海洋肥沃化装置の包括的環境影響評価

正員 大 塚 耕 司* 正員 大 内 一 之**

Inclusive Environmental Impact Assessment for Ocean Nutrient Enhancer

by Koji Otsuka, *Member* Kazuyuki Ouchi, *Member*

Summary

Deep ocean water (DOW) is cold, nutrient-rich and pathogen-free seawater found at depths of several hundred meters or more. Artificial upwelling of DOW may significantly enhance marine primary production. The fisheries agency of Japanese government has undertaken an *in-situ* experiment of a prototype ocean nutrient enhancer, named TAKUMI, which is driven by a conventional diesel engine, in Sagami Bay. They have also designed a large-scale practical machine, which is driven by an ocean thermal energy conversion (OTEC) engine. In this paper, inclusive impact assessments of TAKUMI and the practical machine, which evaluate environmental and economical sustainability by an integrated evaluation indicator using ecological footprint and gross domestic product, were performed. The assessment results show that renewable energy sources should be employed to operate the system in order to realize sustainable artificial upwelling. The ecological footprint per unit biomass of fish production by the practical machine is much lower than that of land-based commercial meat productions, such as beef, pork and chicken.

1. 結 言

産業革命後世界人口は急激に増加し、2006年には65億人を超えた。2020年には80億人近くまで増加すると予測され、深刻な食糧不足が指摘されている。過去30年間世界の穀物生産は倍増してきたが、1996年以降は増えることなくおよそ年間2,100Mtにとどまっている。例えば、米国では1人あたりの年間穀物消費量が800kgであり、このレベルで消費するとすれば、現在の生産では25億人しか養うことができない。一方、アフリカでは1人あたりの年間穀物消費量は200kgであり、このレベルだと100億人を養うことができる。しかし、飢餓人口の集中しているアフリカの平均寿命は50歳と短いことから、このレベルでは我々は健康に暮らしていけるとは言いがたい¹⁾。

これまでの食糧生産の増加は淡水、化学肥料、そして化石燃料を大量に使うことで達成してきた。その結果、水資源の減少、乾燥地帯の増加、気候変動といった環境悪化がもたらされた。その上、近年は穀物中心の食生活から肉中心の食生活へ移行しており、肉の生産はより多くの穀物や水の消費を伴うことから環境への負荷がさらに大きくなっている。こう

したことから、食糧生産、特に動物性たんぱく質の生産を高めるための新しい持続可能な技術の開発が求められている。

その技術の1つとして海洋深層水を利用した海洋肥沃化が考えられている。海洋深層水は、数百m以深の層に存在する海水の総称で、低温、富栄養、清浄という特長を持っている。富栄養な海洋深層水を人工的に湧昇させることにより、海洋での食糧増産のための再生可能資源として活用できる²⁾。自然の湧昇域についての多くの研究結果³⁾からも、人工湧昇の有用性については推察できる。

(社)マリノフォーラム21は、実海域実験段階として海洋肥沃化装置「拓海」を相模湾で運用し、人工湧昇による外洋での食糧増産効果について調べている。この研究は、効率のよい水産動物性たんぱく質生産技術の開発が目的であるが、同時に海洋深層水という再生可能資源を用いた持続可能な食糧生産技術の開発も目的としていることから、この技術が社会的に受け入れられるか否かの判断には、持続可能性の観点からの評価が必要である。

本研究では、環境面での持続可能性指標として開発されているEcological Footprint、さらにEcological Footprintと環境リスク評価を統合した指標として現在研究開発中のInclusive Impact Index (Triple I) の考え方を基礎として、「拓海」ならびにコンセプト設計段階である実用規模の海洋肥沃化装置の持続可能性について評価することを目的とする。

* 大阪府立大学大学院工学研究科

** (株)大内海洋コンサルタント

2. 海洋肥沃化装置

海洋肥沃化装置は、水産庁の補助を受けて（社）マリノフォーラム 21 によって技術開発が行われている人工湧昇装置で、Fig. 1 に示すように、スパー型浮体に内蔵されたダブルインペラによって、海洋深層水と表層水の両方を取り出し、混合、密度調整した上で、有光層に 360 度全周方向に放流、拡散、滞留させることができる。これにより、海洋深層水が持つ富栄養性でその海域の一次生産力が増大し、食物連鎖により周辺に新しい漁場が形成されることになる⁴⁾。

Fig. 1 Conceptual image of ocean nutrient enhancer.

Table. 1 Principal particulars of TAKUMI and practical machine.

	TAKUMI	Practical machine
Height of floating structure (m)	32.0	52.0
Width of floating structure (m)	16.8	40.0
Length of floating structure (m)	175	800
Inner diameter of riser pipe (m)	1.0	3.2
DOW* intake capacity ($\text{m}^3 \text{d}^{-1}$)	0.1×10^6	1.0×10^6
DOW* intake depth (m)	200	850
SOW** intake capacity ($\text{m}^3 \text{d}^{-1}$)	0.2×10^6	2.0×10^6
SOW** intake depth (m)	5	5

*Deep Ocean Water, **Surface Ocean Water

Table. 1 に、実海域実験機「拓海」とコンセプト設計段階である実用規模の海洋肥沃化装置（以下実用機とする）の主要目を示す。拓海は、直径 1m のライザー管で、深度 200m から日量 $0.1 \times 10^6 \text{m}^3$ の海洋深層水を取り出すことができる。これに対し、実用機は直径 3.2m のライザー管で深度 850m から日量 $1.0 \times 10^6 \text{m}^3$ の海洋深層水を取り出す設計となっている。また、拓海は水中モーターの動力源がディーゼル発電であるのに対し、実用機では海洋温度差発電（Ocean Thermal Energy Conversion、OTEC）を使用することが想定されている。なお拓海は、2003 年 5 月、相模湾平塚南方沖 25km の水深 1,000m の海域に一点係留方式で設置され、現在まで、数個の大型台風が通過したにも関わらず、大きなダメージもなく係留されている。

3. 包括的環境影響評価指標

3.1 Ecological Footprint

Ecological Footprint (EF) は、1990 年代に British Columbia 大学の William Rees 教授と当時博士課程に在籍していた Martis Wackernagel 博士らによって開発された。EF は、経済活動による資源やエネルギーの消費、廃棄物の処理などに必要となる生態系の生産（処理）能力を、生物生産力のある土地（耕作地、牧草地、森林、生産力のある水域、生産力阻害地に区分される）の面積として換算した値で表される。これらの土地区分ごとに単位面積当たりの生産力が異なるため、土地面積を合計する際には、Table. 2 に示すような等価係数（Equivalence Factor）を掛けることによって世界平均の生物生産力を基準にした値に標準化する必要がある。この標準化した土地面積の単位には global hectares (gha) が用いられる。実際の地球上に存在する土地や水域の生産（処理）力も同じ等価係数を用いて標準化した土地面積として表すことができ、その値は Biocapacity (BC) と呼ばれる。

EF の計算には 2 つの方法がある。1 つは Compound 法と呼ばれる手法で、各国の EF 消費や BC 存在量を計算する際に用いられる。Compound 法では、各国の生物資源消費を国内生産量、輸入量、輸出量などの統計データから計算する。また、エネルギー消費については、国内エネルギー生産に輸入品に内在する消費エネルギーを加えることによって計算する。もう 1 つは Component 法と呼ばれる方法で、個々の生産活動や経済活動による EF 消費を計算する際に用いられる。個々の生産活動による EF 消費の大部分は CO_2 排出に伴う森林の消費（排出した CO_2 を全て吸収するだけの森林面積が必要と考える）で換算されるため、従来から行われている CO_2 排出量を指標とする Life Cycle Assessment (LCA) の手法が応用できる。

Table. 2 Equivalence factors for ecological footprint accounting.⁵⁾

Area type	Equivalence factor (gha/ha)
Cropland	2.10
Pasture	0.48
Forest (Energy land)	1.37
Productive sea area	0.36
Built-up area	2.19

EF は人間活動によってどれだけ生産力のある土地が消費されたかを計算する指標であるので、実際の地球の生産（処理）可能容量である BC と比較すれば、人類の持続可能性を測る物差しとして用いることができる。世界最大の自然保護団体 WWF（World Wide Fund for Nature、世界自然保護基金）では、隔年で発行している「生きている地球レポート（Living Planet Report）」⁶⁾の中で、人類全体の EF と BC の比の経年変化を紹介している。Fig. 2 を見ると、人間活動による生態系の消費は、1980 年代に持続可能な経済活動の限界である地球 1 個分を超え、現在は約 1.3 個分となっていることがわかる。

このように、 EF は土地面積という非常に単純でわかりやすい指標となっているため、ヨーロッパ連合（EU）をはじめ、多くの国・自治体で現在急速に普及しつつある。しかしながら、 EF は基本的に現時点での統計データを基礎として計算されるため、将来的な価値や寿命、技術革新などが反映されていないという批判もあり、意思（政策）決定に用いる際には、長期的な観点からの比較評価をどう取り入れるかが課題となっている。

Fig. 2 Ratio of humanity's ecological footprint to global biocapacity.⁶⁾

3.2 環境リスク

環境リスクによる評価手法は 1990 年代に東京大学の中西準子教授（現（独）産業技術総合研究所化学物質リスク研究センター長）により提案されたもので、地球温暖化や化学物質の人体への影響といった広域的で長期的な環境影響問題を評価するのに有効な手段とされている。この手法では、環境影響として現在および未来の経済損失・人の健康への影響・生態系への影響が、資源消費として現在および未来のコストが、ベネフィットとして現在および未来の利益が、それぞれ環境影響評価の際考慮すべき項目として挙げられている。これらは、コスト（ C ）、人の健康リスク（ HR ）、生態リスク（ ER ）に集約され、最終的にベネフィット（ B ）とリスクの比（ $\angle B / \angle R$ = 見返りとしてもたらされるベネフィット／受忍するリスクの大きさ）で評価される。

3.3 Inclusive Impact Index (Triple I)

EF は単純で分かりやすい指標であるため近年、世界中の多くの国で普及しつつある。しかし、 EF は現時点でのデータを元に計算されるため、将来もたらされる価値などを評価に含めることができないという欠点がある。一方、環境リスクは将来を含めた長期的な環境評価をすることができるので、 EF にその考えをうまく取り入れると、より正確な評価ができる指標になる可能性がある。

日本船舶海洋工学会、海洋の大規模利用に対する包括的環境影響評価研究委員会（通称：IMPACT 研究委員会）は、Inclusive Impact Index (Triple I) という包括的環境影響評価指標を提案している。リスクを含めた将来的な生態系の価値を生物生産量の価値として考えれば、 EF として換算することが可能となる。すなわち ER を EF に統合するという考え方である。一方環境リスク論において HR は C に統合される。したがって、 ER と統合した EF と HR を統合した C の換算が可能であれば、包括的指標を作ることができる。そこで Triple I (III) の計算では、次式のように、対象となる海洋利用技術の適用が想定される国あるいは地域の EF と GDP の比 EF_{region}/GDP_{region} （ただし、二酸化炭素海洋隔離など外洋を対象とする技術については世界の総 EF と総 GDP の比 $\Sigma EF_{region}/\Sigma GDP_{region}$ を用いる）が換算係数として導入された⁷⁾。

$$III = [(EF - BC) + \alpha ER] + \frac{EF_{region}}{GDP_{region}} [\beta HR + (C - B)] \quad (1)$$

ここで、 α は ER の EF への換算係数、 β は HR の C への換算係数である。なお、環境リスク論では HR は人間の健康へのリスク（Health Risk）として扱われているが、Triple I では、

災害による経済損失などの社会リスクも含めた人間リスク (Human Risk) として扱っている。

4. 海洋肥沃化装置の評価方法

4.1 評価項目

本研究では、(1)式で示した Triple I の各項のうち、計算方法がまだ確立されておらず、基礎となるデータベースについても研究開発段階である ER と HR は取り扱わないこととした。また漁獲によるコスト (C) とベネフィット (B) についても、燃料価格や漁獲効率、流通段階での需給バランスなど不安定な要素が大きく、長期の予測が難しいことから取り扱わないこととし、経済性評価については海洋肥沃化装置のコスト (C) のみ取り扱うこととした。なおこれらの評価を統合する換算係数については、対象となる装置が国内での運用を想定していることから、日本の EF と GDP の比 (EF_{JP}/GDP_{JP}) を用いることとした。結局、本研究で用いた簡易型の包括的環境影響評価式 (III_{light}) は次式で表される。

$$III_{light} = (EF - BC) + \frac{EF_{JP}}{GDP_{JP}} C \quad (2)$$

4.2 Ecological Footprint の計算方法

海洋肥沃化装置の EF 計算方法は、富士⁸⁾、Otsuka⁹⁾の方法に従い、海洋肥沃化装置の素材製造から、建造(設置を含む)、運用管理、廃棄にいたる Life Cycle の CO_2 排出量を積み上げ法によって計算し、推定された総 CO_2 排出量を機器の稼動期間内に全て吸収するために必要な森林面積に換算した。また、漁獲段階での EF については、小型巻網漁船の燃料消費に伴う CO_2 排出量を考え、上記と同様の方法で算出した。ここで、年間に単位 CO_2 を吸収する森林面積が $A_{forest} = 0.19 \text{ ha t-CO}_2^{-1} \text{ y}$ 、森林地の等価係数が $f_{forest} = 1.37 \text{ gha ha}^{-1}$ で与えられるので¹⁰⁾、機器の稼動年数を n (y) とすれば、次式で EF (gha) が計算できる。

$$EF = f_{forest} A_{forest} \left(\frac{E_{RM} + E_B + E_S}{n} + E_{O\&M} + E_F \right) \quad (3)$$

ただし E_{RM} (t-CO_2)、 E_B (t-CO_2)、 E_S (t-CO_2)、 $E_{O\&M}$ ($\text{t-CO}_2 \text{ y}^{-1}$)、 E_F ($\text{t-CO}_2 \text{ y}^{-1}$) は、それぞれ素材製造、建造(設置を含む)、廃棄、運用管理、漁獲の各段階における CO_2 排出量である。

以下、それぞれの段階における CO_2 排出量の計算方法について詳細を述べる。

4.2.1 素材生産

海洋肥沃化装置は、スパー型の浮体と、1点係留システム、ライザー管から構成されている。それぞれに使用された(実用機の場合は想定)素材の生産過程で排出される CO_2 排出量 E_{RM} (t-CO_2) は次式で表される。

$$E_{RM} = \sum w_i e_i \quad (4)$$

ただし、 w_i (t) および e_i ($\text{t-CO}_2 \text{ t}^{-1}$) は、それぞれ各素材の重量および Table. 3 で示される CO_2 排出量原単位である。

Table. 3 CO_2 emissions per unit of material production.¹¹⁾

Material	CO_2 emission rate
Steel ($\text{t-CO}_2 \text{ t}^{-1}$)	1.2
Concrete ($\text{t-CO}_2 \text{ t}^{-1}$)	0.75
Plastic ($\text{t-CO}_2 \text{ t}^{-1}$)	4.0
Copper ($\text{t-CO}_2 \text{ t}^{-1}$)	1.0
Zinc ($\text{t-CO}_2 \text{ t}^{-1}$)	2.9
Titan ($\text{t-CO}_2 \text{ t}^{-1}$)	9.4
Fuel oil A ($\text{t-CO}_2 \text{ kl}^{-1}$)	3.0
Gas oil ($\text{t-CO}_2 \text{ kl}^{-1}$)	3.0

4.2.2 建造および廃棄

建造および廃棄の際に排出される CO_2 量 E_B (t-CO_2)、 E_S (t-CO_2) は、船舶の LCA で用いられる手法に従い、素材生産による CO_2 排出量に対する割合から次式で求めた¹²⁾。

$$E_B = r_B E_{RM} \quad (5)$$

$$E_S = r_S E_{RM} \quad (6)$$

ただし、 $r_B = 0.343$ 、 $r_S = 0.093$ はそれぞれ建造および廃棄に関する素材生産による CO_2 排出量に対する割合である。

4.2.3 運用管理

運用管理に伴う燃料消費 q_i (kl y^{-1}) については、拓海の場合は実績値を用いた。また実用機の場合は、OTEC を想定しているため運用に関する燃料消費をゼロとし、管理に関する燃料消費(定期点検時の船舶運用)を年間稼働日数に合わせて拓海の実績値の2倍とした。A 重油ならびに軽油の CO_2 排出原単位 e_{oi} ($\text{t-CO}_2 \text{ kl}^{-1}$) については Table. 3 が使えるので、次式で運用管理に伴う CO_2 排出量 $E_{O\&M}$ ($\text{t-CO}_2 \text{ y}^{-1}$) が求められる。

$$E_{O\&M} = \sum q_i e_{oi} \quad (7)$$

4.2.4 漁獲

耕地など生産力のある土地が造成された場合には、その土地で生産される穀物などが全て収穫（土地から除去）されたとしても、それは資源として利用される（その生産量だけ EF 消費を賄うことができる）ので BC の減少とはみなさず、土地の造成時および収穫時に必要な資源やエネルギーの消費のみを EF 消費として評価する。ここでも、漁獲によって海域から除去される魚は資源として利用されるため BC の減少とはみなさず、漁獲に伴う CO_2 排出量のみを以下の方法で EF 消費として評価した。

桜井ら^{13), 14)}は、小型巻網漁等に用いられる FRP 漁船の CO_2 排出に関するインベントリ解析を行っている。ここでは、拓海の年間稼働日数を密度成層が形成される夏場の 180 日間としたので、年間の燃料（A 重油）消費量を文献値の半分程度（20kl）と仮定して CO_2 排出量 E_F ($t-CO_2 y^{-1}$) を算出した。また実用機については、年間を通じて稼働（360 日間）するとし、後述のように魚類生産量が拓海の 40 倍になると推定されること、漁場の離岸距離が拓海の場合より遠くなることを考慮し、拓海の 80 倍（年間 1,600kl）の A 重油を消費すると仮定して CO_2 排出量を算出した。

4.3 Biocapacity の計算方法

人工湧昇による一次生産量の向上は、生産力の高い水域である湧昇域の創出を意味しており、 BC を増加させることになる。年間の深層水取水量を Q_{DOW} ($m^3 y^{-1}$)、深層水中の DIN（溶存無機態窒素、Dissolved Inorganic Nitrogen）濃度を N_{DOW} (μM)、植物プランクトンの C/N 比 α_{CN} を Redfield 比の 106/16 と仮定すると、炭素換算での年間一次生産量 P_P ($t-C y^{-1}$) は次式で表される。

$$P_P = \alpha_{CN} M_C N_{DOW} Q_{DOW} \times 10^{-9} \quad (8)$$

ここで、 $M_C = 12 g mol^{-1}$ は炭素の原子量である。

Table. 4 に示すように、Ryther³⁾によれば、湧昇域の平均的栄養段階数 TL_U は 1.5、生態効率 k_U は 0.2 である。海洋肥沃化装置は人工湧昇発生装置であるので、この栄養段階数と生態効率が適用できると考え、海洋肥沃化装置による年間の魚類生産量 P_F ($t-C y^{-1}$) を次式で求めた。

$$P_F = P_P k_U^{TL_U} \quad (9)$$

生産力のある水域（沿岸域と湧昇域から構成される）における平均的な年間魚類生産量 $Y_{F0} = 0.73 t-C km^{-2} y^{-1}$ (Table. 4 参照) は、沿岸域と湧昇域での魚類生産量の和を沿岸域と湧昇域の面積の和で割ることによって求められる。この値で

P_F を割れば、海洋肥沃化装置によって創出される生産性のある海域面積が km^2 の単位で得られるので、この値を ha 単位に換算して等価係数 $f_{sea} = 0.36 gha ha^{-1}$ を掛ければ Biocapacity、 BC (gha) が次式のように求められる。

$$BC = f_{sea} \frac{P_F}{Y_{F0}} \times 10^2 \quad (10)$$

Table. 4 Marine production efficiencies for coastal, upwelling and productive sea areas³⁾.

	Coastal area	Upwelling area	Productive sea area*
Area (Mkm^2)	26.6	0.4	27.0
Primary production ($t-C km^{-2} y^{-1}$)	100	300	103
Trophic level	3.0	1.5	—
Ecological efficiency	0.15	0.20	—
Fish production ($t-C km^{-2} y^{-1}$)	0.34	26.8	0.73

*Average of coastal and upwelling sea areas

4.4 Cost の計算方法

海洋肥沃化装置の C については、 EF と同様、まず建造、設置、運用管理、廃棄の各段階でのコストを積算し、このうち建造、設置、廃棄のコストを単純に稼働年数で割ることによって年間消費コストを求めた。なお拓海の場合は実績値を、実用機の場合は（社）マリノフォーラム 21¹⁵⁾で検討された推定値を用いた。

5. 海洋肥沃化装置の評価結果

5.1 Ecological Footprint の計算結果

Table. 5、6 に、海洋肥沃化装置の素材生産ならびに建造・廃棄段階での CO_2 排出量と EF の計算結果をそれぞれ示す。なお、素材生産ならびに建造・廃棄段階で排出された CO_2 は稼働全期間内に森林に吸収されるとみなすので、 EF は稼働年数 n で割った値として示している。

実用機の深層水汲み上げ量は拓海の 10 倍であるが、取水深度が深いことから、素材重量は浮体が約 20 倍、ライザー管が約 30 倍となっている。また実用機についてはチタン製熱交換プレートの使用が考慮されている。なお実用機の係留系については詳細検討が行われていないため、ここでは単純に拓海の係留系素材重量の 10 倍とした。建造および廃棄段階での CO_2 排出量と EF は、前述のように素材重量段階での値に対する割合を掛けて求めている。

Table. 7 に、海洋肥沃化装置の運用管理段階での CO₂ 排出量と *EF* の計算結果を示す。拓海はディーゼル発電で運転されているため運用段階での CO₂ 排出量が非常に多い。これに対して実用機は OTEC を用いて運転されているため、素材生産や建造・廃棄段階での CO₂ 排出量に比べると無視できるほど小さい。

Table. 5 Estimated CO₂ emissions and ecological footprints of TAKUMI and practical machine for material productions.

	Material	Weight (t)	CO ₂ Emission (t-CO ₂)	Ecological Footprint (gha)
TAKUMI				
Floating Structure	Steel	421	505	132/ <i>n</i>
	Concrete	621	466	121/ <i>n</i>
	Plastic	4	16	4/ <i>n</i>
	Copper	1	1	0
	Zinc	2	6	2/ <i>n</i>
Mooring System	Steel	81	97	25/ <i>n</i>
	Concrete	140	105	27/ <i>n</i>
Riser pipe	Steel	123	148	38/ <i>n</i>
Total			1,344	350/ <i>n</i>
Practical machine				
Floating Structure	Steel	8,200	9,840	2,561/ <i>n</i>
	Concrete	5,710	4,283	1,115/ <i>n</i>
	Titan	17	160	42/ <i>n</i>
Mooring System	Steel	810	972	253/ <i>n</i>
	Concrete	1,400	1,050	273/ <i>n</i>
Riser pipe	Steel	3,110	3,732	971/ <i>n</i>
Total			20,036	5,215/ <i>n</i>

Table. 6 Estimated CO₂ emissions and ecological footprints of TAKUMI and practical machine for building and scrap.

	CO ₂ emission rate to raw material production	CO ₂ Emission (t-CO ₂)	Ecological Footprint (gha)
TAKUMI			
Building	0.343	461	120/ <i>n</i>
Scrap	0.093	125	33/ <i>n</i>
Practical machine			
Building	0.343	6,872	1,789/ <i>n</i>
Scrap	0.093	1,863	485/ <i>n</i>

Table. 7 Estimated CO₂ emissions and ecological footprints of TAKUMI and practical machine for operation and maintenance.

	Fuel	Con-sumption (kl y ⁻¹)	CO ₂ Emission (t-CO ₂ y ⁻¹)	Ecological Footprint (gha)
TAKUMI				
Operation	Fuel oil A	131.4	392	102
Maintenance	Fuel oil A	0.8	2	1
	Gas oil	1.8	5	1
Total			399	104
Practical machine				
Operation	Fuel oil A	0	0	0
Maintenance	Fuel oil A	1.6	5	1
	Gas oil	3.6	11	3
Total			16	4

Table. 8 Estimated CO₂ emissions and ecological footprints of TAKUMI and practical machine for fishing.

	Fuel oil A consumption (kl y ⁻¹)	CO ₂ Emission (t-CO ₂ y ⁻¹)	Ecological Footprint (gha)
TAKUMI	20	60	16
Practical machine	1,600	4,767	1,241

Table. 8 に、漁獲段階での CO₂ 排出量と *EF* の計算結果を示す。漁獲による燃料消費に伴う *EF* は、ディーゼル発電を用いて運転するものの漁獲量が少ない拓海の場合は相対的に値が小さいが、OTEC を用いて運転し漁獲量が多くなる実用機の場合は相対的に大きな値となる。これらの結果は、再生可能エネルギーの導入により大きな *EF* 削減効果が得られるものの、より *EF* 値の小さい海洋肥沃化を実現するためには、漁獲段階での燃料消費を抑える必要があることを示している。

5.2 Biocapacity の計算結果

Table. 9 に、海洋肥沃化装置によって生産される年間の魚類生産量と *BC* 増加量の計算結果を示す。実用機の深層水汲み上げ量は拓海の 10 倍であり、かつ取水深度が深いため深層水中の DIN 濃度が 2 倍となっている。さらに年間の稼働日数が拓海の 180 日の 2 倍の 360 日と想定していることから、結局実用機の魚類生産量は拓海の 40 倍となる。*BC* 増加量の値は、拓海が 126gha で漁獲も含めた運用段階での *EF* と同程度であるのに対し、実用機は約 5,000gha で運用段階での *EF* よりはるかに大きい値となっている。

Table. 9 Estimated fish production and increase of biocapacity of TAKUMI and practical machine.

	TAKUMI	Practical machine
Intake capacity of DOW (t d ⁻¹)	100,000	1,000,000
Number of work days (d y ⁻¹)	180	360
DIN concentration of DOW (μM)	20	40
Primary production (t-C y ⁻¹)	28.6	1,145
Fish production (t-C y ⁻¹)	2.6	102
Fish production (t-wet y ⁻¹)	38	1,536
Increase of biocapacity (gha)	126	5,049

Fig. 3 Life cycle dependence of $(EF-BC)$ with and without fishing for TAKUMI. Fig. 4 Life cycle dependence of $(EF-BC)$ with and without fishing for practical machine.

海洋肥沃化装置の環境面での持続可能性を評価するため、 EF 消費量から BC 増加量を差し引いた値を稼動年数で整理した。拓海および実用機の計算結果を、Fig. 3、4 にそれぞれ示す。なお、漁獲による EF 消費については、漁船のエンジンのタイプや漁獲方法、漁獲対象魚の行動範囲など多くの不確定要素によって値が大きく変化すること、また将来的にはバイオ燃料や他の再生可能エネルギーの漁船への導入もありえることなどから、ここでは漁獲による EF 消費を考慮しない場合の評価結果も合わせて示すこととした。

Fig. 3 に示した拓海の場合、稼動年数を 20 年としても $EF-BC$ が負の値 (BC 増加が EF 消費を上回る値) となることはない。この結果は、拓海が環境面で持続可能ではない装置であることを示している。

一方 Fig. 4 に示した実用機の場合、漁獲を考慮しない場合で稼動年数 2 年以上、漁獲を考慮した場合でも 3 年以上で $EF-BC$ が負の値となるので、十分持続可能な装置であると評価できる。このような大きな評価の違いは、大型化、大水深化によって年間の魚類生産量 (BC 増加量) を大幅に増やし、かつ OTEC を導入したことにより運用段階での EF 消費をゼロに押さえたことに主要因がある。

仮に稼動年数を 20 年とし、漁獲を考慮した場合の EF を計算すると、拓海の場合 145gha、実用機の場合 1,620gha となる。この値を年間の魚類生産量で割ることにより、単位湿重量あたりの魚類生産に必要な EF を求めた。Table. 9 は、拓海および実用機により生産された魚の値と、陸上で生産される他の肉類の単位湿重量あたりに必要な EF とを比較したものである。これを見ると、牛肉の生産に必要な EF は非常に大きく、鶏肉の生産に必要な EF は比較的小さいことがわかる。これは、大型の動物を生産させるためには、単位重量あたりに換算してもより多くの水や穀類を必要とするからである。今回の計算結果では、拓海による魚類生産は、小規模な実証実験機であるにもかかわらず、鶏肉とほぼ同じ値となっている。さらに実用機による魚類生産は鶏肉や拓海による魚肉生産の約 30% であることから、海洋肥沃化装置による動物性タンパク質の生産効率は陸上での生産に比べて EF の抑制という面では非常に良いといえる。

Table. 9 Ecological Footprints of Various animal protein productions.

	Ecological footprint per unit biomass (gha t-wet ⁻¹)
Chicken ¹⁰⁾	3.8
Pork ¹⁰⁾	5.7
Beef (grain breeding) ¹⁰⁾	13.2
Beef (pasturage) ¹⁰⁾	15.6
Fish (TAKUMI)	3.77
Fish (practical machine)	1.05

5.3 Cost の計算結果および評価の統合

Table. 10 に、拓海と実用機の各経費の見積額、ならびに稼働年数を20年としたときの総額を示す。総額は、拓海の場合578 M¥ (5.78 億円)、実用機の場合8,870 M¥ (88.7 億円) となった。一般的なスケールメリットから考えると、深層水汲み上げ規模が拓海の10倍となる実用機は、経費が拓海の10倍より低くなるのが通常であるが、実用機は海洋温度差発電を動力源として使用すること、深層水取水深度が拓海の4倍以上であること、拓海が年間180日の稼働に対して実用機が年間360日の稼働を想定していることなどから、コストは約15倍となっている。

Living Planet Report 2006⁶⁾によると、2003年の日本のEFは562Mghaである。同じ2003年の日本のGDPが517 T¥ y⁻¹ (517 兆円/年) であるので、 EF_{JP}/GDP_{JP} は $1.09 \times 10^{-6} \text{gha } ¥^{-1} \text{y}$ となる。ちなみに、世界平均である $\Sigma EF_{region}/\Sigma GDP_{region}$ は、2003年ベースで $3.22 \times 10^{-6} \text{gha } ¥^{-1} \text{y}$ である。このことは、日本は世界平均に対して1/3程度のEFの消費で同じだけの経済生産活動を行っていることを示している。

稼働年数を20年とし、簡単のために金利を考慮せず建造・設置・廃棄コストを20年で均等に支払うとすると、2003年ベースで拓海の $(EF_{JP}/GDP_{JP})C$ は約31ghaとなり、 $(EF-BC)$ の値とほぼ同じ桁での比較が可能であることがわかる。このことは、拓海のような海洋肥沃化装置の包括的環境影響評価を行う際に、*Triple I* が有効な手段となり得ることを示唆している。なお(2)式で示した III_{light} の値は50ghaとなり、正の値であることから拓海は持続可能ではない装置と評価される。一方実用機の $(EF_{JP}/GDP_{JP})C$ は約482ghaで、 III_{light} の値は-2,948ghaとなり、負の値であることから実用機はコストを考慮しても持続可能な装置と評価される。

Table. 10 Estimated costs of TAKUMI and practical machine for each process.

Process	TAKUMI	Practical machine
Building (M¥)	350	6,520
Installation (M¥)	90	600
Scrap (M¥)	40	750
O&M* (M¥ y ⁻¹)	5	50
Total for 20 years (M¥)	578	8,870

*Operation and maintenance

6. 結 言

本研究では、包括的環境影響評価指標として研究開発中の Inclusive Impact Index (Triple I) の考え方を基礎として、海洋肥沃化装置の実証実験機「拓海」およびコンセプト設計段階である実用機の包括的環境影響について評価を試みた。その結果、拓海は小規模でかつディーゼル発電を動力としていることから、持続可能な装置ではないと評価され、実用機は大規模で海洋温度差発電を動力としていることから、経済面を考慮しても持続可能な装置であると評価された。また海洋肥沃化装置による魚類生産は、陸上の肉類生産に比べるとEF消費の少ない効率的な生産活動であることがわかった。

謝 辞

本研究は(社)マリノフォーラム21の研究プロジェクト「海洋肥沃化システム技術確立事業」の一環として行ったものであることを付記し、推進委員会委員長である高橋正征高知大学教授をはじめ関係各位に謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) (社)日本船舶海洋工学会：海洋資源－7つの不思議と11の挑戦－，海事プレス社，2007。
- 2) 藤田大介，高橋正征：海洋深層水利用学－基礎から応用・実践まで－，成山堂書店，2006。
- 3) J. Ryther : Photosynthesis and Fish Production in the Sea, Science, Vol.166, 1969, pp.72-76.
- 4) K. Ouchi, K. Otsuka and H. Omura : Recent Advances of Ocean Nutrient Enhancer “TAKUMI” project, Proc. of 6th ISOPE Ocean Mining Symposium, 2005, pp.7-12.
- 5) M. Wackernagel, C. Monfreda, D. Moran, S. Goldfinger, D. Deumling, and M. Murray : National Footprint and Biocapacity Accounts 2004: The underlying calculation

method, *Report of Global Footprint Network*, Oakland, 2004.

- 6) WWF (World Wide Fund For Nature) : Living Planet Report 2006, WWF International, 2006.
 - 7) (社)日本船舶海洋工学会海洋の大規模利用に対する包括的環境影響評価研究委員会:海洋の大規模利用に対する環境影響評価, 2008.3.
 - 8) 富士雄介:海洋肥沃化実験装置のエコロジカル・フットプリントによる評価, 平成 17 年度大阪府立大学工学部海洋システム工学科卒業論文, 2006.
 - 9) K. Otsuka : Ecological Footprint Accounting of TAKUMI, Proc. of 7th ISOPE Ocean Mining Symposium, 2007, pp.33-38.
 - 10) ニッキー・チェンバース, クレイグ・シモンズ, マティース・ワケナゲル:エコロジカル・フットプリントの活用ー地球1コ分の暮らしへ, 合同出版, 2005.
 - 11) 環境情報科学センター:ライフサイクル評価 CO₂ 排出原単位 2007 年版, http://www.lifecycle.jp/manual/CO2_unit_2007.pdf
 - 12) 大塚耕司, 松本吉倫:海洋深層水大規模取水ー分配システムのフィージビリティスタディ(第2報)ーCO₂ 排出量を指標とした LCAー, 海洋深層水研究, Vol.4, No.1, 2003, pp.19-27.
 - 13) 櫻井昭男, 亀山道弘, 林慎也, 千田哲也, 木原洸, 久津見都, 深町得三, 大熊正造, 田子廣政, 岡田一成, 本多貴寿, 蒲谷勝治:FRP 漁船の製造・運航時のインベントリ分析, 船舶技術研究所第 74 回研究発表会, 2000, pp.329-334.
 - 14) 櫻井昭男, 亀山道弘, 久津見都, 木原洸:FRP 漁船の廃船処理時のインベントリ分析, 平成 14 年度(第2回)独立行政法人海上技術安全研究所研究発表会, 2002, pp.185-188.
 - 15) (社)マリノフォーラム 21:平成 19 年度海洋肥沃化システム技術確立事業に関する報告書, 2008.
-