

### S - 3 脱温暖化社会に向けた中長期的政策オプションの多面的かつ総合的な評価・予測・立案 手法の確立に関する総合研究プロジェクト

#### 3. 都市に対する中長期的な二酸化炭素排出削減策導入効果の評価

##### (4) 都市への燃料電池と太陽電池導入によるエネルギー削減効果

成蹊大学

工学部

山田興一

< 研究協力者 > 成蹊大学工学部  
信州大学繊維学部

岩崎 博  
高橋伸英

#### [ 要旨 ]

住宅用系統連携太陽光発電システムのLCA評価を行った。太陽電池は多結晶シリコンとし、システム容量は3.5kWを想定した。分析したケースは現状としてのCase 1 - セル効率15%、セル生産規模10MW/y、将来の技術向上、生産規模増大を想定したケースとして、Case 2 - セル効率17%、セル生産規模1GW/y、およびCase 3 - セル効率20%、セル生産規模100GW/yの3ケースである。

エネルギー投入量はBOSも含んだ値として、Case 1、Case 2、Case 3について、それぞれ31MJ/Wp、17MJ/Wp、11MJ/Wpとなった。投入コストはそれぞれ710円/W、380円/W、290円/Wとなり、太陽光発電システム設置価格の推移データから、Case 1の投入コストは2002年に達成されており、Case 2、Case 3の投入コストはそれぞれ2009年、2012年に到達されると予測された。発電コストは現状のケースでは51円/kWhと高いが、Case 3では20円/kWhまで低減され、電気事業用電力と競合できるレベルになる。さらにコストを削減するには、保護ガラス、鉄鋼、アルミなどの構造材の高強度化、高耐食化、リサイクル利用が必要である。

CO<sub>2</sub>排出原単位はCase 1、Case 2、Case 3について、それぞれ22g-C/kWh、12g-C/kWh、8.4g-C/kWhと計算され、将来ケースでは電気事業電力のCO<sub>2</sub>排出原単位の約10分の1以下になる。

都市への太陽光発電システム導入を検討する手始めとして、中規模都市の代表として宇都宮市を選択し、太陽光発電ポテンシャルを推定した。その結果、宇都宮市の住居地域の建築面積に全て太陽電池を敷き詰めた場合、宇都宮市の電力需要量の5倍の発電量となり、電力需要を賄うに十分な面積が存在することが明らかになった。

#### [ キーワード ]

太陽光発電システム、LCA評価、発電コスト、CO<sub>2</sub>排出原単位、宇都宮

#### 1. はじめに

我が国の温室効果ガスの排出量の約9割はエネルギー起源のCO<sub>2</sub>である。エネルギー起源のCO<sub>2</sub>排出を部門別で見ると、産業部門が最も多く、運輸部門、業務その他部門、そして家庭部門の順となるが、2001年度の排出量を1990年度比で見た場合、産業部門が - 5.1%と削減されているのに対し、運輸部門が + 22.8%、業務その他部門が + 30.9%、家庭部門が + 19.4%の増加となっている<sup>1)</sup>。これら3部門の増加は、オフィスビルや商業施設等の床面積の増大や、家庭における家電製品

の使用の増加、社用車・自家用車等の保有台数の増加等により引き起こされていると考えられ、早急に何らかの対策を施す必要がある。オフィス、商業施設あるいは家庭におけるエネルギー起源のCO<sub>2</sub>排出量を削減するための一つの方策は、CO<sub>2</sub>排出原単位の小さいエネルギー源への代替であり、太陽電池、燃料電池はその有力な候補となりうる。

太陽電池の導入は主に既存の発電施設のない遠隔地から始まったが<sup>2)</sup>、太陽エネルギーを直接電気エネルギーに変換できる簡便性、住居の屋根や壁面への設置の容易さ、既存の発電設備とも連携できることから、都市部での導入も進んだ<sup>3)</sup>。特に日本は資源に乏しいため、太陽光発電に掛ける期待は大きく、また最も重要な地球温暖化対策の一つと目され、30年前から研究開発が進められてきた。政府主導の助成制度の後押しを受けて、一般家庭への導入も急速に進み、現在では生産量、累積導入量でも世界第一位となっている<sup>1)</sup>。

技術開発による性能の向上、または生産規模の増大により、コストダウンは達成されてきたが、太陽光発電システムの普及をさらに促進するためには、更なるコストの削減が最重要課題である。現状では45円/kWhの発電コストと見積もられているが<sup>5)</sup>、系統電力と競合するためには、従量電灯電力料金(23円/kWh)、あるいは、業務用電力料金(14円/kWh)並みに発電コストを低減する必要がある。経済性改善のための技術課題を明らかにするために、まず現状のコストの内訳を明らかにし、さらには想定される将来的な性能向上に対するコスト削減効果を検討する必要がある。

太陽電池の都市への導入によるCO<sub>2</sub>削減効果については、Kraines, *et al.*<sup>4)</sup>が東京を対象として系統連携住宅用太陽光発電システムの導入を検討しており、利用可能な建物の屋根または屋上の全てを利用した場合、電力需要の12%が太陽光発電により賄われ、同じ割合のCO<sub>2</sub>を削減できるとしている。太陽電池モジュールを設置できる面積は土地利用形態、建物の種類によって大きく異なり、電力需要も地域によって異なる。住宅地域では太陽光発電システムを設置可能な面積に敷き詰めることにより、概ねその地域での電力需要を満たすことができるが、工業地区では40-70%程度に留まるという試算もある<sup>3)</sup>。太陽光発電システム導入によるCO<sub>2</sub>排出削減量を推定するためには、このような都市の地域差を考慮する必要がある。

## 2．研究目的

本研究では、分散電源としての住宅用太陽光発電システムを都市部に導入することを想定し、まずは太陽光発電システムの導入の可能性を検討するために、現状技術および将来技術によるシステムのエネルギー投入量、システムコスト、発電コストおよびCO<sub>2</sub>排出量をLCA手法を用いて評価する。また、最終的には日本全土を対象とし、太陽光発電システム導入によるCO<sub>2</sub>排出削減量の推定を目的とするが、全ての都市を網羅し、解析対象とすることは現実的ではない。そこで、気象条件、人口規模、都市形態などを考慮して代表的な都市を選定し、まずは代表都市での解析を行い、日本全土へと展開する。本研究では、中規模都市の代表として選定された宇都宮市を対象とし、宇都宮市における太陽光発電ポテンシャルの算定を行う。

## 3．研究方法

### (1) 住宅用系統連携多結晶シリコン太陽電池発電システムのLCA評価<sup>6)</sup>

導入するシステムは、屋根置き住宅用系統連携太陽光発電システムであり、発電容量は3.5kWとした。太陽電池は将来の大規模生産に適している多結晶シリコンとした。

将来の太陽電池の需要増に備え、原料の安定供給を確保するために、珪石を原料とする。原料珪石を水ガラス化し、塩酸との脱水縮合により析出したシリカゲルを乾燥、脱水させ、高純度(5N) SiO<sub>2</sub>を得る。高純度SiO<sub>2</sub>をカーボンブラックを用いた「NEDO直接還元法」によりSiに還元し、Si中の残留炭素を除去したのち、「NEDO電磁鑄造法」によりインゴット鑄造を行う。このようにして得られたインゴットからマルチワイヤーソーにより200ミクロンの厚さのウェハを切り出し、表面処理、不純物ドーピングによるpn接合形成、電極形成などを経てセルとする。太陽電池モジュールの構造はスーパーストレート構造とし、受光面側の透明基板には熱強化白板ガラスを想定し、充填材にはEVA、裏面にはアルミニウムをフッ化ビニルフィルムで挟んだシートを用いた。このようにして形成された構造にアルミニウムフレームの枠を取り付け、太陽電池モジュールとする。

以上述べた太陽電池モジュール製造プロセスの素材投入量、エネルギー投入量に加え、原料珪石の採掘および輸送、製造設備および建屋の製造、運転エネルギー、人件費なども分析対象とした。さらに、発電システムとして、屋根に設置するための架台、系統連携を行うためのパワーコンディショナーおよび配線を加え、LCA評価を行った。

評価対象とした製造技術水準と生産規模はTable 1に示す3通りのケースとした。

Table 1 分析ケース

	Case 1	Case 2	Case 3
技術水準	現状	将来	将来
太陽電池生産規模(年産)	10MW	1GW	100GW
セル効率	15	17	20

東京の南向き屋根に30°の傾斜角で設置するとし、時間別日射量データ、月別気温データなどの気象データと、一般世帯における時間別電力需要量データを用いて、年間の有効発電量を計算した。

## (2) 宇都宮市の太陽光発電ポテンシャル推定

NEDOのホームページ<sup>7)</sup>よりダウンロードした日射量データベースMETPV-2を用いて、宇都宮市における日射量を計算した。太陽電池を南向きに、傾斜角30°で設置することを想定した。また、太陽光発電システムを設置可能な面積を推定するために、宇都宮市のホームページ<sup>8)</sup>に公開されている用途別地域の状況データを使用した。用途別の建築棟数、面積などの詳細なデータは掲載されていないが、本研究では住宅用を想定し、発電ポテンシャルの推定を目的としているため、太陽電池を設置できる地域として住居地域を選択し、それぞれの面積に法定建蔽率の上限値を掛けて最大設置可能面積を求めた。この設置可能面積全てに太陽電池を敷き詰めると仮定し、前述の方法で推定した宇都宮市の年間斜面日射量を用いて発電量を計算した。計算に当たり、太陽電池のセル効率は将来ケースの20%とし、また発電システムの出力係数は0.81と仮定した。

## 4. 結果・考察

### (1) 住宅用系統連携多結晶シリコン太陽電池発電システムのLCA評価<sup>6)</sup>

Table 2に各ケースの分析結果を示す。システム容量を固定しているため、セル効率(モジュール効率)の増大に伴い、必要モジュール面積は減少する。年間日射量は1295kWh/m<sup>2</sup>/年であり、有

効発電電力量はどのケースでも3,795kWh/年と計算された。

#### ア．エネルギー投入量およびエネルギーペイバックタイム（EPT）

結晶シリコンを用いた太陽光発電システムのエネルギー投入量については、LCAによる計算例が過去にもあるが<sup>9-13)</sup>、それらの計算結果の間にはかなりのばらつきが見られる。このばらつきの一つの原因はセル効率や、ウェハ厚さ、ウェハ切断時の損失の見積もりに対する仮定の違いであるが、主な原因は原料Siを半導体産業からのoff-grade Siを利用するか否か、利用した場合のエネルギー投入量の見積もりの違い、または結晶化プロセスの違いである<sup>13)</sup>。Alsema<sup>13)</sup>は過去の研究例を参考にし、off-grade Siのエネルギー投入量を低めに見積もり、妥当な値として、現状技術による多結晶Si太陽電池モジュールのエネルギー投入量を32MJ/Wpと計算した。この値にはモジュールのアルミフレームやBOSに対するエネルギーが含まれておらず、それらを加えると42MJ/Wpとなる。本研究のCase 1では、システム全体として31MJ/Wpという値が得られており、より低い結果となった。本研究では、原料には珪石を想定しており、off-grade Si利用の場合のエネルギー投入見積もりに関する不確実さがなく、その点ではより信頼性の高い評価であると言える。また、原料珪石の利用、さらにはインゴット鑄造法には生産性の高い「NEDO電磁鑄造法」を想定していることにより、エネルギー投入量が低減されたと考えられる。将来ケースであるCase 2およびCase 3では、それぞれCase 1の約2分の1、3分の1のエネルギー投入量となると推定された。また、EPTはCase 1の約3年からCase 3では1年まで短縮されると推定された。

Table 2 LCA分析結果

分析ケース	Case 1	Case 2	Case 3
システム容量 [kWp]	3.5		
モジュール効率[-]	0.118	0.142	0.17
モジュール面積 [m <sup>2</sup> ]	29.6	24.6	20.6
年間日射量 [kWh/m <sup>2</sup> /年]	1,295		
有効発電電力量 [kWh/年]	3,795		
耐用年数 [年]	20		
エネルギー投入量 [MJ/Wp]	31	17	11
EPT[年]	2.7	1.6	1.0
投入コスト [円/Wp]	710	380	290
年経費[千円/年]	31	9.0	7.0
発電コスト [円/kWh]	51	26	20
モジュール	36	15	10
架台/配線材料	4.6	4.1	3.7
設置工事	0.4	0.4	0.4
パワーコンディショナ	5.5	3.6	3.6
修繕・保守費用	4.4	2.3	1.8
CPT[年]	39	16	12
CO <sub>2</sub> 排出原単位 [g-C/kWh]	22	12	8.4
CO <sub>2</sub> PT[年]	2.8	1.4	1.0

#### イ．投入コストおよびコストペイバックタイム（CPT）

システムの投入コストはCase 1では710円/Wとなり、新エネルギー財団が提供している太陽光発

電システム設置価格推移データ<sup>14)</sup>における2002年度の値と等しい。本研究の結果では、Case 2、Case 3の投入コストはそれぞれ380円/W、290円/Wと推定されているが、前述の設置価格推移データ（1994年～2002年）に基づき、Case 2およびCase 3の投入コストが達成される時期を予測したところ、それぞれ2009年、2012年となった。

発電コストはCase 1では51円/kWhとなり、NEDOのロードマップ<sup>5)</sup>の値（46円/kWh）よりも若干高い値であった。将来ケースであるCase 2、Case 3ではそれぞれ26円/kWh、20円/kWhまで発電コストが低減されると推定された。Case 3の値は従量電灯電力料金を下回る値であり、そこまで低減されれば電気事業とも競合できるレベルになる。発電コストの内訳を見ると、モジュール部門が発電コストの半分以上を占めている。しかし、その割合は現状から将来にかけて低下する。これは主にウェハ製造工程の割合の顕著な低減に起因しているが、一方、モジュール部門内でもモジュール組立工程のコスト低減幅は小さく、相対的に全体に占める割合が増加し、Case 3では、モジュール部門の発電コストの約半分を占めるようになる。特に保護ガラスは全体の10%を占め、架台およびパワーコンディショナーで使用される鉄鋼、モジュール枠およびパワーコンディショナーで使用されるアルミニウムとともに、発電コストに占める割合が大きい素材である。さらに発電コストを低減するためには、これらの構造材のコストを低減する必要があり、高強度化、高耐食化、およびリサイクル使用が重要である。

CPTは現状のCase 1では39年と耐用年数の約2倍長い結果となっているが、Case 2、Case 3では耐用年数より短く、設置に掛かる費用を回収することが可能となる。

#### ウ．CO<sub>2</sub>排出原単位およびCO<sub>2</sub>ペイバックタイム（CO<sub>2</sub>PT）

CO<sub>2</sub>排出原単位はCase1、Case2、Case3でそれぞれ22 g-C/kWh、12 g-C/kWh、8.4 g-C/kWhと計算された。電気事業用電力のCO<sub>2</sub>排出原単位が114 g-C/kWh（1995年）であるので、仮に全ての電力需要を太陽光発電で賄うとすると、現在のCO<sub>2</sub>排出量の、Case2では89%、Case3では94%を削減できることになる。太陽光発電システムのCO<sub>2</sub>排出原単位は電気事業用電力に比べ各段に小さく、CO<sub>2</sub>PTも短いため、これ以上の低排出原単位のプロセスや素材を模索するよりも、やはり導入量をいかに伸ばすかがCO<sub>2</sub>排出量削減には重要となる。

#### (2) 宇都宮市の太陽光発電ポテンシャル推定

想定した太陽電池モジュールの設置方位、設置角から、宇都宮市における年間の斜面日射量は1468kWh/m<sup>2</sup>/年と計算された。また、太陽光発電システム設置面積として、第一種低層住居専用地域から準住居地域までの最大建築面積は合計で約 $3.7 \times 10^3$  haと推定された。それらの値を用い、年間発電量を計算したところ $7.4 \times 10^6$  MWh/年となった。これは宇都宮市の年間電力需要量の約5倍である。実際の建蔽率はもっと低く、また建築面積全てに設置するのは過剰な想定であるが、都市計画区域の7割を占める市街地化調整区域の利用を考えれば、電力需要量を賄うのに十分な面積が存在する。

今回の計算では発電システムの出力係数を0.81と仮定した。Ohtani, *et al.* は日本全国に導入された100基の住宅用系統連携太陽光発電システムについて長期間の測定を行い、年間通してのシステム効率が平均で0.72であったと報告している<sup>15)</sup>。出力係数は、モジュールの温度上昇や汚れなどによる効率低下、日射の不完全な利用、およびインバータ損失などを考慮したシステム効率であ

り、地域によって異なることが予想される。そのため、対象とする都市の気象データ、建物の立地条件などを考慮し発電量を計算する必要がある。

Kurokawa<sup>3)</sup>が指摘しているように、太陽光発電システムの導入初期段階は、特定の地域に導入されるシステム台数も少なく、それぞれのシステムが直接系統に連結しても問題は生じないが、コストダウンが進み、ある地域に大量に導入された場合、その大量の発電システムの連結には注意を払う必要がある。その地域特性を考慮し調和の取れた最適な連結の仕方を模索する必要がある。

今後はより現実的な計算を行うために、用途別の敷地面積、建築面積のデータおよび建物での電力消費量を調査し、必要なシステム容量および台数を算定する。また、複数の太陽光発電システムを連結する最適なネットワークシステムについても検討を行い、太陽光発電システムの都市への導入によるCO<sub>2</sub>排出削減量を推定する。

## 5．本研究により得られた成果

住宅用系統連携太陽光発電システムのLCA評価により、セル効率の向上、生産規模の増大により、発電コストを従量電灯電力料金以下に低減できることが明らかになった。さらなる経済性改善の課題は、保護ガラス、鉄鋼、アルミなどの構造材にかかるコストの低減にあることが示された。現状の投入コストは2002年の太陽光発電システム設置価格の実績値と同等であり、過去のデータからの予測として、将来のセル効率向上、生産規模増大により、2012年には従量電灯電力料金以下の発電コストが達成される見込みがあることが明らかになった。

中規模都市の代表として選択された宇都宮市において、太陽光発電ポテンシャルを推定したところ、電力需要量の約5倍の発電が可能であり、電力需要を賄うだけの十分な面積が存在することが明らかになった。

## 6．引用文献

- 1) 経済産業省、エネルギー白書2004年版, <http://www.meti.go.jp/report/whitepaper/index.html> (2004)
- 2) M. A. Green, Photovoltaic technology overview, *Energy Policy*, **28**, 989-998 (2000)
- 3) K. Kurokawa, PV systems in urban environment, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, **67**, 469-479 (2001)
- 4) S. B. Kraines, D. R. Wallace, Y. Iwafune, Y. Yoshida, T. Aramaki, K. Kato, K. Hanaki, H. Ishitani, T. Matsuo, H. Takahashi, K. Yamada, K. Yamaji, Y. Yanagisawa and H. Komiyama, An integrated Computational Infrastructure for a Virtual Tokyo, *Journal of Industrial Ecology*, **5**, 35-54 (2001)
- 5) NEDO, 2030年に向けた太陽光発電ロードマップ (PV2030) (2004)
- 6) 山田興一, 小宮山宏著, 太陽光発電工学-太陽電池の基礎からシステム評価まで-, 日経BP社, 東京 (2002)
- 7) NEDOホームページ, <http://www.nedo.go.jp/database/>
- 8) 宇都宮市データバンク, <http://www2.city.utsunomiya.tochigi.jp/DataBank/index.htm>
- 9) G. A. Keoleian, and G. M. Lewis, Application of life-cycle analysis to photovoltaic module design, *Progress in Photovoltaic: Research and Applications*, **5**, 287-300 (1997)
- 10) R. Dones and R. Frischknecht, Life cycle assessment of photovoltaic systems: results of Swiss studies on energy chains, *Progress in Photovoltaic: Research and Applications*, **6**, 117-125 (1998)

- 11) P. Frankl, A. Masini, M. Gamberale and D. Toccaceli, Simplified life-cycle analysis of PV systems in buildings - Present situation and future trends, *Progress in Photovoltaic: Research and Applications*, **6**, 137-146 (1998).
- 12) K. Kato, A. Murata and K. Sakuta, Energy payback time and life-cycle CO<sub>2</sub> emission of residential PV power system with silicon PV module, *Progress in Photovoltaic: Research and Applications*, **6**, 105-115 (1998)
- 13) E. A. Alsema, Energy Pay-back Time and CO<sub>2</sub> Emissions of PV Systems, *Progress in Photovoltaic: Research and Applications*, **8**, 17-25 (2000)
- 14) 財団法人 新エネルギー財団, <http://www.solar.nef.or.jp/index1.htm>
- 15) K. Otani, K. Kato, T. Takashima, T. Yamaguchi and K. Sakuta, Field Experience with Large-scale Implementation of Domestic PV Systems and with Large PV Systems on Buildings in Japan, *Progress in Photovoltaic: Research and Applications*, **12**, 449-459 (2004)

## 7．国際共同研究等の状況

なし

## 8．研究成果の発表状況

### ( 1 ) 誌上発表 ( 学術誌・書籍 )

<学術誌 ( 査読あり ) >

<学術誌 ( 査読なし ) >

なし

<書籍>

なし

<報告書類等>

なし

### ( 2 ) 口頭発表

なし

### ( 3 ) 出願特許

なし

### ( 4 ) 受賞等

なし

### ( 5 ) 一般への公表・報道等

なし

## 9．成果の政策的な寄与・貢献について

太陽電池、燃料電池実用化時の環境影響、コストが定量的に評価され、また実用化するための技術的課題も明確になるため、それらの大規模実用化のための政策計画立案に貢献する。