

北杜サイト太陽光発電所のライフサイクル評価

A Life Cycle Assessment of the Hokuto Mega-Solar Plant

伊藤雅一^{*1}
Masakazu ITO
植田 譲^{*4}
Yuzuru UEDA

工藤 満^{*2}
Mitsuru KUDO
津野裕紀^{*5}
Yuki TSUNO

名倉将司^{*3}
Masashi NAGURA
黒川浩助^{*6}
Kosuke KUROKAWA

Abstract

A 2 MW mega-solar system has been installed in Hokuto, Yamanashi prefecture by NTT Facilities and Hokuto city commissioned by NEDO. To investigate environmental potentials of energy and CO₂ emissions, the mega-solar system was evaluated by a life cycle assessment (LCA). In this paper, 22 PV systems corresponding to 1453 kW were evaluated. As a result, 2.6 year of energy pay back time and 50.1 g CO₂-eq/kWh of CO₂ emissions rate were obtained. The CO₂ emissions rate is much smaller than other CO₂ emissions rates of fossil fired plants. In addition, sensitivity analyses about PV module's recycling effects and longer lifetime of arrays and foundations (60 years comparing to 30 years) were done. By adapting basic recycling using current technologies, 4.2% of energy consumptions and 4.3% CO₂ emissions can be reduced. Advanced recycling can reduce 13.8% of energy consumption and 12.3% of CO₂ emissions. And longer lifetime of arrays and foundations reduces 11.2% of energy consumption and 13.1% of CO₂ emissions. Combination of advanced recycling and longer lifetime reduces 24.9% of energy consumptions and 25.4% of CO₂ emissions.

キーワード：ライフサイクル評価, LCA, メガソーラー, エネルギーペイバックタイム, CO₂, リサイクル

Key Words : Life Cycle Assessment, LCA, Mega-solar, Energy payback time, CO₂, Recycle

1. はじめに

ライフサイクル評価とは、製品をライフサイクルにわたって調査し、環境への影響を定量的に調べることである。太陽光発電システムのライフサイクル評価に関する報告は、住宅用の太陽光発電システムの評価⁽¹⁻⁴⁾や太陽電池モジュールの評価⁽⁵⁻⁹⁾、リサイクル⁽¹⁰⁻¹²⁾、大型太陽光発電システムのシミュレーションによる評価⁽¹³⁻¹⁷⁾、その他の電源との比較評価⁽¹⁸⁻²⁰⁾などがあるが、実際の地上設置型大型太陽光発電システム(メガソーラー)を対象とした評価例は少ない。Mason ら⁽²¹⁾による、米国に設置された 3.5 MW のメガソーラーの周辺機器を対象とした評価や、Desideri ら⁽²²⁾によるイタリアに設置された 1778 kW メガソーラーの評価、Fthenakis・Kim⁽²³⁾による AMONIX 社の集光型太陽光発電システムの評価があるが、国内において実際のメガソーラーを対象としたライフサイクル評価事例は見られない。

本論文ではこのライフサイクル評価を用い、実際に山梨県北杜市に設置された北杜サイト太陽光発電所を対象とし

て環境への影響を評価する。

北杜サイト太陽光発電所は、NEDO 技術開発機構の委託により 2006 年から 5 年間にわたり「大規模電力供給用太陽光発電系統安定化等実証研究（北杜サイト）⁽²⁴⁾」として実施され、約 2MW のメガソーラーが山梨県北杜市に設置された。そのうちの研究項目「大規模 PV システムの環境貢献度 (LCA) の評価」では、コンクリート基礎を用いた従来型の架台と金属製の杭基礎を用いた新型架台のライフサイクル評価による比較⁽²⁵⁾、太陽電池モジュール 19 種のライフサイクル評価による比較⁽²⁶⁾、システム全体を対象としたライフサイクル評価を行った。本論文ではシステム構成を再度確認して LCA データを更新し、リサイクル効果を検討したので報告する。

2. ライフサイクル評価概要

ライフサイクル評価 (LCA : Life Cycle Assessment) とは、製品のライフサイクル、すなわち、原料の採掘から廃棄のすべての段階に渡って環境に与える影響を分析し、評価する手法である。図 1 のように目的および調査範囲の設定、インベントリ分析、インパクト評価の 3 つのステージで評価を行い、結果の解釈・報告を行う。

ライフサイクル評価は対象とする製品の直接的な影響（例えば、発電時の CO₂ 排出量）だけでなく、間接的な影響（例えば、架台や太陽電池の製造時の CO₂ 排出量）までを含める。目的及び範囲の設定は、ライフサイクル評価の

*1 東京工業大学 先進エネルギー国際研究センター
(〒152-8550 東京都目黒区大岡山 2-1 2-1)
e-mail: masakazu.ito@cea.fr

(当時の成果。現在日本学術振興会 海外特別研究员)

*2 NTT ファシリティーズ ソーラープロジェクト本部

*3 NTT ファシリティーズ ソーラープロジェクト本部

*4 東京工業大学大学院 工理学研究科 電子物理工学科攻

*5 産業技術総合研究所 太陽光発電工学研究センター

*6 東京工業大学 先進エネルギー国際研究センター

(原稿受付 : 2012 年 12 月 14 日)

枠組みを決め、範囲の設定においてそのライフサイクルを定義し、間接的な影響をどこまで含めるかを決定する。

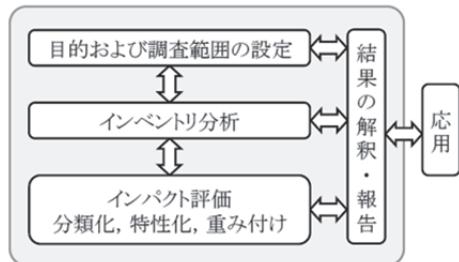


Fig.1 A scheme of LCA

図1 ライフサイクル評価の構成

2.1 インベントリ分析

インベントリ分析ではそれぞれのライフサイクルの過程で、どのような環境影響物質がどれだけ排出されているかを明らかにする。手法には積み上げ法と産業連関表を用いる方法があり、前者は1つ1つ具体的に検討するため精度の高い分析が可能であり、新しい技術の適用といった分析も可能であるが、手間がかかるため実際には分析範囲が限定される。後者は個別のライフサイクルを追うことなく、財・サービスの取引関係を記述した産業連関表を用いて推定する。産業連関表は国、もしくは地域の経済をいくつかの産業部門に分け、一定期間内における産業間の財・サービスの流れを示したものであるから、精度の高い分析に用いることは困難である。どちらも一長一短あることから、分析に用いたデータの精度や、前提条件を把握した上で結果を解釈することが重要である。

2.2 インパクト評価

インパクト評価は分類化、特性化、重み付けの3段階に分けられる。分類化では各環境影響物質を環境負荷のカテゴリに振り分ける。例えば、地球温暖化というカテゴリにはCO₂やメタンが振り分けられる。特性化では同じカテゴリ間に属する物質を統合する。重み付けでは異なるカテゴリを重み付けすることで統合化が試みられる。しかし、環境負荷を定量的に把握することは難しく、結果の解釈には注意したい。

3. メガソーラーのライフサイクル評価方法

メガソーラーの評価は、使用されている全ての機器をリストアップし、対象とするライフサイクル評価の範囲をまとめ、インベントリ分析を行い、メガソーラーのライフサイクル全体の投入資源、排出物をまとめる。地球温暖化を対象としてインパクト評価を実施するとすれば、地球温暖化に関連するCO₂やメタン、フロンについて地球温暖化係数を用いて重み付けをし、結果を算出する。

3.1 ライフサイクル評価の計算方法

ここでは本研究で用いた積み上げ法について述べる。積み上げ法ではそれぞれの機器において原料の採掘から廃棄まで積み上げて算出する。通常は、機器の数や重量などの評価対象から得られるフォアグラウンドデータと、その機器を対象としたバックグラウンドデータを組み合わせて評価する。例えば、架台であれば架台の重量等がフォアグラウンドデータとなり、亜鉛めっき鋼で構成されていれば亜鉛めっき鋼の投入資源や排出物のデータ（LCAデータ）がバックグラウンドデータとなる。バックグラウンドデータには日本ではJLCA-LCAデータベース⁽²⁷⁾、欧州ではEcoinvent⁽²⁸⁾、米国ではU.S. LCI database⁽²⁹⁾などがある。データベースには原料や素材、機器についての入出力、つまり投入されたエネルギーや原料、排出されたガスや廃棄物が表に示されており、前述の例に沿えば亜鉛めっき鋼1kgあたり製造するのに必要な投入資源、排出物がまとめられている。これらを用いてインベントリ分析を行う。

3.2 エネルギーベイバックタイム

太陽光発電システムのライフサイクル評価では、エネルギー採算性の指標として、(1)式に示すエネルギーべイバックタイムを算出する。エネルギーべイバックタイムとは、太陽光発電システムのライフサイクルに投入されたエネルギー量をその発電した電力で回収するのに要する年数である。投入されたエネルギーと発電した電力はどちらも一次エネルギー換算して計算し、投入されたエネルギーは原料の採掘から廃棄までそれぞれ一次エネルギー換算して足し合わせる。発電した電力は需要地における系統電力の変換効率で割り一次エネルギー換算する。エネルギーべイバックタイムの頭字語は、国内では公的な資料による定義付けがなされていない。IEA/PVPS（国際エネルギー機関／太陽光発電研究協力実施協定）のTask12（太陽光発電システムの環境、健康および安全）による太陽光発電システムのライフサイクル評価に関するガイドライン⁽³⁰⁾ではEPBTとしているが、ここでは国内で一般的なEPTを用いる。

$$EPT = \frac{E_{total}}{E_{agen}/\eta_G} = \frac{E_{mat} + E_{manuf} + E_{trans} + E_{inst} + E_{O&M} + E_{EOL}}{E_{agen}/\eta_G} \quad \dots (1)$$

ここで、

EPT	: エネルギーベイバックタイム [年]
E _{total}	: ライフサイクルを通した一次エネルギー投入量 [J]
E _{mat}	: 素材の製造にかかる一次エネルギー投入量 [J]
E _{manuf}	: 機器の製造にかかる一次エネルギー投入量 [J]
E _{trans}	: 輸送にかかる一次エネルギー投入量 [J]
E _{inst}	: 建設にかかる一次エネルギー投入量 [J]
E _{O&M}	: 運転・保守にかかる一次エネルギー投入量 [J]
E _{EOL}	: 廃棄にかかる一次エネルギー投入量 [J]
E _{agen}	: 年間発電電力量 [J/年]
η_G	: 系統電力の変換効率 (受電端)

3.3 二酸化炭素 (CO₂) 排出原単位

太陽電池モジュールの製造や架台の建設時に発生するCO₂の発生量をCO₂排出量と呼ぶのに対し、CO₂排出原単位とは太陽光発電システムが発電する電力1kWhあたりのCO₂排出量である。(2)式に示すように、太陽光発電システムを構成するすべての機器のライフサイクルを通したCO₂排出量を、ライフサイクルを通した発電電力量で割り、kWh当たりのCO₂排出量を求める。ここでは単位にt CO₂-eq (CO₂換算トン) を用いる。CO₂換算トンとは、CO₂を1とし、メタンやフロンなどのCO₂以外の温暖化ガスをCO₂換算して合算した数値である。例えば、メタンの係数を25、一酸化窒素の係数を298とし、CO₂1t、メタン1t、一酸化窒素1tを足し合わせると324t CO₂-eqとなる。これらの係数は地球温暖化係数(GWP)と呼ばれIPCC(気候変動に関する政府間パネル)による報告書などでまとめられている。それぞれの温暖化係数は、対象とする期間の放射エネルギーの積算値を同期間のCO₂と比較して求める。第4次評価報告書(2007)⁽³¹⁾によると、たとえば、メタンの温暖化係数は温室効果の年数が20年では72、100年では25、500年では7.6である。なお、京都議定書で使用されている数字は第2次評価報告書(1995)⁽³²⁾から引用されており、メタンの温暖化係数の100年での値は21となる。

$$g_{CO_2} = \frac{G_{total} \times 10^6}{E_{agen} \cdot L_{PV}}$$

$$= \frac{(G_{mat} + G_{manuf} + G_{trans} + G_{inst} + G_{O&M} + G_{EOL}) \times 10^6}{E_{agen} \cdot L_{PV}} \quad \dots (2)$$

ここで、

- g_{CO_2} : CO₂排出原単位 [g CO₂-eq/kWh]
- G_{total} : ライフサイクルを通したCO₂排出量 [t CO₂-eq]
- E_{agen} : 年間発電電力量 [kWh/年]
- L_{PV} : システムの寿命 [年]
- G_{mat} : 素材の製造にかかるCO₂排出量 [t CO₂-eq]
- G_{manuf} : 機器の製造にかかるCO₂排出量 [t CO₂-eq]
- G_{trans} : 輸送にかかるCO₂排出量 [t CO₂-eq]
- G_{inst} : 建設にかかるCO₂排出量 [t CO₂-eq]
- $G_{O&M}$: 運転・保守にかかるCO₂排出量 [t CO₂-eq]
- G_{EOL} : 廃棄にかかるCO₂排出量 [t CO₂-eq]

4. 対象とするシステムの構成

4.1 北杜サイト太陽光発電所概要と評価範囲

本ライフサイクル評価で対象とした北杜サイト太陽光発電所は山梨県北杜市長坂町に設置され、設置容量は1839kWである。本メガソーラーの概略図を図2に示す。図の左側639kW太陽光発電システムはPVシステム評価エリアに設置され、750kVA変圧器(210V/6.6kV)に接続されている。また、図の右側1200kW太陽光発電システムは大容量PCS導入PVシステム評価エリアに設置され、

1500kVA変圧器(420V/6.6kV)に接続されている。評価は太陽電池モジュールから変圧器までを対象とし、それより系統側の受電設備や研究用計測設備、外灯・フェンス等は含まれていない。変圧器以降は6.6kV、66kVの連系設備が設置され、現在は66kVにて連系されている。

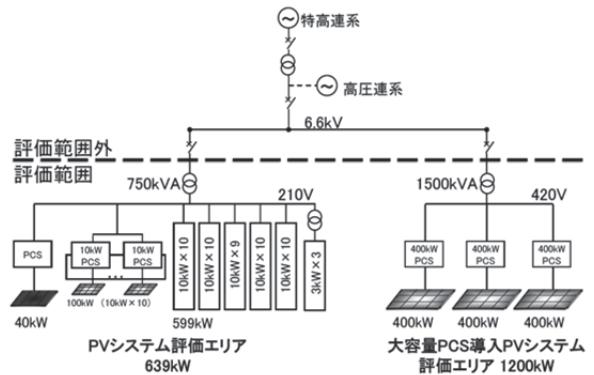


Fig.2 Overview of the Hokuto Mega-Solar Plant and a boundary of LCA evaluation. 639kW and 1200kW system including transformers (750kVA, 1500kVA) are in the boundary. Outside of the transformers does not included.

図2 北杜サイト太陽光発電所概要図とライフサイクル評価範囲。PCSを含む639kW、1200kW太陽光発電システムから変圧器(750kVA、1500kVA)までを対象に評価。変圧器より連系側の機器は含まれていない。

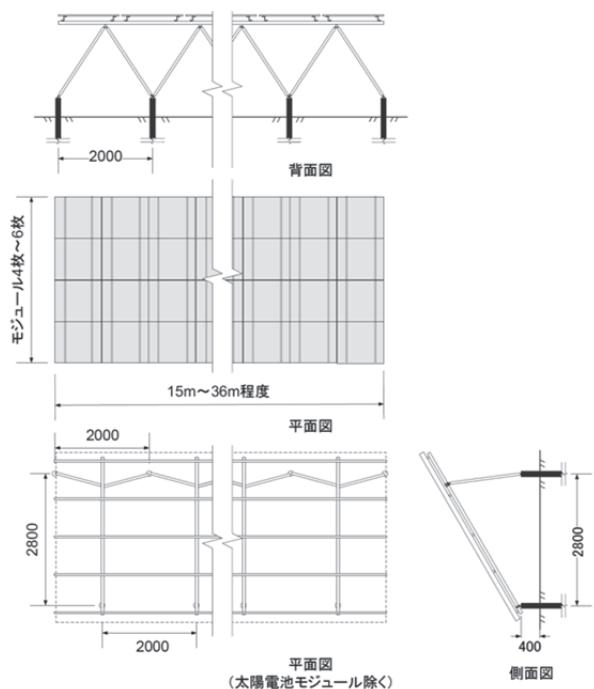


Fig.3 Example of array configuration. Width and number of modules in vertical row are depends on land condition, and module sizes.

図3 架台の概要図。横幅と縦のモジュール枚数は土地の幅、モジュールサイズによる。

4.2 太陽電池モジュール

図2に示すPVシステム評価エリアには639kWの太陽光発電システムが設置され、大容量PCS導入PVシステム評価エリアには400kWの太陽光発電システムが3基設置されている。そのうち1基には200kWずつ2種の太陽電池モジュールが設置されている。表1に設置された太陽電池モジュールのリストを示す。設置された太陽電池は、単結晶シリコン、多結晶シリコン、アモルファスシリコン、化合物半導体、球状シリコン、リボンシリコン、集光2軸追尾、

Table 1 List of PV modules with capacity and checks showing evaluated or not. (Some companies may be divided because of installation phases.)

表1 設置された太陽電池モジュールの種類・設置容量と評価対象の有無（同種でも設置時期により複数ある）

種類	メーカー	導入量 (kW)	評価 対象
単結晶 シリコン	シャープ	30	○
	MOTECH	10	○
	KPE(旧 Photon)	10	○
	E-TON	10	○
	Isofoton	30	○
	GE	30	○
	Suntech	10	
	SunPower	50	
	SunPower	10	
単結晶 シリコン (ヘテロ接合)	SunPower	200	
	三洋電機 (現パナソニック)	30	○
	三洋電機 (現パナソニック)	400	○
	シャープ	30	○
多結晶 シリコン	京セラ	100	○
	京セラ	10	
	三菱電機	30	○
	Q-Cells	10	○
	ErSol	10	○
	Suntech	30	○
	BP Solar	10	○
	Day4Energy	30	
	京セラ	400	○
	京セラ	10	
アモルファス シリコン	カネカ	30	○
	富士電機システムズ	10	
	カネカ	10	○
アモルファス シリコン／微 結晶シリコン (タンデム)	三菱重工業	10	○
	昭和シェルソーラー	30	○
化合物半導体 (CIGS系)	昭和シェルソーラー	200	○
	ホンダソルテック	3	○
	ソーラーシリコン テクノロジー	20	
リボン シリコン	Schott Solar	30	
集光2軸追尾	シャープ	3	
平板1軸追尾	大同メタル工業, シャープ	3	

平板1軸追尾である。また、評価を実施した太陽電池には表中に丸を付けた。実施されていない太陽電池にはバックコンタクト型、フィルム基盤、球状シリコン、追尾型(開発品)など、いずれも特殊または情報がないためここでは含めない。評価を実施した太陽電池モジュールの合計の容量は1453kW(PVシステム評価エリア:453kW、大容量PCS導入PVシステム評価エリア:1000kW)である。

4.3 架台・基礎

架台・基礎の概要図を図3に示す。設置方位は真南、設置傾斜角は30度である。一部、比較研究のために傾斜角15度、45度の架台が設置されている。架台は安価な市販鋼管と大量生産可能な形成ジョイント(開発品)で構築され、鋼材量の低減、運搬性・作業性の効率化、意匠性の高さを特徴とする。また、基礎には鋼管杭を使用した。建設残土が低減できることや架台下および周辺の緑地化可能面積を確保できる。さらに材料が鉄であることから資源の再利用が可能である。全ての架台はほぼ同じ形状で設計され、土地の形状やモジュールサイズにより大きさが異なる。横幅は15m~36m、縦のモジュール枚数は4枚~6枚である。設計用基準風速は30m/s、評価対象1453kWあたりの架台は131t、杭基礎は161tである。

4.4 周辺機器

表2には本ライフサイクル評価で対象とした機器を示す。評価していない太陽電池モジュールに専用で使用されている機器は評価対象から外し、共有されている機器は共有されている割合を計上した。

10kWのPCSは45台設置され、ホンダソルテック製化合物半導体向けに3kWのPCSが設置されている。400kWのPCS(開発品)は表1に示す三洋電機400kW太陽電池アレイ、SunPower200kW太陽電池アレイ、京セラ400kW太陽電池アレイ、昭和シェルソーラー200kW太陽電池アレイに設置されているが、SunPowerの200kW太陽電池アレイを評価対象に含めていないため、ライフサイクル評価には2.5台分計上した。400kWPCSの内部構成はヒアリングから重量を決めた。400kWPCSを2台収納できるコンテナは2.2t/台、基礎は97.7t/台であり、PCS2.5台分を計上した。変圧器についても同様の方法で数量を調整し、PVシステム評価エリア向けに設置された750kVA変圧器は0.76台、1500kVA変圧器は0.83台とした。PVシステム評価エリアに設置された集電箱は0.45t、大容量PCS導入PVシステム評価エリアに設置された接続箱は6.0t。ケーブルは600VCE(架橋ポリエチレン絶縁耐熱性ポリエチレンシースケープル)と600V CET(架橋ポリエチレン絶縁耐熱性ポリエチレンシースケープルトリプレックス)が用いられている。電線管はFEP(波付硬質合成樹脂管)、VE(硬質塩化ビニル管)が使用され、それぞれ7.2t、10.6tである。また、ハンドホールが25.7t、マンホールが203t、露出ブルボックスが0.52t、連結式接地棒が0.08tである。

5. 前提条件と LCA データ

5.1 発電量の前提条件

PV システム評価エリアの評価対象 453kW 太陽光発電システムは、2008 年 4 月から 2009 年 3 月までの実際の発電

Table 2 List of components for evaluated 1453 kW

表 2 評価対象 1453 kWあたり構成機器

機器名	数量	素材等
架台	131 t	亜鉛めつき鋼鋼管
杭基礎	161 t	普通鋼鋼管
10kW PCS	45 台	NEDO 技術開発機構報告書 ⁽³³⁾ を参照
3kW PCS	1 台	NEDO 技術開発機構報告書 ⁽³³⁾ を参照
400kW PCS (開発品)	2.5 台 (4.4 項 参照)	鉄 890kg, 銅 460kg, アルミ 80kg, 樹脂 60kg, ケーブル 50kg (1 台あたり)
400kW PCS 2 台 収容コンテナ・基 礎	1.25 台	鉄 2.2t, コンクリート 97.7t (1 台あたり)
750kVA 変圧器	0.76 台	6600V/210V, PV システム 評価エリア向け。非標準変 圧器の LCA データ ⁽³⁴⁾⁽³⁵⁾ を 使用
1500kVA 変圧器	0.83 台	6600V/420V, 大容量 PCS 導 入 PV システム評価エリア 向け。非標準変圧器の LCA データ ⁽³⁴⁾⁽³⁵⁾ を使用
集電箱	0.45 t	鉄製, 100 kW/台 (PV シス テム評価エリア用)
接続箱	6.0 t	鉄製, 50kW/台 (発電スペ ース用)
ケーブル		
600V CE3.5sq	6.5 km	
600V CE5.5sq	18.2 km	
600V CE8.0sq	2.4 km	
600V CE14.0sq	1.5 km	
600V CE150sq	3.2 km	
600V CE200sq	4.3 km	電力ケーブルの LCA デー タ ⁽³⁴⁾⁽³⁵⁾ を使用して算出
600V CE250sq	1.8 km	
600V CET14sq	0.6 km	
600V CET22sq	0.6 km	
600V CET38sq	2.2 km	
600V CET60sq	1.6 km	
600V CET200sq	0.5 km	
600V CET250sq	1.4 km	
硬銅線	11.4 km	避雷用ワイヤ
電線管 FEP	7.2 t	波付硬質合成樹脂管
電線管 VE	10.6 t	硬質塩化ビニル管
ハンドホール	25.7 t	鉄ふた 6.9t, コンクリート 18.7t
マンホール	203 t	鉄ふた 7.5t, コンクリート 196t
プルボックス	0.52 t	塩化ビニル樹脂製
接地棒	0.08 t	銅製

量を用い、大容量 PCS 導入 PV システム評価エリアの評価対象 1000kW は PV システム評価エリアに設置された太陽電池と同タイプの太陽電池モジュールの発電量を利用した。劣化係数はライフサイクル評価ガイドライン⁽³⁰⁾に沿い、寿命後の発電量を 0.80 と想定してその平均である 0.90 を用いた。評価対象 1453 kW の年間発電量は、表 3 に示すように 1428 kWh/kW となった。この期間の方位南・傾斜角 30 度の日射量は 1725 kWh/m² であった。

5.2 寿命の前提条件

太陽電池モジュールなどの機器の寿命は 30 年と想定した。PCS の寿命は、ライフサイクル評価ガイドライン⁽³⁰⁾では、メガソーラー向け PCS は 10 年ごとに 10% の交換とされているが、ヒアリングから 10% のパーツのみ交換することは難しいことから、ここでは 15 年の寿命とし、1 回の交換とした。PV システム評価エリアの小型の PCS も 15 年とした。ガイドラインでも小型の PCS は 15 年の寿命としている。

5.3 ライフサイクル評価の範囲

本ライフサイクル評価では、表 4 に示すように、原料の採掘から廃棄まで評価した。また、本評価ではエネルギーと CO₂に関する検討を行い、エネルギーペイバックタイムと CO₂排出原単位を算出する。

Table 3 Assumptions related to power generation

表 3 発電量関連前提条件

設置容量 (評価対象)	1453 kW
日射量 (2008 年 4 月～2009 年 3 月の実測値)	1725 kWh/m ² (方位南、傾斜角 30 度)
年間発電量 (2008 年 4 月～2009 年 3 月の実測値)	1428 kWh/kW (評価対象 1453 kW から算出)
想定寿命	30 年 (PCS は 15 年)
劣化係数	寿命後に 0.80 とし、計算には平均値の 0.90 を使用

Table 4 LCA boundary on this study

表 4 本研究で対象としたライフサイクル評価の範囲

	原料 の 採掘	輸送	素材 の 製造	輸送	機器 の 製造	輸送	建設	運転・ 保守	輸送	廃棄
太陽電池	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
PCS	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
架台・ 基礎	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
ケーブル	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
変圧器	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
その他 周辺機器	○	○	○	△	△	○	○	○	○	○

(その他周辺機器の△については 5.4 項で説明。PCS は Power Conditioning System の頭字語、パワーコンディショナー)

5.4 LCA データ

本ライフサイクル評価で使用した LCA データを表 5～7 に示す。表 5 に示す太陽電池モジュールの LCA データは NEDO 技術開発機構によるライフサイクル評価に関する成果報告書⁽³³⁾⁽³⁶⁾より引用した。表 5 に示す太陽電池モジュールのうち、アモルファスシリコン型（単層）については 2008 年度の調査では実施されていないため、2000 年度に行われた報告書⁽³⁶⁾のデータを用いた。PCS は同ライフサイクル評価に関する成果報告書⁽³³⁾から引用し、10kW の PCS は 10kW の PCS データを、3kW の PCS については 4kW の PCS のデータを使用した。

これ以外の機器は表 2 の数量と表 6 に示すライフサイクル評価用ソフトウェア MiLCA ver1.1.2.5⁽³⁴⁾⁽³⁵⁾で計算した素材・機器のエネルギー投入量、CO₂ 排出量を組み合わせて算出した。表 6 のエネルギー投入量の計算には「エネルギー消費、高位発熱量（全量）」を使用し、CO₂ 排出量の算出には「100 年指数（IPCC, 2007）」を使用した。

架台は亜鉛めっき鋼管であるが、亜鉛めっき鋼管の情報がないため「亜鉛めっき鋼板」に「鋼管製造加工」を足し合わせて計算した。基礎には「普通鋼管」を使用した。変圧器には 500kVA 以上を対象とした「非標準変圧器」を使用し、ケーブルは導体重量を算出して「電力ケーブル」を適用した。ハンドホール、マンホールは、鉄ふたは「普通鋼」、コンクリートは「道路用コンクリート製品」を使用した。

400kW PCS を含むその他の機器についてはそれぞれの素材重量から評価を行った。ヒアリングや仕様書等から素材の重量を抽出し、素材別に計算した。ただし、この場合には素材から機器の製造までの輸送と、機器の製造が含まれないため、素材までの結果を 2 倍することで対応した。また、建設時の歩留まりとして 0.99 を使用し、ケーブルは設置時の端切れを考慮して 0.9 を使用した。

表 7 は本研究で使用した系統電力のエネルギー投入量と CO₂ 排出量である。どちらも日本を想定し、原料の採掘や輸送を含む。また、このエネルギー投入量を用いてメガソーラーが発電した電力の一次エネルギー変換を行う。

5.5 輸送に関する前提条件

表 4 に示すようにほぼ全ての機器について輸送は含まれているが、集電箱、接続箱、電線管、ブルボックス、設置棒については 5.4 で述べたように素材までの結果を 2 倍することで輸送も含めた。

機器の製造から建設までの輸送の条件を表 8 にまとめた。太陽電池モジュール、PCS については機器の製造場所の情報があるため、各工場からの輸送距離を地図上で算出した。海外製の太陽電池モジュールは輸送手段に応じて海上輸送、航空輸送のデータで計算した。海外の工場から港または空港までの距離は無視した。海上輸送、航空輸送による距離はライフサイクル評価ソフトウェア MiLCA⁽³⁴⁾⁽³⁵⁾のデータベースを用いた。海上輸送距離には Lloyd's Register Fairplay

Table 5 LCA data of PV modules and PCS

表 5 太陽電池モジュールと PCS の LCA データ

	エネルギー 投入量 [MJ]	CO ₂ 排出量 [kg CO ₂ -eq]
太陽電池モジュール ⁽³³⁾		
単結晶シリコン（14.3%） [m ²]	3,986	193.5
単結晶シリコン（ヘテロ接合）（16.6%）[m ²]	3,679	178.0
多結晶シリコン（13.9%） [m ²]	2,737	135.2
アモルファスシリコン ⁽³⁶⁾ (2000 年値) [m ²]	1,202	54.3
アモルファスシリコン／ 微結晶シリコン（タンデム）（8.6%）[m ²]	1,210	67.8
化合物半導体（CIGS 系） (10.1%) [m ²]	1,105	67.5
10 kW PCS ⁽³³⁾ [kW]	568	43.0
4 kW PCS ⁽³³⁾ [kW]	266	16.8

NEDO/MHIR：太陽光発電システムのライフサイクル評価に関する調査研究（2009）⁽³³⁾、NEDO/PVTEC：太陽光発電評価の調査研究（2001）⁽³⁶⁾から引用。括弧内の数字は文献中のモジュール効率。アモルファスシリコン（2000 年値）は効率の明記なし

Table 6 Input energy and CO₂ emissions of materials and equipment表 6 素材・機器のエネルギー投入量、CO₂ 排出量⁽³⁴⁾⁽³⁵⁾

	エネルギー 投入量 [MJ]	CO ₂ 排出量 [kg CO ₂ -eq]
普通鋼 [kg]	29.2	1.86
普通鋼管 [kg]	31.3	1.88
電磁鋼 [kg]	35.2	2.20
亜鉛めっき鋼板 [kg]	35.0	2.41
钢管製造加工 [kg]	10.8	0.76
アルミニウム版材 [kg]	121	11.1
道路用コンクリート製品 [kg]	3.22	0.203
電力ケーブル (導体重量あたり) [kg]	107	6.06
伸銅品 [kg]	45.2	2.77
ポリエチレン [kg]	65.0	1.88
塩化ビニル樹脂 [kg]	65.5	3.37
エポキシ樹脂 [kg]	122	6.63
非標準変圧器 [kVA]	143	34.3

MiLCA ver1.1.2.12、IDEA ver.1.1.0⁽³⁴⁾⁽³⁵⁾で計算。エネルギー投入量の計算には「エネルギー消費、高位発熱量（全量）」、CO₂ 排出量の算出には「地球温暖化、100 年指数（IPCC, 2007）」を使用

Table 7 Input energy and CO₂ emissions of electricity in Japan表 7 系統電力（日本、受電端）の
エネルギー投入量と CO₂ 排出

項目	数量
系統電力（日本）の 1 kWh あたり のエネルギー投入量 ⁽³⁴⁾⁽³⁵⁾	10.49 [MJ/kWh]
系統電力（日本）の 1 kWh あたり の CO ₂ 排出量 ⁽³⁴⁾⁽³⁵⁾	0.568 [kg CO ₂ -eq/kWh]

「Ports & Terminals Guide 2003-2004」等が用いられ、航空輸送による距離は大圈距離が用いられている。その他の機器の輸送距離は、近隣から調達したと想定し、100kmとした。

表8に示すように、陸上輸送に用いた燃料消費率は経済産業省、国土交通省がまとめているロジスティクス分野におけるCO₂排出量算定方法共同ガイドライン Ver.3.0⁽³⁷⁾を参考し、最大積載量10トンのデータを使用した。積載率は、積載率が不明な場合に使用する62%を使用した。海上輸送の燃料消費率は4000TEU以下(TEUは20フィートコンテナ換算の単位)のコンテナ船のデータを使用し、航空輸送の燃料消費率は国際線貨物のデータを使用した。軽油、C重油、ジェット燃料のエネルギー投入量、CO₂排出量は、原料の採掘から燃焼までを考慮したデータを採用した。

Table 8 Assumptions for transportation between manufacturing and construction of equipment

項目	数量
陸上輸送燃料消費率 ⁽³⁷⁾ (トラック、最大積載量10t)	0.0504 [l-diesel oil/(t·km)]
積載率 ⁽³⁷⁾	62 [%]
軽油のエネルギー投入量*	40.4 [MJ/l]
軽油のCO ₂ 排出量*	2.91 [kg CO ₂ -eq/l]
海上輸送燃料消費率(コンテナ船、<4000TEU)	0.00776 [kg-heavy oil/(t·km)]
C重油の投入エネルギー*	47.6 [MJ/kg]
C重油のCO ₂ 排出量*	3.57 [kg CO ₂ -eq/kg]
航空輸送燃料消費率 (国際貨物)	0.199 [l-jet oil/(t·km)]
ジェット燃料の 投入エネルギー*	38.6 [MJ/l]
ジェット燃料のCO ₂ 排出量*	2.76 [kg CO ₂ -eq/l]
輸送距離(製造→建設)	陸上輸送:工場または港、空港から設置場所までの距離を地図上から算出 海上輸送・航空輸送:各国の港・空港から到着港・空港、到着港・空港から現地まで(海外工場から港・空港までは無視)

* 原料の採掘から燃焼までを考慮

Table 9 Data for intermediate treatment and landfill
表9 中間処理、埋め立てに使用したデータ⁽³⁸⁾

項目	数量
中間処理	
処理対象重量あたり電力	15.3 [kWh/t]
処理対象重量あたり軽油	2.2 [l/t]
埋め立て	
処理対象重量あたり電力	2.0 [kWh/t]
処理対象重量あたり軽油	0.94 [l/t]

5.6 建設に関する前提条件

建設は、ブルドーザーを用いた不陸整正のみを対象とした。設置された土地面積100,000m²に対し、建設機械経費の積算⁽³⁹⁾を参照しながら軽油1リットルあたりの不陸整正面積を11m²/lとして算出した。手作業のエネルギー投入量、CO₂排出量は無視した。

5.7 廃棄に関する前提条件

廃棄は、中間処理で細かく碎き、産業廃棄物としての埋め立てを想定する。表9に示す中間処理と埋め立てに必要な電力と軽油は、社団法人 産業環境管理協会、JEMAI-LCA Pro用オプションデータパック 手引きと解説⁽³⁸⁾のデータを利用した。輸送は陸上輸送とし、距離は中間処理場まで100km、最終処分場まで100kmと想定した。前提条件は表8の陸上輸送に関する前提条件と同様の数値を使用した。

6. 評価結果

以上の前提条件から、北杜サイト太陽光発電所の表1に示す22種の太陽光発電システム(1453kW)を評価した。図4に結果を示す。エネルギー投入量、CO₂排出量どちらも太陽電池モジュールが最も多くなり、次いで架台、杭基礎である。ケーブル等の配線や、それらをまとめる電線管・マンホールなどの配管も無視できない。発電量、寿命を考慮すると、エネルギーペイバックタイムは2.6年、CO₂排出原単位は50.1 g CO₂-eq/kWhと算出された。また、図5では電力中央研究⁽²⁰⁾による電源別のCO₂排出原単位に本研究の結果を載せた。本研究で得られたCO₂排出原単位は既存の火力発電と比較して非常に小さく、環境負荷低減の効果があると言える。

7. 感度分析(リサイクル効果の検討)

ここでは太陽電池モジュールのリサイクルによるエネルギー・CO₂の削減効果と、架台・杭基礎を太陽電池の寿命の2倍としたケースについて検討する。

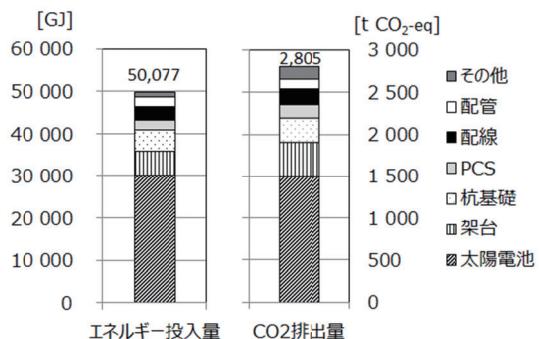


Fig.4 Energy consumption and CO₂ emissions of the Hokuto mega-solar plant (covering 1453kW)

図4 北杜サイト太陽光発電所全体(対象1453kW)のエネルギー投入量とCO₂排出量

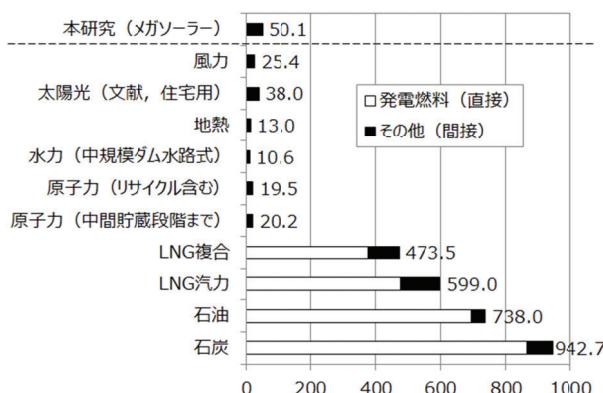


Fig.5 CO₂ emissions rate (g CO₂-eq/kWh) of power generation systems. A result of this paper (covering 1453kW) and of reference from CRIEPI.

図5 北杜サイト太陽光発電所全体（対象 1453kW）のCO₂排出原単位 (g CO₂-eq/kWh) と電力中央研究所による電源別CO₂排出原単位⁽²⁰⁾の比較
(本研究はメガソーラーを対象にしているのにに対し、文献は住宅用を想定。前提条件が異なるため結果が異なる)

太陽電池のリサイクル手法に関する研究は多く進められているところである⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾⁽⁴⁰⁻⁴³⁾。NEDO技術開発機構は住宅用4kW、公共・産業等用10kW太陽光発電システムのリサイクルを含めた評価を行った⁽³³⁾。5種類の太陽電池（単結晶シリコン、多結晶シリコン、単結晶シリコン（ヘテロ結合）、アモルファスシリコン／微結晶シリコン（タンデム）、化合物半導体（CIGS系））を、寿命を20年、日射量を1342kWh/m²/年、システム出力係数は住宅用0.74、公共・産業用等0.79として評価した。また、同報告書では「リサイクル基本ケース」と「リサイクル促進ケース」の2つのケースについて検討が行われている。リサイクル基本ケースではフレームと端子ボックス、電極材料である銅リボンを対象とし、リサイクル促進ケースではこれらに加えてガラスが加わり、結晶Si太陽電池モジュールではSiセル原料が回収・リサイクルされる。ここではこの結果を利用し、リサイクル効果を検討する。リサイクルによる太陽電池モジュールのエネルギー投入量、CO₂排出量の削減量を表10に示す。

周辺機器のリサイクルについては、LCAデータベース上で既に現在行われているリサイクル分が考慮されていることから、ここでは周辺機器のリサイクルの感度分析は行わない。ただし、架台や杭基礎の寿命は太陽電池モジュールで想定した30年より長期にわたって利用できる可能性があることから、架台と杭基礎のみ60年利用したケースについて感度分析を行った。

上記の条件で、北杜サイト太陽光発電所に適用した場合のエネルギー投入量、CO₂排出量、エネルギーペイバックタイム、CO₂排出原単位を算出した。結果を表11、図6に示す。エネルギー投入量、CO₂排出量は、リサイクル基本ケースではエネルギー投入量は4.2%、CO₂排出量は4.3%，

リサイクル促進ケースではエネルギー投入量は13.8%、CO₂排出量は12.3%の削減効果があることが分かった。また、架台・杭基礎の寿命を60年とするとエネルギー投入量は11.2%、CO₂排出量は13.1%の削減効果があり、リサイクル基本ケースではエネルギー投入量は15.4%、CO₂排出量は17.4%の削減効果、リサイクル促進ケースではエネルギー投入量は24.9%、CO₂排出量は25.4%の削減効果がある。

また、短縮されるエネルギーペイバックタイムはリサイクル基本ケースで0.1年、リサイクル促進ケースで0.4年となった。CO₂排出原単位はそれぞれ2.2 g CO₂-eq/kWh、6.2 g CO₂-eq/kWhとなり、架台・杭基礎の寿命が60年になることでエネルギーペイバックタイムは0.3年、CO₂排出原単位は6.5 g CO₂-eq/kWh削減される。

Table 10 Energy and CO₂ reduction of PV modules by recycling. Basic case and advanced case.

They are obtained by NEDO.

表10 リサイクル基本ケースとリサイクル促進ケースの太陽電池モジュールのエネルギー投入量とCO₂排出量の削減量。NEDO技術開発機構による計算⁽³³⁾

	エネルギー投入量 [MJ/m ²]		CO ₂ 排出量 [kg CO ₂ -eq/m ²]	
	基本	促進	基本	促進
単結晶シリコン	-218.38	-767.31	-13.03	-38.02
多結晶シリコン	-151.09	-663.39	-8.68	-31.15
単結晶シリコン（ヘテロ結合）	-212.61	-755.37	-12.39	-37.42
アモルファスシリコン／微結晶シリコン（タンデム）	-168.51	-251.86	-10.37	-16.79
化合物半導体（CIGS系）	-229.24	-352.74	-13.31	-22.18

Table 11 Energy and CO₂ reduction of the Hokuto mega-solar plant by PV module recycling

表11 太陽電池モジュールのリサイクルによる北杜サイト太陽光発電所全体のエネルギー・CO₂の削減効果

項目	リサイクルなし	リサイクル基本ケース	リサイクル促進ケース
エネルギー投入量	50,077 [GJ] (-11.2%)	-4.2% (-15.4%)	-13.8% (-24.9%)
CO ₂ 排出量	2,805 [t CO ₂ -eq] (-13.1%)	-4.3% (-17.4%)	-12.3% (-25.4%)
EPT [年]	2.6 (-0.3)	-0.1 (-0.4)	-0.4 (-0.6)
CO ₂ 排出原単位 [g CO ₂ -eq/kWh]	50.1 (-6.5)	-2.2 (-8.7)	-6.2 (-12.7)

() 内数字は架台・杭基礎の寿命が60年のケース

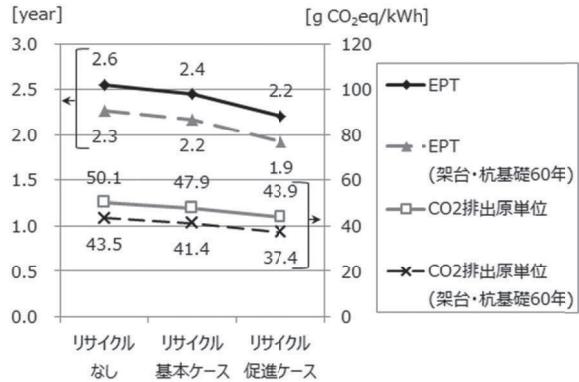


Fig.6 Comparisons of EPT and CO₂ emissions rate between recycle methods and lifetime of arrays and foundations.
(covering 1453kW, 1725 kWh/m² annual irradiation)

図6 リサイクル効果と架台・杭基礎の寿命の違いによるエネルギーペイバックタイム、CO₂排出原単位の比較
(北杜サイト太陽光発電所全体(対象1453kW)の結果。
年間傾斜面日射量 1725 kWh/m²)

8. 考察

地上設置型の太陽光発電システムのライフサイクル評価は、近年になって大型のシステムが設置されるようになったことから、そのシステムを評価した論文が見られるようになった。Desideri ら⁽²²⁾によるイタリアに設置された 1778 kW システムの評価では、実際の輸送距離なども調査して分析し、CO₂排出原単位は 106 g CO₂-eq/kWh、エネルギーペイバックタイムは 4.17 年と算出した。Desideri による評価は想定使用年数が 25 年と本研究より短く、フェンスも考慮に加えられている点が異なる。また、大きく影響する日射量が記載されていないが、25 年間の発電量 1828 MWh から推定すると日射量は年間 1300 kWh/m²程度であるため、やや大きい結果が出たと考えられる。

また、Fthenakis・Kim⁽²³⁾による AMONIX 社の集光型太陽光発電システムのライフサイクル評価では EPT は 0.9 年、CO₂排出原単位は 27 g CO₂-eq/kWh である。本システムは集光型であるため 37%と高効率の太陽電池が使用されていることや、直達日射量が約 2500 kWh/m²/年と本研究で使用した 1725 kWh/m²/年と比べてかなり大きいことから良い結果が得られたと考えられる。いずれにしても、投入したエネルギーは数年で回収され、CO₂排出原単位は化石燃料発電と比べて非常に小さい。

9. まとめ

山梨県北杜市に設置された太陽光発電システムに対してライフサイクル評価を実施した。評価にはデータが揃う 1453kW について評価し、エネルギーと CO₂の両面から評価を実施した。また、発電量は PV システム評価エリアに設置されたシステムの実測値を使用した。

エネルギーペイバックタイムは 2.6 年、CO₂排出原単位

は 50.1 g CO₂-eq/kWh と算出され、環境負荷低減の効果があることが分かった。現在の技術で実施できる太陽電池モジュールのフレームや端子ボックス、銅リボンをリサイクルするだけで、システム全体に対してエネルギー投入量は 4.2%，CO₂排出量 4.3%削減できる。また、ガラスやセル(シリコン基板)のリサイクルによりエネルギー投入量は 13.8%，CO₂排出量は 12.3%削減できる。また、架台や基礎を 60 年使用し、ガラス、セルを含めたリサイクルによりエネルギー投入量は 24.9%，CO₂排出量は 25.4%削減できることが分かった。

謝辞

多大なるサポートを頂いた NEDO 技術開発機構、多くのご指導を頂いた査読者の方々、またこのような場を設けて頂いた学会関係者に、心より謝意を表す。

参考文献

- K. Sakaki, K. Yamada, CO₂ mitigation by new energy systems, Energy Conversion and Management, 38 (1997) S655-S660.
- K. Kato, A. Murata, K. Sakuta, Energy pay-back time and life-cycle CO₂ emission of residential PV power system with silicon PV module, Progress in Photovoltaics, 6-2 (1998) 105-115.
- A.N. Celik, T. Muneer, P. Clarke, Optimal sizing and life cycle assessment of residential photovoltaic energy systems with battery storage, Progress in Photovoltaics, 16-1 (2008) 69-85.
- R. Laleman, J. Albrecht, J. Dewulf, Life Cycle Analysis to estimate the environmental impact of residential photovoltaic systems in regions with a low solar irradiation, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15-1 (2011) 267-281.
- N. Jungbluth, Life cycle assessment of crystalline photovoltaics in the swiss ecoinvent database, Progress in Photovoltaics, 13-5 (2005) 429-446.
- V. Fthenakis, E. Alsema, Photovoltaics energy payback times, greenhouse gas emissions and external costs: 2004 - early 2005 status, Progress in Photovoltaics: Research and Application, 14-3 (2006) 275-280.
- H.C. Kim, V. Fthenakis, J.-K. Choi, D.E. Turney, Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Thin-film Photovoltaic Electricity Generation, Journal of Industrial Ecology, 16 (2012) S110-S121.
- H.C. Kim, V.M. Fthenakis, Comparative life-cycle energy payback analysis of multi-junction a-SiGe and nanocrystalline/a-Si modules, Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 19 (2011) 228-239.
- N.J. Mohr, J.J. Schermer, M.A.J. Huijbregts, A. Meijer, L. Reijnders, Life cycle assessment of thin-film GaAs and GaInP/GaAs solar modules, Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 15-2 (2007) 163-179.
- M. Held, Life Cycle Assessment of CdTe Module Recycling, 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference,

- Hamburg, Germany (2009) 2370-2375.
- (11) K. Komoto, H. Uchida, K. Kurokawa, A. Inaba, Estimation of Energy Payback Time and CO₂ Emission of Various Kind of PV Systems, 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference, Valencia (2008) 3833-3835.
 - (12) 木村真典, 泉二敏郎, 新規EVA剥離剤による太陽電池モジュール高度リサイクル技術の開発, 太陽エネルギー, 38-6 (2012).
 - (13) M. Ito, K. Kato, H. Sugihara, T. Kichimi, J. Song, K. Kurokawa, A preliminary study on potential for very large-scale photovoltaic power generation (VLS-PV) system in the Gobi desert from economic and environmental viewpoints, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 75 (2003) 507-517.
 - (14) M. Ito, K. Komoto, K. Kurokawa, Life-cycle analyses of very-large scale PV systems using six types of PV modules, *Current Applied Physics*, 10 (2010) S271-S273.
 - (15) M. Ito, K. Kato, K. Komoto, T. Kichimi, K. Kurokawa, A comparative study on cost and life-cycle analysis for 100 MW very large-scale PV (VLS-PV) systems in deserts using m-Si, a-Si, CdTe, and CIS modules, *Progress in Photovoltaics: Research and Application*, 16-1 (2008) 17-30.
 - (16) D. Zhang, S. Tang, B. Lin, Z. Liu, X. Zhang, D. Zhang, Co-benefit of polycrystalline large-scale photovoltaic power in China, *Energy*, 41 (2012) 436-442.
 - (17) Á.A. Bayod-Rújula, A.M. Lorente-Lafuente, F. Cirez-Oto, Environmental assessment of grid connected photovoltaic plants with 2-axis tracking versus fixed modules systems, *Energy*, 36 (2011) 3148-3158.
 - (18) K. Tahara, T. Kojima, A. Inaba, Evaluation of CO₂ payback time of power plants by LCA, *Energy Conversion and Management*, 38 (1997) S615-S620.
 - (19) V.M. Fthenakis, H.C. Kim, Quantifying the life-cycle environmental profile of photovoltaics and comparisons with other electricity-generating technologies, Conference Record of the 2006 IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Vols 1 and 2 (2006) 2477-2480.
 - (20) 今村栄一, 長野浩司, 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 研究報告: 09027, 電力中央研究所 (2010).
 - (21) J.E. Mason, V.M. Fthenakis, T. Hansen, H.C. Kim, Energy payback and life-cycle CO₂ emissions of the BOS in an optimized 3.5 MW PV installation, *Progress in Photovoltaics*, 14-2 (2006) 179-190.
 - (22) U. Desideri, S. Proietti, F. Zepparelli, P. Sdringola, S. Bini, Life Cycle Assessment of a ground-mounted 1778kWp photovoltaic plant and comparison with traditional energy production systems, *Applied Energy*, 97 (2012) 930-943.
 - (23) V.M. Fthenakis, H.C. Kim, Life cycle assessment of high-concentration photovoltaic systems, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* (2012).
 - (24) NEDO 技術開発機構, NTT ファシリティーズ, 北杜市, 大規模電力供給用太陽光発電系統安定化等実証研究(北杜サイト) (2011).
 - (25) M. Ito, M. Kuro, K. Kurokawa, A preliminary life-cycle analysis of a mega-solar system in Japan, Technical Digest of the International PVSEC-17, Fukuoka (2007) 508-511.
 - (26) M. Ito, M. Kudo, M. Nagura, K. Kurokawa, A comparative study on life cycle analysis of 20 different PV modules installed at the Hokuto mega-□ solar plant, *Progress in Photovoltaics: Research and Application*, 19 (2011) 878-886.
 - (27) LCA 日本フォーラム, JLCA-LCA データベース, <http://lca-forum.org/>.
 - (28) Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Ecoinvent, <http://www.ecoinvent.ch/>.
 - (29) NREL, U.S. LCI Database <http://www.gabi-software.com/databases/us-lci-database/>.
 - (30) V. Fthenakis, R. Frischknecht, M. Raugei, H.C. Kim, E. Alsema, M. Held, M.d. Wild-Scholten, Methodology Guidelines on Life Cycle Assessment of Photovoltaic Electricity, IEA PVPS Task 12, 2nd edition (2011).
 - (31) IPCC, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (2007).
 - (32) IPCC, Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (1995).
 - (33) NEDO 技術開発機構, みずほ情報総研株式会社, 太陽光発電システム共通基盤技術研究開発 太陽光発電システムのライフサイクル評価に関する調査研究 (2009).
 - (34) 産業環境管理協会, LCA システム MiLCA ver.1.1.2.12.
 - (35) 産業技術総合研究所/産業環境管理協会, LCI データベース IDEA ver.1.1.0.
 - (36) NEDO 技術開発機構, 太陽光発電技術研究組合, 太陽光発電システム実用化技術開発 太陽光発電利用システム・周辺技術の研究開発 「太陽光発電評価の調査研究」 (2001).
 - (37) 経済産業省, 国土交通省, ロジスティクス分野におけるCO₂排出量算定方法 共同ガイドライン Ver.3.0 (2007).
 - (38) 社団法人産業環境管理協会, JEMAI-LCA Pro 用オプションデータパック 手引きと解説.
 - (39) 建設機械経費積算研究会, 建設機械経費の積算, 財團法人経済調査会 (1990).
 - (40) V.M. Fthenakis, End-of-life management and recycling of PV modules, *Energy Policy*, 28-14 (2000) 1051-1058.
 - (41) N. Urashima, M. Izumina, A. Arita, K. Matsumoto, Research & development on recycling technology of photovoltaic power generation systems - social system for PV recycling, 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Osaka (2003) 1985-1987.
 - (42) A. Müller, K. Wambach, E. Alsema, Life Cycle Analysis of Solar Module Recycling Process, *MRS Proceedings*, 895 (2011).
 - (43) NEDO 技術開発機構, 太陽光発電技術研究組合, シャープ, 昭和シェル, 旭硝子, 産業技術総合研究所, 太陽光発電システムのリサイクル・リユース処理技術等の研究開発, 太陽光発電技術研究開発 太陽光発電システム共通基盤技術研究開発 (2006).