

ライフサイクルCO₂排出量による 地中熱利用事業及び小水力発電事業の評価

岡田 浩一^{1*}・山崎 智雄¹・鶴田 祥一郎²・中野 勝行²・
金岩 貢³・平野 彰秀⁴・岡村 鉄兵⁵

¹株式会社エックス都市研究所 サステナビリティ・デザイン事業本部

(〒171-0052 東京都豊島区高田2-17-22目白中野ビル6F)

²一般社団法人産業環境管理協会 LCA事業推進センター

(〒101-0044 東京都千代田区鍛冶町2-2-1三井住友銀行神田駅前ビル)

³株式会社カナイワ 省エネ・環境部 (〒924-0028 石川県白山市相川新町728)

⁴特定非営利活動法人地域再生機構 (〒501-5231 岐阜県郡上市白鳥町石徹白65-18)

⁵名古屋大学大学院環境学研究科地球環境科学専攻 (〒464-8601 名古屋市千種区不老町D2-1(510))

* E-mail: okada@exri.co.jp

再生可能エネルギーの評価に当たっては、ライフサイクル全体のCO₂排出量を評価するライフサイクルアセスメント(LCA)を導入することが重要である。本研究では、平成24年度環境省業務の一環として、1. 民間病院における地中熱利用空調・給湯事業、2. 農業用水を用いた小水力発電事業を対象に、LCAケーススタディを実施した。対象プロセス及びオリジナルプロセスについてインベントリ分析を行い、CO₂排出削減率を算出した結果、上記1. で78%、上記2. で62%となった。これらから、算出結果に影響を及ぼす要素として、(1) 地中熱利用事業については使用段階の電力消費に関する活動量・原単位データ等、(2) 小水力発電事業については水車の設置工事費用、設備の想定使用期間等の影響が大きい可能性が示唆された。

Key Words : Life Cycle Assessment(LCA), renewable energy, Geothermal Heat Pump Systems, small hydroelectric generation

1. はじめに

再生可能エネルギーの導入によるCO₂排出量の削減については、導入された再生可能エネルギーの使用時でCO₂を排出しないとみなせる時のみに着目するのではなく、ライフサイクル全体を考慮した排出量及び削減量を評価するライフサイクルアセスメント(LCA)を導入することが重要である。このような考え方が、欧州を中心に世界的にも広まりつつある。

しかし、地中熱利用事業や小水力発電事業のLCAに関しては、既往事例が少ない上、特に地中熱利用事業については住宅用の地中熱ヒートポンプに偏っている(Sanerら(2010)¹⁾、岩岡ら(2008)²⁾、阿部ら(2008)³⁾等)といった問題があり、CO₂排出削減の大きさや評価結果に影響を及ぼす要素、事業者が判断に迷いやすい点等が明らかになっていない。

そのため本研究は、(a) 民間病院における地中熱利用空調・給湯事業及び(b) 農業用水を用いた小水力発電事業を対象に、ライフサイクルを通じたCO₂排出削減効果の検証を行い、評価結果への影響因子等を分析することを目的として実施した。

なお、本研究は、環境省「平成24年度再生可能エネルギー二酸化炭素削減効果検証等業務」⁴⁾の一環として実施したものである。

2. 民間病院における地中熱利用空調・給湯事業に関するLCAケーススタディの実施

(1) 対象事業の概要

本事業は、空調及び給湯設備について、外気温と地中の温度差が大きいことを利用し、熱容量の大きな地下水や地盤と熱をやりとりする地中熱ヒートポンプを導入す

ることにより、効率的なエネルギー利用を図ったものである。本事業の主要諸元を表-1に示す。

(2) 機能単位等の設定

本事業に係る機能単位（製品のCO₂排出量を表す基準となる単位）は、「石川県金沢市の病院用途での1年間の空調・給湯利用（面積2,790m²）」とした。また、プロセスフローとシステム境界は、以下のように設定した。

a) 対象プロセスのプロセスフロー

対象プロセスのプロセスフローを図-1に示す。

システム境界（算定の対象範囲）には、カーボンフットプリント制度における商品種別算定基準（PCR）⁵⁾等、LCAに関する類似基準を参考に、「原料調達段階」～「処分段階」のすべての工程を含めることとした。

ただし、設備建設工程に必要な機材（ドリル機械、井戸水汲み上げポンプ等）については、当該システムの建設以外の用途でも用いられ、その製造工程のCO₂排出量に対する当該システムの寄与は無視できるレベルと考えられるため、本事例では輸送工程のみシステム境界内と

表-1 民間病院における地中熱利用空調・給湯事業の主要諸元

実施場所	石川県金沢市
事業の目的及び概要	エネルギー消費量の低減及び環境負荷の低減を図ることを目的として、空調及び給湯設備について、従来のA重油ボイラから地中熱ヒートポンプ（単体利用、オープンループ）へ置き換え
導入設備	井水熱源式高効率ヒートポンプ 75HP、熱源水ポンプ×2、給湯槽昇温ポンプ×2、冷温水ポンプ×1、熱源井戸ポンプ×1、給湯加圧ポンプ×1、貯湯槽・熱源水槽、熱源制御盤、熱源監視装置
想定使用期間	・取水井用鋼管/還元井用鋼管：50年（法定耐用年数から） ・その他の部材：15年

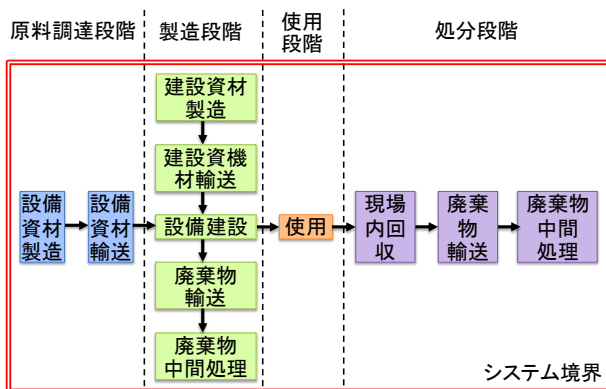


図-1 対象プロセスのプロセスフロー
(民間病院における地中熱利用空調・給湯事業)

し、「建設機材製造工程」は対象外とした。また、「処分段階」に関して、加工された鉄スクラップはシステム境界外に出るものとし、鉄スクラップ再資源化に関するシステム境界の拡張は行わないこととした。

b) オリジナルプロセスのプロセスフロー

オリジナルプロセス（対象プロセスが代替する既存の製品システム）のプロセスフローを図-2に示す。オリジナルプロセスは、地中熱ヒートポンプ導入前に設置されていた「A重油ボイラ」と設定した。システム境界の考え方は、対象プロセスと同様とした。

(3) 対象プロセスの活動量データの収集

対象プロセスの活動量データの収集方法を以下に示す。また、収集した活動量データの一部を表-2に整理した。

a) 原料調達段階

原料製造工程では取水井、還元井、水冷ヒートポンプ等の主要部材に関して自社データを、その他の部材に関して二次情報を用いた。

原料輸送工程では10tトラック（積載率50%）を使用することとして、実際の輸送距離（241.6km）を用いた。

b) 製造段階

主要な投入物に関して自社データを入手できたため、それをもとに活動量を設定した。

c) 流通段階

本事業では、地中熱ヒートポンプを建設する場所と使用する場所は同一で、その間の流通工程は存在しない。

d) 使用段階

地中熱ヒートポンプ導入後の平成21年2月～平成22年1月の1年間の電気使用実績を用いた。

e) 処分段階

処分段階では、「鉄くず」として輸送され、「鉄スクラップへの加工」が行われることとして算定した。

(4) オリジナルプロセスの活動量データの収集

段階別の活動量データの収集方法を以下に示す。なお、A重油ボイラの耐用年数は、法定耐用年数に基づき15年と設定し、各段階からの排出量を15年で割り込んだ。

a) 原料調達段階

投入される部材として、冷温水一次ポンプ、熱交換器、A重油ボイラ、空冷ヒートポンプの4種類を考慮した。

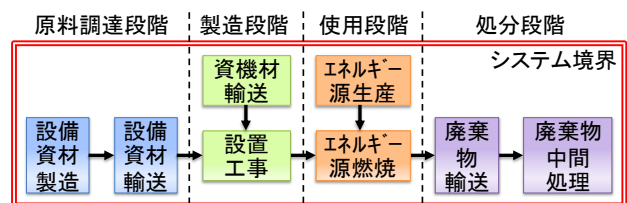


図-2 オリジナルプロセスのプロセスフロー
(民間病院における地中熱利用空調・給湯事業)

表-2 民間病院における地中熱利用空調・給湯事業の
活動量データ（一部）

段階	工程	投入物	数量	単位	情報源区分
原料調達段階	原料製造	取水井用鋼管	5.50E+01	kg	自社データ
		水中ポンプ	4.00E-02	台	自社データ
		還元井用鋼管	5.61E+01	kg	自社データ
		電動三方弁	6.72E+02	円	二次情報
		熱源水槽	4.00E-02	台	自社データ
		熱源ポンプ	2.34E+03	円	二次情報
		水冷ヒートポンプ	2.80E+06	円	自社データ
		貯湯槽	4.00E-02	台	自社データ
		貯湯槽昇温ポンプ	4.28E+00	kg	二次情報
		冷温水一次ポンプ	4.45E+04	円	二次情報
		給湯加圧ポンプ	3.99E+03	円	二次情報
		配管	1.59E+01	kg	二次情報
		冷媒	6.63E-01	kg	二次情報
		制御盤・制御パネル	4.00E-02	式	自社データ
原料	取水井用鋼管	1.35E+01	t-km	自社データ	
輸送	水中ポンプ	5.11E-01	t-km	自社データ	

b) 製造段階

算定に当たっての考え方は基本的に対象プロセスと同様であるが、ドリル機械等の重機は使用せず、電動ドリルを用いた設置工事を想定した。

c) 流通段階

オリジナルプロセスについても、A重油ボイラを建設する場所と使用する場所は同一で、その間の流通工程は存在しない。

d) 使用段階

地中熱ヒートポンプ導入前の平成20年2月～平成21年1月の1年間の重油使用実績を用いた。

e) 処分段階

算定の考え方は、対象プロセスと同様とした。

(5) 原単位データの収集

原単位データは、以下の考え方にに基づき、対象プロセス/オリジナルプロセス共に、優先順位を(a) 温対法算定省令に基づく事業者別排出係数⁶⁾、(b) LCA日本フォーラムデータベース⁷⁾、(c) IDEA (MiLCA)⁸⁾、(d) その他の排出係数(3EID⁹⁾等)として選定した。ただし、下記の優先順位で一義的に定めるのではなく、収集する活動量データの単位(重量、価格等)が原単位データの単位に

影響されることに鑑み、活動量データ、原単位データの双方の精度が可能な限り高くなるように選定した(例: LCA日本フォーラムデータベースの原単位データの単位が「台数」で、IDEA (MiLCA)の原単位データの単位が「価格」の場合、前者を採用すると、どんな大きさの部材でもCO₂排出量は一定となり、活動量データの精度が悪くなるため、後者を採用した)。

- ・3EIDなど産業連関表に基づく原単位は、産業連関表の部門で生産される平均財の原単位であるが、本研究は個別の事業のCO₂排出量を算定するものであるため、積み上げ法による原単位を優先する。
- ・地域による個別事業のCO₂排出量の違いを明確にするため、温対法算定省令に基づく事業者別排出係数等、地域別の原単位データを優先する。次いで、LCA日本フォーラムデータベース等、データの更新頻度が比較的高い原単位データを優先する。

(6) インベントリ分析の実施

上記(3)～(5)で収集した活動量データ、原単位データを用いて、下式によりCO₂排出量の積み上げ計算を行った。算定対象とする温室効果ガスとしては、CO₂以外にCH₄、N₂O、SF₆等も考慮した。地球温暖化係数(GWP)には、IPCC第4次報告書に記載された100年係数を使用し、温室効果ガス排出量をCO₂換算量(CO₂e)で評価した。

$$\text{排出量} = \sum \{ \text{GWP} \times (\text{活動量} \times \text{原単位}) \}$$

次いで、下式により排出削減効果を算定した。

$$\text{排出削減率} = \frac{\left(\begin{array}{l} \text{オリジナルプロセスの排出量} \\ - \text{対象プロセスの排出量} \end{array} \right)}{\div \text{オリジナルプロセスの排出量}}$$

(7) LCAの結果の評価

a) 対象プロセスのLCA算定結果

対象プロセスの排出量は 9.5×10^4 kgCO₂e/年となり、使用段階がその95%を占めた。

b) オリジナルプロセスのLCA算定結果

オリジナルプロセスの排出量は 4.4×10^5 kgCO₂e/年となり、使用段階が全体の99%を占めた。

c) CO₂削減効果の算定結果

ライフサイクル全体のCO₂削減効果は、図-3に示すように78%となり、本算定結果を代表的な地中熱関連事業者5社に提示したところ、概ね妥当の値との評価を受けた。比較的大きなCO₂削減効果が得られたのは、地中熱ヒートポンプの導入により原料調達段階、製造段階、処分段階の排出量は増加したが、使用段階の排出量が大きく減少したことによる。

使用段階(地中熱ヒートポンプの使用に伴う電力消費)の排出量が95%を占めたことから、地中熱利用事業の

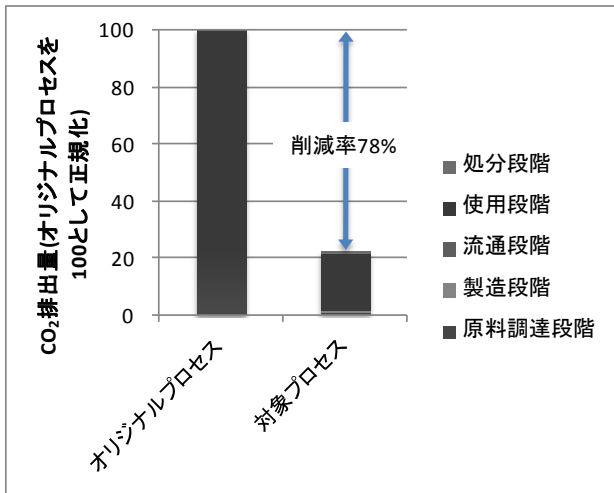


図-3 CO₂削減率算定結果
(民間病院における地中熱利用空調・給湯事業)

LCAにおいて、使用段階の電力消費量（活動量データ）を精度高く把握するとともに、原単位データに関して電気事業者による差異を考慮することの重要性が示唆された。

また、事業者が判断に迷いやすい点等として、①機能単位や②オリジナルプロセスが抽出されるとともに、上記の地中熱関連事業者へのヒアリングにより、「LCAとしての算定精度」と「事業者等にとっての作業負荷」のバランスが取れた算定方法とするためには、以下の方針とすることが妥当と考えられた。

- ①機能単位： 本来は「1MJ相当の熱利用」等と設定することが望ましいが、このためには対象プロセスの年間採熱量・排熱量等を把握する必要が生じる。「1年間の熱利用」（対象事業ごとに地域、空調面積、用途を限定した条件を付記）とすることにより、事業者等にとっての作業負荷を軽減し、LCAを実施可能な事業範囲を拡大することができる。
- ②オリジナルプロセス： LCA実施の目的により、設定すべきオリジナルプロセスが異なるため、一義的に設定することができないが、以下の考え方の中から適切なものを採用すればよいと考えられる。
 - ・熱源機器の切り替えを行う場合、切り替え前の熱源をオリジナルプロセスとする。
 - ・システム導入時点における標準的な熱源機器をオリジナルプロセスとする（地域、建物用途等の要素に配慮する）。

3. 農業用水を用いた小水力発電事業に関するLCAケーススタディの実施

(1) 対象事業の概要

本事業は、水の位置エネルギーを活用し、農業水路の

流量と落差を利用して小規模、小出力の発電を行うものである。本事業の主要諸元を表-3に示す。

(2) 機能単位等の設定

本事業に係る機能単位は、「1kWhの外部への電力供給」と設定した。また、プロセスフローとシステム境界は、以下のように設定した。

a) 対象プロセスのプロセスフロー

対象プロセスのプロセスフローを図-4に示す。システム境界には、上記2と同様に、「原料調達段階」～「処分段階」のすべての工程を含めることとした。

b) オリジナルプロセスのプロセスフロー

オリジナルプロセスは、「系統電力」と設定した。オリジナルプロセスのプロセスフロー図を図-5に示す。システム境界には、本図の工程がすべて含まれる。

(3) 対象プロセスの活動量データの収集

対象プロセスの活動量データの収集方法を以下に示す。また、収集した活動量データの一部を表-4に整理した。

a) 原料調達段階

水車本体、発電機、水路及び羽、それらを支える架台の製造及び輸送（2tトラック、積載率58%、10km）を本段階に含めた。すべての投入物に関して自社データを入手できたため、それらをもとに活動量を設定した。

b) 製造段階

水車及び水路等の溶接に要するエネルギーを考慮し、1年間の操業データをもとに、活動量を設定した。また、溶接した製品の輸送に関して、4tトラック（積載率100%）を用いることとし、工場～水車設置場所の距離を75kmとして活動量を設定した。

c) 流通段階

流通段階に該当する工程はない。

d) 使用段階

メンテナンス工程が該当するが、本事業では地域住民の手によるメンテナンスが主となっており、特段の資機

表-3 農業用水を用いた小水力発電事業の主要諸元

実施場所	岐阜県郡上市
事業の目的及び概要	・直径3mの上掛け水車 ・最大出力は2.2kW
事業開始	上掛け水車の設置は2011年（小水力発電事業の開始は2007年）
導入設備	水車本体、水車架台、水路（約12.5m）、水路架台、発電機
年間発電量	8,760kWh/年
設備利用率	45.5%
想定使用期間	20年

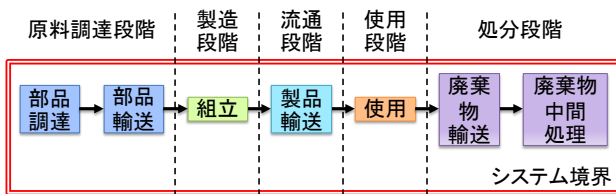


図-4 対象プロセスのプロセスフロー
(農業用水を用いた小水力発電事業)

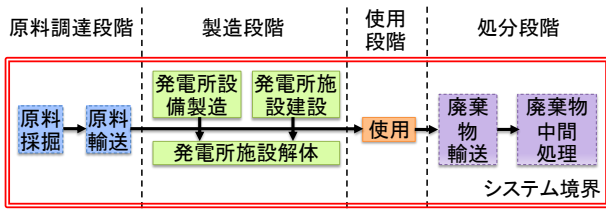


図-5 オリジナルプロセスのプロセスフロー
(農業用水を用いた小水力発電事業)

表-4 農業用水を用いた小水力発電事業の活動量データ (一部)

段階	工程	投入物	数量	単位	情報源区分
原料調達段階	水車製造	水車本体鋼板	8.45E-03	kg	自社データ
		水車本体型鋼	2.82E-03	kg	自社データ
		水車架台鋼板	1.61E-04	kg	自社データ
		水車架台型鋼	1.34E-03	kg	自社データ
		羽 (木材)	1.68E-06	m ³	二次情報
	水路製造	水路鋼板	8.18E-03	kg	自社データ
		水路型鋼	9.74E-04	kg	自社データ
		水路架台鋼板	5.33E-04	kg	自社データ
		水路架台型鋼	3.45E-03	kg	自社データ
	発電機製造	同期モータ	1.39E-06	百万円	自社データ
サイクロ減速機		2.29E-06	百万円	自社データ	
インバータ・コンバータ		4.57E-06	百万円	自社データ	
原料輸送	輸送 (2tトラック)	2.59E-02	t-km	自社データ	
製造段階	溶接	電力	1.40E-03	kWh	自社データ
	水車設置	設置工事	3.21E-05	百万円	自社データ
	製品輸送	輸送 (4tトラック)	2.59E-02	t-km	自社データ

材は使用しないことから、CO₂排出はないものとした。

e) 処分段階

アルミや鋼材等はリサイクル、木材は焼却、それ以外は破碎、埋立を行うこととして活動量を設定した。

(4) オリジナルプロセスの活動量データの収集

段階別の活動量データの収集方法を以下に示す。なお、

系統電力の発電所の想定使用期間は40年と設定し、各段階からの排出量を40年で割り込んだ。

a) 原料調達段階

発電に要する燃料の調達工程が相当するが、使用段階のCO₂排出量に含まれるため、本段階では考慮しない。

b) 製造段階

系統電力の発電所設備の製造、発電所施設の建設及び解体の3工程を考慮した。

c) 流通段階

流通段階に該当する工程はない。

d) 使用段階

系統電力による電力供給 (受電端基準) を考慮した。

e) 処分段階

発電に伴う焼却灰の処理等が相当するが、使用段階のCO₂排出量に含まれるため、本段階では考慮しない。

(5) 原単位データの収集

選定に当たっての考え方は、上記2.と同様とした。

(6) インベントリ分析の実施

上記2.と同様にCO₂排出量の積み上げ計算を行い、排出削減効果を算定した。

(7) LCAの結果の評価

a) 対象プロセスのLCA算定結果

対象プロセスの排出量は 2.1×10^{-1} kgCO₂e/kWhとなり、製造段階がその62%を占めた。

b) オリジナルプロセスのLCA算定結果

オリジナルプロセスの排出量は 5.5×10^{-1} kgCO₂e/kWhとなり、使用段階が全体の99%を占めた。

c) CO₂削減効果の算定結果

ライフサイクル全体のCO₂削減効果は、図-6に示すように62%となり、本算定結果を代表的な小水力発電関連団体1団体及び関連事業者2社に提示したところ、概ね妥当の値との評価を受けた。比較的大きなCO₂削減効果が得られたのは、小水力発電事業の開始により原料調達段階の排出量が増加したが、使用段階の排出量が大きく減少したことによる。

製造段階、特に水車の設置工事に伴うCO₂排出量が60%超を占めたことから、小水力発電のLCAにおいて、水車の設置工事の費用といった活動量データを精度高く把握するとともに、設備の想定使用期間等について十分な検討を行うことの重要性が示唆された。

また、事業者が判断に迷いやすい点等として、①オリジナルプロセスや②算定対象とする単位 (サイト単位/製品単位) が抽出されるとともに、上記の小水力発電関連団体・事業者へのヒアリングにより、「LCAとしての算定精度」と「事業者等にとっての作業負荷」の balan

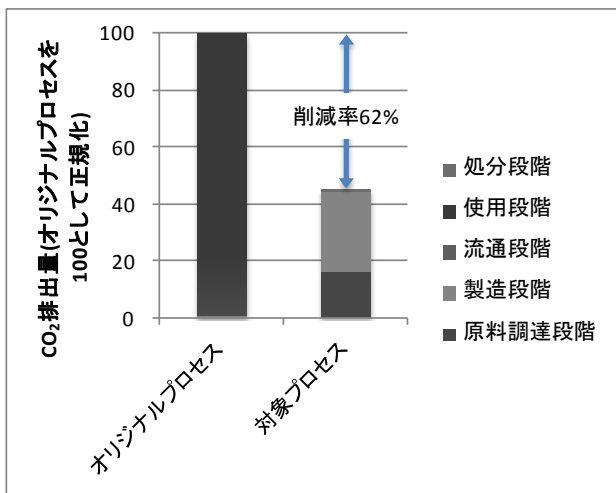


図-6 CO₂削減率算定結果
(農業用水を用いた小水力発電事業)

スが取れた算定方法とするためには、以下の方針とすることが妥当と考えられた。

- ①オリジナルプロセス：小水力発電の導入がどの電源を置き換えているのかを特定することは難しい。オリジナルプロセスは原則として「系統電力」とし、調達先の電力供給者から公表される電気事業者別排出係数（実排出係数）を用いることにより、異種の事業間のCO₂削減効果の優劣を評価しやすくなると思われる。しかし、調達先の電力供給者から公表される電気事業者別排出係数（実排出係数）には、発電所の建設・解体工程が含まれていないため、製造段階として、それらの工程からの温室効果ガス排出量を合算する必要がある（ただし、発電所建設・解体工程に関する活動量データを入手するのは一般に困難であるため、（一財）電力中央研究所（2010）¹⁰⁾等のデータを二次データとして引用することも一つの方法と考えられる）。
- ②算定対象とする単位：同じ水車、発電機等を用いた場合であっても、サイトによりCO₂削減効果が大きく変わることが想定される。小水力発電を導入した「サイト」ごとにCO₂削減効果を算定することを原則とし、「製品」単位での算定を行う場合には、以下を条件とするのがよいと考えられる。
 - ・サイトにより違いが生じるパラメータ（設備稼働率等）に関して、現実的に妥当性のある条件を想定して算定すること。
 - ・上記のパラメータに関して、感度分析を行うこと。

4. まとめ

本研究で実施したLCAケーススタディ等を通じて、(a) 民間病院における地中熱利用空調・給湯事業については

78%、(b) 農業用水を用いた小水力発電事業については62%のCO₂排出削減率が見られた。また、(a) 地中熱利用事業については使用段階の電力消費に関する活動量データ、原単位データ等、(b) 小水力発電事業については設備の想定使用期間、設備利用率等が及ぼす影響が、それぞれ大きいことが示唆された。

なお、本研究の成果等を踏まえ、「再生可能エネルギー等の温室効果ガス削減効果に関するLCAガイドライン（案）」を作成しており、今後、環境省ウェブサイト（URL；<http://www.env.go.jp/earth/ondanka/lca/index.html>）にて公表される予定であるので、積極的に活用されたい。

謝辞：本研究は、環境省「平成24年度再生可能エネルギー二酸化炭素削減効果検証等業務」の一環として実施したものである。検討に当たって、有識者を委員とした「平成24年度LCA温室効果ガス排出削減効果検証手法検討会」（座長：横浜国立大学大学院環境情報研究院・本藤祐樹 教授）を設置し、多岐にわたり多くの助言・指導を頂いた。また、本業務は平成21年度から4年間にわたって実施したものであり、多くの方々のご協力を賜った。この場をお借りして感謝申し上げたい。

参考文献

- 1) Saner et al. : Is it only CO₂ that matters? A life cycle perspective on shallow geothermal systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.14, 1798-1813, 2010.
- 2) 岩岡ら：地中熱を利用する省エネルギー住宅のLCA, *日本建築学会環境系論文集*, 625, 401-408, 2008.
- 3) 阿部ら：福岡市東区アイランドシティにおける地中熱利用冷暖房システムのLCA, *日本地熱学会学術講演会講演要旨集*, 23, 2008.
- 4) (株) エックス都市研究所：平成24年度再生可能エネルギー二酸化炭素削減効果検証等業務報告書, 2013.
- 5) (一社) 産業環境管理協会：認定 CFP-PCR 一覧 (URL；<http://www.cfp-japan.jp/calculate/authorize/pcr.php>)
- 6) 環境省：電気事業者別排出係数の公表について (URL；<http://ghg-santeikohyo.env.go.jp/calc/denki>)
- 7) LCA 日本フォーラム：LCA データベース 2012 年第3版 (URL；<http://lca-forum.org/database/>)
- 8) (独) 産業技術総合研究所、(一社) 産業環境管理協会：IDEA v.1.1 (URL；<http://www.milca-milca.net/>)
- 9) (独) 国立環境研究所：産業連関表による環境負荷原単位データブック (3EID), 2005.
- 10) (一財) 電力中央研究所：日本の発電技術のライフサイクル CO₂ 排出量評価—2009 年に得られたデータを用いた再推計—, 2010.