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 讓*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 1453kW 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% CO_2 emissions can be reduced. Advanced recycling can reduce 13.8% of energy consumption and 12.3% of CO_2 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(14)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

*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2-12-1) e-mail: masakazu ito@cea fr (当時の成果。現在日本学術振興会 海外特別研究員) *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 理工学研究科 電子物理工学専攻 *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)

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

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そ 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 エネルギーペイバックタイム

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ペイバ ックタイムを算出する。エネルギーペ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。エネルギーペイバッ 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。

$EPT = \frac{1}{E}$	$\frac{E_{total}}{T_{agen}/\eta_G}$
$=\frac{E_{mat}}{E_{mat}}$	$+ \frac{E_{manuf} + E_{trans} + E_{inst} + E_{0\&M} + E_{EOL}}{E_{eol}} \cdots (1)$
ここで,	E_{agen}/η_G
EPT	:エネルギーペイバックタイム [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	, 年期丞電電力具 [1/年]

 E_{agen} : 年間発電電力量 [J/年]

η₆: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 324 t 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	$F_{total} imes 10^{6}$
$g_{CO_2} = \frac{1}{l}$	$E_{agen} \cdot L_{PV}$
G_{mat}	$+ G_{manuf} + G_{trans} + G_{inst} + G_{0\&M} + G_{EOL}) \times 10^{6}$
_	$E_{agen} \cdot L_{PV}$
	• • (2)
ここで,	
g_{CO_2}	: CO ₂ 排出原単位 [g CO ₂ -eq/kWh]
G_{total}	: ライフサイクルを通した CO ₂ 排出量 [t CO ₂ -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 1839 kW である。本メガソーラの概略図を図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)

毎粒 マーカ		導入量	評価
个里天只	×—,	(kW)	対象
	シャープ	30	0
	MOTECH	10	0
	KPE(旧 Photon)	10	0
	E-TON	10	0
単結晶	Isofoton	30	\bigcirc
シリコン	GE	30	\bigcirc
	Suntech	10	
	SunPower	50	
	SunPower	10	
	SunPower	200	
光空日	三洋電機	20	\sim
甲枯百	(現パナソニック)	30	0
$(\pm A)$	三洋電機	400	~
(ヘアロ接合)	(現パナソニック)	400	0
	シャープ	30	0
	京セラ	100	\bigcirc
	京ヤラ	10	
	二差雷機	30	\bigcirc
	—没电10g	10	\bigcirc
多結晶	Q-Cells ErSol	10	0
シリコン	EISUI Counto ala	20	0
	DD Calar	30	
	BP Solar	10	0
	Day4Energy	30	
	泉セフ	400	0
	泉セフ	10	
アモルファス	カネカ	30	0
シリコン	富士電機システムズ	10	
アモルファス	力ネカ	10	0
シリコン/微			
結晶シリコン	三菱重工業	10	\bigcirc
(タンデム)			
化合物半道体	昭和シェルソーラー	30	0
化口初十等件 (CICS 系)	昭和シェルソーラー	200	0
(CIUS 示)	ホンダソルテック	3	0
	ソーラーシリコン	20	
球状シリコン	テクノロジー	20	
リボン	0.1 / 0.1	20	
シリコン	Schott Solar	30	
集光2軸追尾	シャープ	3	
	大同メタル工業		
半板 l 軸追尾	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, SunPower 200kW 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。 400kW PCS の内部構成はヒアリング から重量を決めた。400kW PCS 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 600V CE (架橋ポリエチレン絶縁耐熱性ポリエチレンシースケー ブル)と 600V CET (架橋ポリエチレン絶縁耐熱性ポリエ チレンシースケーブルトリプレックス)が用いられている。 電線菅は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, 露出プルボックス 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	亜鉛めっき鋼鋼管
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
4001-W DCC	2.5 台	鉄 890kg, 銅 460kg, アルミ
400KW PCS (問惑日)	(4.4 項	80kg, 樹脂 60kg, ケーブル
(開発面)	参照)	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
600V CE250sq	1.8 km	タ ⁽³⁴⁾⁽³⁵⁾ を使用して算出
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	Assun	ptions 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	1725 kWh/m ² (方位南, 傾斜
年3月の実測値)	角 30 度)
年間発電量(2008年4月~	1428 kWh/kW (評価対象
2009年3月の実測値)	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 4LCA boundary on this study

表4 本研究で対象とした	ライフサイ	ウル評価の範囲
--------------	-------	---------

	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	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PCS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
架台・ 基礎	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ケーブル	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
変圧器	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
その他 周辺機器	0	0	0	\triangle	\bigtriangleup	0	0	0	0	0

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 verl.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鋼管であるが、亜鉛めっき鋼鋼管の 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、プルボックス、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	ールと	PCS	Sの	LCA	データ	7

	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)	L	
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,	CO ₂ 排出量 ^{(34) (35)}
----	-----	-------	---------	--

	エネルギー	CO ₂ 排出量
	投入量 [MJ]	[kg CO ₂ -eq]
普通鋼 [kg]	29.2	1.86
普通鋼鋼管 [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
鋼管製造加工 [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	2 22	0 202
[kg]	3.22	0.203
電力ケーブル	107	6.06
(導体重量あたり)[kg]	107	0.00
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

	2
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圏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 参照し,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
manufa	acturing and construction of equipment

表8 機器の製造から建設までの輸送に関する前提条件(34)(35)

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 CO2 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
o		

衣子 中間処理, 理の立てに使用した/ グ		
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 [1/t]	

5.6 建設に関する前提条件

建設は、ブルドーザ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 11m²/1 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、中間処理で細かく砕き、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50.1gCO₂eq/kWhと算出された。また,図5では 電力中央研究^{CO}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





- 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⁽³⁾

	エネルギー投入量		CO ₂ 排出量	
	$[MJ/m^2]$		$[kg CO_2 - eq/m^2]$	
	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	-16.7 9
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	レのリサイ	ウルによる北杜
------	-----------	-------	---------

サイト太陽光発電所全体のエネルギー・CO2の削減効果					
TT 17	リサイクル	リサイクル	リサイクル		
項日	なし	基本ケース	促進ケース		
エネルギー	50,077 [GJ]	-4.2%	-13.8%		
投入量	(-11.2%)	(-15.4%)	(-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。Dresideri 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, <u>38</u> (1997) S655-S660.
- (2) 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, <u>6</u>-2 (1998) 105-115.
- (3) A.N. Celik, T. Muneer, P. Clarke, Optimal sizing and life cycle assessment of residential photovoltaic energy systems with battery storage, Progress in Photovoltaics, <u>16</u>-1 (2008) 69-85.
- (4) 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, <u>15</u>-1 (2011) 267-281.
- (5) N. Jungbluth, Life cycle assessment of crystalline photovoltaics in the swiss ecoinvent database, Progress in Photovoltaics, <u>13</u>-5 (2005) 429-446.
- (6) V. Fthenakis, E. Alsema, Photovoltaics energy payback times, greenhouse gas emissions and external costs: 2004 - early 2005 status, Progress in Photovoltaics: Research and Application, <u>14</u>-3 (2006) 275-280.
- (7) 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, <u>16</u> (2012) S110-S121.
- (8) 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, <u>19</u> (2011) 228-239.
- (9) 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, <u>15</u>-2 (2007) 163-179.
- (10) 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,<u>38</u>-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, <u>75</u> (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, <u>10</u> (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, <u>16</u>-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, <u>41</u> (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, <u>36</u> (2011) 3148-3158.
- (18) K. Tahara, T. Kojima, A. Inaba, Evaluation of CO₂ payback time of power plants by LCA, Energy Conversion and Management, <u>38</u> (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, <u>97</u> (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-I solar plant, Progress in Photovoltaics: Research and Application, <u>19</u> (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, <u>2nd edition</u> (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,財団 法人経済調査会 (1990).
- (40) V.M. Fthenakis, End-of-life management and recycling of PV modules, Energy Policy, <u>28</u>-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, <u>895</u> (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).