されている。

② 欧州共通指標プロジェクト

ヨーロッパにおける自治体の持続可能性の達成度を地域横断的に10の共通指標で計測することを目的とする欧州共通指標プロジェクトが2000年から2003年にかけて実施された。その内、「気候変動への寄与度」という指標の代替的・補完的指標として、EFが重点研究の対象となった。このプロジェクトへの加盟自治体数は144となり、実際に指標を使ってデータを収集し事務局に回答を送付した自治体は、全体の29%に相当する42自治体となった。

③ 英国連邦政府のエコロジカル・フットプリントの活用

英国でのEF関連の調査研究は100以上存在する。その中でも最も規模の大きいものは、英国連邦政府による「エコ・バジェット・プロジェクト」である。このプロジェクトの第一の目的は、マテリアル・フロー分析、マテリアル・バランス分析をもとに、英国の広域地域区分（12区分）の「物量産業連関表」(Physical Input-Output Table, PIOT) を構築することであった。さらに、政策シナリオ毎のEFを容易に計算できるパソコン・ソフトを開発することが二つ目の目的であった。このソフトは、「資源エネルギー分析プログラム」(Resource and Energy Analysis Program, REAP) と呼ばれるが、2005年に完成した⁸⁾。

④ 英国連邦内の各政府・自治体のEFの応用

英国での地方、自治体レベルのエコロジカル・フットプ

rint計算は30以上に上る。ここでは、ウェールズと、同国の首都カーディフ市の例を取り上げた。

ア. ウェールズ議会政府

ウェールズ議会政府は2002年、世界で初めて国家として公式にEFを持続可能性指標の一つとして採用し、資源消費をモニターしてゆくことを宣言した。この背景となっているのが、ウェールズ政府法である。この法律には、ウェールズ政府の法的義務として持続可能な開発を進めるスキームを作成することと明記されている(1998年「ウェールズ政府法」・法的義務121節)。この義務規定に基づき2000年に「持続可能な開発計画」(第1版)が策定され、持続可能性をモニターする指標の必要性が指摘された。2001年には、12の持続可能性評価指標が選定され、その中に、EFが含まれた。その理由は、この指標は、ウェールズ内の資源消費が地球環境に及ぼす負荷をよく表現できるというものであった。こうして、2003年から、6000万円規模の予算でウェールズ・エコロジカル・フットプリント・プロジェクトが開始された。ただし、ウェールズ政府は、EFを継続的に測定してゆくことを政府として決定しているものの、計算結果をもとに政策変更を加えるか否かについては未定である。

イ. カーディフ市

カーディフ市は、人口約30万人の都市である。2000年に発行された『カーディフ市持続可能性戦略』(Local Sustainability Strategy for Cardiff) の中に、「ウェールズの中で、カーディフ市は地域内のみならず国際的な『持続可能性』を促進する特別の役割を担っている」と記された(para. 7.3, p. 27)。以上の理念に基づき、カーディフでは、持続可能性評価指標を選定した。EFや生物多様性などの指標が採用された。このプロジェクトの中心となったのが、「持続可能な開発ユニット(Sustainable Development Unit, SDU)」であるが、各部署の政策担当者からデータの提供を受けつつ、EF計算に必要なデータ集積を進め、政策シナリオ毎のEF計算を行った⁹⁾。結論の一部として、“ビッグヒッター”(EFを大きくしている要因)として食料消費が明らかになった(30%)。特に、季節はずれの食材を使用した加工食品はEFを拡大する。これを有機栽培、且つ旬の食材を中心とする食事に変更することで下げることができる。既に、EF計算による政策評価結果が実際の政策変更結びついた例もある。たとえば、市内の小中高等学校(総数140校)の給食用の牛乳がすべて有機牛乳へ変更された。

⑤ 西オーストラリア州におけるエコロジカル・フットプリント利用

西オーストラリア州政府は『州持続可能性戦略』(2003年)において「2020年までに西オーストラリア州の環境資源

効率を4倍に増大させ、州経済のエコロジカル・フットプリントを半分に削減する」という期限付EF削減数値目標を設定した(世界初)¹⁰⁾。この戦略はあらゆる分野を網羅している。持続可能性評価、環境情報の公表、政府機関等の組織改革、開発援助、生物多様性、エネルギー、農林水産業、鉱工業、観光業、水資源・海洋・草地管理、まちの活性化、居住環境、都市デザイン、交通輸送計画、大気、廃棄物管理、文化遺産保護、教育、文化多様性、企業の社会的責任、資源効率と産業エコロジーなど多岐に渡る。この戦略は、サステナビリティという根源的理念を具現化するための州政府全体を巻き込む行政改革であるばかりか、州内の様々な組織(コミュニティ・産業界・行政)の意識改革・構造改革という性格を帯びている。戦略に掲げられた336の行動計画のうち、多くの計画が既に実施され始めている。持続可能性戦略の担当官(首相内閣府)は3人のみであるが、各行動計画について担当政府機関が定められており、6ヶ月毎に進捗状況を首相内閣府に報告しなければならない。また、市民・産業界・行政府の専門家から構成される「持続可能性円卓会議」が、行動計画および持続可能性の進捗状態の監視を行なっている。これら重層のチェックシステムが機能すれば、戦略が成功する可能性は高い。ただし、EFの算定方法には未確定部分が残されている等の課題も抱えている。

7. エコロジカル・フットプリント計算手法の課題と今後の方向性

①原子力発電のエコロジカル・フットプリント

EFの計算方法の中で、見解が大きく分かれているものの1つとして、原子力発電に関する環境負荷をいかに適切に計算するかという問題がある。グローバル・フットプリント・ネットワーク(GFN)では、原子力発電で得られる電力量を、化石燃料を使う火力発電によって代替的に発電したと仮定し、その場合に必要となる化石燃料量を用いて計算している。しかし、二酸化炭素の直接排出という観点からは過大評価となり、放射性廃棄物の超長期的リスク管理のための様々なコストを考慮すると過小評価となるなど、様々な問題点が指摘され、議論は収束していない。

以上の議論に資するためオーストラリアのウラン鉱山開発について現地調査を実施したが、連邦政府による厳重な監視下でもウラン採掘・精錬過程で、汚染事故や汚染の程度が判別不能な事態が発生していることが判明した¹¹⁾。

②事後継続的影響管理(Prolonged Impact Management, PIM)コスト

さらに、事後継続的影響管理(Prolonged Impact Management, PIM)コスト概念を用いて日本の原子力発電所の超長期的な環境コストをEFに反映させつつ計算を試みた。

Figure 2. Extension of the Concept of Ecological Footprint (Inclusion of the Temporal Dimension of the Extended Responsibility of Resources Consumption)

PIMコストとは筆者の造語であるが、その意味するところは、鉱山の閉山後にも不可欠とされる水質・尾鉱などの長期的管理コストや、使用済み核燃料などの高レベル放射性廃棄物の超長期的管理コストなどだ。たとえば、ウラン鉱山の尾鉱や水質の管理は、最低でも1万年必要であるとする証言がある^{12, 13)}。使用済み核燃料の天然ウランに対する相対毒性は一旦は下がるが70万年後に最大化する¹⁴⁾。そのため、必要な管理期間は100万年とする見解も説得的である¹⁵⁾。日常的な放射能漏れ管理、原発労働者の放射能被曝、そして核関連施設の事故、テロ攻撃の可能性、プルトニウムや劣化ウランの兵器利用による影響も考慮されねばならない。これらの長期的・超長期的管理コストは、LCA分析の中でも組み込まれていない場合が多い。

EF数量評価の原則は、ある国・地域の資源利用のために必要とされる土地水域が国内・地域内にあろうが国外・地域外にあろうが無関係に、その国・地域の責任として計算することとなっている(地理的な意味での利用者拡大責任論・帰属論)。事後継続的影響管理は、現世代の資源利用が、次世代に負わせているコストである。このコストを現世代の責任として計算することが必要であろう。つまり地理的な意味での利用者拡大責任論が採用されるのであれば、時間的な利用者拡大責任論も成り立つと思われる(Figure 2参照)。

③事後継続的影響管理コストをEFに反映させる具体的手法

A. ケース・スタディー

日本の原子力エネルギー利用のEFを試算した。基本的に、アメリカ政府 Energy Research and Development Administration (ERDA) が1976年に計算した原子力発電の純エネルギーコスト計算¹⁶⁾をもとに室田(1981)¹⁴⁾が修正を加えた結果に準拠しつつ試算を行った。標準的な原子炉発電所・加圧水型軽水炉(PWR)100万kW一基を耐用年数(30年間と仮定)まで運転する場合を想定して

いる。室田（1981）は、ERDA（1976）の計算結果に対し、揚水発電所維持コスト、廃炉処分コストを追加し、送電ロス等を差し引くなどの修正を加えて再計算した。今回の試算では、室田（1981）の再計算の手法を踏襲しつつ、ウラン鉱山の鉱滓・尾鉱の環境管理（大気・水質管理など）コスト、および高レベル放射性廃棄物の管理コストなど、いわゆる事後継続的影響管理（PIM）コストについて算入・補強した。ウラン鉱山開発の事後継続的影響管理は、1万年必要であると仮定した。ウラン鉱山のPIMエネルギーコストの原単位は、オーストラリア・レンジャーウラン鉱山の環境管理費用¹⁷⁾と自然科学系研究機関と河川・下水道等の公共事業（日本）のエネルギー原単位¹⁸⁾から推計した（具体的には、酸化ウラン消費1tonne、1年間当り0.93 GJ。1万年間で1基当り37,000,000 GJとなった）。原発が30年間に使用するウラン燃料の累積使用量を酸化ウラン量に換算し、エネルギー原単位を掛け合わせ、ウラン鉱山の事後継続的管理エネルギーコストを算出した。高レベル放射性廃棄物のPIMコストは100万年間管理する必要があると仮定した。因みに、EDRA（1976）は30年、室田（1981）は2.4万年および24万年と仮定していた。以上のような諸仮定に基づき原子力発電所一基分を対象としたエネルギーコスト計算を行い、その結果を日本全体に換算した。日本の総発電量の29%が55基の原発で発電されている（2005年）¹⁹⁾。55基すべてを耐用年数まで稼働させ、原発の新設数をゼロと仮定した。最後に総エネルギーコストを二酸化炭素吸収地面積に換算した。発電で生産されるエネルギー量も計算した。尚、今回の試算では、事故、テロ攻撃、プルトニウムや劣化ウランの兵器利用などの影響、放射性

廃棄物管理者などの放射能被曝の影響コストは、算入しなかった。計算のプロセスと根拠、前提条件等の詳細は、Table 2に示した。

イ. 試算結果

日本で稼働している原子力発電所を耐用年数（30年）まで稼働させた場合、ウラン鉱山の管理（1万年間）と高レベル放射性廃棄物の管理（100万年）のための投入エネルギーを含む総エネルギーコストは、産出されるエネルギーの16倍という結果となった。超長期的な視点に立てば、原子力発電は、エネルギーの浪費であることが判明した（Table 3）。

さらに、日本に現存し稼働している全原発（55基）を耐用年数まで稼働させた場合のEF値は、54億2千万 gha/年となり、日本の生物生産力（バイオキャパシティ）の57倍の面積が必要となることが分かった。国民一人当りにすれば、42.4 gha/年となる。これを50年の分割払いとすれば、一人一人が0.9 ghaの土地に森林を育成して50年間管理し続けることで、将来世代に対してコストを負担させずに済むという計算になる（Table 4）。しかし、そのような広い森林面積を確保することは困難と考えられ、現世代が原子力発電に依存することによって後継世代に負わせることになる負荷は莫大となるだろう。

Table 3. Results of Net Energy Cost Calculation of One Typical Japanese Nuclear Power Plant (PWR, 1 Million kW, Operation Period: 30 Years)

Input Energy	8,611,000,000 GJ
Energy Generated	541,000,000 GJ

Table 2. Procedure and Assumptions for the Ecological Footprint Calculation of Nuclear Power Generation

< The First Step > Calculation of energy requirement for one typical nuclear power plant (Pressured Water Reactor, PWR, one million kW). Assumed life expectancy is 30 years. ¹⁶⁾
Concentration of uranium in uranium ore: 0.2 % ¹⁶⁾
Average operation rate of a nuclear power plant: 61 % ¹⁶⁾
Total energy cost of uranium fuel production: 29.83×10^{12} kcal ¹⁶⁾
Total energy cost of construction and maintenance of a nuclear reactor: 11.80×10^{12} kcal ¹⁴⁾
Total energy cost of construction and maintenance of a pumping-up hydraulic power plant: 2.19×10^{12} kcal ¹⁴⁾
Total energy cost of demolishing a nuclear power plant: 2.95×10^{12} kcal ¹⁴⁾
Total energy cost for storing, monitoring and controlling highly radioactive nuclear waste for one million years : $2,002.5 \times 10^{12}$ kcal (Calculated by the author, based on 14))
Total energy cost for monitoring and controlling the radioactive waste (tailings) at uranium minesites for 10,000 years : 0.93 GJ per tonne of uranium oxide per year $\Rightarrow$ 3.7 million GJ per reactor per 10,000 years.(Calculated by the author, based on 17), 18), and 19))
< The Second Step > The calculation results for one reactor was converted into total 55 reactors in Japan (total capacity: 47,700,000 kW) ¹⁹⁾ . No addition to the existing nuclear power plants was assumed. The rate of 75.78 GJ/gha/year was used to compute the energy (CO ₂) land. This rate was calculated by the author, based on 6).

Table 4. Ecological Footprint of Operating 55 Japanese Nuclear Power Stations until Their Life Expectancy (Total Capacity: 47,700,000 kW)

EF of Japanese Nuclear Power Generation	5,420,000,000 gha/year
	(57 times as large as Japan's biocapacity)
Per Capita EF of Japanese Nuclear Power Generation	42.4 gha/capita/year
	(as large as 10 Tokyo Dome Stadiums)
Per capita repayment of EF in 50 years	0.9 gha/capita/year×50 years

8. 結論

- ① 欧米、特に英国などでエコロジカル・フットプリントの応用事例が急増している。英国内でEFを応用しようとする政治家、官僚、NGO、市民が増加している要因としては、教育者、ジャーナリストなどによる啓蒙活動の活発化、関連出版物やウェブサイト数の増加、欧州全体におけるEFの関心の高まりなどが指摘できる。
- ② EF計算を得意とするコンサルタントや研究者などの専門家集団が英国では育っている¹⁹⁾。ベスト・フット・フォーワード (BFF)、ストックホルム環境研究所ヨーク支所 (SEIY)、カーディフ大学ビジネス関係・説明責任・持続可能性・社会研究センター、ケンブリッジ・エコノメトリックスの活躍が特に重要である。
- ③ EFの削減目標を期限付きで『州持続可能性戦略』に取り入れた西オーストラリア州の取り組みは、世界初の試みとして評価できる。実現に向けた336の行動計画の多くが実行に移されている。課題はEF計測の手法の詳細について、未だ確定していないことである。
- ④ 原子力発電のEF計算には、超長期的に発生し続ける廃棄物管理コストと、管理をすり抜ける環境汚染コスト等を反映させる必要があることが示唆された。資源利用の超長期的コストを、事後継続的影響管理 (PIM) コストとしてEF計算に組み込んだ試算結果からは、原子力発電のPIMコストは莫大で、生態学的合理性の観点から考えると原子力発電を利用しないことが賢明という結論が導かれた。
- ⑤ 現在、スイス、フィンランド、日本政府などがEF計算を政府として行い、GDPと同じような位置付けを与えようとする動きがある。日本政府は、2006年4月閣議決定した第三次環境基本計画においてEF指標で日本の持続可能性をモニターしていく旨を述べている。この際も、PIM費用を計算に含めることが重要だと考えられる。
- ⑥ 事後継続的影響管理 (PIM) 費用、特に1万年を超える超長期的な管理費用は、EF以外の分析手法 (LCAなど) に充分取り入れられているとは言えない。PIMを考慮することにより分析手法は、世代間の公平性を担保する分析ツールとなり得るだろう。

謝辞

当該研究のために内外の多くの研究者の協力を得た。全ての御名前を記すことはかなわないが、特に、小出裕章、藤田祐幸、細川弘明、室田武の各氏 (順不同) には原子力開発の環境影響などについての貴重なアドバイスを頂いた。岸基史氏には現地調査で協力いただいた。なお、本研究は、地球環境研究総合推進費・研究課題番号 (H-9) 「物質フローモデルに基づく持続可能な生産・消費の達成度評価手法に関する研究」(H.16～H.18) の支援を得てまとめた成果の一部であることを付記する。

引用文献

- 1) Rees W. E. : Population and Environment, 17 (3), (1996), pp. 195-215.
- 2) Wackernagel M., Rees W. E. "Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth," New Society Publishers, Gabriola Island, B. C., Canada, (1996). (ワケナゲル, マティース, ウィリアム・リース著, 和田喜彦監訳・解題, 池田真里訳, 『エコロジカル・フットプリント: 地球環境持続のための実践プランニングツール』合同出版, 東京, (2004))
- 3) Daly H, "Beyond Growth: The Economics of Sustainable Development," (New edition) Beacon Press, Boston, (1996).
- 4) Wada Y, "The Myth of Sustainable Development: The Ecological Footprint of Japanese Consumption," Ph. D. Dissertation, The University of British Columbia, Vancouver, BC, Canada, (1999).
- 5) Pauly D., Christensen V.: Nature, 374, (1995), pp. 255-257. and references therein.
- 6) WWF, Global Footprint Network, et al., "Living Planet Report 2004," WWF International, Gland, Switzerland, (2004).
- 7) WWF, Global Footprint Network, et al., "Living Planet Report 2006," WWF International, Gland, Switzerland, (2006).
- 8) Wiedmann T., Barrett J. "Ecological Budget UK: Report No. 2: The Use of Input-Output Analysis in

- REAP to Allocate Ecological Footprints and Material Flows to Final Consumption Categories,”Stockholm Environment Institute-York, University of York, UK, (2005).
- 9) Collins A., Flynn A., Netherwood A., “Reducing Cardiff’s Ecological Footprint : A Resource Accounting Tool for Sustainable Consumption,” Cardiff Council, BRASS Research Centre, Cardiff University, WWF Cymru, Cardiff, (2005).
- 10) State Government of Western Australia, “Hope for the Future: The Western Australian State Sustainability Strategy,” Department of the Premier and Cabinet, Perth, (2003).
- 11) Wada Y., Kishi M., “Environmental and Social Impacts of Uranium Mining: A Case Study of Ranger and Jabiluka Minesites in Kakadu National Park, Australia,” Doshisha University Research Center of Social Common Capital Discussion Paper No. 14., Kyoto, (2006).
- 12) Wassen R. J., White I., Mackey B., Fleming M., “The Jabiluka Project: Issues that Threaten Kakadu National Park.” Submission to the UNESCO delegation World Heritage Committee Delegation to Australia (1998). (オンライン), 入手先 〈<http://www.deh.gov.au/ssd/uranium-mining/arr-mines/jabiluka/pubs/appn2ofmain.pdf>〉, (参照2006-10-20)
- 13) Authority of the Senate, “Official Committee Hansard: Senate Environment, Communications, Information Technology and the Arts References Committee held on Tuesday, October 1, 2002.” Senate, Commonwealth of Australia, Canberra (2002).
- 14) 室田武, “原子力の経済学”日本評論社, 東京 (1981)
- 15) 小出裕章, 『再処理』からの撤退を求める!“京都保健医新聞” 第2444・2445合併号付録② pp. 7-15, pp. 27-53. (2004年)
- 16) Energy Research and Development Administration (ERDA), United States. “A National Plan for Energy Research, Development & Demonstration: Creating Energy Choices for the Future,” Vol.1: The Plan. ERDA-76-1. Appendix B: Net Energy Analysis of Nuclear Power Production, Washington, D.C., (1976)
- 17) Energy Resources of Australia Ltd (ERA) “2004 Annual Report” Darwin, (2004)
- 18) 南齋規介, 森口祐一, 東野達, “産業連関表による環境負荷原単位データブック (3EID)” 国立環境研究所, 地球環境研究センター, つくば市 (2002)
- 19) World Nuclear Association (WNC) : “World Nuclear Reactors 2005-06 and Uranium Requirements,” (オンライン), 入手先 〈<http://www.world-nuclear.org/info/reactors.htm>〉, (参照2006-10-20)
- 20) Chambers N., C. Simmons, M. Wackernagel, “Sharing Nature’s Interest : Ecological Footprints as an Indicator of Sustainability,” Earthscan, London, (2000). (チェンバース, ニッキー, クレイグ・シモンズ, マティース・ワケナゲル著, 五頭美和訳 “エコロジカル・フットプリントの活用 : 地球1コ分の暮らしへ” 合同出版, 東京, (2005))