

2. 再生可能エネルギー設備の特性把握

2.1 温室効果ガス排出量及び排出削減効果の整理・把握

再生可能エネルギー設備について、ライフサイクル全体での温室効果ガスの排出量及び化石燃料と比較した排出削減効果について、文献調査等により既往の知見を整理した。

(1) 調査方法

太陽光発電等の再生可能エネルギー設備は、一旦使用済みとなった設備や部品のリユース・リサイクルを行うことで、設備製造段階のCO₂の排出削減にもつながることとなり、結果的に環境負荷の低減につながる事となる。本調査項目は、環境負荷削減効果を明らかとすることで、再生可能エネルギー設備のリユース・リサイクルを促進することを目的に実施した。

<調査項目>

- ・再生可能エネルギー設備毎のライフサイクル全体での温室効果ガス排出量
- ・化石燃料と比較した温室効果ガス排出量の削減効果

※結果のみでなく、妥当性を確認できるよう、可能な範囲で以下の情報も合わせて収集した。

算定目的、算定範囲、前提条件、算定に用いた活動量データ、算定に用いた原単位 等

本調査項目では、再生可能エネルギー設備のライフサイクル全体での温室効果ガスの排出量及び化石燃料と比較した排出削減効果について、文献調査（国会図書館、当社の資料センター、論文検索サービス（JST 文献検索サービス JDream II）等）を通じて既往の知見を整理した。調査対象文献を以下に示す。

<調査対象文献>

- ① NEDO「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年3月）
- ② （財）電力中央研究所「ライフサイクルCO₂排出量による発電技術の評価—最新データによる再推計と前提条件の違いによる影響—」（2000年3月）、（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年7月）
- ③ Marco Raugei, Silvia Bargigli and Sergio Ulgiati, “Life cycle assessment and energy pay-back time of advanced photovoltaic modules: CdTe and CIS compared to poly-Si”（2007）
- ④ E.A.Alsema 他 “Environmental Life Cycle Inventory of Crystalline Silicon Photovoltaic Module Production”（2005）
- ⑤ Paolo Frankl, Annalisa Corrado, Simona Lombardelli “Photovoltaic (PV) Systems ECLIPSE (Environmental and Ecological Life Cycle Inventories for Present and future Power System in Europe) Final Report”、(2004)
- ⑥ EPIA/BSW「STUDY ON THE DEVELOPMENT OF A TAKE BACK AND RECOVERY SYSTEM FOR PHOTOVOLTAIC PRODUCTS」（2007）
- ⑦ Vestas Wind Systems A/S “Life cycle assessment of offshore and onshore sited wind power plants based on Vestas V90-3.0 MW Turbines”（2005）
- ⑧ 法政大学大学院工学研究科機械工学専攻修士課程 町田 知聡「風力発電のライフサイクルにおける環境負荷評価」（2006年3月）
- ⑨ 足利工業大学大学院工学研究科修士課程 安達 陽介「大型風力発電装置のLCA」（平成14年度）

(2) 調査結果

調査対象とした文献は、1) 再生可能エネルギー設備導入による効果の評価、2) 再生可能エネルギー設備の種類間の比較評価、3) 再生可能エネルギー設備のリサイクル等による効果の評価の観点からレビューした。

1) 再生可能エネルギー設備導入による効果の評価

文献②（電中研）では、発電技術別のライフサイクル CO₂ 排出量を 2000 年と 2009 年の 2 時点で比較評価している。火力発電技術の CO₂ は他の技術の 10 倍以上であり、再生可能エネルギーが火力発電に比べて CO₂ 排出量が小さい結果となっている。文献⑧（法政大学）、文献⑨（足利工業大学）でも上記と同様の結果を報告している。

文献①（NEDO）では、太陽光発電システムのエネルギー・CO₂ ペイバックタイムによる評価を実施している。基本ケースのペイバックタイムはエネルギーで 1.4～3.4 年、CO₂ で 2.1～4.2 年であり、いずれも想定する使用年数よりも短い値となると報告している。

文献③（Raugei ら）も太陽光発電システムのペイバックタイムによる評価を実施しており、モジュールのみでは 0.5～4.9 年、BOS も含めたトータルでは 1.5～5.5 年との試算結果を報告している。

2) 再生可能エネルギー設備の種類間の比較評価

文献①（NEDO）では、太陽光発電システムのうちシリコン系 4 ケース + CIS 系 1 ケースのライフサイクル CO₂ 排出量の比較評価を実施している。比較結果によれば、システム当たりの CO₂ 排出量は単結晶 Si が 6,082 kg-CO₂ と最も大きく、CIS が 3,527kg-CO₂ と最も小さいという結果となっている。

文献②（電中研）では、発電技術別のライフサイクル CO₂ を 2000 年と 2009 年の 2 時点で比較評価している。結果によれば、再生可能エネルギーでは太陽光（38.0gCO₂/kWh）、風力（25.4gCO₂/kWh）、地熱（13.0gCO₂/kWh）、水力（10.6gCO₂/kWh）の順に CO₂ 排出量が大きい結果となっている（2009 年時点）。

文献③（Raugei ら）では、薄膜系（CdTe 系、CIS 系）、多結晶 Si 系の太陽光発電システムのライフサイクル GHG 排出量の比較評価を実施している。Si 系では規格外 Si の使用割合によって CO₂ 排出量は変化し、規格外 Si の使用割合が高い場合は Si 系が薄膜系の 2 倍以上、逆に低い場合は Si 系 < 薄膜系となるという結果となっている。

文献⑤（Frankl ら）では、シリコン系 3 種、CIGS 系の太陽光発電システムについてライフサイクル GHG 排出量の比較評価を実施している。アモルファス Si 系（50kgCO₂e/m²）、CIGS 系（90kgCO₂e/m²）、多結晶 Si 系・単結晶 Si 系（いずれも 150kgCO₂e/m²）の順に GHG 排出量が小さい結果となっている。

文献⑦（Vestas）では、風力発電システムについて、洋上プラントと陸上プラントの地球温暖化への寄与度等について推計している。洋上プラントの方が、陸上プラントよりも地球温暖化への寄与度は高い（発電量が小さい年間 6,000MWh 程度の場合、洋上プラントは陸上プラントの 2 倍の寄与度となる）こと、洋上プラント、陸上プラントともに発電量が増加（設備利用率が向上）するにつれて、地球温暖化への寄与度は低下することが報告されている。

文献⑧（法政大学）では、風力発電に着目し、風力発電容量を変化させることによるライフサイクル CO2 排出量の比較評価を実施している。結果によれば、発電容量を大きくすることにより発電量当たりの CO2 排出量は小さくなる（300kW や 100kW の発電量あたり CO2 排出量はそれぞれ発電容量 1,000kW の風車の 2 倍、3 倍となる）とされている。

文献⑨（足利工業大学）では、大型の風力発電システムを対象にライフサイクル CO2 排出量を推計し、設備製造段階の CO2 排出量が全体の 8 割程度を占めているという結果を示している。また、大型化による CO2 削減メリットは顕在化しない結果となったが、単機出力の変化や耐用年数、風速等、パラメータが原単位へ与える影響を分析することによる更なる分析の可能性について言及している。

3) 再生可能エネルギー設備のリサイクル等による効果の評価

文献①（NEDO）では、太陽光発電システムに関して、リサイクルを実施しないケース、BOS（Balance Of System：架台等、太陽電池モジュール以外の部分）構成材料のリサイクルを実施したケース、モジュールのリサイクルが進展したケースのそれぞれについて、ライフサイクル CO2 排出量の比較評価を実施している。評価結果によれば、リサイクルがより促進することにより CO2 排出量は 20%～40% 近く削減され、特に単結晶 Si 系モジュールにおいてその差が顕著であるとされている。

文献⑤（Frankl ら）では、シリコン系 3 種、CIGS 系の太陽光発電システムについてライフサイクル CO2 排出量の比較評価を実施している。多結晶 Si 系については、使用済み品からの中古シリコンウェハの再利用により CO2 排出量を 70% 削減することが期待されるとされている。

文献⑥（EPIA）では、太陽光発電システムのリサイクルについて、WEEE 指令適用ケース、自主的取組ケース（WEEE 指令適用ケースに加えてガラスのリサイクルを実施）を適用した場合のライフサイクル CO2 排出量を推計している。結果は、自主取組ケースでは、WEEE ケースと比較して 2020 年時点で 1.7 倍程度の削減効果を有するとしている。

調査対象文献について、個票形式に整理した結果を次頁以降に示す。

No	1
テーマ	太陽光発電のLCA評価（住宅用および公共・産業等用太陽光発電システムの比較、ライフサイクル効果の検討）
文献名	NEDO「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年3月）
評価シナリオ	<ul style="list-style-type: none"> 太陽光発電システムのLCA結果を例示することにより、太陽光発電システムが環境に与える負荷を定量的に把握し、その環境面での効果を広く一般に周知するとともに、今後の太陽光発電システムの研究開発において、研究開発に携わる者などがより環境に配慮したシステムを開発する際に参考となる情報を提供することを目的として評価を実施。 現在国内市場に出ている5種類の太陽電池（①多結晶Si太陽電池、②単結晶Si太陽電池、③アモルファスSi/結晶Siヘテロ接合太陽電池、④薄膜Siハイブリッド太陽電池、⑤CIS系太陽電池）を対象とし、住宅用及び公共・産業等用太陽光発電システムのエネルギー・ペイバック・タイムとCO₂排出原単位等を分析
評価指標	<ul style="list-style-type: none"> CO₂、CH₄、N₂O等の温室効果ガス排出量に関連する項目だけでなく、資源消費やエネルギー消費量等についても可能な限り定量的もしくは定性的な評価を実施。 <p>【対象とする環境負荷項目】</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ 地球温暖化：CO₂、CH₄、N₂O など ➤ 大気汚染（光化学オキシダント）、酸性化：NO_x、SO_x、NMHC、PM、CO など ➤ 資源消費：金属資源（Al、Si、Fe など）、化石資源 ➤ 廃棄物：埋立廃棄物量 ➤ エネルギー消費量：エネルギー消費量（エネルギーペイバックタイムなど） ➤ オゾン層破壊：CFC、HCFC など ➤ 富栄養化：COD（洗浄工程における水の消費が多ければ考える必要有り） ➤ 化学物質：エコマーク認定基準の策定にあたり考慮された環境負荷項目として「有害物質などの使用・排出」が挙げられているが、太陽電池セルの製造工程において、フッ酸、EVA重合時に発生する酢酸ビニルガス、フッ素系ガス、イソプロピルアルコール等の有害性化学物質が使用・排出される可能性があるため、少なくとも定性的な評価が必要 <p>【評価手法】</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ 1kWhあたりの環境負荷原単位（単位列：【kg-CO₂/kWh、g-NO₂/kWh など】） ＝ ライフサイクルにおける環境負荷量 ÷ （年間発電量×使用年数） ➤ 出力1kWあたりの環境負荷量（単位列：【t-CO₂/kW、kg-NO₂/kW など】） ＝ ライフサイクルにおける環境負荷量 ÷ （システム出力）

	<ul style="list-style-type: none"> ➤ エネルギーペイバックタイム（単位：【年】） = $LCE^{59} \div \text{年間発電量}^{60}$（一次エネルギー換算） ➤ CO_2 ペイバックタイム（単位：【年】） = $LCCO_2^{61} \div (\text{年間発電量} \times \text{日本の購入電力平均の} CO_2 \text{ 排出原単位}^{62})$ 																								
仮説・前提条件	<ul style="list-style-type: none"> ・ 評価対象とした太陽光発電システムの仕様は以下のとおり。 <p style="text-align: center;">表 評価対象とした太陽光発電システムの仕様</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 30%;">システム用途</th> <th style="width: 35%;">住宅用</th> <th style="width: 35%;">公共・産業等用</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>システム構成機器</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">太陽電池モジュール パワーコンディショナ 接続箱（直流側開閉器を含む） 架台 配線材料</td> </tr> <tr> <td>システム出力規模</td> <td style="text-align: center;">4kW</td> <td style="text-align: center;">10kW</td> </tr> <tr> <td>パワーコンディショナ</td> <td style="text-align: center;">定格出力：4 kW 単相2線/3線式AC202V トランスレス絶縁方式</td> <td style="text-align: center;">定格出力：10 kW 三相3線式AC202V トランスレス絶縁方式</td> </tr> <tr> <td>設置形態</td> <td style="text-align: center;">傾斜屋根上への架台設置型</td> <td style="text-align: center;">陸屋根上への架台設置型</td> </tr> <tr> <td>設置方位・傾斜角度</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">方位：南向き 傾斜角：20度</td> </tr> <tr> <td>使用年数</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">20年 ただし、パワーコンディショナは10年で交換</td> </tr> <tr> <td>年間発電量の計算方法</td> <td colspan="2"> 「年間日射量」×「システム出力係数」により想定 <ul style="list-style-type: none"> ・ 年間日射量：日本平均（MONSOLA00(801)）による収録地点平均値（3.68kWh/m²/d=1,342 kWh/m²/年） ・ システム出力係数：住宅用0.74（990kWh/kW/年）、産業等用0.79（1,060kWh/kW/年） </td> </tr> </tbody> </table> <ul style="list-style-type: none"> ・ 評価対象とした太陽電池モジュール、BOS（パワーコンディショナ、接続箱、架台、配線材料）の仕様は以下のとおり。 	システム用途	住宅用	公共・産業等用	システム構成機器	太陽電池モジュール パワーコンディショナ 接続箱（直流側開閉器を含む） 架台 配線材料		システム出力規模	4kW	10kW	パワーコンディショナ	定格出力：4 kW 単相2線/3線式AC202V トランスレス絶縁方式	定格出力：10 kW 三相3線式AC202V トランスレス絶縁方式	設置形態	傾斜屋根上への架台設置型	陸屋根上への架台設置型	設置方位・傾斜角度	方位：南向き 傾斜角：20度		使用年数	20年 ただし、パワーコンディショナは10年で交換		年間発電量の計算方法	「年間日射量」×「システム出力係数」により想定 <ul style="list-style-type: none"> ・ 年間日射量：日本平均（MONSOLA00(801)）による収録地点平均値（3.68kWh/m²/d=1,342 kWh/m²/年） ・ システム出力係数：住宅用0.74（990kWh/kW/年）、産業等用0.79（1,060kWh/kW/年） 	
システム用途	住宅用	公共・産業等用																							
システム構成機器	太陽電池モジュール パワーコンディショナ 接続箱（直流側開閉器を含む） 架台 配線材料																								
システム出力規模	4kW	10kW																							
パワーコンディショナ	定格出力：4 kW 単相2線/3線式AC202V トランスレス絶縁方式	定格出力：10 kW 三相3線式AC202V トランスレス絶縁方式																							
設置形態	傾斜屋根上への架台設置型	陸屋根上への架台設置型																							
設置方位・傾斜角度	方位：南向き 傾斜角：20度																								
使用年数	20年 ただし、パワーコンディショナは10年で交換																								
年間発電量の計算方法	「年間日射量」×「システム出力係数」により想定 <ul style="list-style-type: none"> ・ 年間日射量：日本平均（MONSOLA00(801)）による収録地点平均値（3.68kWh/m²/d=1,342 kWh/m²/年） ・ システム出力係数：住宅用0.74（990kWh/kW/年）、産業等用0.79（1,060kWh/kW/年） 																								

⁵⁹ 太陽光発電システムのライフサイクルエネルギー消費量（燃料使用分だけではなく、燃料製造時のエネルギー消費も考慮する）

⁶⁰ 発電時および発電に使用する燃料製造時のエネルギー消費量を考慮する（エネルギーペイバックタイムのみ）

⁶¹ 太陽光発電システムのライフサイクル CO_2 排出量

⁶² 日本の購入電力平均の CO_2 排出原単位も発電用燃料の製造などライフサイクルを考慮した数値を使用する

表 多結晶Si 太陽電池モジュールの諸元

セル	セル寸法	mm	155 × 155	
	セル厚さ	mm	0.2	
	セル出力	W	3.88	
	セル効率	%	16.1	
モジュール	モジュール寸法	mm	1,326 × 1,008	
	セル枚数	枚	48 (=8×6)	
	モジュール出力	W	186	
	モジュール効率	%	13.9	
	モジュール重量	kg	16.0	
構成材料	セル	結晶シリコン	kg	0.5
	フロントカバー	ガラス	kg	10.0
	フレーム	アルミ	kg	2.5
	充填材	EVA	kg	2.8
	周辺シール	プラスチック		
	バックカバー	プラスチック		
	電極材料	銅／はんだ	kg	0.1
	端子ボックス	プラスチック	kg	0.1
システム			住宅用	公共・産業等用
	システム出力	kW	3.90	10.03
	モジュール枚数	枚	21	54

表 単結晶Si 太陽電池モジュールの諸元

セル	セル寸法	mm	155 × 155	
	セル厚さ	mm	0.2	
	セル出力	W	3.93	
	セル効率	%	16.4	
モジュール	モジュール寸法	mm	1,165 × 990	
	セル枚数	枚	42 (=7×6)	
	モジュール出力	W	165	
	モジュール効率	%	14.3	
	モジュール重量	kg	14.5	
構成材料	セル	結晶シリコン	kg	0.5
	フロントカバー	ガラス	kg	8.7
	フレーム	アルミ	kg	2.9
	充填材	EVA	kg	1.8
	周辺シール	プラスチック		
	バックカバー	プラスチック		
	電極材料	銅／はんだ	kg	0.1
	端子ボックス	プラスチック	kg	0.4
システム			住宅用	公共・産業等用
	システム出力	kW	3.96	9.90
	モジュール枚数	枚	24	60

表 アモルファスSi/単結晶Siヘテロ接合モジュールの諸元

セル	セル寸法	mm	125 × 125		
	セル厚さ	mm	0.2		
	膜厚(アモルファス Si)	nm	5 ~ 10 (片面あたり)		
	セル出力	W	2.95		
	セル効率	%	19.1		
モジュール	モジュール寸法	mm	1,443 × 812		
	セル枚数	枚	66 (=11×6)		
	モジュール出力	W	195		
	モジュール効率	%	16.6		
	モジュール重量	kg	14.0		
構成材料	セル	結晶シリコン	kg	0.5	
	フロントカバー	ガラス	kg	8.8	
	フレーム	アルミ	kg	3.0	
	充填材	EVA	kg	1.5	
	周辺シール	プラスチック			
	バックカバー	プラスチック			
	電極材料	銅/はんだ	kg	>0.1	
端子ボックス	プラスチック	kg	0.2		
システム				住宅用	公共・産業等用
	システム出力	kW	3.89	9.92	
	モジュール枚数	枚	20	51	

表 薄膜Si ハイブリッド太陽電池モジュールの諸元

サブモジュール	サブモジュール寸法	mm	910 × 455		
	膜厚(アモルファス Si)	μm	0.3		
	膜厚(微結晶 Si)	μm	2		
	サブモジュール出力*	W	37.5		
	サブモジュール効率*	%	9.1		
モジュール	モジュール寸法	mm	939 × 465		
	モジュール出力	W	37.5		
	モジュール効率	%	8.6		
	モジュール重量	kg	5.4		
構成材料	基板/ フロントカバー	ガラス	kg	4.1	
	フレーム	アルミ	kg	0.8	
	充填材	EVA	kg	0.4	
	周辺シール	プラスチック			
	バックカバー	プラスチック			
	電極材料	銅/はんだ	kg	>0.1	
	端子ボックス	プラスチック	kg	0.2	
システム				住宅用	公共・産業等用
	システム出力	kW	4.06	10.14	
	モジュール枚数	枚	108	270	

(注) サブモジュール出力はモジュール出力と同様とし、サブモジュール効率は出力と面積による単純計算

表 CIS 系太陽電池モジュールの諸元

サブモジュール	サブモジュール寸法		mm	600 × 1,200	
	膜厚		μm	3	
	サブモジュール出力 [*]		W	80	
	サブモジュール効率 [*]		%	11.1	
モジュール	モジュール寸法		mm	641 × 1,235	
	モジュール出力		W	80	
	モジュール効率		%	10.1	
	モジュール重量		kg	12.4	
構成材料	基板	ガラス	kg	3.6	
	フロントカバー	ガラス		5.6	
	フレーム	アルミ	kg	2.2	
	充填材	EVA			
	周辺シール	プラスチック	kg	0.8	
	バックカバー	プラスチック			
	電極材料	銅/はんだ	kg	>0.1	
	端子ボックス	プラスチック	kg	0.1	
システム			住宅用	公共・産業等用	
システム出力			kW	3.84	10.08
モジュール枚数			枚	48	126

(注) サブモジュール出力はモジュール出力と同様とし、サブモジュール効率は出力と面積による単純計算

表 パワーコンディショナの諸元

システム用途	住宅用	公共・産業等用
定格出力等	定格出力：4 kW 単相2線/3線式AC202V トランスレス絶縁方式	定格出力：10 kW 三相3線式AC202V トランスレス絶縁方式
製品重量	13kg/台	150kg/台
主要素材	鉄、アルミ、銅、絶縁材料等	
使用年数	10年	

表 接続箱の諸元

システム用途	住宅用	公共・産業等用
製品重量	3.4kg/台	12kg/台
主要素材	鉄、アルミ、銅、絶縁材料等	
使用年数	20年	

表 アレイ架台の諸元

システム用途	住宅用	公共・産業等用
アレイ設置方式	傾斜屋根上の架台設置型	陸屋根上の架台設置型 (傾斜角度20度)
鋼材所容量	7.5kg/m ²	20.35kg/m ²
基礎コンクリート 所要量	—	0.015m ³ /m ²

表 配線材料の諸元

システム用途	住宅用	公共・産業等用	
モジュール ～接続箱	種類	2φ単芯CV	
	単位重量	0.064kg/m	
	延長の考え方	アレイ幅×2本×アレイ段数	
接続箱～イ ンバータ	種類	8φ2芯CV	60φ2芯CV
	単位重量	0.317kg/m	1,580kg/m
	延長の考え方	20m×2本	50m×2本

- データ収集の可能性や結果に及ぼす影響等を考慮し、環境影響の大きい工程を優先的に評価し、太陽電池モジュールの製造に使用される消耗品や薬剤などの製造も考慮。また、既存の文献等では評価対象となっていない使用後処理工程も考慮し評価を実施。なお、製造・輸送等に要する設備の製造・建設は評価の対象外としている。

【評価対象とするプロセス】

- 材料となる資源の採掘工程
- 太陽光発電システムを構成する機器・素材の製造工程
- セル・モジュール製造に投入される薬品・消耗品などの製造工程
- システムの輸送（流通）工程
- システムの使用・修理・部品交換（交換部品の製造を含む）
- システムの使用後処理（廃棄・リサイクル）工程
- 素材・部品の各輸送工程

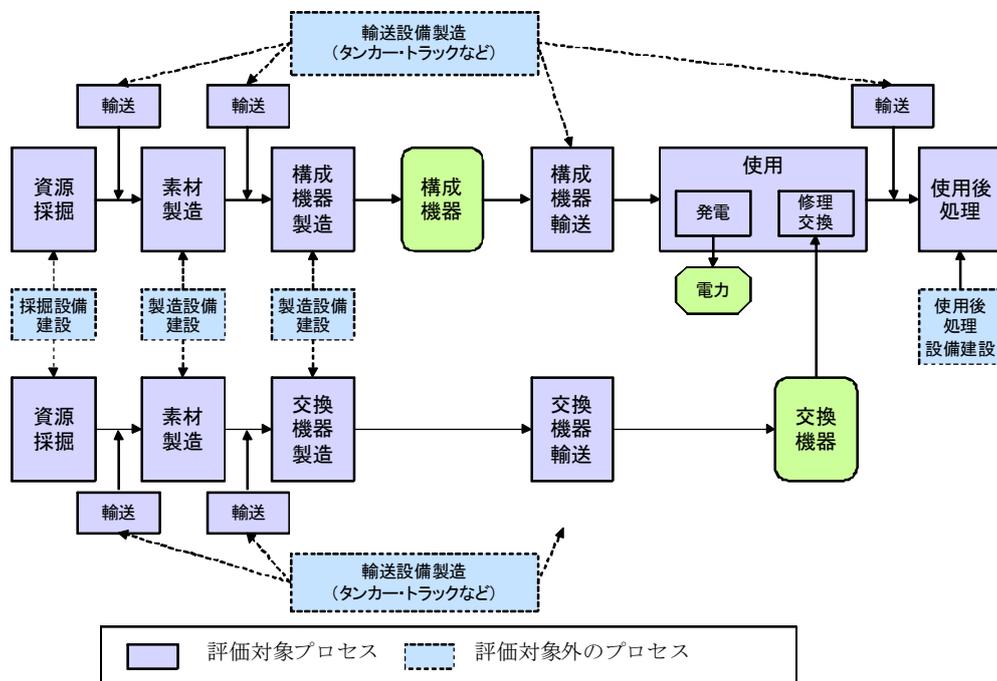


図 太陽光発電システムのライフサイクルフロー

(NEDO「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年3月)の図より三菱総合研究所作成)

- ライフサイクルを以下の通り区分し、各工程におけるデータを作成⁶³。
 - 製造工程：材料となる資源の採掘工程、太陽光発電システムを構成する機器（モジュール・架台・パワーコンディショナ・接続箱・配線材料・開閉器・基礎）・素材の製造工程、セル・モジュール製造に投入される薬品・消耗品などの製造工程を対象。製造データは、各種文献やLCAデータベース、JEMAI-LCA Pro7（燃料製造プロセスなど上流も含んだもの）等より収集。

⁶³ いずれも太陽電池モジュール、パワーコンディショナ、接続箱（直流側開閉器を含む）、架台、配線材料について算出

- 輸送工程：4tトラックによる輸送を想定し、輸送の原単位（JEMAI-LCA Pro21のデータを使用）に対し、輸送手段、輸送距離、製品重量、積載率の情報を設定し環境負荷量を算出。輸送距離は、太陽電池モジュール種類によらず、モジュール、パワーコンディショナ、接続箱、架台、配線材料とも大阪→東京間を想定し、「片道500km」とした。太陽光発電システム構成機器は、いずれも専用の輸送手段によらず、一般的なトラック輸送であることから、復路については、別の製品の輸送に使用されるものとして、復路は考慮しないものとした。
- 使用工程：太陽光発電システムの使用年数は20年と仮定。太陽光発電システムはその運転（発電）のために環境負荷の排出を伴う燃料等を消費せず、また、不慮の事故による故障等以外は、システム使用期間中のメンテナンスもほぼ必要としないことから、太陽光発電システムの使用段階における環境負荷は考慮しないものとした。ただし、パワーコンディショナについては使用年数を10年としていることから、住宅用、公共・産業用ともに使用期間中にパワーコンディショナを1回交換するものとした。
- 使用後処理工程
 - ◇ 既存のしくみや技術によって回収・再利用が可能と考えられる部品や材料をリサイクルする「基本ケース」（リサイクル効果を考慮しない）、「基本ケース」においてリサイクル効果を考慮する「リサイクル効果考慮ケース」、開発途上にある技術が実用化され、太陽電池モジュール中の再利用可能な有価物を可能な限り回収し、リサイクルする「リサイクル促進ケース」の三つのケースを想定。
 - ◇ 周辺機器（BOS）の使用後処理については、いずれも共通とし、鉄やアルミなどの主要素材は分離・回収後、リサイクルすることを想定。
 - ◇ 使用年数を終えた太陽光発電システムは、その使用場所において破損などの生じない状態としてシステム構成機器別に撤去され、機器別の使用後処理が実施されるものとし、撤去後の回収輸送はいずれのケースも共通とする。

表 使用後処理ケース別のリサイクル効果の考え方

		基本ケース	リサイクル効果考慮ケース	リサイクル促進ケース
リサイクル技術	モジュール	現状	現状	促進
	BOS	現状	現状	現状
リサイクル効果		考慮しない	考慮する	考慮する

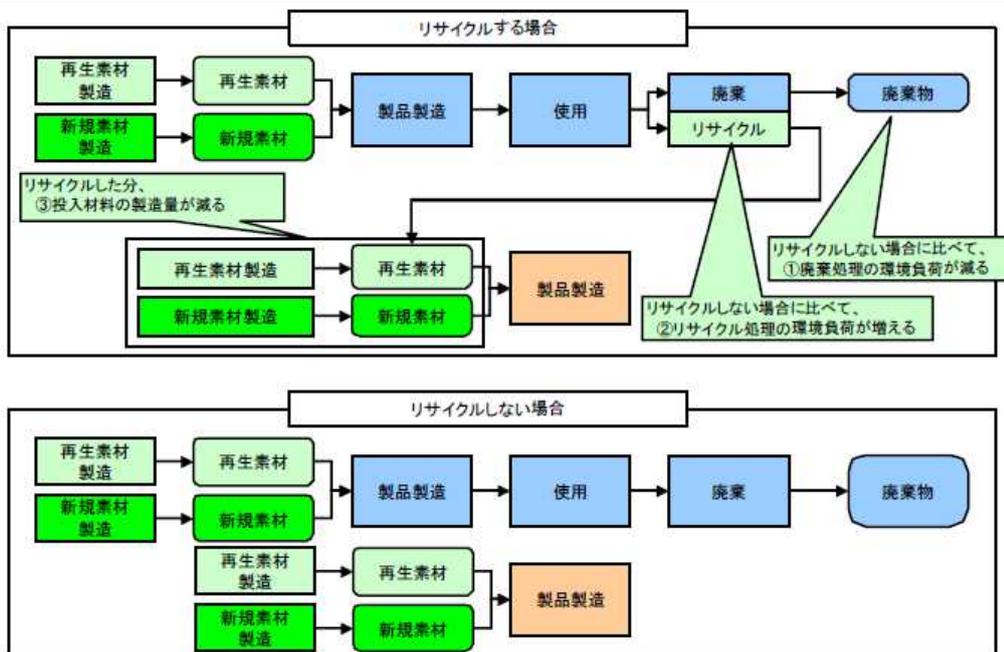


図 使用後処理ケース別のリサイクル効果の考え方

◇ 太陽電池モジュールの使用後処理工程は以下のとおりとした。

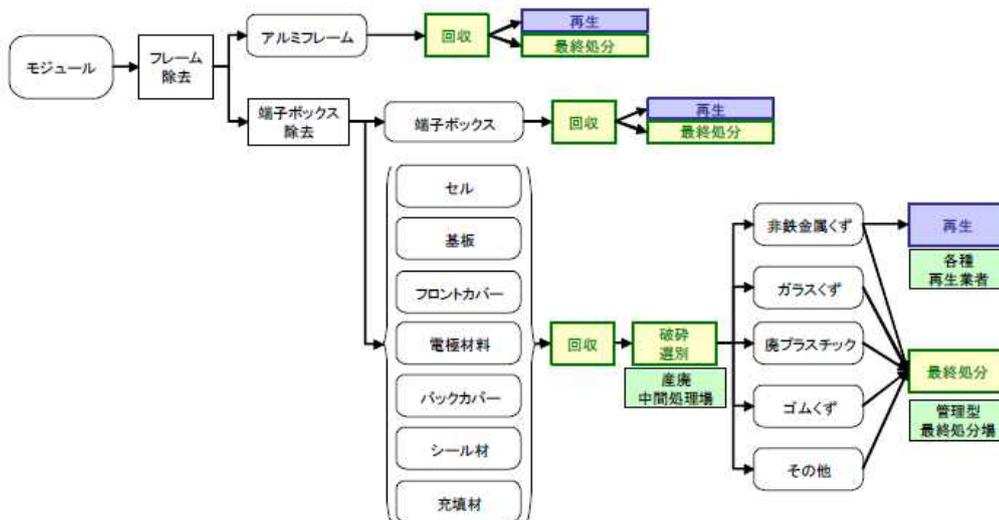


図 太陽電池モジュールの使用後処理工程 (基本ケース、リサイクル効果考慮ケース)

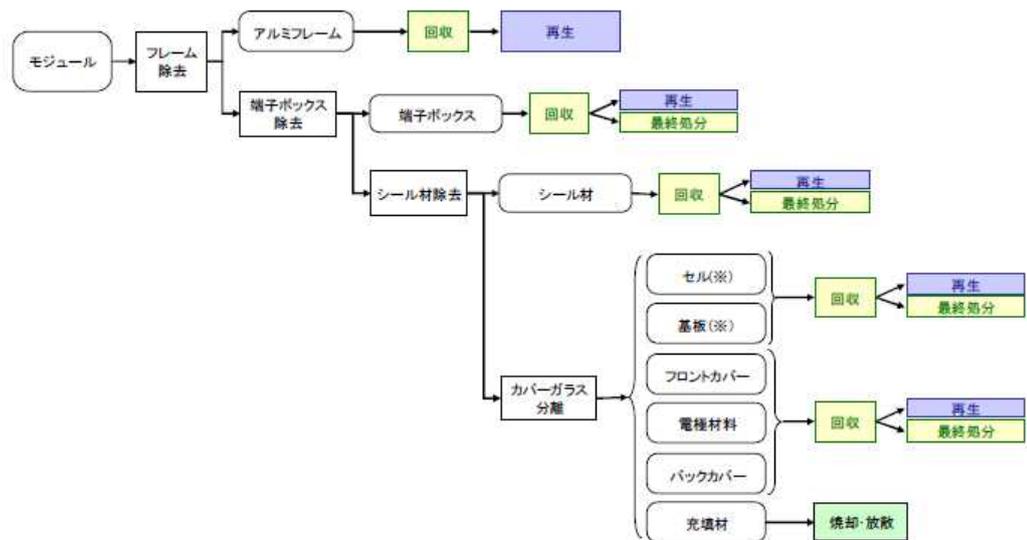


図 太陽電池モジュールの使用後処理工程（リサイクル促進ケース）

◇ 周辺機器（BOS）の使用後処理工程は以下のとおりとした。

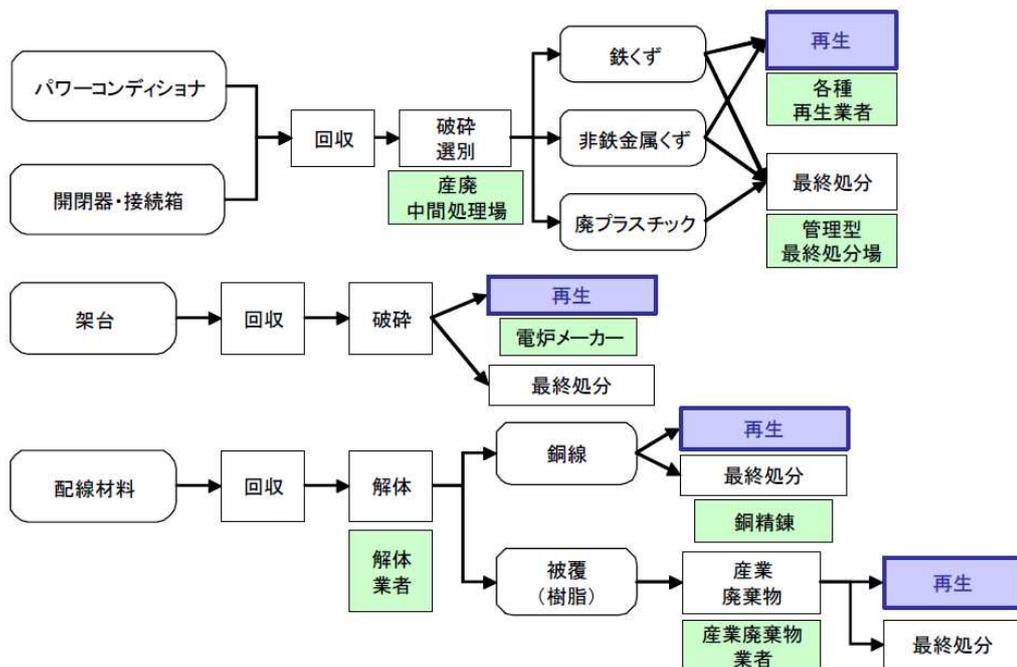


図 周辺機器（BOS）の使用後処理工程（全ケース共通）

評価結果

■住宅用太陽光発電システムのライフサイクルにおけるCO₂排出量

- 住宅用太陽光発電システム（出力4kW程度）のライフサイクルにおけるCO₂排出量の評価結果は以下のとおり。
- 【基本ケース】
 - システムあたりのCO₂排出量は、単結晶Si（6,082 kg-CO₂）が最も大きく、アモルファスSi/単結晶Siヘテロ接合（4,810 kg-CO₂）、多結晶Si（4,528 kg-CO₂）、薄膜Siハイブリッド（4,323 kg-CO₂）、CIS（3,527kg-CO₂）の順となっており、太陽電池モジュール製造に伴うCO₂排出量が非常に大きい。

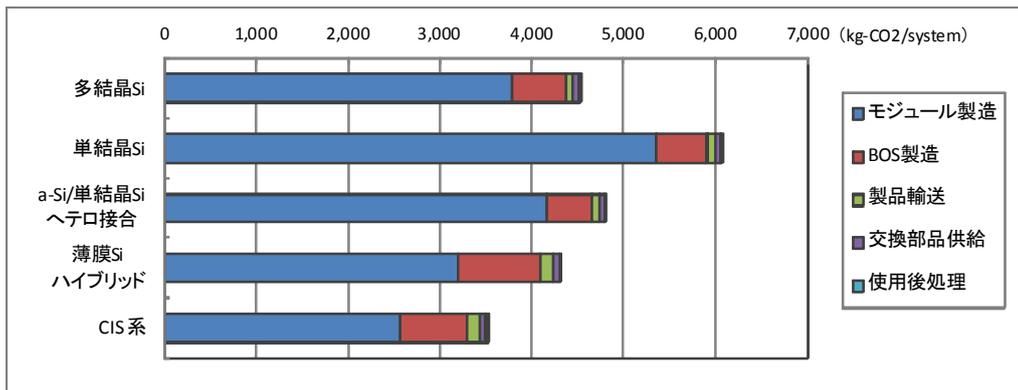


図 住宅用太陽光発電システムのライフサイクルにおける CO₂ 排出量 (kg-CO₂/システム) (基本ケース)

※文献に示された図より三菱総合研究所作成

【リサイクルによる効果 (基本ケースとの比較)】

- 使用後の太陽電池モジュールからの主たる回収物がアルミフレームのみであっても、回収可能な BOS 構成材料を適切に処理することにより太陽光発電システムのライフサイクルにおける CO₂ 排出量が低減される (リサイクル効果考慮ケース)。さらに、太陽電池モジュールのリサイクル技術が進展することにより (リサイクル促進ケース)、その効果が一層高まることが期待される。特に結晶 Si 系においてその効果は大きく、基本ケースに比べ、20%~40%近く排出量は削減可能となる。

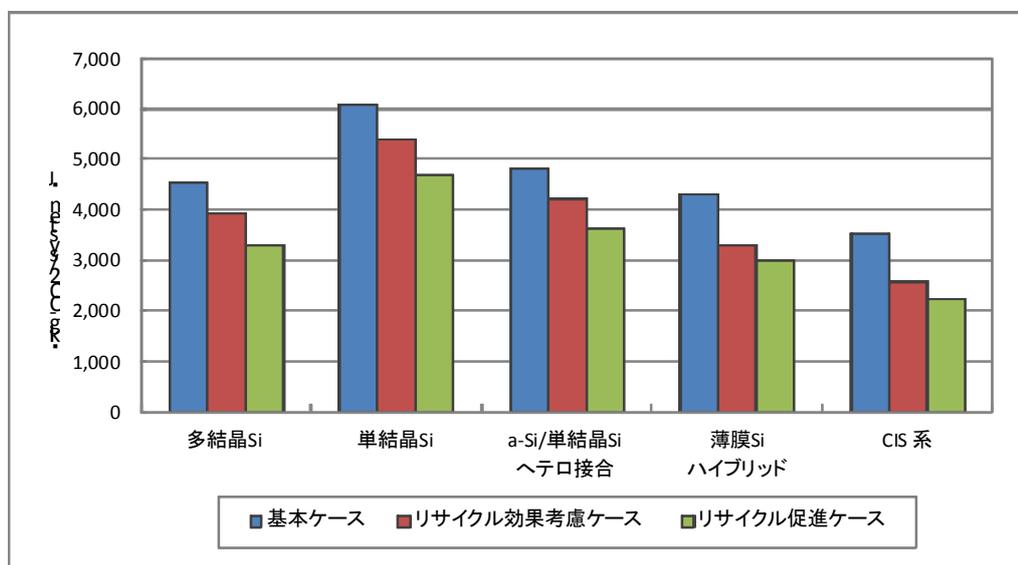


図 住宅用太陽光発電システムのライフサイクルにおける CO₂ 排出量 (kg-CO₂/システム)

※文献に示された図より三菱総合研究所作成

■ 公共・産業等用太陽光発電システムのライフサイクルにおけるCO₂排出量

・ 公共・産業等用太陽光発電システム（出力10kW 程度）のライフサイクルにおけるCO₂排出量の評価結果は以下のとおり。

【基本ケース】

- システムあたりのCO₂排出量は、単結晶Si（18,202 kg-CO₂）が最も大きく、薄膜Si ハイブリッド（15,465 kg-CO₂）、アモルファスSi/単結晶Si ヘテロ接合（14,936 kg-CO₂）、多結晶Si（14,727 kg-CO₂）、CIS（13,252 kg-CO₂）の順となっている
- 太陽電池の種類によらず、周辺機器（BOS）製造に伴う排出の比率が大きく、薄膜太陽電池モジュールによるシステムではライフサイクル全体の約4割を占めている。

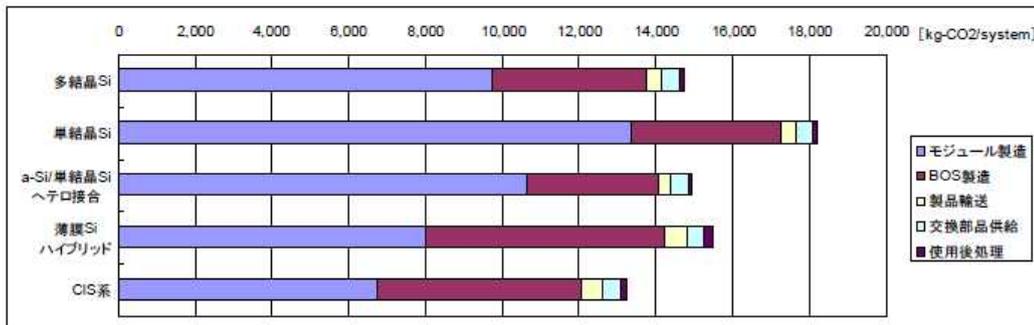


図 公共・産業等用太陽光発電システムのライフサイクルにおけるCO₂排出量 (kg-CO₂/システム) (基本ケース)

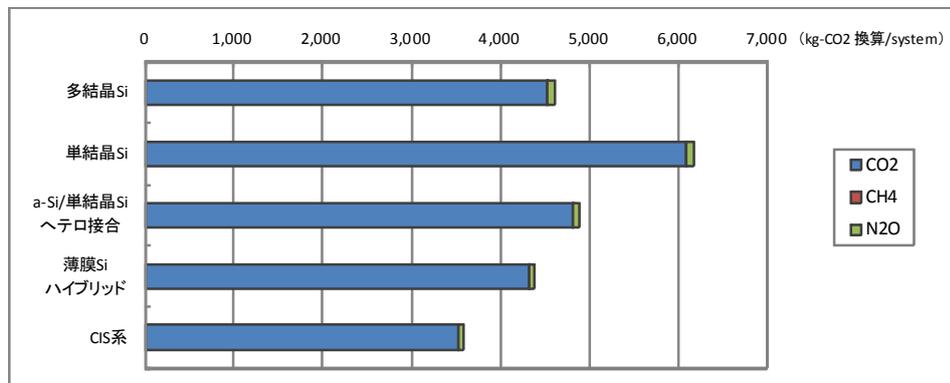


図 住宅用太陽光発電システムにおける温室効果ガス排出量 (kg-CO₂換算/システム、基本ケース)

【リサイクルによる効果（基本ケースとの比較）】

- 公共・産業等用太陽光発電システムにおいては、周辺機器（BOS）の製造に伴うCO₂排出量が相対的に大きいため、基本ケースに対するリサイクル効果考慮ケースやリサイクル促進ケースによる低減の度合いが大きい。
- このため、モジュールリサイクルの実現による効果も重要ではあるが、周辺機器（BOS）の適切な使用後処理により太陽光発電システムとしてのライフサイクルにおけるCO₂排出量の低減が、より重要となる。

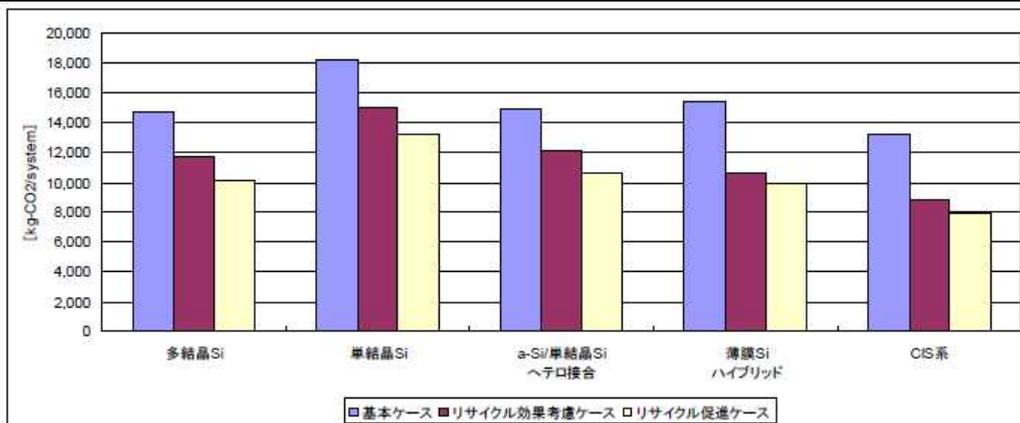


図 公共・産業等用太陽光発電システムのライフサイクルにおける CO₂ 排出量 (kg-CO₂/システム) (基本ケース)

■住宅用と公共・産業等用の比較

- 住宅用太陽光発電システムと公共・産業等用太陽光発電システムの比較結果は以下のとおり。
 - 太陽電池モジュールは住宅用、公共・産業等用で共通としており、その値は同一であるが、周辺機器 (BOS) 製造や製品輸送、使用後処理に伴う CO₂ 排出量が公共・産業等用で大きい。このためライフサイクル全体でみると、CO₂ 排出量は、結晶 Si 系では公共・産業等用は住宅用の 1.2~1.3 倍、薄膜系では 1.4 倍強となる。

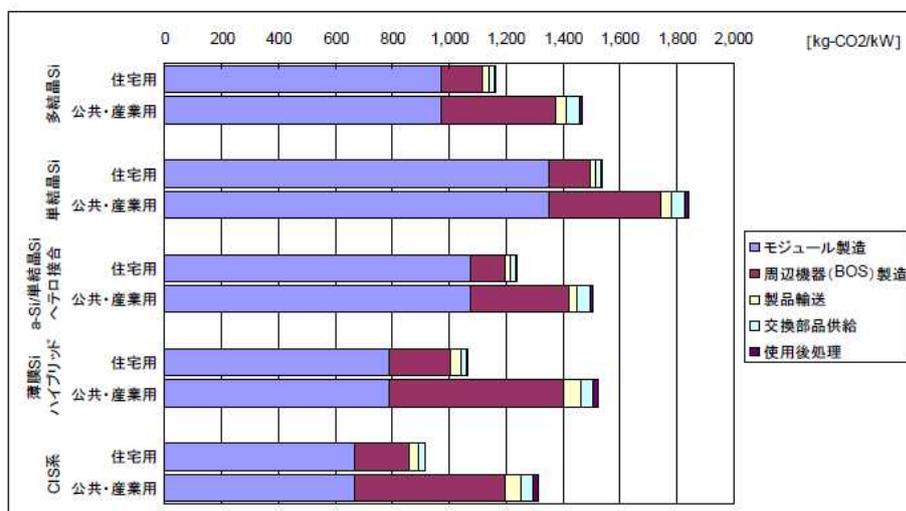


図 住宅用および公共・産業等用太陽光発電システムのライフサイクルにおける CO₂ 排出量 (kg-CO₂/kW) (基本ケース)

- 使用後処理におけるリサイクル効果は公共・産業等用の方が大きく、リサイクル効果を加味することで、住宅用と公共・産業等用のライフサイクルにおける CO₂ 排出量は小さくなる。

表 住宅用および公共・産業等用太陽光発電システムのライフサイクルにおけるCO₂排出量 (kg-CO₂/kW)

	多結晶 Si		単結晶 Si		a-Si/単結晶 Si ヘテロ接合		薄膜 Si ハイブリッド		CIS系		
	住宅用	公共・ 産業等 用	住宅用	公共・ 産業等 用	住宅用	公共・ 産業等 用	住宅用	公共・ 産業等 用	住宅用	公共・ 産業等 用	
モジュール製造	973	973	1,353	1,353	1,072	1,072	789	789	668	668	
周辺機器 (BOS) 製造	145	400	141	391	125	345	219	613	192	529	
製品輸送	21	38	22	38	18	33	35	61	35	56	
交換部品供給	18	45	17	46	18	46	17	45	18	45	
使用後処理	基本ケース/ リサイクル効果考慮ケース		4	12	4	11	3	10	6	19	6
	リサイクル促進ケース		51	59	47	55	37	44	20	33	27
リサイクル 効果	基本ケース		-	-	-	-	-	-	-	-	-
	リサイクル考慮ケース		-151	-301	-177	-325	-151	-283	-254	-478	-249
	リサイクル促進ケース		-359	-510	-395	-543	-336	-468	-343	-567	-358
合 計	基本ケース		1,160	1,468	1,537	1,839	1,237	1,506	1,066	1,525	919
	リサイクル考慮ケース		1,010	1,167	1,359	1,514	1,085	1,223	812	1,047	670
	リサイクル促進ケース		848	1,005	1,184	1,339	934	1,072	737	972	582

- CO₂排出原単位（単位発電量当たりの排出量）については、基本ケースと比較して、リサイクル効果考慮ケースでは、住宅用で8～13g-CO₂/kWh、公共・産業等用で13～23g-CO₂/kWh、リサイクル促進ケースでは、住宅用で15～18g-CO₂/kWh、公共・産業等用で20～26g-CO₂/kWh 小さくなるという結果が得られた。

表 太陽光発電システムのCO₂排出原単位 (g-CO₂/kWh) : リサイクルによる効果

		多結晶 Si	単結晶 Si	a-Si/単結晶 Si ヘテロ接合	薄膜 Si ハイブリッド	CIS系
住宅用	基本ケース	58.6	77.6	62.5	53.8	46.4
	リサイクル効果考慮ケース	51.0	68.6	54.8	41.0	33.8
	リサイクル促進ケース	42.8	59.8	47.2	37.2	29.4
公共・産業 等用	基本ケース	69.2	86.8	71.0	72.0	62.0
	リサイクル効果考慮ケース	55.0	71.4	57.7	49.4	41.1
	リサイクル促進ケース	47.4	63.2	50.6	45.9	37.0

■住宅用と公共・産業等用における温室効果ガス排出量全体の評価

- 基本ケースのみで評価を実施した、温室効果ガス排出量全体 (CH₄、N₂O の排出量と合わせた温室効果ガスの合計) の評価結果は以下のとおりである。住宅用、公共・産業等用ともに、温室効果ガスの中ではCO₂の排出量が合計の98～99%を占めている。

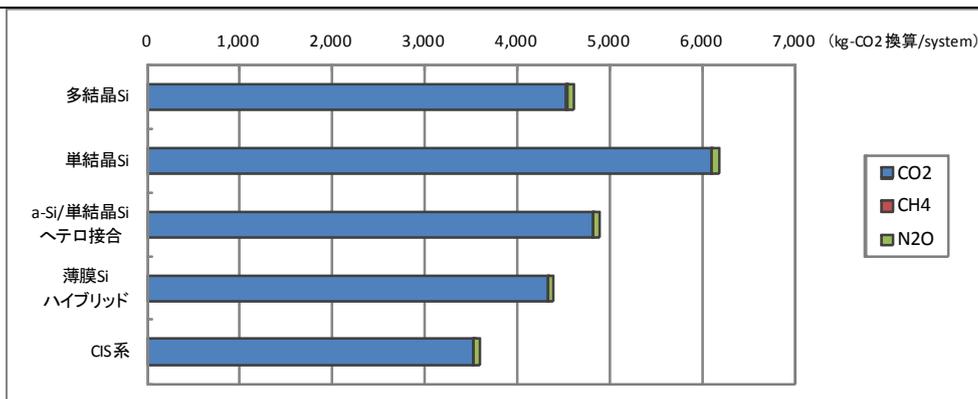


図 住宅用太陽光発電システムにおける温室効果ガス排出量 (kg-CO₂換算/system、基本ケース)

※文献に示された図より三菱総合研究所作成

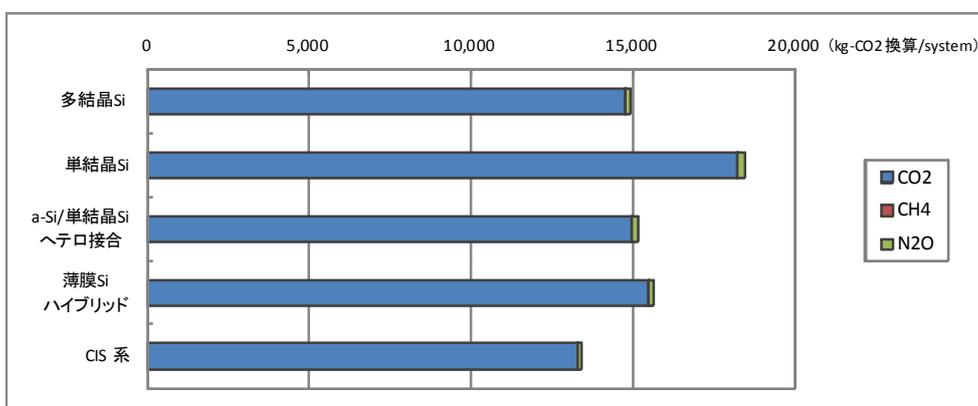


図 公共・産業等用太陽光発電システムにおける温室効果ガス排出量 (kg-CO₂換算/system、基本ケース)

※文献に示された図より三菱総合研究所作成

■エネルギー・CO₂ペイバックタイムの評価

- 基本ケースの住宅用太陽光発電システムのエネルギー・ペイバック・タイムは1.4～3.0年、公共・産業等用太陽光発電システムでは1.9～3.4年であり、いずれのケースも想定される使用年数よりも短いという結果となった。また、いずれもリサイクルによって、ペイバックタイムは更に短くなるという結果となった。

表 太陽光発電システムのエネルギー・ペイバック・タイム (年)

		多結晶 Si	単結晶 Si	a-Si/単結晶 Si ヘテロ接合	薄膜 Si ハイブリッド	CIS 系
住宅用	基本ケース	2.20	3.01	2.42	1.75	1.41
	リサイクル効果考慮ケース	2.02	2.78	2.22	1.45	1.08
	リサイクル促進ケース	1.65	2.40	1.90	1.35	0.96
公共・産業 等用	基本ケース	2.58	3.38	2.75	2.31	1.89
	リサイクル効果考慮ケース	2.28	3.04	2.45	1.84	1.42
	リサイクル促進ケース	1.91	2.66	2.13	1.75	1.30

- 基本ケースのCO₂ペイバック・タイムは、住宅用において2.1～3.5年、公共・産業等

用では3.0～4.2年であり、いずれのケースも想定される使用年数よりも短いという結果となった。また、いずれもリサイクルによって、ペイバックタイムは更に短くなるという結果となった。

表 太陽光発電システムのCO₂ ペイバック・タイム (年)

		多結晶 Si	単結晶 Si	a-Si/単結晶 Si ヘテロ接合	薄膜 Si ハイブリッド	CIS 系
住宅用	基本ケース	2.63	3.48	2.80	2.42	2.08
	リサイクル効果考慮ケース	2.29	3.08	2.46	1.84	1.52
	リサイクル促進ケース	1.92	2.68	2.12	1.67	1.32
公共・産業 等用	基本ケース	3.33	4.17	3.41	3.46	2.98
	リサイクル効果考慮ケース	2.64	3.43	2.77	2.37	1.98
	リサイクル促進ケース	2.28	3.04	2.43	2.20	1.78

結果
の
解
釈

- ・ 基本ケースにおける CO₂ 排出原単位は、住宅用で 46～78g-CO₂/kWh、公共・産業用等で 62～87g-CO₂/kWh (BOS が住宅用よりも大きい) であったが、いずれの太陽電池も系統電力の排出原単位と比較すると小さくなっている。使用後処理段階や部品交換などを加味し、環境負荷全体への影響が最も大きい結晶 Si の場合でも、結果として太陽光発電システムの環境優位性を示す結果となっている。
- ・ リサイクル効果の検証においては、基本ケースとリサイクル効果考慮ケースを比較した場合、架台の鉄やフレームのアルミ等、kW あたりの重量が多い薄膜系でより大きな CO₂ 削減効果が得られる。一方、リサイクル考慮ケースとリサイクル促進ケースを比較した場合、セル材料の回収による効果が大きい結晶 Si 系において、より大きな CO₂ 削減効果が得られる。
- ・ リサイクル促進ケースの場合、CO₂ 排出原単位は、基本ケースよりも住宅用で平均 28.4%、最大 (CIS 系) 36.6%改善、公共・産業用等で 32.8%、最大 (CIS 系) 40.3% 改善する結果となった。
- ・ 以上より、回収可能な架台等 BOS のリサイクルは、CO₂ 排出量の改善に大きな効果があること、特に結晶 Si 系については、セル材料の回収により更なる改善が見込めることがわかった。また、CIS 系ではリサイクルを促進し、そのリサイクル効果を考慮することにより、より高い CO₂ 削減効果が得られることが分かった。

No	2
テーマ	太陽光発電、風力発電、水力発電、地熱発電の LCA 評価（発電技術別の比較）
文献名	<p>(財) 電力中央研究所「ライフサイクル CO₂ 排出量による発電技術の評価—最新データによる再推計と前提条件の違いによる影響—」（2000 年 3 月）</p> <p>(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 年 7 月）</p>
評価シナリオ	<ul style="list-style-type: none"> 既存の発電技術である火力（石炭、石油、LNG）、水力、地熱、原子力と、新エネルギーの代表である太陽光、風力を対象とし、ライフサイクルにわたる CO₂ とメタン（CO₂ に換算）排出量を推計し、各発電技術の特性を分析する。 火力の熱効率、設備利用率などの前提条件の変化が結果に与える影響を定量的に評価。 1996 年時点の国内の平均的な技術、周囲の状況を前提とし、2000 年に電源別 CO₂ 及びメタン排出量を推定（以下「2000 年評価」と記載）。その後 10 年が経過したことから、2009 年時点で入手可能なデータを更新し、電源別 CO₂ 排出量の再計算を実施（以下「2009 年評価」と記載）。
評価指標	<ul style="list-style-type: none"> CO₂ メタン
仮説・前提条件	<ul style="list-style-type: none"> 評価対象とした発電技術は、石炭火力、石油火力、LNG 火力（汽力、複合）、原子力（PWR、BWR）、水力、地熱、太陽光、風力である。 分析手法の概略は以下のとおり。 <div style="text-align: center;"> </div>
	<p style="text-align: center;">図 分析手法の概要</p> <ul style="list-style-type: none"> システム境界の考え方は以下のとおり。石炭火力発電と原子力発電については、発電後の処理工程（廃棄物処理）までを含めて評価し、石油火力、LNG 火力、水力、地熱、太陽光、風力については、送電端までを評価範囲とし発電後処理工程は対象外とした。また、送配電あるいは電力の最終消費等については対象外とした。

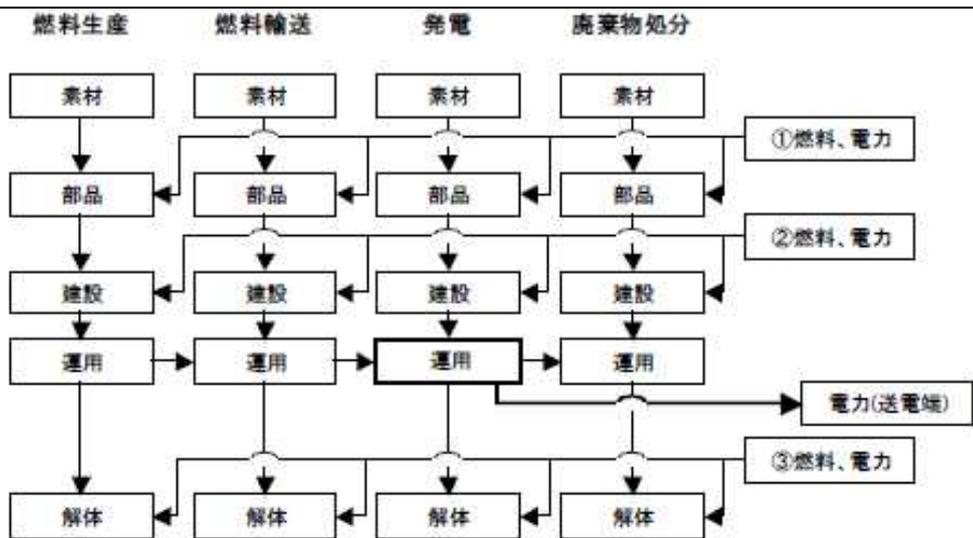


図 2.2 評価対象の発電技術のシステム境界

Fig 2.2 Boundary of Life Cycle Analysis for Electricity Power Plants

図 評価対象の発電技術のシステム境界

評価対象とした発電技術の設計仕様等は以下のとおり。

表 評価対象の発電技術の設計仕様・運転条件の想定値

	出力 [MW]	設備利 用率	熱効率 (HHV)	所内率	耐用年 数	補修比 率
石炭火力(従来・国内炭)	1,000	70%	39.6%	6.9%	40年	
石炭火力(従来・輸入炭)	1,000	70%	39.6%	6.9%	40年	
石炭火力(600℃)	1,000	70%	42.4%	5.1%	40年	
石油火力(重油)	1,000	70%	38.3%	5.1%	40年	
石油火力(原油)	1,000	70%	38.3%	5.1%	40年	
石油火力(平均)	1,000	70%	38.3%	5.1%	40年	
LNG火力(汽力)	1,000	70%	38.9%	4.3%	40年	
LNG火力(複合・従来)	1,000	70%	44.6%	2.1%	40年	
LNG火力(複合1,300℃)	1,000	70%	50.0%	2.1%	40年	
LNG火力(複合1,500℃)	1,000	70%	53.0%	2.1%	40年	
原子力(BWR)[中間貯蔵段階まで]	1,000	70%	33.7%	4.3%	40年	
原子力(PWR)[中間貯蔵段階まで]	1,000	70%	33.7%	4.3%	40年	
原子力(BWR)リサイクル	1,000	70%	33.7%	4.3%	40年	
原子力(PWR)リサイクル	1,000	70%	33.7%	4.3%	40年	
水力(中規模ダム水路式)	10	45%		0.7%	40年	
地熱	55	60%		7.0%	30年	
太陽光	0.00384	15%		0.0%	30年	1.0%
風力(300kW級)	0.3	20%		10.0%	30年	2.0%
風力(600kW級)	0.6	20%		10.0%	30年	2.0%
風力(1000kW級)	1	20%		10.0%	30年	2.0%
風力(2000kW級)	2	20%		10.0%	30年	2.0%
風力(2500kW級)	2.5	20%		10.0%	30年	2.0%

	補修比率	燃焼度 [MWD/t-U]	燃料 濃縮度	テール 濃度	石炭中 灰分	石炭灰 有効利 用率	最大水量	水圧鉄 管	堤体積	導水路
石炭火力(従来・国内産)					12.50%	58.00%				
石炭火力(従来・輸入炭)					12.50%	58.00%				
石炭火力(600℃)					12.50%	58.00%				
石油火力(重油)										
石油火力(原油)										
石油火力(平均)										
LNG火力(汽力)										
LNG火力(複合・従来)										
LNG火力(複合1,300℃)										
LNG火力(複合1,500℃)										
原子力(BWR)(中間許容段階まで)		40,000	3.4%	0.25%						
原子力(PWR)(中間許容段階まで)		40,000	4.1%	0.25%						
原子力(BWR)リサイクル		40,000	3.4%	0.25%						
原子力(PWR)リサイクル		40,000	4.1%	0.25%						
水力(中規模ダム水路式)							4.80m ³ /s	490m	2,000m ³	9,000m
地熱										
太陽光	1.0%									
風力(300kW級)	2.0%									
風力(600kW級)	2.0%									
風力(1000kW級)	2.0%									
風力(2000kW級)	2.0%									
風力(2500kW級)	2.0%									

(財) 電力中央研究所「ライフサイクル CO₂ 排出量による発電技術の評価—最新データによる再推計と前提条件の違いによる影響—」(2000年3月)の図より三菱総合研究所作成

- 生産物は電力だけとし、ライフサイクルで発生した環境負荷はすべて電力が負担することとした。
- 素材及び資材の排出原単位、CO₂ 排出係数は燃料中の炭素分のみに依存することとした。
- 設備の建設に伴って排出される CO₂ は運用期間に一律に配分。
- メタン排出量は地球温暖化ポテンシャル (GWP) を用いて CO₂ 排出量に換算。
- 発電所の耐用年数は、地熱、太陽光、風力は 30 年、それ以外は 40 年とした(2000 年評価では一律 30 年)。
- 各種素材の CO₂ 排出原単位については、LCA データベース⁶⁴から引用(2000 年評価では産業連関表と各種統計資料)。
- 産業連関表に基づいて、素材から製品製造段階で排出される CO₂ 量を加味。

・ 発電技術毎に前提条件を下記のとおり設定。

- LNG 火力：LNG 専焼火力を想定。
- 水力：中規模ダム水路式を想定。
- 地熱：発電所建設前における調査井掘削などの開発時の素材・燃料消費量を開発設備として計上。
- 太陽光：2000 年評価では、出力 3kW の屋根に設置するタイプを想定していたが、2009 年評価では、近年設置されている標準的な仕様である 1 枚 600W の多結晶シリコンパネルを 6 枚×4 列設置する出力 3.84kW タイプを想定(下表参照)。耐用年数はパワーコンディショナ以外を 30 年(耐用期間内にパワーコンディショナの交換を 1 回実施)と想定。

64 「JLCA-LCA データベース 2004 年度 2 版」、LCA フォーラム

表 太陽光発電システムの想定仕様

用途・分野	戸建住宅
設置形態	架台設置型
太陽電池種類	多結晶 Si
太陽電池モジュール出力 (W/枚)	160
太陽電池モジュール枚数 (枚)	24
太陽光発電システム出力 (kW)	3.84

- 風力：2009年評価では、300kW級発電所（国産品の装置を使用）の建設に必要な素材量・燃料消費量を推計したが、2009年評価では、近年の大型化の傾向を反映し、600kW、1,000kW、2,000kW、2,500kWを評価対象に追加。

- ・ 以下の前提条件が変化した場合、ライフサイクルCO₂に与える影響を分析。
 - 火力の熱効率（発電効率を30%から50%まで変化）
 - 火力及び原子力の発電燃料生産国
 - 火力の発電量燃料のCO₂係数
 - 設備利用率
 - 太陽光発電の普及（太陽電池（PV）の生産規模の拡大及び技術の進歩）
 - 将来の風力発電設備（出力の増大）

評価
結果

- 【発電技術別のライフサイクルCO₂排出量】
- ・ 発電技術別のライフサイクルCO₂排出量は以下のとおり（2009年評価）。

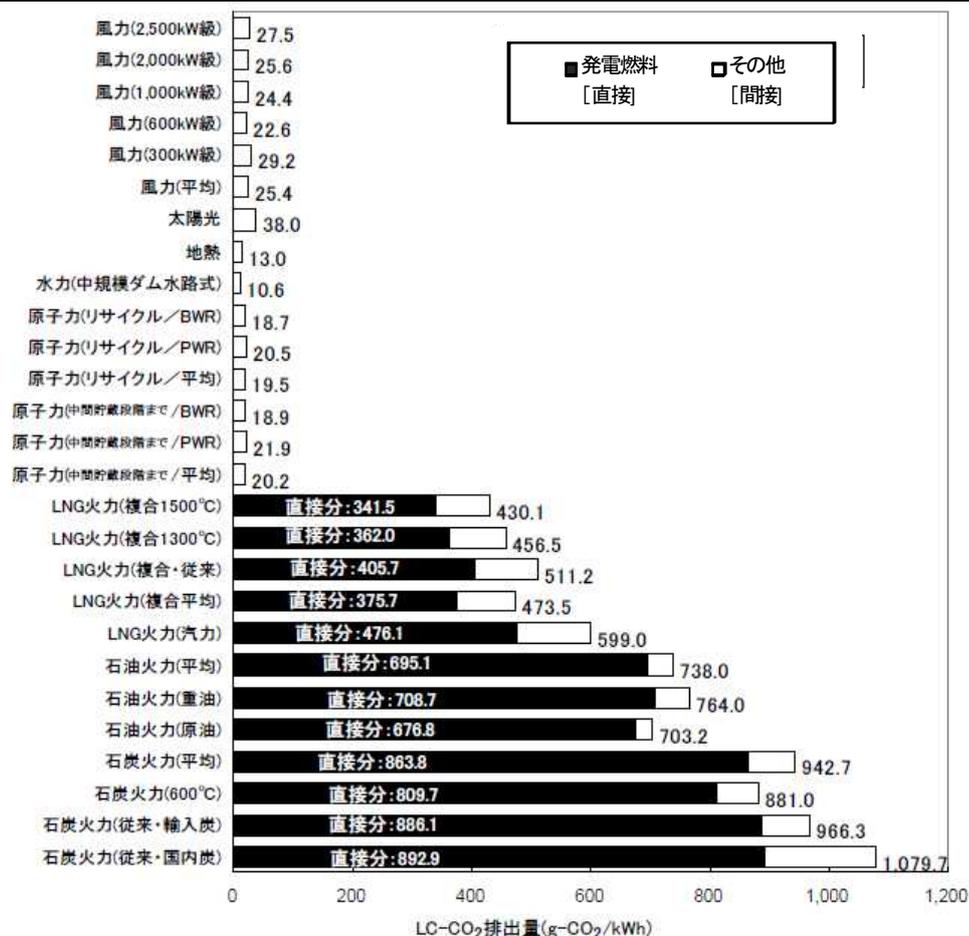


図 4.1 2009 年時点で得られたデータに基づく電源別 LC-CO₂ 排出量

Fig 4.1 Life Cycle CO₂ Emissions of Power Generation Technologies

Estimated in FY2009

注) 図中、石油火力を除く各発電技術の平均とは、技術カテゴリ毎に算出した生涯発電電力量あたりの LC-CO₂ 排出量を、各技術カテゴリに属するプラントの総設備容量で加重平均した「電源別平均 LC-CO₂ 排出量」である。

図 2009 年時点で得られたデータに基づく電源別 LC-CO₂ 排出量

- 火力発電：発電燃料である石炭や原油、重油、LNG の燃焼に伴い発電所から直接排出される CO₂ 排出量が、ライフサイクル全体の大半を占めており、特に石炭は全体の 92%、石油は 95%となっている。
- 原子力発電：ガス拡散分離法によるアメリカでのウラン濃縮を想定した場合、核燃料の濃縮に伴い発電所から直接排出される CO₂ 排出量が、ライフサイクル全体の約 4 分の 3 程度を占める。一方、国内で延伸分離法による濃縮を想定した場合、CO₂ 排出量は前述の 3 分の 1 程度に減少する。
- 水力発電：ライフサイクル CO₂ の約 8 割が、発電設備の建設によるものである。特に、ダム、導水路、発電所建屋、水圧鉄管などの土木施設の建設による排出量が全体の 6 割を占め、そのほとんどが、鉄およびコンクリートの製造に伴う排出量である。発電機や水車などの機械設備の製造に伴う排出量は全体の 1 割に満たない。現場建設におけるトラックや重機の燃料消費に伴う排出量は

全体の1割程度である。

- 地熱発電：蒸気井と還元井が減衰していくため、補充井を掘削する必要があること、また設備の腐蝕による途中交換が必要であることから、設備運用時のCO₂排出量がライフサイクル全体の約3分の2を占める。設備建設時に排出されるCO₂量は、全体の3分の1程度である。タービンや発電機などの主要設備を製造する際の排出量の割合が高く、土木設備の製造・建設に伴う排出量は全体の1割強である。なお、調査井の掘削などの開発段階における排出量は全体の1%程である。
- 太陽光発電：ライフサイクルCO₂の約8割が、設備建設によるものである。特に、太陽電池（PV）パネルを製造する際の排出量が全体の53%を占める。そのうちの3分の2が、シリコン製造と基板化の両プロセスからの排出量である。PVパネルを支える架台の製造に伴う排出量は全体の18.3%である（蓄電池を含めた場合、排出量は増加）。
- 風力発電：ライフサイクルCO₂の7割以上が設備建設によるものである。鉄塔を支える基礎の製造・建設に伴い排出されるCO₂が7.40g-CO₂/kWhと全体の25.1%を占めている。土木設備の排出量の約8割は鉄鋼とコンクリート起源であり、残り2割は、現場建設および輸送から排出される。また、ブレード製造時のCO₂排出量は全体の4.8%であり、その多くがグラスファイバーおよび合成樹脂の製造に伴い排出される。によるものである。

【2000年評価と2009年評価の比較】

- ・ 2000年評価と2009年評価の比較結果は以下のとおり。
 - LNG火力発電：複合発電の技術進歩による熱効率の向上により、大幅なCO₂原単位の改善がみられた。2009年評価から新たに評価対象に加えた1,300℃級では、従来の複合発電と比較して10%、1,500℃級では16%CO₂原単位が低下した。
 - 原子力発電：2000年評価では、電力の排出係数が大きいアメリカでのガス拡散法による濃縮が67%を占めていたが、2009年評価では33%に低下したため、再処理を前提とした中間貯蔵段階までを対象としたケースで24%、プルサーマルケースを前提としたリサイクルケースで20%、ライフサイクルCO₂排出量が低下した。
 - 風力発電：素材の排出原単位の見直しにより、300kW級風車については2000年評価の29.5g-CO₂/kWhから2009年評価では29.2g-CO₂/kWhと、わずかに減少した。2000年以降、風車の大型化に伴い基礎部コンクリートの量が増加した影響で、CO₂排出原単位の改善には必ずしもつながっていないものの、風力発電の設備容量で加重平均した場合、2000年評価と比較して14%ライフサイクルCO₂排出量が低下した。
 - 太陽光発電：システムを構成する物量の約半分を占める架台の素材が、2000年のアルミニウムから、2009年では溶融亜鉛メッキ鋼板に変更したため、2000

年評価の 53 g-CO₂/kWh から 2009 年評価では 38 g-CO₂/kWh に減少した。今回対象とした再生可能エネルギー技術の中で、唯一大幅に排出量が減少している。

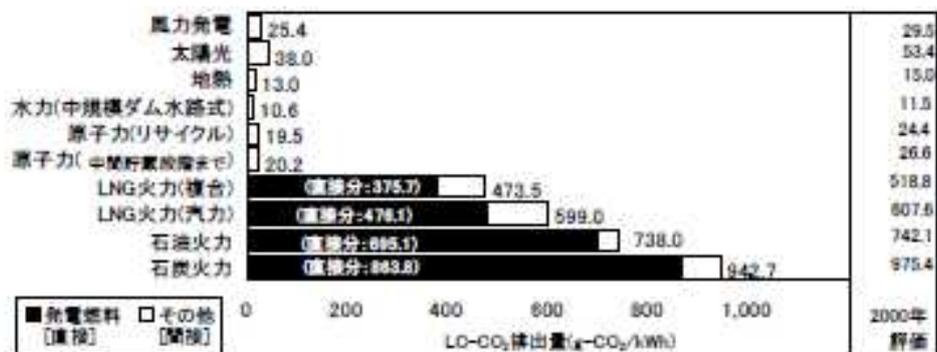


図 4.2 2000 年評価と今回評価の電源別 LC-CO₂ 排出量比較

Fig 4.2 Compare of Life Cycle CO₂ Emissions of Power Generation Technologies

Estimated in FY2009 and FY2000

注) 図中の LC-CO₂ 排出量は、技術カテゴリ毎に算出した生涯発電電力あたりの LC-CO₂ 排出量を、各技術カテゴリに属するプラントの総設備容量で加重平均した「電源別平均 LC-CO₂ 排出量」である。ただし、石油火力を除く。

注) 原子力の評価結果は、ABWRを除く、EWRとPWRのみについて、各々の設備容量で加重平均した平均 LC-CO₂ 排出量である。

図 2000 年評価と 2009 年評価の電源別 LC-CO₂ 排出量

前提条件の変化がライフサイクル CO₂ 排出量に与える影響を分析した結果は、下記のとおりである (※2000 年評価時の結果、2009 年時には評価していない)。

- 火力発電以外では、想定条件により各発電技術間のライフサイクル CO₂ 排出量の大小関係が異なる。例えば、原子力発電では核燃料の濃縮に関する想定に大きく依存し、水力発電では立地条件に大きく依存する。
- 再生可能エネルギーを利用する発電技術では、設置場所などにより設備利用率が大きく異なる可能性があり、太陽光発電や風力発電では、設備利用率が 5 ポイント増減するだけで結果に大きな影響を及ぼす。

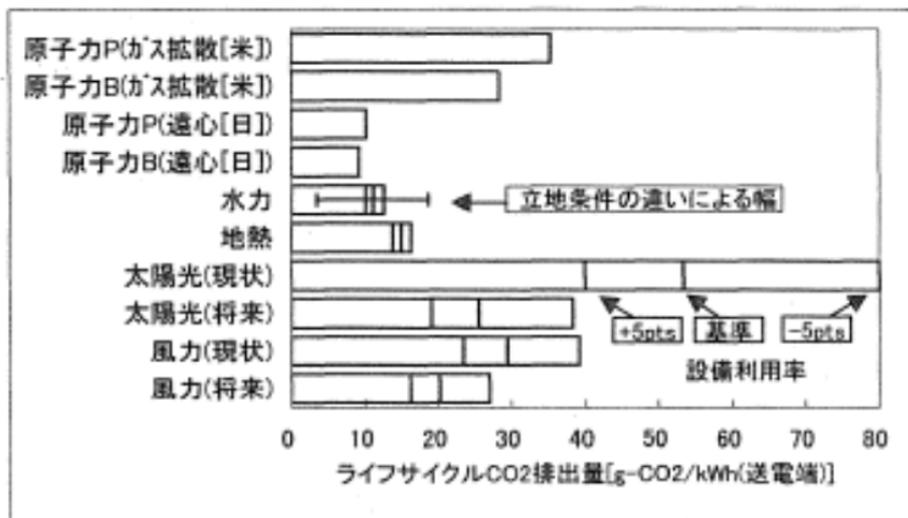


図 発電技術のライフサイクル CO₂ 排出量

<p>結果の解釈</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 風力発電の大型化は、基礎部コンクリートの使用量増大につながるため、ライフサイクルCO₂排出量の改善には必ずしもつながらない。特に洋上風力では基礎容量の増加が設備利用率の向上と相殺される可能性がある。このため、CO₂排出量を削減するためには、上部重量の軽減につながるブレードやナセル等の軽量化技術の開発が不可欠である。 ・ 火力発電技術のライフサイクルCO₂排出量は、他の発電技術の約10倍以上であり、基準ケース（1996年時点の我が国の平均的な技術、周囲の状況を想定）の前提条件をある程度変化させても、地球温暖化の面からみて火力発電が不利であることに変わりはない。一方、火力発電以外の発電技術は、前提条件如何で評価が大きく変化するため、前提条件の変化が結果に与える影響を十分に把握した上で結果を解釈することが非常に重要となる。例えば、太陽光発電では架台の素材変更によりCO₂排出量は大幅に減少しており、今後技術改善および普及に伴う生産規模の拡大による製造時の排出量削減により、ライフサイクルCO₂排出量を現状の約半分程度、風力発電でも約7割程度に削減することが可能である。 ・ 今後は、社会への導入量の変化が与える影響を考慮した動的な分析、さらには地球温暖化以外の環境特性や経済性などの面も含めた総合的な評価が必要となる。
--------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

No	3
テーマ	太陽光発電の LCA 評価（薄膜太陽電池（CdTe 系、CIS 系）モジュールと多結晶シリコン系太陽電池モジュールとの比較）
文献名	Marco Raugai, Silvia Bargigli, Sergio Ulgiati (Energy and Environment Research Unit, Dep. of Chemistry, University of Siena Via, Italy) “Life cycle assessment and energy pay-back time of advanced photovoltaic modules: CdTe and CIS compared to poly-Si”（2006 年 3 月） （「太陽光電池モジュールのライフサイクルアセスメントとエネルギーペイバックタイム～CdTe 系、CIS 系と多結晶シリコン系との比較～」）
評価シナリオ	<ul style="list-style-type: none"> ・ 薄膜太陽電池モジュール2種と多結晶シリコン系太陽電池モジュールの生産及び使用時における環境影響を、sustainability multi-method multiscale assessment⁶⁵ (SUMMA) (マルチメソッド、マルチスケールによる持続可能性アセスメント) に基づき評価⁶⁶。 ・ 太陽電池モジュールのみの場合と、架台等の太陽光発電システムにおける太陽電池モジュール以外の部分を含めた場合（以下、BOS⁶⁷）について評価を実施。 ・ 製造工程で必要とされる kWh 当たりの鉱物、燃料等の非生物的要素と水の総量から、ライフサイクルにおけるマテリアルフローの収支を評価。 ・ kWp⁶⁸当たり必要な総エネルギーとエネルギー投資回収期間を評価。 ・ 太陽光、風、雨等の通常のエネルギー分析では用いられない自然由来のエネルギーについて、直接的、間接的に必要とされる量（エメルギー）を評価。 ・ 多くの商用 LCA ソフトウェア・パッケージに含まれる環境影響評価手法である「CML2 ベースライン 2000」の指標を用いて、地球温暖化係数、酸性化係数、水質汚染係数を評価。
評価指標	<ul style="list-style-type: none"> ・ 無機物の必要量（単位：【kg/kWh】） ・ 水の必要量（単位：【kg/kWh】） ・ 総エネルギー要求量（単位：【MJ/kWp】） ・ エネルギーペイバックタイム（単位：【年】） ・ エメルギー⁶⁹と出力の比（単位：【seJ/J】） ・ 地球温暖化係数（GWP）（単位：【g(CO2-eq)/kWh】） ・ 酸性化係数（AP）（単位：【%】） ・ 水質汚染係数（EP）（単位：【%】）

⁶⁵ Ulgiati S, Raugai M, Bargigli S. Overcoming the inadequacy of single-criterion approaches to life cycle assessment. Ecol. Model.190: 432–442.による

⁶⁶ 評価は全て ISO14040 に準拠している

⁶⁷ Blance of System の略。架台等、太陽光発電システムにおける太陽電池モジュール以外の部分

⁶⁸ キロワットピーク。標準的条件での最大発電量（設備容量としての公称最大出力）を示す。

⁶⁹ 太陽光発電システムを製造し、維持管理において、直接的または間接的に必要とされる有効エネルギー（エクセルギー）の総量

仮説・前提条件

- ・ 評価対象とした太陽電池モジュールの仕様は以下のとおり。
 <薄膜太陽電池モジュール>

- ・ CdTe：名目上の変換効率は9%。PN接合のP型が10μm以下のCdTeで構成。

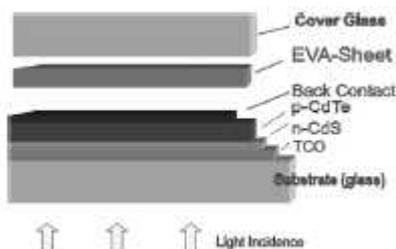


図 CdTe 太陽電池モジュールの構造

- ・ CIS：名目上の変換効率は11%。PN接合のP型が0.1μm以下のCuInSe₂で構成。

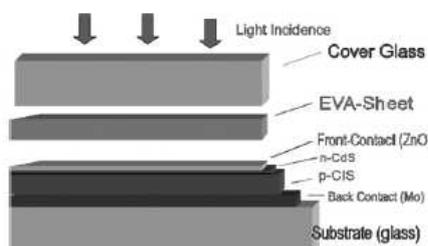


図 CIS 太陽電池モジュールの構造

<多結晶シリコン系太陽電池モジュール>

- ・ シリコンウエハの製造工程が最もエネルギーを要することから、2つのケースを想定。
 - poly-Si A：全量、エレクトロニクス用に製造されたシリコンウエハの規格外品を使用するケース。
 - poly-Si B：規格外シリコンの利用は30%のみのケース。
- ・ 既存のデータベース⁷⁰をもとに、BOSを含まない太陽電池モジュールの製造には1m²当たり以下の材料が使用されていると設定。

表 CdTe 太陽電池モジュールの製造工程に使用されている主な材料

Glass	24,960 g/m ²
Water	1250 g/m ²
EVA	630 g/m ²
{CdTe + CdS + CdCl ₂ + Sn + Ni/V + ITO + Sb ₂ Te ₃ }	230 g/m ²
Electricity	236 kWh/m ²

⁷⁰ 「ETH-ESU—Eidgenössischen Technischen Hochschule, Energie-Stoffe-Umwelt. Ökoinventar von Energiesystemen. Berne, Switzerland, 1996」及び「BUWAL 250—Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft. Ökoinventar für Energiesysteme. Berne, Switzerland: 1998」.

表 CIS 太陽電池モジュールの製造工程に使用されている主な材料

Glass	24,960 g/m ²
Water	1250 g/m ²
EVA	880 g/m ²
{Mo + Cu + In + Ga + Se + CdS + ZnO + CuSn}	70 g/m ²
Electricity	24.3 kWh/m ²

BOS には、以下に示す材料が使用されていると設定。

表 BOS1m² 当りに使用される主な材料

Al (frame)	1900 g/m ²
Steel (support structure)	25,000 g/m ²
Cu (cables and contact boxes)	40 g/m ²
Plastics (cables and contact boxes)	40 g/m ²
Fuel oil (for installation)	10.8 MJ/m ²

その他の前提条件は以下のとおり。

- バウンダリはモジュールの製造及び使用段階とし、廃棄については、薄膜太陽電池モジュールに関して信頼できるデータがないため、評価の対象外とした。
- 全ての太陽光発電システムは屋根設置後、グリッド接続される。
- 使用年数は 20 年とする。

評価結果

【地球温暖化係数に関する評価】

地球温暖化係数に関する分析結果は、以下のとおり。

- モジュールのみを比較した場合、全量エレクトロニクス用に製造されたシリコンウエハの規格外品を使用する poly-Si A が 147 g(CO₂-eq)/kWh と最も GWP が高く、CdTe や CIS といった薄膜系の 2 倍以上となった。
- しかし、多結晶シリコン系においては前述したようにシリコンウエハの製造時に最もエネルギーを要するため、規格外シリコンの利用量が低い poly-Si B や poly-Si C では、CdTe よりも GWP は低くなる。
- BOS を含めた太陽光発電システム全体で見ると、多結晶シリコン系では BOS を含めない場合の 1.1~1.5 倍であるのに対し、CIS は 1.6 倍、CdTe は 2.8 倍となり、薄膜系の方が BOS を含めたことによる影響が大きくなる。

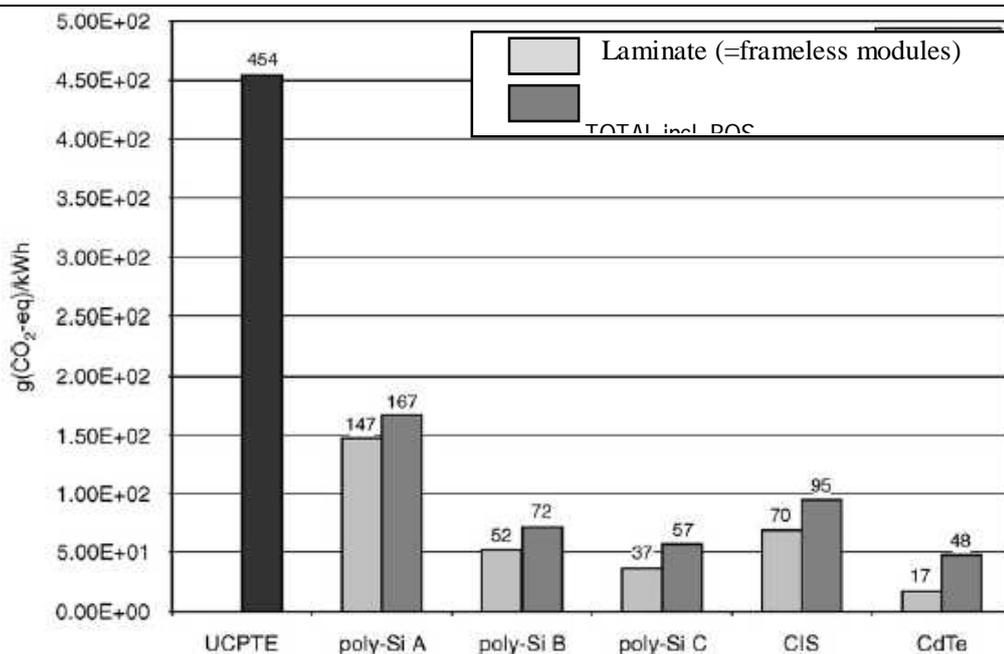


図 56 UCPTe⁷¹における電力ミックスと太陽光発電システムの GWP

(注) それぞれ右側の棒グラフが BOS を含む場合、左側が太陽電池モジュールのみの場合についての分析結果を示している。

【地球温暖化係数以外に関する結果】

- ・ 薄膜太陽電池モジュールに含まれる化学物質 (CdTeにおけるIn₂O₃、CdS、CdTe、Sb₂Te₃及びCISにおける Mo、In、Ga、Se、CdS、ZnO) が個別に環境に与える大きさを正確に定量化することは難しい。
- ・ BOSを含まない場合、環境的、熱力学的パフォーマンスはCdTeが最も良い。
 - CdTeは有毒のカドミウムを使用しているが、CdTeそれ自体は融点1,700℃と、安定した化合物である。また、火力発電所からのカドミウムの大気への排出量は低く見積もって2μg (Cd) /kWhであるのに対し、CdTe 太陽電池システムからの排出量は0.06μg (Cd) /kWhである。

【エネルギーペイバックタイムに関する結果】

- ・ エネルギーペイバックタイムに関する各システムの試算結果は以下のとおりであり、モジュールのみでは0.5～4.9年、BOSも含めたトータルでは1.5～5.5年となった。
- ・ モジュールの種類別ではCdTeがモジュールのみで0.5年、BOSを含めても1.5年と最も短い結果となった。

⁷¹ European Union for the co-ordination of production and transmission of Electricity (送電共同連盟) の略

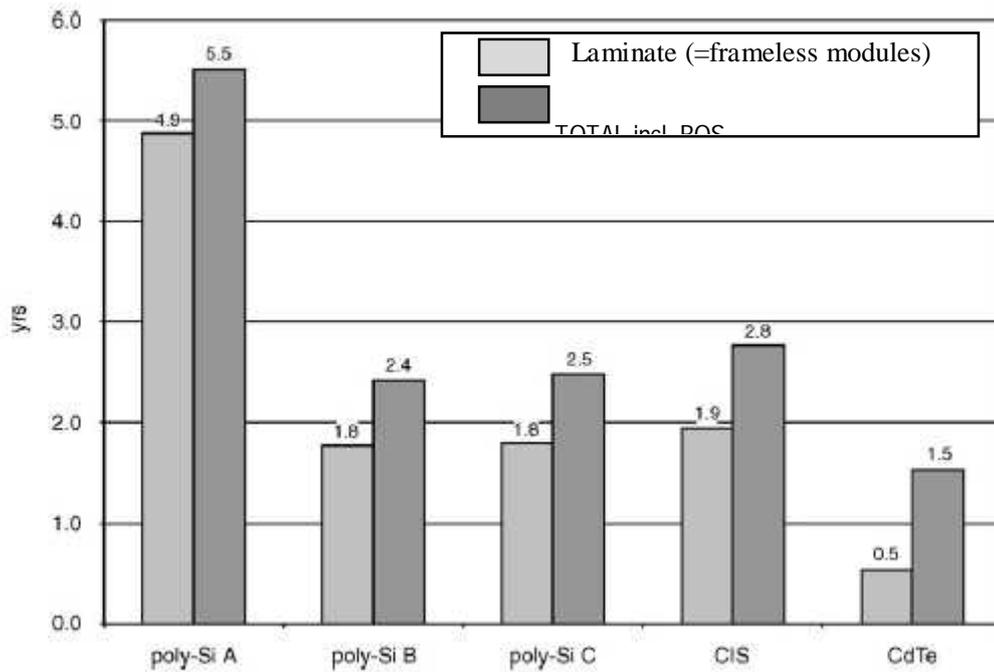


図 エネルギーペイバックタイムの試算結果

結果の
解釈

- ・ CdTe及びCIS薄膜太陽電池モジュールは開発途上であるが、多結晶シリコン系と比較すると環境性能や熱力学的性能が高くGWPも低いいため、将来的には再生可能エネルギー生産において大きな役割を果たすと考えられる。
- ・ BOSに使用する鋼やアルミニウムの使用量を減少させることにより、BOSを含めた太陽光発電システム全体のGWP低下が可能である。
- ・ CdTe及びCISは、変換効率が低いため、変換効率改善によりBOSの影響は増加するものの発電量当たりのBOSによる影響は減少する可能性がある。
- ・ 製造プロセスの最適化に、廃棄物の減量化や環境への影響の低減につながると考えられる。薄膜太陽電池モジュールの場合、生産量の増加が、環境的、熱力学的パフォーマンスを向上させる可能性がある。
- ・ シリコン系は、シリコンの製造が最もエネルギーを要する工程であることから、太陽電池に適合した規格のシリコンを効率的に製造することにより、環境への影響を低減することが可能である。
- ・ 本論文において廃棄段階は分析対象外としているが、CdTe 及び CIS 太陽電池モジュールのリサイクル戦略の開発の必要性が問題提起されている。

No	4
テーマ	太陽光発電の LCI データの収集 (太陽電池モジュールごとの比較)
文献名	Mariska J. de Wild-Scholten, Energy research Centre of the Netherlands ECN, Unit Solar Energy Erik A. Alsema, Department of Science, Technology and Society Copernicus Institute, Utrecht University Environmental Life Cycle Inventory of Crystalline Silicon Photovoltaic Module Production (2005年)
評価シナリオ	<ul style="list-style-type: none"> 太陽光発電の製造における環境負荷を評価する際に必要となる、信頼可能なデータが過去十数年なかったことから、これまでの技術革新の結果をLCAや外部コストの研究に反映することができなかった。このため、欧州及び米国の太陽光発電会社11社と共同で、Life Cycle Inventory(LCI)データの収集を実施。 バウンダリは、シリコン原料生産から結晶化とウエハ化、セル処理、モジュール組立てまでの主要な製造プロセスを包含するものとした。
	<p style="text-align: center;">Electricity generation (location dependent)</p> <p style="text-align: center;">図 LCI のシステムバウンダリ</p>
評価指標	<ul style="list-style-type: none"> 各工程及びプロセス技術ごとに、下記データを収集。 <ul style="list-style-type: none"> ➤ 原材料の種類と使用量 (kg) ➤ 電力、熱の燃料の種類と使用量 (kWh、MJ) ➤ 大気への排出物の種類と量 (kg) ➤ 廃棄物の種類と量 (kg) ➤ 廃棄物の処理の仕方と量 (m³)
仮説・前提条件	<ul style="list-style-type: none"> 2004年時点における欧州及び米国の太陽光発電製造企業の製造技術データを使用 (生産ラインからの実測データに基づく値を用いている)。 各工程及びプロセス技術ごとに、少なくとも3社のデータの平均値を用いた (取得原料消費量やエネルギー消費量といった企業の機密情報を漏らさないため)。

- 情報源の概要は以下のとおり。なお、表中の数字はデータを提供した企業数である。

表 情報源の概要

Wafer technology / Process step	Multi Si	Mono Si	Ribbon Si
Si feedstock production	1 + literature		
Crystallization + wafering	3 + equipment manufacturer	1 (1999) + update 2004 + literature	2 + 1 pilot
Cell processing	4 multi-Si + 1 mono-Si		
Module assembly	2 + material suppliers		

- 電子グレードシリコン製造からの「スクラップシリコン」は、市場シェアが5%まで減少（2005年）しているため対象に含めていない。
- シリコン原料の製造については、複数社からLCIデータを得られなかったため、シーメンス法の文献データに基づき、別の製造会社の推定データと合わせてデータを集約。

評価結果

- 2004年時点の太陽光発電製造企業の実測データに基づき、結晶シリコン太陽電池モジュールの生産における以下のLCIデータを収集・作成した。
 - 多結晶ソーラーグレードシリコンの原料生産に係るLCIデータは以下のとおり。

表 多結晶ソーラーグレードシリコン原料生産に係るLCIデータ

Name	High purity polycrystalline silicon, feedstock material for crystalline silicon ingots (Poly-Si)
Time period	2004
Geography	Europe, Western and North America
Technology	Mixed data
Representativeness	Average of data from one company and estimated data from another company based on literature data
Collection method	Data collection by factory representative + literature data.
Data treatment	
Comment	Production with Siemens process either from SiHCl ₃ or SiH ₄ . Partly with standard Siemens process and partly with modified Siemens ("solar grade") at reduced electricity consumption. Mix of electricity supply in accordance with actual conditions at considered production locations.

Products	Unit	Amount	Comment
Polycrystalline silicon, Siemens process	kg	1.00	high purity, with specifications applicable for photovoltaic industry
Materials			
MG-silicon	kg	1.13	metallurgical grade silicon
Inorganic chemicals, unspecified	kg	2	mix of NaOH, HCl and H ₂
Heat from natural gas	MJ	185	for process heat
Electricity/heat			
Electricity, from combined cycle plant, gas-fired	kWh	45	actual sources of electricity can vary with considered production location
Electricity, hydropower	kWh	65	mix of reservoir and run-of-river hydro
Emissions to air			
N.B.: emissions from natural gas combustion not included here yet!			

- 多結晶シリコン原料による単結晶シリコンウエハ製造に係るLCIデータは以下のとおり。

表 多結晶シリコン原料による単結晶シリコンウエハ製造に係るLCIデータ

Name	mono-crystalline silicon wafer from poly-Si
Time period	2004
Geography	North America + Europe, Western + Asia, former USSR
Technology	Mixed data
Representativeness	Estimated data, partly based on data from one company (but with many uncertainties) supplemented with literature sources and many own estimates.
Collection method	
Data treatment	Averaging over 3 assumed production locations.
Comment	Includes both Czochralski crystal pulling and wafer cutting processes. Wafer thickness 300 μm . The process for internal recycling of silicon is NOT included in the process data, external recycling of sawing slurry is not accounted either. The amount of poly-silicon includes virgin AND recycled silicon.

Products	Unit	Amount	Comment
mono-Si wafer	m ²	1.00	typical wafer: 125x125 mm ² (0.0156 m ²), semisquare, thickness 300 μm
Materials			
SOLIDS			
poly-Si	kg	1.58	polycrystalline silicon of semiconductor or solar grade quality, partly internally recycled silicon from
ingot cut-offs and broken wafers			
quartz crucible	kg	0.36	for ingot growing
glass	kg	0.01	for temporarily attachment of bricks to wiresawing equipment, assumed same as multi wafers
steel wire	kg	1.49	for wafer cutting, assumed same as multi wafers
silicon carbide (SiC)	kg	2.61	for sawing slurry, assumed same as multi wafers
GASES			
argon (Ar)	kg	6.20	for ingot growing
LIQUIDS			
polyethylene glycol (PEG)	kg	2.63	for sawing slurry, assumed same as multi wafers
dipropylene glycol monomethyl ether (DPM)	kg	0.30	for sawing slurry, assumed same as multi wafers
adhesive	kg	0.002	for temporarily attachment of bricks to wire-sawing equipment
tenside (concentrated)	kg	0.24	for wafer cleaning
Sodium hydroxide, 50% in H ₂ O	kg	0.015	see note 1, for wafer cleaning, assumed same as multi wafers
Hydrochloric acid, 30% in H ₂ O	kg	0.0027	see note 1, for wafer cleaning, assumed same as multi wafers
Acetic acid, 98% in H ₂ O	kg	0.039	see note 1, for wafer cleaning, assumed same as multi wafers
tap water	kg	0.006	for ingot sawing
water, deionised	kg	65	for wafer cleaning
Electricity/fuel			
electricity, medium voltage	kWh	145	total electricity consumption including direct and indirect process energy and overhead energy
natural gas	MJ	77	general use + furnaces
Final waste flows			
Silicon waste (not recycled)	kg	0.4	unused part of ingot, estimate
Waste to treatment			
cutting waste (Si + slurry)	kg	6.0	not recycled internally, but SiC and cutting fluids may be partially recovered at specialized facility

- 多結晶シリコンによる多結晶シリコンウエハ製造に係るLCIデータは以下のとおり。

表 多結晶シリコン原料による多結晶シリコンウエハ製造に係るLCIデータ

Name	multi-silicon wafer from poly-Si
Time period	2004
Geography	Europe, Western
Technology	Average technology
Representativeness	Average from 3 companies, total production 1.5E6 m ² wafer area.
Collection method	Data collection by factory representatives.
Data treatment	
Comment	Includes both the ingot growth and wafer cutting processes. Average wafer thickness 285 μm . The process for internal recycling of silicon is NOT included in the process data, external recycling of sawing slurry is not accounted either. The amount of poly-silicon includes virgin AND recycled silicon.

Products	Unit	Amount	Comment
multi-Si wafer	m ²	1.0E+00	typical wafer area: 125x125 mm ² (0.0156 m ²), average thickness 285 um
Materials			
SOLIDS			
poly-Si	kg	1.67E+00	polycrystalline silicon of semiconductor or solar grade quality, partly internally recycled silicon
from ingot cut-offs and broken wafers			
quartz crucible	kg	3.90E-01	for ingot growing
glass	kg	1.00E-02	for temporarily attachment of bricks to wiresawing equipment
steel wire	kg	1.49E+00	for wafer cutting
silicon carbide (SiC)	kg	2.61E+00	for sawing slurry
GASES			
nitrogen (N ₂)	kg	5.33E-02	for ingot growing
argon (Ar)	kg	3.04E-01	for ingot growing
helium (He)	kg	1.36E-04	for ingot growing
LIQUIDS			
polyethylene glycol (PEG)	kg	2.63E+00	for sawing slurry
dipropylene glycol monomethyl ether (DPM)	kg	3.03E-01	for wafer cleaning
adhesive	kg	2.00E-03	for temporarily attachment of bricks to wire-sawing equipment
lenside (concentrated)	kg	2.37E-01	for wafer cleaning
Sodium hydroxide, 50% in H ₂ O	kg	1.49E-02	see note 1, for wafer cleaning
Hydrochloric acid, 30% in H ₂ O	kg	2.72E-03	see note 1, for wafer cleaning
Acetic acid, 98% in H ₂ O	kg	3.90E-02	see note 1, for wafer cleaning
tap water	kg	6.41E-03	for ingot sawing
water, deionised	kg	6.49E+01	for wafer cleaning
Electricity/fuel			
electricity, medium voltage	kWh	3.00E+01	total electricity consumption including direct and indirect process energy and overhead energy
natural gas	MJ	3.96E+00	for removing adhesive after sawing
Final waste flows			
silicon waste (not recycled)	kg	3.00E-01	unused part from ingot, estimate
Waste to treatment			
cutting waste (Si + slurry)	kg	6.2E+00	not recycled internally, but SiC and cutting fluids may be partially recovered at

- 多結晶シリコンによる多結晶シリコンリボン製造に係るLCIデータは以下のとおり。

表 多結晶シリコンによる多結晶シリコンリボン製造に係るLCIデータ

Name	ribbon silicon wafer from poly-Si
Time period	2004
Geography	Europe, Western + North America
Technology	Average technology
Representativeness	Average from 3 specific processes of which one in pilot phase.
Collection method	Data collection by factory representatives.
Data treatment	
Comment	

Wafer thickness 300-330 um. Wafer area 120-156 cm².

Products	Unit	Amount	Comment
ribbon Si wafer	m ²	1	
Materials/fuels			
SOLIDS			
poly-Si	kg	0.91	
graphite	kg	0.014	
GASES			
argon (Ar)	kg	4.38	
Electricity			
electricity, medium voltage, total	kWh	45.7	
Emissions to air			
argon	kg	4.38	
Waste to treatment			
graphite crucibles	kg	0.014	
wafer waste, to recycling	kg	0.09	

- ウエハから結晶シリコンソーラーセル製造に係るLCIデータは以下のとおり。

表 ウエハから結晶シリコンソーラーセル製造に係るLCIデータ

Name multi- or mono-crystalline silicon cell
Time period 2004
Geography Europe, Western
Technology Average technology
Representativeness Average from 5 specific processes and companies (4 multi + 1
Collection method Data collection by factory representatives.
Data treatment Some inputs and emissions aggregated to protect sensitive data
Comment Wafer thickness 270–300 um.

Products	Unit	Amount	Comment
multi- or mono-Si cell (156 cm ²)	p	1.00	cell area 156 cm ² , typical thickness 270-300 um
Resources			
Water, cooling	m ³	1.56E-02	cooling water
Materials/fuels			
SOLIDS			
multi/mono-Si wafer (156 cm ²)	p	1.06E+00	
phosphorus paste	kg	2.27E-05	for emitter formation
metallisation paste	kg	1.17E-03	aggregated value for front and back pastes containing, silver content 1.6E-4 kg
polystyrene, expandable	kg	6.36E-06	for packaging
GASES			
nitrogen (N ₂)	kg	2.89E-02	
oxygen (O ₂)	kg	1.59E-03	
argon (Ar)	kg	4.01E-04	
Fluorinated compound mix (CF ₄ , C ₂ F ₆ , SF ₆ , NF ₃)	kg	4.93E-05	aggregated value for different fluorinated source gases
ammoniak (NH ₃)	kg	1.05E-04	for silicon nitride deposition
silane (SiH ₄)	kg	1.89E-05	for silicon nitride deposition
LIQUIDS			
sodium hydroxide, 50% in H ₂ O (NaOH)	kg	2.45E-03	
acetic acid, 98% in H ₂ O (CH ₃ COOH)	kg	4.42E-05	
hydrochloric acid, 30% in H ₂ O (HCl)	kg	7.12E-04	
hydrogen fluoride (HF) 100%	kg	5.89E-04	
nitric acid, 50% in H ₂ O (HNO ₃)	kg	4.17E-04	
POCl ₃ phosphoryl chloride	kg	3.39E-06	for emitter formation
phosphoric acid, industrial grade, 85% in H ₂ O (H ₃ PO ₄)	kg	1.19E-04	for emitter formation
sodium silicate	kg	1.17E-03	
calcium chloride (CaCl ₂)	kg	3.37E-04	
tetraisopropyl titanate (TPT, a titanium precursor)	liter	2.22E-08	for titanium dioxide antireflection coating deposition
isopropanol	kg	1.23E-03	
ethanol	kg	9.98E-06	
solvents, organic, unspecified	kg	2.24E-05	
water, deionised	kg	2.15E+00	
Electricity			
electricity, medium voltage	kWh	5.90E-01	
natural gas	MJ	7.42E-02	
fuel oil	liter	5.06E-04	
Emissions to air			
aluminum	kg	1.21E-05	
hydrogen chloride	kg	4.16E-06	
hydrogen fluoride	kg	7.56E-08	
lead	kg	1.21E-05	
particulates, unspecified	kg	4.16E-05	
silicon dioxide	kg	1.13E-06	
silver	kg	1.21E-05	
sodium hydroxide	kg	7.56E-07	
tin	kg	1.21E-05	
VOC, volatile organic compounds	kg	3.02E-03	
FC-gases (CF ₄ , C ₂ F ₆ , SF ₆ , NF ₃)	kgCO ₂ -eq	4.41E-02	Emission in kg CO ₂ equivalent, estimate based on 70% source gas utilisation
Final waste flows			
Photovoltaic cell waste	kg	4.31E-03	
Waste to treatment			
multi-Si cell, to recycling	p	1.76E-02	
neutral solution	?	7.31E-01	
alkaline solution	?	2.17E-04	

➤ ソーラーセルから結晶シリコン製造に係るLCIデータは以下のとおり。

表 ソーラーセルから結晶シリコン製造に係るLCIデータ

Name	Crystalline silicon PV module production
Time period	2004
Geography	Europe, Western
Technology	Mixed data
Representativeness	Average from 2 companies + literature data
Collection method	Data collection by factory representatives and literature data.
Data treatment	
Comment	Only materials and energy use for module lamination and further assembly. Typical total area (excluding frame) efficiencies are 14.0% for mono-Si modules, 13.2% for multi-Si modules and 11.2% for ribbon-Si modules.

N.B.: Module parameters may be changed below (red figures):

Number of cells, width	6
Number of cells, length	12
Cell size (length)	12.5 cm
Cell area factor	1.00
Cell efficiency (encapsulated)	14.7%
Calculated parameters	
Module width (w/o frame)	80cm
Module length (w/o frame)	156cm
Module area (w/o frame)	1.25m ²
Module perimeter (=frame length)	4.72m
Number of cells	72
Module power	165 Wp
Module efficiency (glass area, excl. frame)	13.2%

N.B. Material quantities below are calculated from the module parameters above

Products	Unit	Amount	Comment
Module, c-Si	pc	1.00	dimensions see above
Materials			
Solar cells	pc	73.4	+2% cell loss
Aluminium profile	kg	3.8	for frame, may vary per manufacturer
Polyphenylenoxid	kg	0.2	junction box, may vary per manufacturer
Glass sheet, low iron, tempered	kg	11.4	assuming 3.6 mm glass thickness, varies from 3.2 to 4.0 depending on application, size and manufacturer, +1% loss
Ethyl Vinyl Acetate	kg	1.3	EVA consumption 0.96 kg/m ² , +6% more than glass area
Back foil, for solar cell module	kg	0.32	50% polyvinylfluoride, 50% polyethylene terephthalate, 0.243 g/m ² (0.17 mm thickness) 7% cutting loss
Copper	kg	0.14	copper ribbons for cell interconnection
Tin	kg	0.007	Sn60Pb40 plating on tabbing material, Sn plating on interconnect/terminal ribbons
Lead	kg	0.004	Sn60Pb40 plating on tabbing material, some manufacturers use lead free.
Nickel	kg	0.00020	Ni plating on interconnect/terminal ribbons
Soldering flux	kg	0.0100	soldering flux, 95% propanol, no halogens
Methanol	kg	0.0162	cleaning fluid 13 ml/m ²
Silicone	kg	0.0029	for diaphragm of laminator
Silicone kit	kg	0.150	kit to attach frame and junction box
Cardboard	kg	1.37	packaging; estimation: 2 modules per cardboard box, 1 kg/m ² board, 2.2 m ² board per m ² module
Tap water	kg	27	for glass rinsing and general use
Electricity			
Electricity, medium voltage	kWh	8.33	total process energy
Final waste flows			
Solar cells waste	kg	0.015	2% loss, 10 g per cell, may be recycled
Waste to treatment			
Solar glass, low-iron, to recycling	kg	0.11	breakage loss assumed
Ethylvinylacetate, foil, to waste incineration	kg	0.05	4% cutting loss
Back foil, to waste incineration	kg	0.02	7% cutting loss

結果の
解釈

- 本文献は、ソーラーパネルの製造の各工程における LCI データの取得と整理を目的としたものであり、LCA 評価法や実際の LCA 分析は行っていないが、LCA 分析の前提となる LCI データを、実データに基づき整理したものである。

No	5
テーマ	太陽光発電の LCI データの収集（太陽電池モジュール別、設置方法別の比較）
文献名	Paolo Frankl, Annalisa Corrado, Simona Lombardelli 「Photovoltaic (PV) Systems ECLIPSE (Environmental and Ecological Life Cycle Inventories for Present and future Power System in Europe) Final Report」(2004年1月)
評価シナリオ	<p>【評価の目的と概要】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 本文献は、欧州委員会のエネルギーと持続可能な開発に関するプログラムにおけるECLIPSE⁷² (Environmental and Ecological Life Cycle Inventories for Present and future Power System in Europe) プロジェクトのもと行われた発電システムのライフサイクルインベントリ分析のうち、太陽光発電に関わる結果のレポートである。 <p>【評価の対象】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 対象とした太陽光発電システムの種類は次の4つであり、生産から維持管理までが評価に含まれる。 <ul style="list-style-type: none"> ➤ 単結晶シリコン型 (sc-Si) システム ➤ 多結晶シリコン型 (mc-Si) システム ➤ アモルファスシリコン型 (a-Si) システム ➤ CIGS システム ・ 上記の太陽光発電システムを更に7～23種類のケースに細分化し、47のケースについて分析を実施。主要な想定ケースは以下のとおり。 <ul style="list-style-type: none"> ➤ 典型的なケース ➤ 日照時間の長いスペインに設置されたケース ➤ 日照時間の短いヨーロッパ中央部に設置されたケース ➤ 最良／最悪のケース ➤ 予想される将来のケース ➤ 設置方法の異なるケース（屋根に設置する、地面に並べる等計9種類） ➤ 多結晶シリコン型については、使用するシリコンの異なる複数のケース ・ 太陽光発電システムのライフサイクルの概念図は以下のとおり。

⁷² ECLIPSE は、イタリアの Ambient Italia を中心とした 7 か国の企業及び研究機関により実施されたプロジェクトである (www.eclipse-eu.org)。ECLIPSE プロジェクトでは、太陽光、風力、バイオマス、CHP、火力の 5 種類の発電種を対象としており、その結果は ECLIPSE の LCI データベースに反映される。

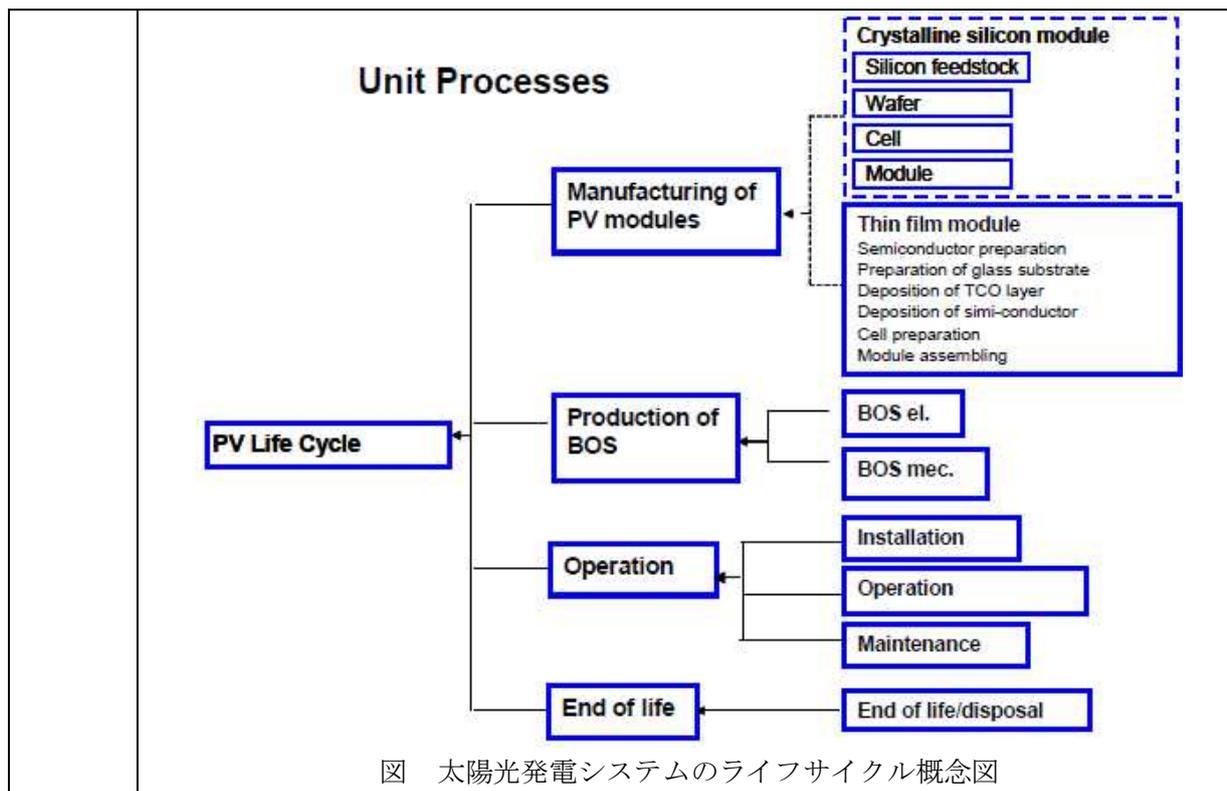


図 太陽光発電システムのライフサイクル概念図

<p>評価指標</p>	<ul style="list-style-type: none"> 以下の指標について、1kWhを送電網に供給する場合の環境影響を分析。 <ul style="list-style-type: none"> ➤ 石油 (単位: 【kg】) ➤ 石炭 (単位: 【kg】) ➤ ガス (単位: 【m³】) ➤ 褐炭 (単位: 【kg】) ➤ CO₂ (単位: 【kg】) ➤ CH₄ (単位: 【kg】) ➤ SO_x (単位: 【kg】) ➤ NO_x (単位: 【kg】) ➤ 微粒子 (単位: 【kg】) ➤ 非メタン揮発性有機化合物 (単位: 【kg】)
<p>仮説・前提条件</p>	<ul style="list-style-type: none"> 太陽電池の効率、一般的な値を設定。 太陽電池はヨーロッパ (EU15 各国とノルウェー、スイス) で生産するものとし、生産国による差異は考慮しない⁷³。 基準ケースは、イタリア中央部での操業を想定。 <ul style="list-style-type: none"> ➤ 日照量が最少のケースとして中央ヨーロッパ、日照量最大のケースとして南スペインを設定し、比較を実施。 2001年の技術を標準とする。 金属のみリサイクルすることとし、その他は埋立処分。
<p>評価結果</p>	<p>【CO₂ 排出量に関する結果】</p>

⁷³ 原料やエネルギーまで考慮すると、ヨーロッパ以外で生産されるものも含まれる。

果

- ・ モジュール 1m²当たりの CO₂ 排出量、及び太陽光発電システムとして設置した場合の 1kWh 当たりの CO₂ 排出量は以下のとおりである⁷⁴。
 - GWP は太陽電池の種類により異なり、単結晶シリコン型や多結晶シリコン型が最も高く 150kg CO₂-eq/m² 以上となる。アモルファスシリコン型は最も低く約 50 kg CO₂-eq/m² である。
 - 太陽光発電システム全体としてみた場合、BOS の影響はアモルファスシリコン型が最も大きく、GWP 全体の約 4 割が BOS によるものとなる。

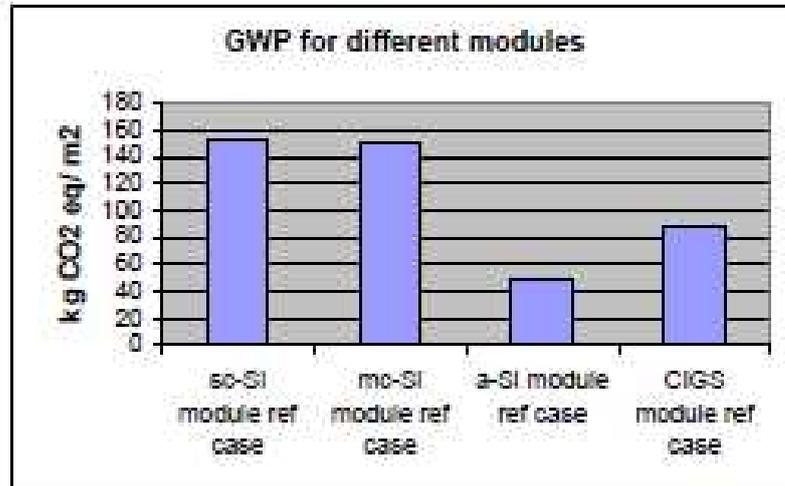


図 モジュール種別の GWP

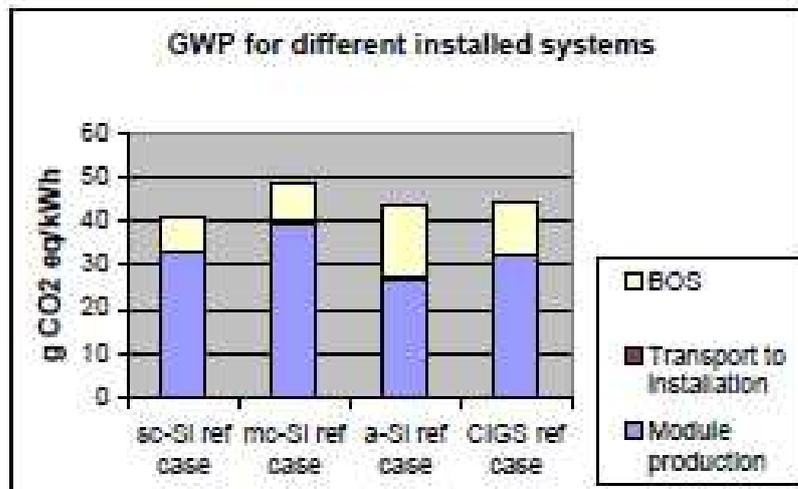


図 太陽光発電システム種別の GWP

- ・ 多結晶シリコン型システムにおける、過去、現在、将来の CO₂ 排出量は以下のとおり。
 - 過去ケースではエレクトロニクス用シリコンを 100%利用と仮定しているのに対して、現在、将来ケースではその割合が低下するとともに、モジュール用シリコンの使用割合が増加するとしているため、GWP は過去と比較して現在では 4 分の 1 以下に低下し、将来的にはさらに低下すると考えられる。

⁷⁴ 結果は各モジュール、発電システムにおける典型的なケースを対象とした分析結果である。

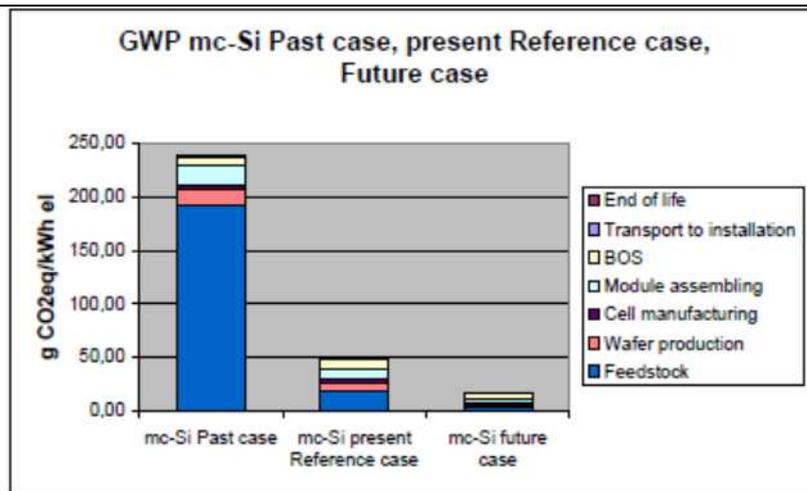


図 多結晶シリコン型の過去、現在、将来の CO₂ 排出量

設置方法別の GWP は以下のとおり。

- 左から順に広い場所に並べるタイプ、ビルの壁面に設置するタイプ、屋根に載せるタイプ、タイルを用いて屋根に組み込むタイプ、屋根そのものを太陽光パネルにするタイプを示しているが、ビル壁面に設置するタイプ (Vertical façade Integrated) では、BOS由来の排出量が少なくなっている。

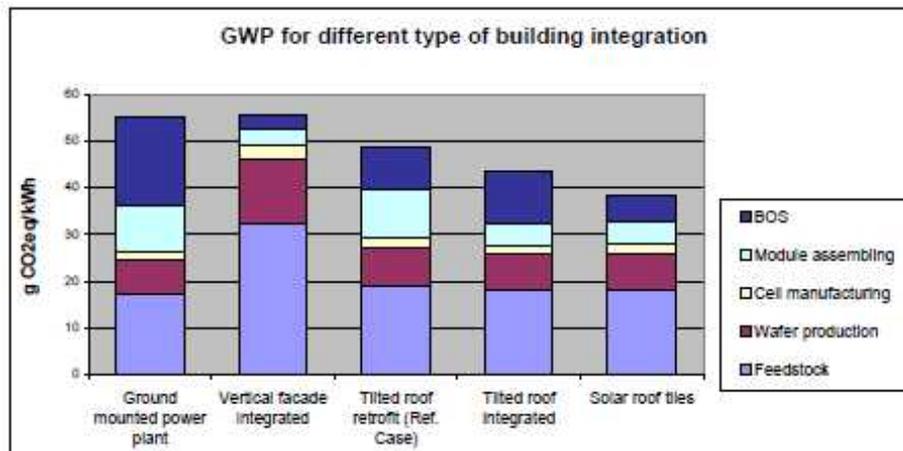


図 設置方法別の GWP

結果の
解釈

- ・ 太陽電池の効率、寿命、どのようなシリコンを使用するかにより、太陽光発電の環境負荷は大きく異なる。
- ・ 結晶シリコン系では、シリコンウエハの製造工程、薄膜系では、半導体の堆積工程の環境影響が大きい。
- ・ 多結晶シリコン型システムでは、将来的に太陽電池の高効率化、寿命の長期化、シリコンの利用プロセスの改善、使用済み太陽光発電からの中古シリコンウエハの再利用により、温室効果ガスの排出量を70%削減することが期待できる。
- ・ ビル壁面に設置するタイプは集光率が悪いいため、kWh当たりのCO₂排出量は多くなる。一方、屋根そのものを太陽光パネルにするタイプは壁面に設置するタイプの7割程度のGWPであり、モジュールの種類だけでなく、設置方法によってもGWPは大きく異なる。

No	6
テーマ	太陽光発電の LCA 評価 (BAU シナリオと WEEE シナリオ、VA シナリオ (回収・修理システム構築) との比較)
文献名	EPIA/BSW 「STUDY ON THE DEVELOPMENT OF A TAKE BACK AND RECOVERY SYSTEM FOR PHOTOVOLTAIC PRODUCTS」 (2007 年 11 月)
評価シナリオ	<ul style="list-style-type: none"> ・ 急速な成長を遂げている太陽光発電市場において、以前から PV モジュールや中間生成物の処分に関する問題は着目されていた。しかし、2007 年 7 月、適切な回収・リカバリー⁷⁵システム (take back and recovery system) の実現を目指して、ブリュッセルで開催された“PV Cycle Association”においては、環境影響、経済性の観点からの分析は十分なされていない。 ・ このため本論文では、妥当な (現実的な) 技術、生態学、経済学、法的・政策的分析をベースとしたパラメータに基づく、より適切な回収・再生利用システムの構築を目的とし、回収場所から処理場までの輸送コストを含む使用済み PV モジュールの回収からリカバリー (リサイクルや廃棄処分) までを対象とし評価を実施。 ・ 評価シナリオは以下のとおり。 <ul style="list-style-type: none"> ➤ BAU シナリオ ➤ WEEE シナリオ：太陽光発電に対して WEEE 指令が適用された場合 ➤ VA (Voluntary Agreement) シナリオ：自主的取り組みとして回収・リカバリーシステムが構築された場合 ・ リサイクルプロセスの考え方は以下のとおり。 <ul style="list-style-type: none"> ➤ リサイクルプロセスについて、現在実用化されているのは、ドイツを中心として実施されている単結晶シリコンモジュールと First Solar 社で実施されている CdTe モジュールに関するリサイクルプロセスである。VA シナリオでは、どちらの場合でも主要なシリコンや CdTe に加え、ガラスについてもリサイクルを行うなど、高価値のリサイクルを行うこととしている。一方、BAU シナリオと WEEE シナリオでは、法規制に準ずる形で処分を行うこととしている。 ➤ リサイクルプロセスにおいて資源の枯渇性は重要な役割を担うが、本評価では、一般的な LCA 評価と同様に、定量的な評価が難しい資源の枯渇性を考慮できていない。CIGS や CdTe モジュールのリサイクルでは、希少で価値ある資源 (In, Te, Se) の再循環に繋がるが、埋立処理される場合や建材として利用される場合には、不可逆的に失われる。
評価指標	<ul style="list-style-type: none"> ・ GWP100 (Global Warming Potential 100 years) ・ オゾン層の減少等環境影響評価、利用者・生産者のコスト等の経済影響評価。
仮説・前提条件	<ul style="list-style-type: none"> ・ シナリオに依存しない前提条件として、以下の項目を設定。なお、経済影響分析を行うための項目を別途設定。

⁷⁵ マテリアルリサイクル (material recycling) と熱回収 (energy recovery) を両方含む

- 廃棄量：生産量を基に推計。耐用年数や導入モジュール数に起因するデータの不確実性あり。薄膜系モジュールの構成割合は以下のとおり。

表 薄膜系総廃棄量に対する薄膜系モジュールの構成割合

Table 41: Proportion of individual technologies in total thin film waste quantity

	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
a-Si	100%	98%	97%	95%	87%	78%	70%	61%	53%	52%	52%	51%	51%	50%
CdTe	0%	2%	3%	5%	8%	12%	15%	19%	22%	22%	22%	22%	22%	22%
CIS	0%	0%	0%	0%	5%	10%	15%	20%	25%	26%	26%	27%	27%	28%

- 規制物質：PV モジュール中の RoHS 指令において使用制限が設けられている物質は以下のとおり。

表 PV モジュールにおける RoHS 指令の規制物質の割合

Table 44: Hazardous substances according to RoHS in PV modules (details for flame retardants are not available)

	Contents in relation to the entire module		Details relating to homogenous material in accordance with RoHS	
	Cd	Pb	Cd	Pb
c-Si	/	<0.1%	<0.1	>0.1 (Solder)
a-Si	/	<0.1%	<0.1	>0.1 (Solder)
CIS	<0.1%	<0.1%	>0.1 (Cadmium-containing parts)	>0.1 (Solder)
CdTe	<0.1%	<0.1%	>0.1 (CdTe film)	>0.1 (Solder)

- 各シナリオの設定は以下のとおり。

シナリオの要素	適用範囲	シナリオ		
		BAU	WEEE	VA
収集				
収集地点における古いモジュールのコスト負担	民生部門のみ	利用者	生産者	生産者
収集地点の物理的責任	民生部門のみ	—	国と生産者が半々	第三者（供給元、ディーラー、インストーラー）
原点収集と処分にかかるコスト負担	民生部門起源	利用者	利用者	利用者
	産業部門起源	利用者	利用者	利用者
ディーラーに引き渡すためのコスト負担	民生部門起源	利用者	生産者が 25～70%、利用者が 75～30%	生産者
	産業部門起源	利用者	生産者	生産者
最低限の収集率		0	民生部門は 25%、産業部門は具体数字ではなく、収集率の増加見通し	初年度(2008年)は 25%、2012年からは 85%に増加

			に起因	
処理				
処理条件	規制物質の分離	—	Hg,Cd,Pb,CrVI, BFR	Hg,Cd,Pb,CrVI, BFR
	高価値材料の分離	—	特に規定しない(リサイクル率と経済性に起因)	ガラス、フレーム、半導体材
処理に関するコスト負担	民生部門	利用者	生産者が 25~70%、利用者が 75~30%	生産者
	産業部門	利用者	生産者	生産者
処理に関する物理的責任	民生部門	一般廃棄物処理業者	25-70%が特定廃棄物処理業者、75-30%が一般廃棄物処理業者	第三者
	産業部門	一般廃棄物処理業者	特定廃棄物処理業者	第三者
リサイクル				
リサイクル率	民生部門起源のモジュール	—	総リサイクル率が 70~80%	総リサイクル率 80%
	産業部門起源のモジュール	—	定量的な規定なし	総リサイクル率 80%
	参考	—	耐用年数経過後のモジュールの割合	耐用年数経過後のモジュールの割合(生成時の廃棄物を含む)
リサイクルのコスト負担	民生部門	利用者	生産者が 25~70%、利用者が 75~30%	生産者
	産業部門	利用者	生産者(リサイクル率の定量化なし)	生産者
リサイクルの物理的責任	民生部門	一般廃棄物処理業者	25~70%が特定廃棄物処理業者、75~30%が一般廃棄物処理業者	第三者
	産業部門	一般廃棄物処理業者	特定廃棄物処理業者	第三者
管理				
義務監視		—	国/許可業者	PV サイクル協会
処分プロセスの組織化		利用者	官庁、生産者、第三者(許可業者、設置業者)	生産者/PV サイクル協会
評価結果	BAU シナリオにおける GWP100 をベースに、WEEE シナリオと VA シナリオにおける 2020 年までの GWP100 を推計した結果は以下のとおり。			

- ▶ WEEE シナリオと比較して、環境により配慮した VA シナリオでは早い段階から大きな違いをみせており、2020 年時点では WEEE シナリオと比較して 1.7 倍程度の削減効果がある。
- ▶ WEEE 指令では、使用済みのガラスを埋立地で道路建設材料として使用した場合もリサイクルとするなど、別用途での再利用もリサイクルの一貫としている。それに対し、VA シナリオではガラスと半導体両方が生産工程と同じ用途によりリサイクルされるなど、より高度で価値の高いリサイクルを行うこととしている。また、WEEE 指令では、レアメタルであるかどうかや環境影響の大小に係らず総リサイクル率のみを設定している。なお、VA シナリオでは、生産や輸送により発生する廃棄物も含んだシナリオとしている。

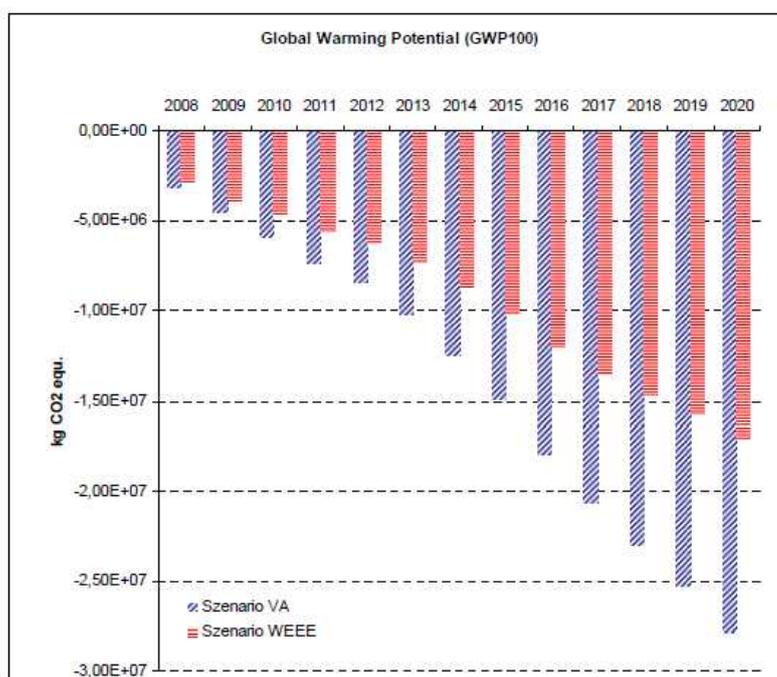


図 各シナリオの GWP100 の推計 (2008~2020 年)

結果の
解釈

- ・ 早期に、環境に配慮した回収・リカバリーシステムを構築することにより、将来の GWP 削減効果はより高いものとなる。
- ・ 環境に配慮した VA シナリオのようなシステムを構築するためには、適切な回収、処理が行われ、十分かつ一定量のリサイクルを行うことなど、複数の条件を満たす必要がある。

No	7
テーマ	風力発電の LCA 評価（洋上プラント及び陸上プラント）
文献名	Vestas Wind Systems A/S 「Life cycle assessment of offshore and onshore sited wind power plants based on Vestas V90-3.0 MW Turbines」 (2005年3月)
評価シナリオ	<ul style="list-style-type: none"> ・ ISO14040-14043の原則に準拠して評価を実施。 ・ モデリングには、EDIP(environmental design of industrial products)法に基づき PC tool GaBi を使用。 ・ Vestas V90-3.0 MW turbine を評価対象とする。 ・ 利用するデータは実際に稼働しているプラントではなく、Vestas 社の保有するモデルプラントを用いて収集することとし、洋上・陸上双方のプラントを対象とする。
評価指標	<p>評価指標は、以下の3グループとする。</p> <p>① 環境への影響</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 地球温暖化 ・ オゾン層の破壊 ・ 酸性化 ・ 富栄養化 ・ 光化学スモッグ <p>② 有毒性</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 人体に対する有毒性 ・ 生態系に対する有毒性 <p>③ 廃棄物</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 建設廃材 ・ 鋳滓及び灰 ・ 有害廃棄物 ・ 放射性廃棄物
仮説・前提条件	<ul style="list-style-type: none"> ・ プラントのタービンとケーブルの耐用年数は 20 年とする。 ・ タービン及びトランスミッションのライフサイクルにおいて用いられる資源の最大量は以下のとおり。

表 タービン及びトランスミッションに用いられる資源の最大量
(ライフサイクル全体)

Materials	Materials for offshore wind power plant		Materials for onshore wind power plant	
	Offshore turbine	Transmission	Onshore turbine	Transmission
	(kg/turbine)	(kg/farm)	(kg/turbine)	(kg/farm)
Water	3.66E+07	1.88E+08	3.27E+07	1.11E+05
Hard coal	1.89E+05	1.65E+06	9.95E+04	0.00E+00
Iron	1.17E+05	4.84E+04	6.42E+03	3.17E+01
Crude oil	1.01E+05	6.56E+06	8.08E+04	1.07E+04
Quartz sand	9.33E+04	5.45E+04	9.27E+04	1.80E+00
Lignite	7.90E+04	1.16E+06	5.34E+04	4.30E+02
Natural gas	7.76E+04	1.35E+06	5.13E+04	3.39E+03
Limestone	3.37E+04	1.14E+05	1.46E+04	3.02E+02
Sodium chloride	1.45E+04	7.38E+04	1.41E+04	2.60E+02
Zinc	1.12E+04	2.44E+04	2.09E+03	0.00E+00
Clay	8.37E+03	2.11E+04	8.37E+03	1.52E-01
Stone	2.80E+03	1.25E+06	5.57E+05	0.00E+00
Manganese	2.52E+03	1.33E+04	1.81E+03	1.90E-01
Aluminium	1.96E+03	1.22E+05	7.86E+02	1.29E+02
Copper	5.51E+02	2.03E+05	5.25E+02	5.32E+02
Lead	4.33E+00	8.60E+04	4.17E+00	0.00E+00

評価結果

- 洋上及び陸上風力発電によって電力を生産する際に消費する1kWh当たりの資源及びエネルギー量は以下のとおり。

Offshore wind power plant		Onshore wind power plant	
Resource	Quantity [g/kWh]	Resource	Quantity [g/kWh]
Water (fresh)	140.010	Water (fresh) [kg]	211.633
Hard coal	0.752	Stone [kg]	3.531
Crude oil	0.635	Hard coal	0.662
Iron	0.419	Quartz sand	0.587
Natural gas	0.338	Crude oil	0.550
Quartz sand	0.335	Lignite	0.357
Lignite	0.334	Natural gas	0.349
Limestone	0.125	Limestone	0.095
Sodium chloride (rock salt)	0.056	Sodium chloride (rock salt)	0.092
Stone	0.055	Clay	0.054
Zinc	0.041	Iron	0.041
Clay	0.031	Zinc	0.013
Aluminium	0.011	Manganese	0.012
Manganese	0.010	Aluminium	0.005
Copper	0.009	Copper	0.004
Lead	0.003	Chromium	0.002

Energy consumption [MJ/kWh produced]	Offshore	Onshore
Fossil fuels		
Crude oil	2.89E-02	2.50E-02
Hard coal	2.32E-02	2.06E-02
Lignite	3.27E-03	3.50E-03
Natural gas	1.86E-02	1.92E-02
Nuclear power	2.12E-02	2.22E-02
Renewable energy		
Biomass, dry matter, fuel	8.98E-04	7.74E-04
Hard wood, dry matter, raw material	7.09E-05	1.26E-04
Primary energy from hydro power	5.57E-03	6.20E-03
Primary energy from wind power*	2.54E-07	4.51E-07
Renewable fuels	1.17E-08	2.08E-08
Straw	1.81E-06	2.30E-11
Total (MJ/kWh produced)	1.02E-01	9.836E-02
Total (kWh/kWh produced)	2.85E-02	2.732E-02
Total (kWh/turbine) in the lifetime	8,098,391	4,311,484

・ また、発電に伴って大気及び水中へ排出される汚染物質質量は以下のとおり。

Emissions [g/kWh produced]	Offshore	Onshore
Emissions to air		
Carbon dioxide (CO ₂)	5.25E+00	4.64E+00
Sulphur dioxide	2.22E-02	2.30E-02
Nitrogen oxides	2.04E-02	1.72E-02
Carbon monoxide	1.99E-02	8.17E-03
Organic emissions to air (group VOC)	1.20E-02	1.38E-02
Nitrous oxide (laughing gas)	1.77E-04	1.87E-04
Lead	1.72E-04	3.02E-04
Hydrogen chloride	1.11E-04	1.62E-04
Nitrogen (N ₂)	1.03E-04	7.26E-05
Hydrogen sulphide	7.45E-05	3.18E-05
Chromium (unspecified)	5.72E-05	7.88E-05
Emissions to water		
Total N	2.66E-06	1.60E-06
Total P	3.20E-08	2.93E-08
Chemical oxygen demand (COD)	1.23E-03	5.18E-04

・ V90風車の環境影響種類別の環境への寄与度 (kWh当たりのPerson Equivalent) は以下のとおり。なお、Person Equivalent とは、デンマーク工科大学の開発した EDIP (environmental design of industrial products) 法に基づき、複数の環境影響を重み付け・統合化する際の単位であり、平均的な人が一生に与える環境影響の大きさを表す。

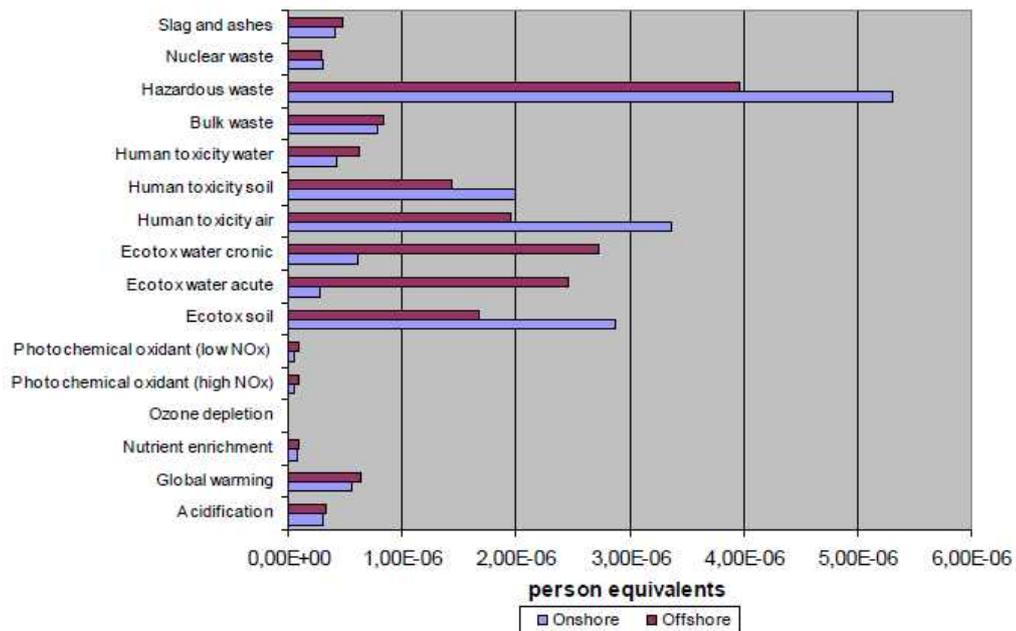


図 V90風車の環境影響種類別の環境への寄与度

- 洋上プラントと陸上プラント各々について1基当たり年間発電量を変化させた場合の1kWh当たりの地球温暖化への寄与度の関係は以下のとおり。
 - 洋上プラントの方が、陸上プラントよりも地球温暖化への寄与度は高く、年間発電量が小さい6,000 MWh程度のタービンの場合、洋上プラントは陸上プラントの2倍の寄与度となる。
 - 洋上プラント、陸上プラントともに、風況がよくタービンの発電量が増加（設備利用率が向上）するにつれて、地球温暖化への寄与度は低下し、その差は減少する傾向にある。

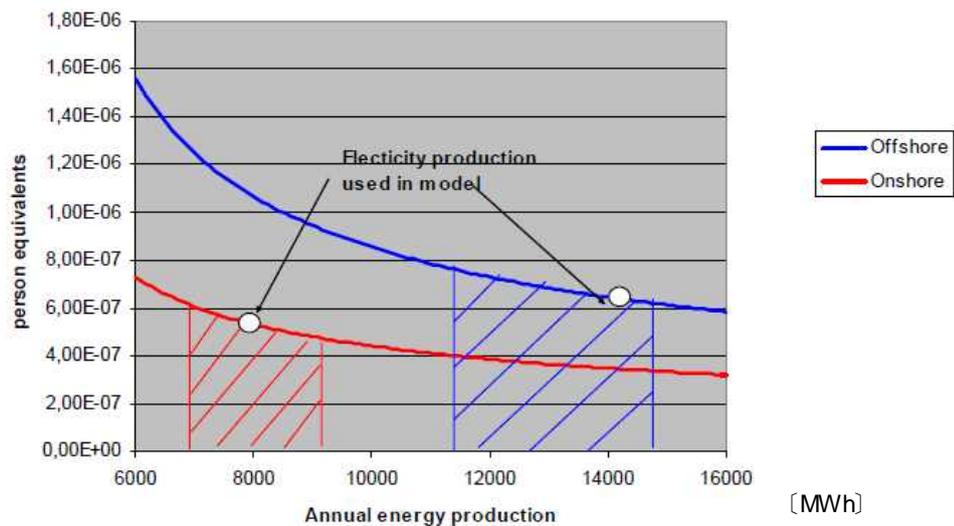


図 洋上/陸上プラントの年間発電量に応じた1kWh当たりの地球温暖化への寄与度

結果の
解釈

- 洋上プラントの導入による資源の消費は陸上プラントによるそれより相当量多いが、発電量の増加（設備利用率の増加）による地球温暖化への影響の低減効果は洋上プラントの方が大きいと言える。

No	8																																																
テーマ	風力発電の LCA 評価（ライフサイクル段階別及び発電種別の比較）																																																
文献名	法政大学 町田 知聡「風力発電のライフサイクルにおける環境負荷評価」（2006年3月）																																																
評価シナリオ	<ul style="list-style-type: none"> 風力発電システムを対象にTMR(Total Material Requirement)という指標を用いた評価を実施。 TMRの結果をLCAの結果と比較。 発電種別ごと、風車の発電量ごとのライフサイクルCO₂を評価。 																																																
評価指標	<ul style="list-style-type: none"> LCA：製品のライフサイクル、すなわち原料の採取から廃棄まで、すべての段階を通して環境負荷を定量的に評価する手法。 TMR: ある製品を作製するのに必要な関与物質総量。関与物質総量はWorld resource institute の国際共同報告書「Resource Flows」の中で以下の式のように定義される。 $(\text{関与物質総量TMR}) = \Sigma (\text{直接投入物質質量}) + \Sigma (\text{間接投入物質質量}) + \Sigma (\text{隠れた物質フロー量})$ CO₂排出量 																																																
仮説・前提条件	<ul style="list-style-type: none"> 風力発電は近年大型化の傾向がみられ、国内外における新規導入風車の定格出力は多くが1,000kW 以上であることから、1,000kW の風車（MWT-1000A）を対象とする。風力発電の主な使用は以下のとおり。 <ul style="list-style-type: none"> ▶ 定格出力：1,000kW カットイン風速：3.0m/s ▶ ロータ直径：61.4m カットアウト風速：25m/s（10分平均風速） ▶ 定格回転数：19.8rpm 耐風速：60m/s ▶ 定格風速：12.5m/s ▶ 発電機形式：誘導発電機 ▶ 電圧・相数・周波数：600V×3相×60Hz、690V×3相×50Hz 石炭火力、石油、火力、LNG 火力、原子力火力、水力、地熱との比較を実施。 ライフサイクルを以下の通り区分し、各工程におけるデータを作成。 <ul style="list-style-type: none"> ▶ 製造工程：使用される原材料の質量に CO₂排出原単位をかけ合わせて算出。 ▶ 使用した CO₂ 排出原単位は以下のとおり。 <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <caption>Table.1 CO₂ emission factors of material</caption> <thead> <tr> <th colspan="2">kg-CO₂/kg</th> <th colspan="2">kg-CO₂/kg</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>GFRP</td> <td>6.48</td> <td>ナイロン</td> <td>3.98</td> </tr> <tr> <td>合金鋼</td> <td>1.25</td> <td>フェルト</td> <td>1.93</td> </tr> <tr> <td>ゴム</td> <td>2.65</td> <td>ベークライト</td> <td>3.98</td> </tr> <tr> <td>ステンレス鋼</td> <td>1.73</td> <td>黄銅</td> <td>1.75</td> </tr> <tr> <td>軟鋼</td> <td>1.25</td> <td>ポリアミド</td> <td>3.98</td> </tr> <tr> <td>プラスチック</td> <td>0.91</td> <td>コンクリート</td> <td>0.11</td> </tr> <tr> <td>塩ビ</td> <td>1.36</td> <td>ガラス繊維</td> <td>1.93</td> </tr> <tr> <td>PVC</td> <td>1.36</td> <td>ポリエステル</td> <td>3.85</td> </tr> <tr> <td>塩ビライニング</td> <td>1.36</td> <td>ビニルエステル</td> <td>1.36</td> </tr> <tr> <td>鋳鉄</td> <td>2.26</td> <td>ガラス</td> <td>1.93</td> </tr> <tr> <td>鋼</td> <td>1.75</td> <td>石油</td> <td>2.70</td> </tr> </tbody> </table> <ul style="list-style-type: none"> ▶ 輸送工程：トラック・鉄道・海運を利用すると仮定。CO₂ 排出量の算出には、輸送に必要な石油量と石油の CO₂排出原単位を利用 ▶ 建設工程：使用した重機等の詳細なデータが得られなかったため、文献（原田幸明 井島清 片桐望 大蔵隆彦：金属の関与物質総量の概算、日本金属学会誌、 	kg-CO ₂ /kg		kg-CO ₂ /kg		GFRP	6.48	ナイロン	3.98	合金鋼	1.25	フェルト	1.93	ゴム	2.65	ベークライト	3.98	ステンレス鋼	1.73	黄銅	1.75	軟鋼	1.25	ポリアミド	3.98	プラスチック	0.91	コンクリート	0.11	塩ビ	1.36	ガラス繊維	1.93	PVC	1.36	ポリエステル	3.85	塩ビライニング	1.36	ビニルエステル	1.36	鋳鉄	2.26	ガラス	1.93	鋼	1.75	石油	2.70
kg-CO ₂ /kg		kg-CO ₂ /kg																																															
GFRP	6.48	ナイロン	3.98																																														
合金鋼	1.25	フェルト	1.93																																														
ゴム	2.65	ベークライト	3.98																																														
ステンレス鋼	1.73	黄銅	1.75																																														
軟鋼	1.25	ポリアミド	3.98																																														
プラスチック	0.91	コンクリート	0.11																																														
塩ビ	1.36	ガラス繊維	1.93																																														
PVC	1.36	ポリエステル	3.85																																														
塩ビライニング	1.36	ビニルエステル	1.36																																														
鋳鉄	2.26	ガラス	1.93																																														
鋼	1.75	石油	2.70																																														

Vol.65, No.7(2001), 564-570) を参考とした。

- 補修工程：風力発電では、使用段階での CO₂ 排出は無いが、風車本体を補修する必要がある。設備補修では、土木設備以外の機械設備の製造および輸送に投入された素材および燃料量の 2%が 1 年間に必要であると仮定。
- 廃棄段階：評価対象外とする。

評価結果

風力発電施設の製造段階におけるCO₂排出量及びライフサイクル全体のCO₂ 排出量は以下のとおり。

- ライフサイクル CO₂ に占める製造段階の割合は約 70%である。
- 製造段階では、タワー部製造の CO₂ 排出量が最も大きい。

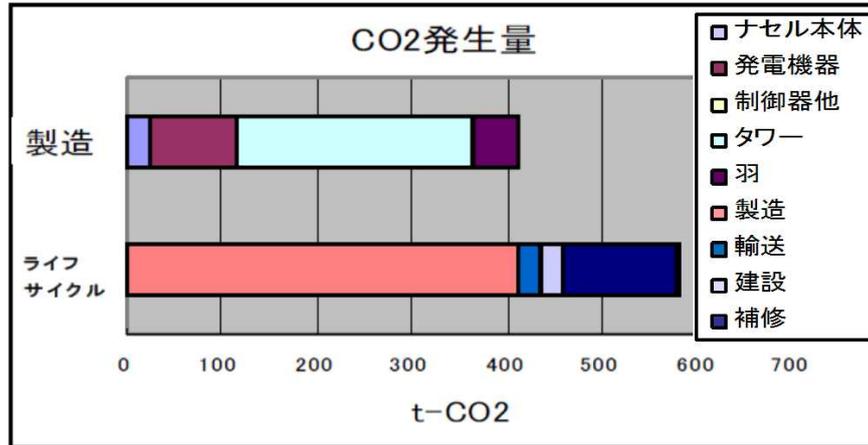


図 風力発電施設からの CO₂ 排出量

※文献に示された図より三菱総合研究所作成

風車1基のLCAとTMRの比較結果は以下のとおり。

- TMR では、LCA に比べて、タワー部の割合が大きく、ナセル本体・羽部の占める割合が小さい。これは、タワー部製造時に使用するコンクリートの TMR 原単位が LCA と比べ相対的に大きく、発電機器部製造時に大量に使用する鉄鋼部品の TMR 原単位が LCA と比べ低いためである。

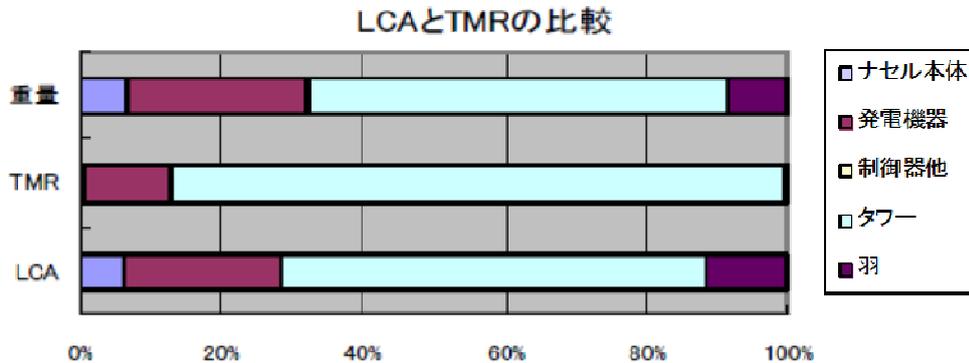


図 TMR と LCA の結果の比較

※文献に示された図より三菱総合研究所作成

発電容量 1000kW 風車の発電量あたりの CO₂ 排出量を他の発電システム ((財) 電力中央研究所「ライフサイクル CO₂ 排出量による発電技術の評価—最新データによ

る再推計と前提条件の違いによる影響—」(2000年3月)の値)と比較したところ、自然エネルギーや原子力発電は、火力発電に比べ発電量あたりのCO₂排出量が低い結果となった。

- ・ 発電容量1000kW風車の発電量あたりのCO₂排出量を発電容量の小さい風車と比較した結果は以下のとおり。
 - 発電容量1,000kWの風車に比べ300kWや100kWの風力発電の発電量あたりのCO₂排出量はそれぞれ2倍、3倍となる。

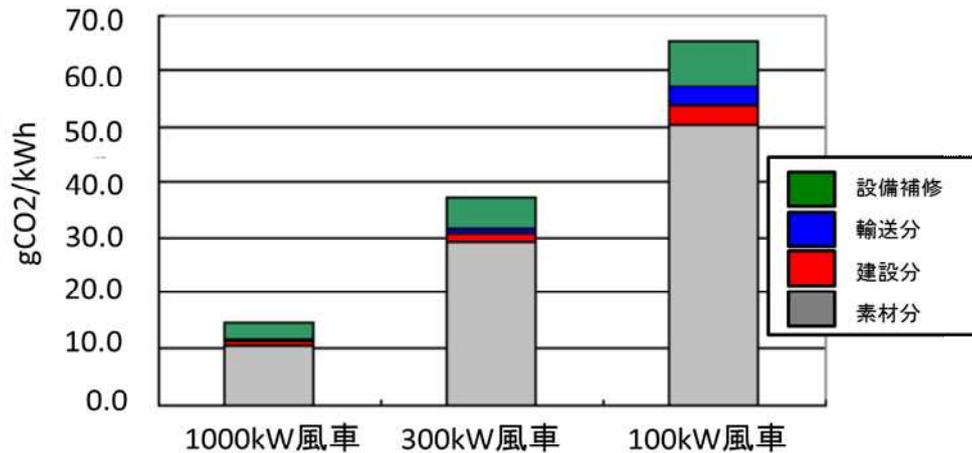


図 風車の発電容量別のCO₂排出量

※文献に示された図より三菱総合研究所作成

結果の
解釈

- ・ 風車製造段階では、タワー部の環境負荷が最も多く、TMRで約87%、LCA(CO₂排出量)で約60%である。
- ・ 制御機器部に希少金属が含まれているが、ごく微量であり全体に与える影響は小さいため、タワー部製造における使用素材の量を削減することにより、環境負荷を低減することが可能である。
- ・ 風車の大型化により、環境負荷は小さくなる傾向にある。

No	9																																								
テーマ	風力発電装置の LCA 評価 (エネルギー消費量及び CO2 排出量の算出と既存各種発電システムとの原単位比較)																																								
文献名	足利工業大学大学院工学研究科修士課程 安達 陽介「大型風力発電装置の LCA」(平成 14 年度)																																								
評価シナリオ	<ul style="list-style-type: none"> ・ 温室効果ガス排出削減目標を達成するため、再生エネルギーの開発が活発に行われており、風力発電設備の導入も活発化することが予想される。しかしながら、風力発電は発電時においてはほとんど二酸化炭素を排出しないものの、製造、建設、廃棄時には大量の資源やエネルギーを投入するため、環境負荷がかかる。近年では風車の大型化が進んでおり、環境に及ぼす影響は無視できなくなっていることから、大型風力発電装置のライフサイクルでの環境負荷性を定量的に推定・評価するために、LCAを実施。 ・ LCAを実施することにより、エネルギー消費量及び CO₂排出量を定量的に算出し、エネルギー及び CO₂原単位を算出。さらに感度分析を実施することにより、計算プロセスの違いによる原単位への影響を分析し、誤差範囲の明確化を実施。 ・ 上記結果を受け、既存発電システムとの比較を行い、CO₂回収年数及び年間のCO₂削減量を推定することにより、大型風力発電装置のCO₂削減効果の明確化。 																																								
評価指標	<ul style="list-style-type: none"> ・ エネルギー消費量及び CO₂排出量 ・ CO₂回収年数とCO₂排出削減量 																																								
仮説・前提条件	<ul style="list-style-type: none"> ・ 評価対象とした大型風力発電システムは、三菱重工業製の1000kW風車「MWT-1000A」である。 ➤ 当該風車は、日本のように台風が多く風の乱れが強い地域にも対応できる設計で、耐震性にも優れており、大型風車としてすでに実績を積んでいるため採用。 ➤ 風車の構成要素は以下のとおり。 <p style="text-align: center;">表 MWT-1000A の構成要素</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>機器名</th> <th>数量 (unit)</th> <th>重量 (kg/unit)</th> <th>材質</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ナセル</td> <td>1</td> <td>43,700</td> <td>鉄</td> </tr> <tr> <td>ローターヘッド</td> <td>1</td> <td>19,000</td> <td>鉄</td> </tr> <tr> <td>ブレード</td> <td>3</td> <td>4,500</td> <td>GFRP (ガラス繊維 65%、不飽和ポリエステル 35%)</td> </tr> <tr> <td>タワー (下段)</td> <td>1</td> <td>18,200</td> <td>鉄</td> </tr> <tr> <td>タワー (中下段)</td> <td>1</td> <td>36,900</td> <td>鉄</td> </tr> <tr> <td>タワー (中上段)</td> <td>1</td> <td>26,400</td> <td>鉄</td> </tr> <tr> <td>タワー (上段)</td> <td>1</td> <td>19,600</td> <td>鉄</td> </tr> <tr> <td>制御盤</td> <td>2</td> <td>2,500</td> <td>鉄</td> </tr> <tr> <td>基礎</td> <td>—</td> <td>1,477,000</td> <td>セメント</td> </tr> </tbody> </table> <p>※基礎部分のデータはドイツ製の風車との重量比で算出。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ システム境界は以下のとおり。 ➤ 風力発電装置の原材料調達から製造、建設、輸送、運用 (修繕保守を含む)、廃棄 	機器名	数量 (unit)	重量 (kg/unit)	材質	ナセル	1	43,700	鉄	ローターヘッド	1	19,000	鉄	ブレード	3	4,500	GFRP (ガラス繊維 65%、不飽和ポリエステル 35%)	タワー (下段)	1	18,200	鉄	タワー (中下段)	1	36,900	鉄	タワー (中上段)	1	26,400	鉄	タワー (上段)	1	19,600	鉄	制御盤	2	2,500	鉄	基礎	—	1,477,000	セメント
機器名	数量 (unit)	重量 (kg/unit)	材質																																						
ナセル	1	43,700	鉄																																						
ローターヘッド	1	19,000	鉄																																						
ブレード	3	4,500	GFRP (ガラス繊維 65%、不飽和ポリエステル 35%)																																						
タワー (下段)	1	18,200	鉄																																						
タワー (中下段)	1	36,900	鉄																																						
タワー (中上段)	1	26,400	鉄																																						
タワー (上段)	1	19,600	鉄																																						
制御盤	2	2,500	鉄																																						
基礎	—	1,477,000	セメント																																						

- までを分析対象とし、リサイクルについては含まないこととした。
- 製造段階、建設段階、輸送段階、運用段階、廃棄段階に分類して算出。
 - ✧ 製造段階：送電線や変圧器等逆潮流のための機器は含めず、風車本体のみを対象。
 - ✧ 風力発電設備は多種多様な材料や危機から構成されており、詳細な部分まで考慮することが困難なため、アロケーション手法⁷⁶は考慮しない。
 - ・ 風車の耐用年数は20年、年平均風速を8m/s、風車の製造場所は長崎、建設場所を北海道と想定。
 - ・ データの収集方法は以下のとおり。
 - 風力発電装置の素材構成や各要素ごとの重量データ：三菱重工業から入手
 - 建設に関するデータ：建設機材の燃料消費率を（株）日本建設機械化協会編「建設機械等損量算定表 平成11年度版」より引用し、1日の機材使用時間と建設日数を乗じて算出。
 - 輸送段階におけるデータ：装置の製造場所から建設地までの輸送距離と、輸送用トレーラーやフェリーの燃料費から算出。
 - 廃棄段階におけるデータ：風車の廃棄にかかるコストに産業廃棄物の原単位を乗じて算出。
 - ・ データ集計方法は以下のとおり。
 - ライフサイクルにおけるエネルギー消費量や CO₂排出量を推計する際は、一般的に積上げ法が採用されるが、風力発電では多種多様な製品で構成されておりすべてを把握することが困難であるため、本論文では基本的には積上げ法で集計を行い、入手困難なデータについては産業連関表を用いて推計を実施。
 - ・ 引用原単位は以下のとおり。
 - 製造段階から廃棄までの計算で使用する原単位は、金材技研「エコマテリアル設計者・開発者のためのデータバンク」から引用。

表 引用原単位

原単位名	エネルギー原単位 [MJ/ kg]※	CO ₂ 原単位 [kg-CO ₂ / kg]※
鉄	30.62	2.37
FRP	77.82	11.94
セメント	1.96	0.80
軽油	9.64	0.90
重油 C	5.91	0.59
産業廃棄物	304 [MJ/万円]	24[kg-CO ₂ /万円]

※産業廃棄物を除く

- 評価結果
- 【総消費エネルギー、総 CO₂排出量】
 - ・ 風力発電装置 1 台あたりの総消費エネルギー及び総 CO₂ 排出量の評価結果は以下のとおり。
 - 大型風力発電装置のライフサイクルにおいては、製造段階におけるエネルギー消費量及び CO₂ 排出量の割合が最も高く、エネルギー消費量ではライフサイクル全

⁷⁶ アロケーション手法とは、1つの工程から複数の有価物が産出される場合に、環境負荷の配分を行うこと。

体の 85.3%、CO₂排出量では 85.8%を占めた。

表 各工程におけるエネルギー消費量及び CO₂排出量

	総エネルギー消費量 [GJ/UNIT]	総 CO ₂ 排出量 [t-CO ₂ /UNIT]
製造段階	9,110.0	1742.9
建設段階	515.1	163.9
輸送段階	8.0	4.4
運用段階 (20 年間)	364	70
廃棄	682.2	53.9
合計	10,679.3	2,035.1

【各種発電システムとの比較】

- ・ 上記結果に基づく 1 kWh 当たりのエネルギー原単位は 0.15MJ/ kWh 、CO₂原単位は 0.028 kg -CO₂/ kWh となる。すでに文献で公表されている各種発電システムのデータと比較した結果は以下のとおり。
- エネルギー原単位においては、水力発電 (0.090 [MJ/ kWh]) に次いで小さい値となり、地熱や原子力発電よりも省エネ効果があることが確認された。100 kWh 風車と比較してもその値は 2 分の 1 以下となり、単機出力を大きくすることによるスケールメリットが確認された。
- CO₂原単位においては、水力、地熱、原子力発電よりも大きな値を示し、100 kWh 風車と比較してもその値はともに 0.029 kg -CO₂/ kWh となり、エネルギー原単位のようなスケールメリットはみられなかった。

【感度分析の実施】

- ・ 同一メーカーでの単機出力の違いや耐用年数の違い、平均風速の違い等、条件面での相違がエネルギー原単位及び CO₂原単位にどのような影響を与えるか、感度分析を実施。結果は以下のとおり。
- 同一メーカーで単機出力を変えた場合、エネルギー原単位だけでなく CO₂原単位についても、出力が大きくなればなるほど原単位は小さくなった。また、耐用年数についても年数が増加するほど、平均風速についても風速が高くなるほど原単位は小さくなり、CO₂原単位においてもスケールメリットがみられた。

表 感度分析において変化させたパラメータ

パラメータ	変換前	変化後
単機出力 [kWh]	1000	300 600 1000 (旧型)
耐用年数 [YEAR]	20	10~30
平均風速 [M/S]	8	5~9
建設地	北海道	東京、本州内陸部 (長野県)。現地 (長崎)
修繕保守のデータ	聞き取り調査より、年間で風車製造段階のエネルギー消費量及び CO ₂ 排出量の 0.2%と仮定	文献より、年間で風車製造段階のエネルギー消費量及び CO ₂ 排出量の 2%

表 感度分析による各原単位への影響範囲

	エネルギー原単位 [MJ/ kWh]	CO ₂ 原単位 [kg-CO ₂ / kWh]
単機出力の違い	0.15～0.31	0.029～0.061
建耐用年数の違い	0.10～0.30	0.019～0.056
平均風速の違い	0.13～0.39	0.024～0.073
建設地の違い	0.15～0.31	0.028～0.061
修繕保守の違い	0.15～0.40	0.028～0.077

【CO₂回収年数とCO₂排出削減量の分析】

- ・ 風力発電装置（MWT-1000A）を1基建設するために排出されるCO₂が、既存発電システムにより同量発電する際に排出されるCO₂の何年分に相当するか、CO₂回収年数を算出した結果は以下のとおり。
 - 石炭火力との比較では0.57～1.45年、石油火力では0.74～1.91年、LNG火力では0.91～2.33年、LNG複合では1.06～2.77年で、排出されたCO₂を回収できることがわかった⁷⁷。
- ・ CO₂排出削減量についてもCO₂回収年数と同様に比較を実施した。結果は以下のとおり。
 - 石炭火力との比較では年間で3,393 t-CO₂、石油火力では2,533 t-CO₂、LNG火力では2,057 t-CO₂、LNG複合では1,741 t-CO₂となり、CO₂排出を削減できることがわかった。

結果の
解釈

- ・ 風力発電設備は、その製造段階でのCO₂排出量が最も多く、条件によってはライフサイクル全体の8割以上を占める。さらにブレード、ナセル、タワー等の風力発電設備を構成する要素別の分析において、基礎部分の製造時に最もCO₂が多く排出される。
- ・ 風力発電は、その経済性の側面から風速や発電設備の規模に大きく影響されるが、環境負荷の面でもその傾向がみられた。このため、高風速地域にける建設や風車の大型化によりCO₂のさらなる削減が期待できる。

⁷⁷ 感度分析の結果より、基本条件（当初の設定）以外に、好条件（耐用年数を30年とした場合）、悪条件（平均風速を5m/sとした場合）の3パターンで評価を実施したため、数値に幅が生じている。

2.2 装置や部品に使用されている材料の整理・把握

再生可能エネルギー設備の基本的な構成を示した上で、それぞれの装置や部品に使用されている材料を明らかにするとともに、レアメタル・レアアース等の有用物質及び鉛等の有害物質の含有状況（種類、含有量）を調査した。

(1) 調査方法

1) 調査項目

再生可能エネルギー設備（太陽光発電設備、太陽熱利用設備、風力発電設備、中小水力発電設備、地熱発電設備）毎に以下の情報を収集した。

- ・ 貴金属・レアメタル・レアアース等の有用物質の含有状況（種類・含有量）
- ・ 鉛・カドミウムテルル等の有害物質の含有状況（種類・含有量）

2) 調査方法

本調査項目では、装置や部品に使用されている材料、特にレアメタル・レアアース等の有用物質及び鉛・カドミウムテルル等の有害物質の含有状況（種類、含有量）について、文献調査（（国会図書館、当社の資料センター、論文検索サービス（JST 文献検索サービス JDream II）等）を通じて既往の知見を収集・整理した。

なお、再生可能エネルギー設備の素材構成情報を整理した既存調査結果は存在するものの、レアメタル・レアアースに関する素材構成情報は乏しく、文献調査のみでは十分な情報を得ることができない可能性がある（例えば、特に今後の普及が見込まれている CIGS 系太陽電池について、インジウム、ガリウム、セレン等の含有量を示した文献は存在しないことが想定）。このため、これらの情報については、文献調査に加え、製造業者等へのヒアリング調査により、追加的な情報収集を試みることにした。

(2) 調査結果

調査結果の概略は以下のとおりである。また、再生可能エネルギー設備別に個票形式でとりまとめたものを次々頁以降に示す。

太陽光発電設備	<p>< 主要な素材 ></p> <ul style="list-style-type: none">・ パネルに使用されるガラス（kW 当たり 40～110kg 使用）、フレームに使用されるアルミニウム（kW 当たり 10～30kg 使用）、架台に使用される鉄（kW 当たり 50kg 程度使用）などが主要な素材である <p>< 有用物質の含有 ></p> <ul style="list-style-type: none">・ 電極材料に銀が使用されている（含有量については個体差が大きい）。・ アルミやシリコンは製造年が新しくなるにつれ減少し、その分ガラスの割合が増える傾向にある。・ モジュールについてはセルの種類別に含有物質が異なる。希少性の観点からは、CIGS 系に含まれるインジウムやガリウム等が特徴的である（含有量は kW 当たり 10g 前後のオーダー）。 <p>< 有害物質の含有 ></p> <ul style="list-style-type: none">・ 接合部等にははんだが使用されており、鉛が含有される可能性あり。
---------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

	<ul style="list-style-type: none"> ・ CIGS 系についてはカドミウム、セレンが、Cd-Te 系のパネルについては、カドミウム、テルルが含有される。 →詳細な含有状況については参考資料参照
太陽熱利用設備	<ul style="list-style-type: none"> <主要な素材> ・ 集熱器に使用されるステンレス・ガラス・発泡スチロール、貯湯槽に使用されるポリエチレン・発泡スチロール・ステンレスが主要な素材である。 <有用物質の含有> ・ 希少性の観点から特に注目すべき物質の含有はない。 <有害物質の含有> ・ 接合部等にははんだが使用されており、鉛が含有される可能性あり。
風力発電設備	<ul style="list-style-type: none"> <主要な素材> ・ 羽根（ブレード）に使用されるガラス繊維強化プラスチック（kW 当たり 10～15kg 程度）、ナセルや鉄塔等に使用される鉄（kW 当たり 100kg 程度）などが主要な素材である。 <有用物質の含有> ・ 発電機、トランス、配線など一部に銅が使用されている。 ・ 希少性の観点からは、永久磁石に使用されているネオジウム、ジスプロシウムがあるが、永久磁石を使用する風車のシェアは累積で全体の 10%程度である（大型の風車 1 台当たりの永久磁石の使用量は 2t 程度）。 <有害物質の含有> ・ 電気機器等の接合部等にははんだが使用されており、鉛が含有される可能性あり。 ・ 処理困難性という意味ではガラス繊維強化プラスチックが注目されている。 →詳細な含有状況については参考資料参照
中小水力発電設備	<ul style="list-style-type: none"> <主要な素材> ・ 水車周りに使用される鉄・ステンレスが主要な素材である。 <有用物質の含有> ・ 小水力の場合は採算性を向上させることが最も重要であり、発電設備はなるべく低コストなもの（汎用品等）を採用している。したがって、ネオジウム磁石等の高機能材料や最先端の技術を適用した製品は採用されない。 <有害物質の含有> ・ 電気機器等の接合部等にははんだが使用されており、鉛が含有される可能性あり。
地熱発電設備	<ul style="list-style-type: none"> <主要な素材> ・ 設備の大部分は鉄が主要な素材である。 <有用物質の含有> ・ 希少性の観点から特に注目すべき物質の含有はない。 <有害物質の含有> ・ 電気機器等の接合部等にははんだが使用されており、鉛が含有される可能性あり。

【太陽光発電】

太陽電池の導入の現状

太陽光発電技術は、シリコン系、化合物系、有機系に大別され、主に下表に挙げる太陽光発電が開発されている。現在、日本で導入されている太陽光発電のほとんどがシリコン系太陽電池である。米国や欧州では、カドミウム、テルルを使用した Cd-Te 系の太陽電池が普及しているが、日本での導入事例は確認されていない。近年では、銅、インジウム、ガリウム、セレン等からなる化合物半導体を使用した CIGS 系太陽電池も商品化されており、市場での導入量を拡大しつつある。有機系については、現在技術開発途上であり、実用化までは 5～10 年程度時間を要すると見込まれている。

主要な太陽電池の種類と特徴

NEDO「再生可能エネルギー技術白書」(2010年7月)において、以下のように太陽電池の種類や特徴、実用化状況等についてまとめている。

種類		特徴	変動効率	実用化状況	主な国内メーカー	
シリコン系	結晶系	単結晶	<ul style="list-style-type: none"> 最も歴史の古い太陽電池。実用化されている太陽電池の中で最も変換効率が高く、耐久性・信頼性に優れるが、コストが高いことや大量生産に不向きな点が課題。 	～20%	実用化	<ul style="list-style-type: none"> シャープ 三洋電機 (HIT タイプ)
		多結晶	<ul style="list-style-type: none"> 単結晶と比較して効率は落ちるが、安価で、製造が容易であり、効率とコストのバランスが良いため、現在最も普及。 	～15%	実用化	<ul style="list-style-type: none"> シャープ 京セラ 三菱電機
	薄膜系	<ul style="list-style-type: none"> シリコン使用量を結晶系の 1/100 程度にまで削減可能。 低温プロセスで製膜できるため、製造に要するエネルギーの削減、大幅な低コスト化が可能。 	～9% (アモルファス)	実用化	<ul style="list-style-type: none"> シャープ 三菱重工業 カネカ 富士電機 	
化合物系	CIGS 系	<ul style="list-style-type: none"> 銅 (Cu)、インジウム (In)、ガリウム (Ga)、セレン (Se) 等からなる化合物半導体を使用。薄膜、軽量、省資源、低価格など多くの長所を持つため注目を浴びている。 希少金属であるインジウムやガリウムについて、資源制約が課題。 	～12%	実用化	<ul style="list-style-type: none"> ソーラーフロンティア ホンダソルテック 	
	Cd-Te 系	<ul style="list-style-type: none"> カドミウムテルル (Cd-Te) を原料として使用するため、日本では普及していないが、欧米では大規模発電所に導入が進んでいる。 薄膜化が可で、低コストで高効率な太陽電池として、世界的に待されている。 	～11%	実用化	<ul style="list-style-type: none"> 国内：無し First Solar (米) 	
	集光型	<ul style="list-style-type: none"> 小面積の高効率な多接合太陽電池にレンズや鏡で集光することにより高い発電効率を実現する太陽電池。 	(集光時～42%)	研究段階	<ul style="list-style-type: none"> シャープ 大同特殊鋼 	
有機系	色素増感	<ul style="list-style-type: none"> 酸化チタンの表面に吸着した色素が可視光などの光を吸収し、励起した電子が酸化チタンの方に移動する原理で発電。 製造が簡単で材料も安価なことから大幅な低コスト化が期待されるが、耐久性が大きな課題。 	(～11%)	研究段階	<ul style="list-style-type: none"> アイシン精機 シャープ フジクラ ソニー 	

	有機薄膜	<ul style="list-style-type: none"> 2種類の有機半導体を混ぜて溶かした液を電極の付いた基板上に塗布して薄膜にした後、薄膜上に電極を形成する。 材料が安価、印刷法やインクジェット法など塗布プロセスにより大面積を簡単に作製可能であるため、大幅な低コスト化が実現可能。ただし、有機材料を用いるため、耐久性が大きな課題。 	(～8%)	研究段階	<ul style="list-style-type: none"> 新日本石油 パナソニック電工 住友化学 三菱化学
--	------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------	------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------

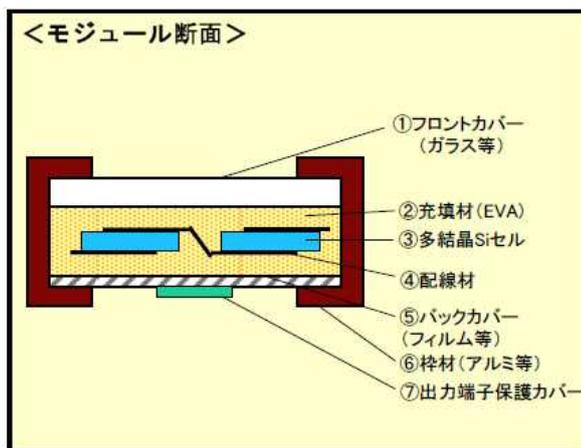


図 太陽電池モジュールの断面 (結晶シリコン系)

出典：シャープ(株)「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 ①結晶シリコン太陽電池モジュール発表資料 (NEDO)」

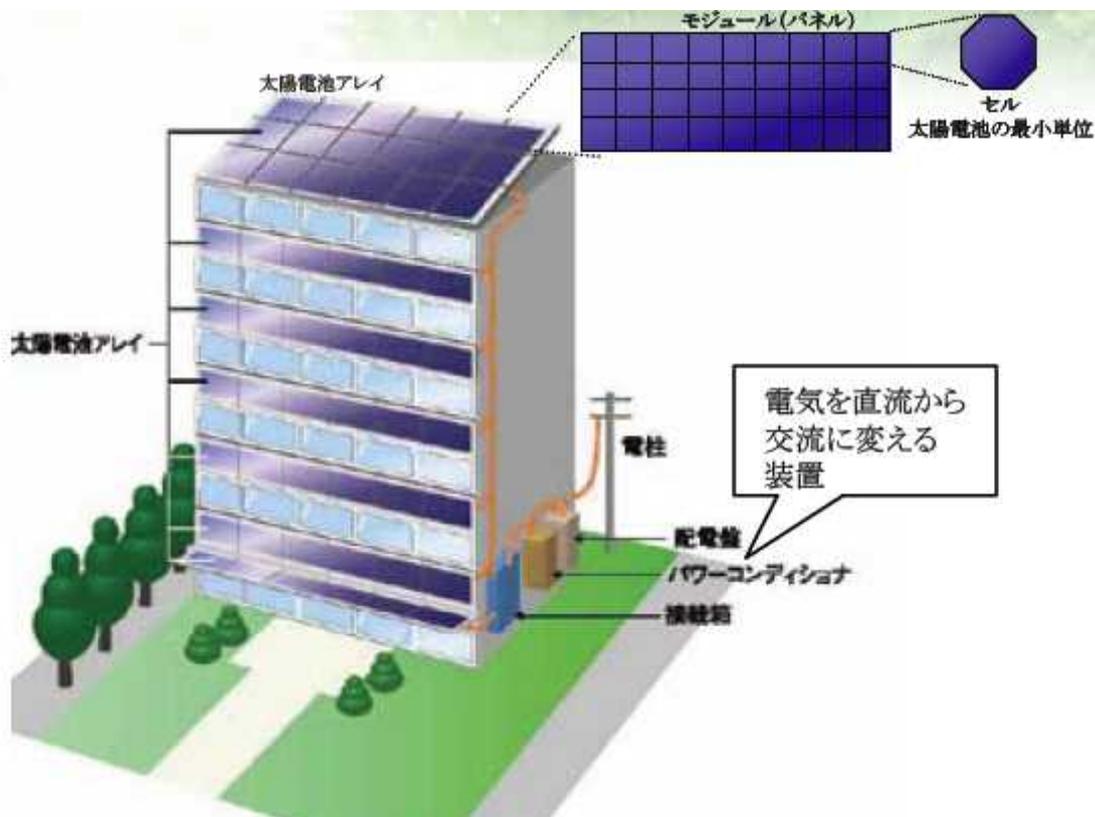


図 太陽光発電システムの概観

出典：NEDO「太陽光発電フィールドテスト事業 設置事例集 III」

素材構成情報

NEDO「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年3月)において、住宅用太陽光発電システム(システム出力4KW)の各モジュールの素材構成及び重量等について、以下のように示されている。

【多結晶 Si】

		初期重量 [kg/system]	処理対象重量 [kg/system]									
			基本ケース				リサイクル促進ケース					
			破砕	非破砕	再生	焼却・埋立	破砕	非破砕	再生	焼却・埋立		
システム全体	[kg]	578.94	508.79	70.15	253.43	325.08	226.93	352.01	476.76	101.78		
モジュール	総重量	[kg]	335.74	281.87	53.87	38.79	296.91	0.00	335.74	262.13	73.61	
	セル	結晶シリコン	[kg]	11.29	11.29	0.00	0.00	11.29	0.00	11.29	8.00	3.29
	フロントカバー	ガラス	[kg]	210.00	210.00	0.00	0.00	210.00	0.00	210.00	189.00	21.00
	フレーム	アルミ	[kg]	52.61	0.00	52.61	36.86	15.75	0.00	52.61	52.61	0.00
	プラスチック	EVA等	[kg]	59.32	58.06	1.26	0.82	58.50	0.00	59.32	11.26	48.06
BOS	電極材料	銅/はんだ	[kg]	2.52	2.52	0.00	1.11	1.37	0.00	2.52	1.26	1.26
	パワコン・接続箱	総重量	[kg]	16.41	16.41	0.00	11.61	4.41	16.41	0.00	11.61	4.41
		鉄	[kg]	8.42	8.42	0.00	7.41	0.76	8.42	0.00	7.41	0.76
		銅	[kg]	1.43	1.43	0.00	1.26	0.13	1.43	0.00	1.26	0.13
		アルミ	[kg]	3.34	3.34	0.00	2.94	0.30	3.34	0.00	2.94	0.30
	その他	[kg]	3.22	3.22	0.00	0.00	3.22	3.22	0.00	0.00	3.22	
	アレイ架台	総重量	[kg]	210.52	210.52	0.00	189.46	21.05	210.52	0.00	189.46	21.05
		鉄	[kg]	210.52	210.52	0.00	189.46	21.05	210.52	0.00	189.46	21.05
		コンクリート	[kg]	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	配線材料	総重量	[kg]	16.28	0.00	16.28	13.57	2.71	0.00	16.28	13.57	2.71
銅		[kg]	8.53	0.00	8.53	8.53	0.00	0.00	8.53	8.53	0.00	
プラスチック		[kg]	7.74	0.00	7.74	5.03	2.71	0.00	7.74	5.03	2.71	

【単結晶 Si】

		初期重量 [kg/system]	処理対象重量 [kg/system]									
			基本ケース				リサイクル促進ケース					
			破砕	非破砕	再生	焼却・埋立	破砕	非破砕	再生	焼却・埋立		
システム全体	[kg]	588.29	491.79	96.50	269.34	318.50	224.01	364.28	492.20	95.69		
モジュール	総重量	[kg]	348.00	287.78	80.22	57.32	290.63	0.00	348.00	280.19	67.81	
	セル	結晶シリコン	[kg]	11.40	11.40	0.00	0.00	11.40	0.00	11.40	8.08	3.32
	フロントカバー	ガラス	[kg]	209.59	209.59	0.00	0.00	209.59	0.00	209.59	188.63	20.96
	フレーム	アルミ	[kg]	70.53	0.00	70.53	49.37	21.16	0.00	70.53	70.53	0.00
	プラスチック	EVA等	[kg]	53.45	43.75	9.70	6.30	47.15	0.00	53.45	11.08	42.37
BOS	電極材料	銅/はんだ	[kg]	3.04	3.04	0.00	1.65	1.34	0.00	3.04	1.87	1.17
	パワコン・接続箱	総重量	[kg]	16.41	16.41	0.00	11.61	4.41	16.41	0.00	11.61	4.41
		鉄	[kg]	8.42	8.42	0.00	7.41	0.76	8.42	0.00	7.41	0.76
		銅	[kg]	1.43	1.43	0.00	1.26	0.13	1.43	0.00	1.26	0.13
		アルミ	[kg]	3.34	3.34	0.00	2.94	0.30	3.34	0.00	2.94	0.30
	その他	[kg]	3.22	3.22	0.00	0.00	3.22	3.22	0.00	0.00	3.22	
	アレイ架台	総重量	[kg]	207.60	207.60	0.00	186.84	20.76	207.60	0.00	186.84	20.76
		鉄	[kg]	207.60	207.60	0.00	186.84	20.76	207.60	0.00	186.84	20.76
		コンクリート	[kg]	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	配線材料	総重量	[kg]	16.28	0.00	16.28	13.57	2.71	0.00	16.28	13.57	2.71
銅		[kg]	8.53	0.00	8.53	8.53	0.00	0.00	8.53	8.53	0.00	
プラスチック		[kg]	7.74	0.00	7.74	5.03	2.71	0.00	7.74	5.03	2.71	

【アモルファス Si/単結晶 Si ヘテロ接合】

		初期重量 [kg/system]	処理対象重量 [kg/system]									
			基本ケース				リサイクル促進ケース					
			破砕	非破砕	再生	焼却・埋立	破砕	非破砕	再生	焼却・埋立		
システム全体		[kg]	488.73	408.32	80.41	228.37	259.95	192.17	296.56	414.23	74.10	
モジュール	総重量	[kg]	280.15	216.15	64.00	44.92	235.22	0.00	280.15	230.77	49.38	
	セル	結晶シリコン	[kg]	9.61	9.61	0.00	0.00	9.61	0.00	9.61	6.81	2.80
	フロントカバー	ガラス	[kg]	176.00	176.00	0.00	0.00	176.00	0.00	176.00	158.40	17.60
	フレーム	アルミ	[kg]	60.00	0.00	60.00	42.00	18.00	0.00	60.00	60.00	0.00
	プラスチック	EVA等	[kg]	34.00	30.00	4.00	2.60	31.40	0.00	34.00	5.20	28.80
	電極材料	銅/はんだ	[kg]	0.54	0.54	0.00	0.32	0.21	0.00	0.54	0.36	0.18
BOS	パワコン・接続箱	総重量	[kg]	16.41	16.41	0.00	11.61	4.41	16.41	0.00	11.61	4.41
		鉄	[kg]	8.42	8.42	0.00	7.41	0.76	8.42	0.00	7.41	0.76
		銅	[kg]	1.43	1.43	0.00	1.26	0.13	1.43	0.00	1.26	0.13
		アルミ	[kg]	3.34	3.34	0.00	2.94	0.30	3.34	0.00	2.94	0.30
		その他	[kg]	3.22	3.22	0.00	0.00	3.22	0.00	0.00	3.22	
	アレイ架台	総重量	[kg]	175.76	175.76	0.00	158.18	17.58	175.76	0.00	158.18	17.58
		鉄	[kg]	175.76	175.76	0.00	158.18	17.58	175.76	0.00	158.18	17.58
		コンクリート	[kg]	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	配線材料	総重量	[kg]	16.41	0.00	16.41	13.67	2.74	0.00	16.41	13.67	2.74
		銅	[kg]	8.58	0.00	8.58	8.58	0.00	0.00	8.58	8.58	0.00
	プラスチック	[kg]	7.83	0.00	7.83	5.09	2.74	0.00	7.83	5.09	2.74	

【薄膜 Si】

		初期重量 [kg/system]	処理対象重量 [kg/system]									
			基本ケース				リサイクル促進ケース					
			破砕	非破砕	再生	焼却・埋立	破砕	非破砕	再生	焼却・埋立		
システム全体		[kg]	993.10	860.83	132.27	427.88	564.69	370.08	623.01	859.50	133.20	
モジュール	総重量	[kg]	597.26	490.74	106.51	77.07	520.06	0.00	597.26	508.69	88.57	
	基板/フロントカバー	ガラス	[kg]	447.17	447.17	0.00	0.00	447.17	0.00	447.17	402.46	44.72
	フレーム	アルミ	[kg]	84.91	0.00	84.91	59.44	25.47	0.00	84.91	84.91	0.00
	プラスチック	EVA等	[kg]	61.09	39.49	21.60	14.04	47.05	0.00	61.09	17.24	43.85
	電極材料	銅/はんだ	[kg]	4.08	4.08	0.00	3.59	0.37	0.00	4.08	4.08	0.00
BOS	パワコン・接続箱	総重量	[kg]	16.41	16.41	0.00	11.61	4.41	16.41	0.00	11.61	4.41
		鉄	[kg]	8.42	8.42	0.00	7.41	0.76	8.42	0.00	7.41	0.76
		銅	[kg]	1.43	1.43	0.00	1.26	0.13	1.43	0.00	1.26	0.13
		アルミ	[kg]	3.34	3.34	0.00	2.94	0.30	3.34	0.00	2.94	0.30
		その他	[kg]	3.22	3.22	0.00	0.00	3.22	0.00	0.00	3.22	
	アレイ架台	総重量	[kg]	353.67	353.67	0.00	318.31	35.37	353.67	0.00	318.31	35.37
		鉄	[kg]	353.67	353.67	0.00	318.31	35.37	353.67	0.00	318.31	35.37
		コンクリート	[kg]	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	配線材料	総重量	[kg]	25.76	0.00	25.76	20.90	4.86	0.00	25.76	20.90	4.86
		銅	[kg]	11.87	0.00	11.87	11.87	0.00	0.00	11.87	11.87	0.00
	プラスチック	[kg]	13.88	0.00	13.88	9.02	4.86	0.00	13.88	9.02	4.86	

【CIS 系】

		初期重量 [kg/system]	処理対象重量 [kg/system]									
			基本ケース				リサイクル促進ケース					
			破砕	非破砕	再生	焼却・埋立	破砕	非破砕	再生	焼却・埋立		
システム全体		[kg]	916.94	784.81	132.13	363.68	552.83	301.40	615.54	815.72	100.82	
モジュール	総重量	[kg]	595.20	483.41	111.79	78.87	516.30	0.00	595.20	530.91	64.29	
	基板	ガラス	[kg]	172.80	172.80	0.00	0.00	172.80	0.00	172.80	172.80	0.00
	フロントカバー	ガラス	[kg]	270.24	270.24	0.00	0.00	270.24	0.00	270.24	243.22	27.02
	フレーム	アルミ	[kg]	105.98	0.00	105.98	74.19	31.79	0.00	105.98	105.98	0.00
	プラスチック	EVA等	[kg]	44.66	38.86	5.81	3.78	40.89	0.00	44.66	7.88	36.78
	電極材料	銅/はんだ	[kg]	1.52	1.52	0.00	0.91	0.57	0.00	1.52	1.04	0.48
BOS	パワコン・接続箱	総重量	[kg]	16.41	16.41	0.00	11.61	4.41	16.41	0.00	11.61	4.41
		鉄	[kg]	8.42	8.42	0.00	7.41	0.76	8.42	0.00	7.41	0.76
		銅	[kg]	1.43	1.43	0.00	1.26	0.13	1.43	0.00	1.26	0.13
		アルミ	[kg]	3.34	3.34	0.00	2.94	0.30	3.34	0.00	2.94	0.30
		その他	[kg]	3.22	3.22	0.00	0.00	3.22	0.00	0.00	3.22	
	アレイ架台	総重量	[kg]	284.99	284.99	0.00	256.49	28.50	284.99	0.00	256.49	28.50
		鉄	[kg]	284.99	284.99	0.00	256.49	28.50	284.99	0.00	256.49	28.50
		コンクリート	[kg]	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	配線材料	総重量	[kg]	20.34	0.00	20.34	16.71	3.63	0.00	20.34	16.71	3.63
		銅	[kg]	9.96	0.00	9.96	9.96	0.00	0.00	9.96	9.96	0.00
	プラスチック	[kg]	10.37	0.00	10.37	6.74	3.63	0.00	10.37	6.74	3.63	

太陽電池セル	種類	多結晶Si	
	(mm)	155 × 155	
太陽電池モジュール	セル枚数 (枚/モジュール)	42	
	出力 (W/枚)	160	
	効率 (%)	13.9	
	サイズ (mm)	990 × 1,165	
	厚さ (mm)	46	
	面積 (m ² /枚)	1.15	
	重量 (kg/枚)	14.5	
	使用年数 (年)	20	
	構成材料	フロントカバー	ガラス
		フレーム	アルミ
充填材		EVA	
周辺シール		シリコン	
バックカバー		PET	
電極材料	銅/はんだ		
端子ボックス	PPE		

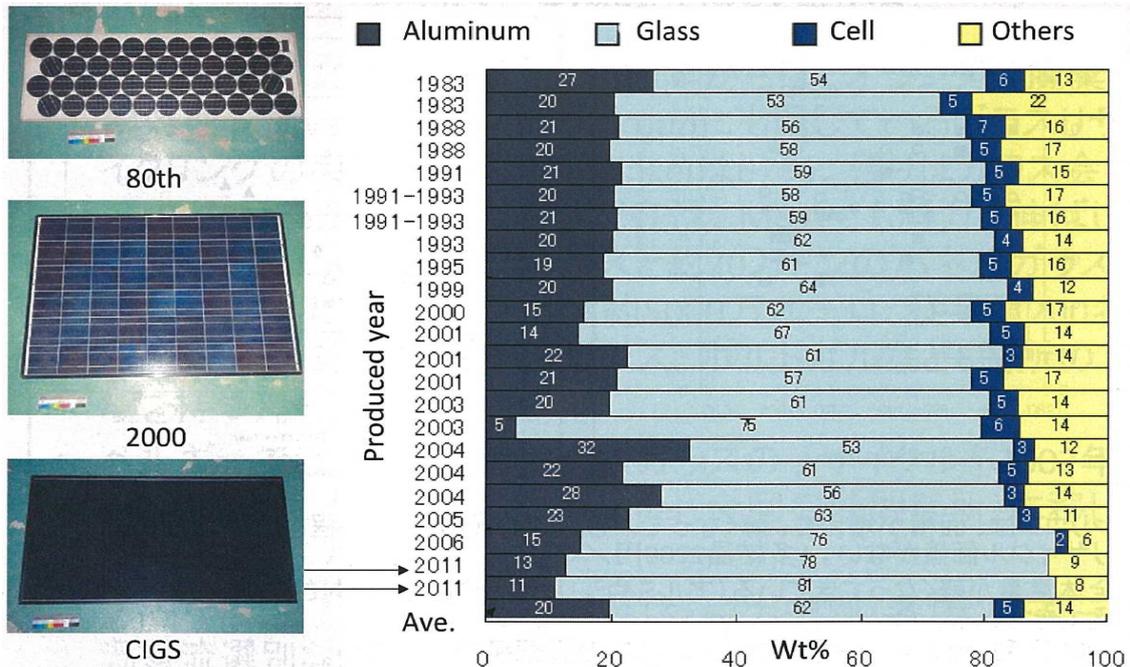
シボ ヨ ナ コ ン デ イ	定格出力 (kW)	4		
	必要台数 (台/システム)	1		
	重量 (kg/台)	内素	鉄	
		駅材	銅	
		別	アルミ	
			エポキシ樹脂	
	使用年数 (年)	15		
	接 続 箱	必要台数 (台/システム)	1	
		重量 (kg/台)	駅別素	鉄
			内材	アルミ
			絶縁材料	
使用年数 (年)		30		

素材量

アレイパネル	シリコン	26.5 kg/基	
	板ガラス	207.1 kg/基	
	アルミニウム	55.4 kg/基	
	銅	2.5 kg/基	
	充填剤	41.4 kg/基	
	PET	15.8 kg/基	
	シリコンゴム	0.0 kg/基	
	PPE	1.4 kg/基	
	架台 制御装置等	鉄鋼	207.6 kg/基
		鉄鋼	7.9 kg/基
銅		1.3 kg/基	
アルミニウム		2.9 kg/基	
絶縁材料		4.2 kg/基	

(3.84kW/基)

秋田県 東日本PVリサイクルネットワーク構築検討委員会 白鳥寿一「秋田県における太陽電池パネルリサイクルシステムへの取り組み」、東北地域環境ビジネスセミナー（2013年2月20日）では、太陽電池パネルのインベントリー調査結果として、以下の結果が示されている。



EPIA/BSW 「STUDY ON THE DEVELOPMENT OF A TAKE BACK AND RECOVERY SYSTEM FOR PHOTOVOLTAIC PRODUCTS」 (2007年11月)において、単結晶シリコンモジュールの素材毎の構成割合及び重量が以下のように示されている。

Component	Quantity (2003) according to [Ökopol 2004]	Quantities 2007	
		%	kg/kWp
Glass	62.7	74.16	77.3
Frames (e.g. AlMgSi0,5)	22.0	10.30	10.7
EVA	7.5	6.55	6.8
Solar cells	4.0	3.48	3.6
Backing film (Tedlar)	2.5	3.60	3.8
Junction box	1.2		
Adhesive, potting compound	No data	1.16	1.2
Weight/kWp	103.6 kg/kWp		102.3
Cu	0.37	0.57	
Ag	0.14	0.004 – 0.006	
Sn	0.12	0.12	
Pb	0.12	0.07	
Si	No data	3%	

さらに、アモルファスシリコンモジュール、CIGS モジュール、CdTe モジュールの素材毎の重量や厚さが以下のとおり示されている。

<アモルファスシリコンモジュール>

Material	Thickness	Weight per module	Weight per surface	
			g	g/Wp*
Glass	3+2.2 mm	3,483	12,480	249.6
SnO ₂		0,96	3,45	0.069
Tin (as oxide)	About 500 nm	0,76	2,72	0.0544857
Boron	-	1.18E-05	4.23E-05	8.46E-07
Silicon	About 400 nm	0,26	0,92	0.0184
Phosphorus	-	1.21E-07	4.33E-07	8.66E-09
Aluminium	< 600 nm	0.452	1,62	0.032
Aluminium strips	0.05 mm	0.988	3,54	0.07
Acryl resin	0.15 mm	19	68,00	1.63
Hot melt glue		0.8	2,87	0.057
Cable	-	40	143.00	2.86
Polyol	-	285	1,021.00	20.3
MDI	-	215	770,00	15.4
Total		4,046	14,497	290

< CIGS モジュール >

	Weight (g/m ²)		
	Producer A	Producer B	Producer C
Si ₃ N ₄	0.5		
Mo	4	5	
CuInGaSe	10	12	9.5
Selenium	5	6	4.5
ZnO	7	6	0.7
CdS	0.2	0	0.24
ITO			
Substrate polyimide			35
Substrate glass	7500	7500	
Cover glass	7500	7500	
PIB Sealant	500		
Encapsulant (PVB, EVA, PU, PE)	200	500	no encapsulation data
Polymer glue	400		
Adhesive tape		100	
Aluminium frame	3000	1800	
J-Box PP	400	100	
Cable Polymer and copper	400	200	
Polyester Label	1	1	
Total glass	15000	15000	
Total polymers	1701	701	
Total weight/m ²	19927	17730	

< CdTe モジュール >

Material	Thickness	Weight per surface g/m ²	Weight per output G/Wp*
Substrate glass	3 mm	7,500	71
TCO-SnO ₂	<1 μm	6.9	0.07
CdS	<0,1 μm	0.483	0.005
CdTe	7 μm	18	0.17
Back contact metal	1 μm	2,7	0.03
EVA	0.5 mm	500	4.8
Front glass	3 mm	7,500	71
CuSn band		6.94	0.07
Junction box		21.7	0.2
Cable		57.8	0.6
Total		15,615	149

Paolo Frankl 「Photovoltaic (PV) Systems ECLIPS (Environmental and Ecological Life Cycle Inventories for Present and future Power System in Europe) Final Report」(2004年1月)において、CIGS モジュールの素材構成及び重量が以下のように示されている⁷⁸。

⁷⁸ 本文献は太陽光発電の LCI 解析に関する結果の報告書であるが、記載した表は「典型的な CIGS モジュール」についての解析に使用したとして示されているものである。

Materials	amount	units
Mo	5	g/m ²
Cu	2,3	g/m ²
In	3,0	g/m ²
Ga	0,6	g/m ²
Se	5,6	g/m ²
CdS	0,2	g/m ²
ZnO	5,5	g/m ²
glass	15	kg/m ²
EVA (Ethyl Vinyl Acetate)	500	g/m ²
Frame	3	kg/m ²
Total module weight per m²	18,57	g/m²
Electricity requirement	112	kWh/m²
Module efficiency	9%	Ref case
	12%	Future

【CIGS系モジュールの構成元素の単位発電量当たりの重量比較】

文献名等	単位発電量当たりの重量[g/kW ⁷⁹]						
	銅 (Cu)	モリブ デン (Mo)	インジ ウム(In)	ガリウ ム(Ga)	セレン (Se)	ZnO	CdS
NEDO「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」	15.0	—	16.3	6.7	37.3	—	—
EPIA/BSW「STUDY ON THE DEVELOPMENT OF A TAKE BACK AND RECOVERY SYSTEM FOR PHOTOVOLTAIC PRODUCTS」 ※	製品 A	34.8			43.5	60.9	1.74
	製品 B	43.5			52.2	52.2	0
	製品 C	—			39.15	6.09	2.008
Paolo Frankl「Photovoltaic (PV) Systems ECLIPS (Environmental and Ecological Life Cycle Inventories for Present and future Power System in Europe) Final Report」	25.6	55.7	33.3	6.67	62.2	61.1.	2.2

※EPIA/BSW では、g/m² を g/kWp に変換するため以下の前提を基に単位面積当たりの発電量 [kWp/ m²]を算出。

【前提】

- ・アモルファスシリコン、CIS、CdTe の変換効率をは下表のとおり（文献抜粋）。

アモルファスシリコン	CIS	CdTe
5.5%	11.5%	10%

- ・単位面積当たりの発電量は変換効率にのみ依存する。

【算出結果】

アモルファスシリコンと CdTe の g/m² を g/Wp の値及び変換効率を参考に CIS の単位面積当

⁷⁹ kW=kWp と仮定する

たりの発電量[kWp/ m²]を「0.115」と推定。

また、Paolo Frankl では気温 25 °C 、日射量 1000 W lum /m²において[g/m²]を[g/kWp]に変換する方法が示されているため、これに基づき単位面積当たりの発電量[kWp/ m²]を算出。

$$\text{kWp} = \text{Ist} \times A \times \eta / 1000$$

$$\text{Ist} = \text{標準的な日射量 (1000 W lum /m}^2\text{)}$$

$$\eta = \text{変換効率}$$

$$A = \text{モジュールの面積}$$

以上より、CIGS の単位面積当たりの発電量[kWp/ m²]を「0.09」と推定。

その他関連情報

欧州では、電気電子機器に係る特定有害物質の使用制限に関する指令（RoHS 指令：2006 年 7 月施行、2011 年 6 月改正）により、欧州市場に上市される電気電子製品への含有を基準値以下に制限する有害物質として、鉛、水銀、カドミウム、六価クロム、ポリ臭化ビフェニール（PBB）、ポリ臭化ジフェニルエーテル（PBDE）を規定しているが、住宅や発電所などシステム型の太陽光発電パネルについては対象外とされている。なお、パワーコンディショナー等の周辺機器については対象となる（ただし、大型のものについては大型固定設備として適用外となる可能性もある）。

一方、我が国では、現時点では太陽電池モジュールに含まれる有害物質に対する規制は存在しないが、2006 年の資源有効利用促進法政省令改正により、電気電子機器 7 品目（太陽電池モジュールは含まない）に対して RoHS 対象 6 物質の含有情報提供を義務付けている。

【太陽熱利用】

太陽熱利用機器の導入の現状

現在市販されている太陽熱利用機器は、ソーラーシステムと太陽熱温水器に大きく分けられ、太陽熱を集める集熱器は、平板形、真空ガラス管形などがある。ソーラーシステムは集熱器とお湯を貯める部分がそれぞれ機器として完全に分離しているが、太陽熱温水器はこの集熱器とお湯を貯める部分が一体となった機器である。平板形集熱器は高効率の割には比較的安価であるため、ソーラーシステムの主流を占めている。

ソーラーシステムの熱利用は 1980 年代になり本格的に始まり、住宅用給湯以外に建物の熱暖房システムやプール水加熱などの比較的大規模システムに利用されている。

太陽熱温水器やソーラーシステムを設置している個人住宅は、1980 年から始まった国の助成制度であるソーラーシステム普及促進融資制度の実施以降、急速に普及し、ピーク時にはそれぞれ年間 80 万 3,000 台 (1980 年)、6 万 4,000 台 (1983 年) であった。しかし、年々減少傾向にあり、2010 年は年間 3 万 8,000 台、5,700 台となっている。なお、2010 年までの太陽熱温水器とソーラーシステムの累計出荷台数はそれぞれ 676 万台、65 万台である。

主要な太陽熱利用機器の種類と特徴

社団法人ソーラーシステム振興協会ウェブサイトにおいて、以下のように太陽熱利用機器の種類や特徴についてまとめている。

種類	特長	
ソーラーシステム	水式	<ul style="list-style-type: none"> 屋根等に設置した太陽集熱器により高温に達した不凍液などの熱媒を循環ポンプで循環させ、蓄熱槽の中に蓄えた水を、蓄熱槽内の熱交換器により、温めてお湯にする。 天候等により集熱量が不十分な場合は、補助熱源器で加温して給湯する。 暖房用配管、循環ポンプなどを備えて、温風暖房、床暖房などに使用する事も可能。 貯湯量 300 リットル、集熱器の面積 6m² (集熱器 3 枚) のものが多い。 集熱器の面積を大きくすればセントラル給湯や暖房などが可能。
	空気式	<ul style="list-style-type: none"> 屋根に設置したガラス付き集熱面などにより高温に達した空気を、小屋根裏部に設置した送風機ユニットで床下に送風し、床下の蓄熱材 (コンクリート) に蓄熱させた後で、室内に入れ直接暖房する。 蓄熱槽の中に蓄えた水を、送風機ユニット内などの熱交換器により、温めてお湯にする。 冬の昼は、暖房を主体にし、集熱量に余剰がある場合は給湯に使う。夏の昼は、高温の屋根空気を屋外に排出 、夏の夜は、屋外から涼気を取り入れて利用できる。
太陽熱温水器	<ul style="list-style-type: none"> 昔から使われているもっとも簡単な太陽熱利用機器。 集熱器の上部に貯湯槽を接続し、水栓より高い位置の屋根上に設置する。貯湯槽に給水された水は下部の集熱器へ流れ込み、太陽熱で暖められ比重が軽くなり、貯湯槽へ戻りお湯が蓄えられる。この循環を動力を使わないで行うため、自然循環型太陽熱温水器と呼ばれている。 集熱部と貯部が一体となった真空貯湯形太陽熱温水器の場合、水道直結式で地上設置が可能である。 貯湯量 200～250 リットル、集熱器の面積 3～4m² のものが多い。 	

素材構成情報

社団法人ソーラーシステム振興協会「ソーラーシステム・太陽熱温水器の撤去・産業廃棄物処理に関する手引き」において、ソーラーシステム・太陽熱温水器から排出される廃棄物の種類について、以下のように示されている。

- ・ 金属くず
- ・ 廃プラスチック類
- ・ ガラスくず及び陶磁器くず

チリウヒーター株式会社 (<http://www.chiryuheater.jp/>) ウェブサイトにおいて、太陽熱温水器（自然循環式）の各部材質について、以下のように示されている。

太陽熱温水器（自然循環式）

貯湯槽	内装材	超高分子量ポリエチレン
	保温材	発泡スチロール
	外装材	ステンレス・その他
集熱器	受熱板	ステンレス
	透明板	熱処理ガラス
	外装材	ステンレス・その他

長府工産株式会社のパンフレットにおいて、太陽熱温水器の材質について、以下のように示されている。

集熱部	集熱板	NSSC190 ステンレス
	透過板	セミ強化ガラス
	外装	SUS430 ステンレス
	保温材	発泡スチロール
貯湯部	貯湯槽	高密度ポリエチレン
	外装材	SUS430 カラーステンレス
	保温材	発泡スチロール

株式会社長府製作所のパンフレットにおいて、太陽熱温水器の材質について、以下のように示されている。

集熱ユニット	集熱体	ファン/アルミ合金 水管/銅管
	透過体	半強化ガラス
	外装材	アルミ合金
貯湯ユニット	タンク	特殊ステンレス銅板

【風力発電】

風力発電の導入の現状

1990年代までの風力発電の導入初期段階においては、試験・研究目的や既存の電力と併用しての自家消費用の電源が中心であり、陸上風力発電の単体設置の事例が多かったが、出力あたりの建設費や運転経費を削減できることから集合設置の事例が増加に、導入の主流となった。近年は、風力発電は単機出力の大型化、および発電所（ウィンドファーム）規模の大規模化が進んでいる。現在、売電事業を目的に設置される中型以上の風車は、その多くがプロペラ式である。プロペラ式風車は水平軸形風車のひとつである。

欧州で導入の動きが加速している洋上風力発電については、気象条件や地形条件ゆえに、我が国ではこれまでは導入数が限られていた。しかし、近年は千葉県銚子沖及び福岡県北九州市沖の2か所で「着床式」の洋上風力発電の実証研究を、長崎県五島沖で我が国初となる「浮体式」の洋上風力発電の実証事業が実施されるなど、大規模プロジェクトが進行中である。

主要な風力発電機の種類と特徴

NEDO「風力発電導入ガイドブック」（2008年2月改訂第9版）において、以下のように風力発電機の種類や風車の形式、特徴についてまとめている。これらの分類の内、マイクロ風車、小型風車の基準はIEC（国際電気標準会議）で承認されているが、他の容量の風車は便宜的に区分したもので、特に大型風車の定格容量の基準は技術の進展とともに時代によって大型化していくものと考えられる。

定格出力からみた風車の分類基準

分類		定格出力
マイクロ風車		1kW 未満
小型風車		1kW ～ 50kW 未満
中型風車	I	50kW ～ 500kW 未満
	II	500kW ～ 1,000kW 未満
大型風車		1,000kW 以上

注) 風車の分類は便宜的にわけたものである。

風車の形式

水平軸	揚力形	プロペラ式	アップウィンド方式 ダウンウィンド方式
	抗力形	セイルウィング式 オランダ式	
垂直軸	揚力形	ダリウス式 直線翼式	
		抗力形	サボニウス式 パドル式 クロスフロー式 S型ロータ式

風車の特徴

種類	特徴
水平軸風車	<ul style="list-style-type: none"> ● 構造が比較的簡単である。 ● 効率がよく、大型化が容易である。 ● プロペラ式風車は発電用に適している。 ● アップウィンド方式の場合は風車の回転面を風に向ける必要がある(ヨー制御)。 ● 重量物(発電機、伝達機構、制御機構等)はナセル内に設置する必要がある。
垂直軸風車	<ul style="list-style-type: none"> ● どの方向の風も利用可能で風向の依存性がない。 ● 重量物は地上に設置できる。 ● 羽根(ブレード)の製造がプロペラ式に比べて容易である。 ● 自己起動時に大きなトルクが必要で回転数制御が難しい。 ● 水平軸風車と比較して効率が劣り、設置面積も大きい。
揚力形風車	<ul style="list-style-type: none"> ● 風速の数倍以上の周速度(羽根の先端の速度、円周速度のこと)で回転可能なため、発電用に適している ● 羽根の枚数が少ない風車ほど運用範囲が広く効率がよく、周速度が大きいため発電用に適している。
抗力形風車	<ul style="list-style-type: none"> ● 小型風車に本タイプの風車が多い。トルクが大きいものの、風速以上の周速度で回転できないために、揚水、粉挽き等の機械的作業の利用に適している。 ● 揚力形に比較して周速度が低いため、効率が低い。

NEDO「風力発電導入ガイドブック」(2008年2月改訂第9版)においては、中大型機で一般的なプロペラ式風力発電システムの構成について以下のように示されている。

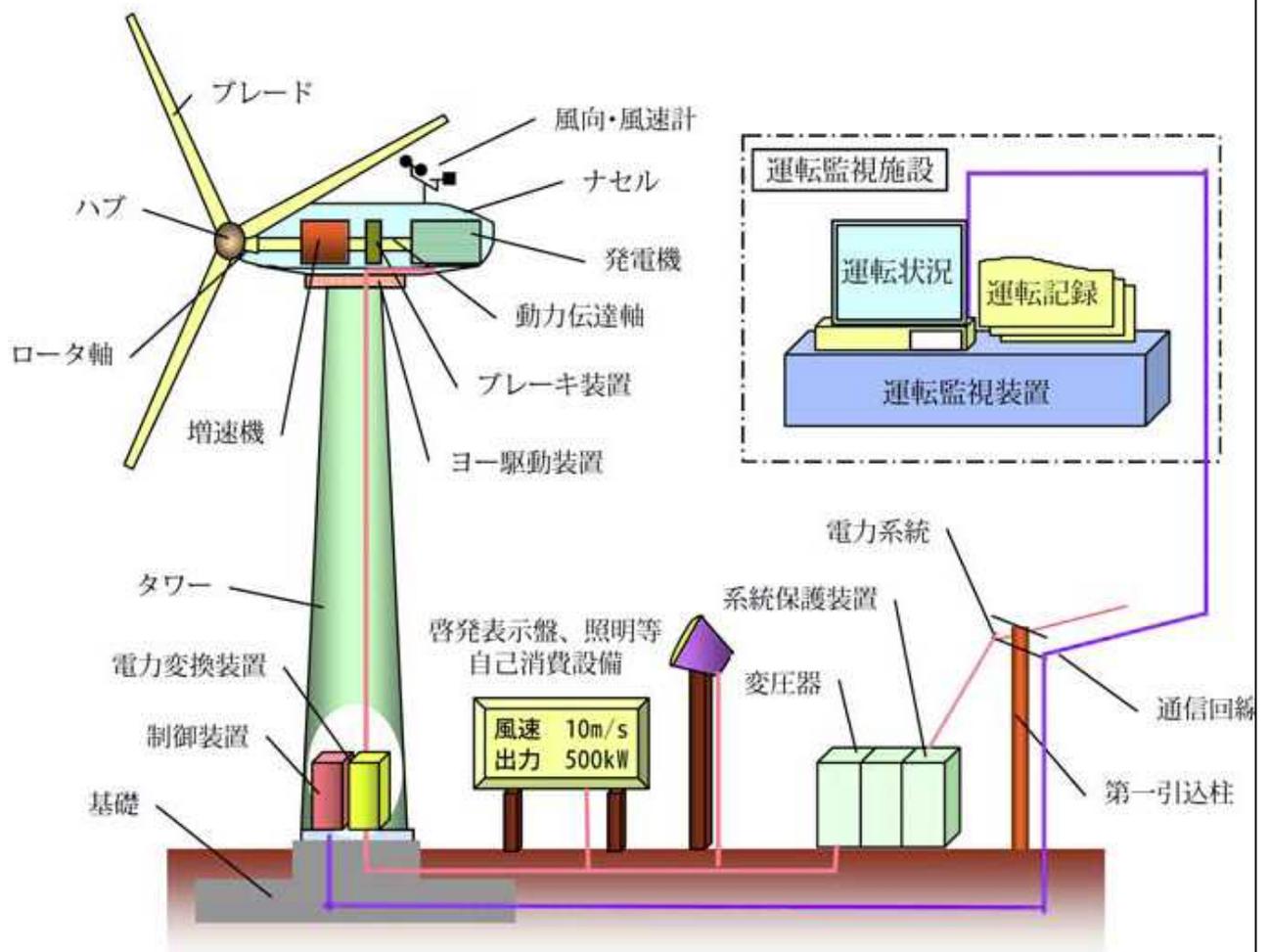


図 プロペラ式風力発電システムの構成例

ロータ系	ブレード	回転羽根、翼
	ロータ軸	ブレードの回転軸
	ハブ	ブレードの付け根をロータ軸に連結する部分
伝達系	動力伝達軸	ロータの回転を発電機に伝達する
	増速機	ロータの回転数を発電機に必要な回転数に増速する歯車（ギア）装置（増速機のない直結ドライブもある）
電気系	発電機	回転エネルギーを電気エネルギーに変換する
	電力変換装置	直流、交流を変換する装置（インバータ、コンバータ）
	変圧器	系統からの電気、系統への電気の電圧を変換する装置
	系統連系保護装置	風力発電システムの異常、系統事故時等に設備を系統から切り離し、系統側の損傷を防ぐ保護装置
運転・制御系	出力制御	風車出力を制御するピッチ制御あるいはストール制御
	ヨー制御	ロータの向きを風向に追従させる
	ブレーキ装置	台風時、点検時等にロータを停止させる
	風向・風速計	出力制御、ヨー制御に使用されるセル上に設置される
	運転監視装置	風車の運転/停止・監視・記録を行う
支持・構造系	ナセル	伝達軸、増速機、発電機等を収納する部分
	タワー	ロータ、ナセルを支える部分
	基礎	タワーを支える基礎部分

素材構成情報

JOGMEC「クリーンエネルギー導入拡大に係るレアメタル需要動向調査」(2009年3月)においては、1kWあたりの各元素の重量について、以下のように示されている。

表 1.1.2-4 風力発電の素材構成

材料	重量(kg/kW)	構成比(%)
スチール	107.89	89.63
Al	0.96	0.8
Cu	0.61	0.51
コンクリート	1.61	1.34
GRP	6.46	5.37
CRP	0.91	0.76
Adhesive	1.37	1.14
永久磁石	0.10	0.08
鉄	0.06	0.0528
ホウ素	0.00	0.0008
ネオジム	0.03	0.0224
ディスプロシウム	0.00	0.004
コア材	0.46	0.38

※表 1.1.2-2 より発電機を 6.5t/2MW (=3.25t/MW) とし、表 1.1.2-1 の 4MW の割合より算出。

(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 年 7 月)においては、架台やブレード、ナセル装置、鉄塔、発電設備土木設備の素材や重量について、以下のように示されている。

架台	架台材料	溶融亜鉛めっき鋼板
	材料所要量 (kg/m ²)	7.5
	(kg/システム)	208
使用年数 (年)	30	

		300kW	600kW	1000kW	2000kW	2500kW
ブレード	一般鋼材	0.540t/基	2.345t/基	2.731t/基	4.690t/基	7.172t/基
	エポキシ樹脂	1.125t/基	4.885t/基	5.690t/基	9.770t/基	14.943t/基
	グラスファイバー	2.250t/基	9.770t/基	11.379t/基	19.540t/基	29.885t/基
	計	3.915t/基	17.000t/基	19.800t/基	34.000t/基	52.000t/基
	ローター直径	30m	48m	54m	80m	80m
ナセル装置	一般鋼材	8.589t/基	10.416t/基	26.040t/基	31.769t/基	35.475t/基
	合金鋼	5.456t/基	6.617t/基	16.541t/基	20.180t/基	22.535t/基
	ステンレス鋼	0.078t/基	0.095t/基	0.236t/基	0.289t/基	0.322t/基
	炭素鋼鍍銀鋼	0.725t/基	0.879t/基	2.198t/基	2.682t/基	2.994t/基
	炭素鋼鍍銅鋼	1.074t/基	1.302t/基	3.256t/基	3.972t/基	4.436t/基
	炭素鋼管炭素鋼	0.455t/基	0.552t/基	1.379t/基	1.683t/基	1.879t/基
	炭素鋼管潤滑油	0.115t/基	0.139t/基	0.349t/基	0.425t/基	0.475t/基
計	16.492t/基	20.000t/基	50.000t/基	61.000t/基	68.116t/基	
鉄塔	炭素鋼管一般鋼材	27.977t/基	42.000t/基	77.000t/基	170.000t/基	188.895t/基
	高さ	41.5m	42.0m	60.0m	78.0m	78.0m
発電設備	発電機 一般鋼材	1.073t/基	2.721t/基	5.441t/基	14.803t/基	14.803t/基
	珪素鋼板	0.179t/基	0.454t/基	0.908t/基	2.469t/基	2.469t/基
	銅	0.089t/基	0.226t/基	0.451t/基	1.228t/基	1.228t/基
	計	1.341t/基	3.400t/基	6.800t/基	18.500t/基	18.500t/基
	操作盤 一般鋼材	3.242t/基	3.242t/基	3.242t/基	3.242t/基	3.242t/基
	銅	0.216t/基	0.216t/基	0.216t/基	0.216t/基	0.216t/基
	アルミニウム	0.216t/基	0.216t/基	0.216t/基	0.216t/基	0.216t/基
	絶縁物	0.648t/基	0.648t/基	0.648t/基	0.648t/基	0.648t/基
	計	1.080t/基	1.080t/基	1.080t/基	1.080t/基	1.080t/基
	ケーブル 銅	0.270t/基	0.540t/基	0.900t/基	1.800t/基	2.250t/基
	ポリエチレン	0.135t/基	0.270t/基	0.450t/基	0.900t/基	1.125t/基
	塩化ビニール	0.090t/基	0.180t/基	0.300t/基	0.600t/基	0.750t/基
	計	0.495t/基	0.990t/基	1.650t/基	3.300t/基	4.125t/基
	変圧器 一般鋼材	0.532t/基	1.064t/基	3.103t/基	3.547t/基	4.433t/基
	珪素鋼板	0.405t/基	0.810t/基	2.362t/基	2.700t/基	3.375t/基
	銅	0.198t/基	0.396t/基	1.155t/基	1.320t/基	1.650t/基
	絶縁物	0.038t/基	0.076t/基	0.222t/基	0.253t/基	0.317t/基
絶縁油	0.467t/基	1.011t/基	2.950t/基	3.372t/基	4.215t/基	
計	1.640t/基	3.357t/基	9.793t/基	11.192t/基	13.989t/基	
土木設備	セメント	55.661t/基	71.822t/基	120.723t/基	527.394t/基	818.629t/基
	異形丸鋼	26.715t/基	34.472t/基	57.942t/基	253.127t/基	392.908t/基
	砂・砂利	333.965t/基	430.932t/基	724.335t/基	3164.353t/基	4911.759t/基
	石材	50.095t/基	64.640t/基	108.851t/基	474.655t/基	738.767t/基
	合計	466.436t/基	601.866t/基	1011.651t/基	4419.530t/基	6860.063t/基
	合計(容積)	194m ³ /基	251m ³ /基	422m ³ /基	1841m ³ /基	2858m ³ /基
風車本体重量		44.231t/基	81.575t/基	134.058t/基	283.074t/基	327.511t/基
総重量		513.882t/基	688.868t/基	1158.232t/基	4718.176t/基	7206.769t/基
建設工事	石炭・ガス	2.460t/基	3.298t/基	5.545t/基	22.566t/基	34.499t/基
	石油	3.006t/基	4.030t/基	6.775t/基	27.599t/基	42.157t/基
	電気	1.414MWh/基	1.895MWh/基	3.187MWh/基	12.983MWh/基	19.830MWh/基

第6回産総研レアメタルシンポジウム「風力発電における永久磁石利用の動向」(2011年10月24日/三菱重工業(株)発表資料)においては、風車向けの永久磁石使用量について、以下のように試算している。

2MW級ギアレスPMSG風車の場合	1.5~2t/台
内、Nd使用量	Nd約30%(450~600kg/台)
内、Dy使用量	Dy約4%(60~80kg/台)
2MW級増速機付PMSG風車の場合	0.15~0.2t/台
内、Nd使用量	Nd約30%(45~60kg/台)
内、Dy使用量	Dy約4%(6~8kg/台)

Vestas Wind Systems A/S「Life cycle assessment of offshore and onshore sited wind power plants based on Vestas V90-3.0 MW Turbines」(2005年3月)では、タービン及びトランスミッションのライフサイクルにおいて用いられる資源の最大量として以下の値を設定している。

表 タービン及びトランスミッションに用いられる資源の最大量
(ライフサイクル全体)

Materials	Materials for offshore wind power plant		Materials for onshore wind power plant	
	Offshore turbine	Transmission	Onshore turbine	Transmission
	(kg/turbine)	(kg/farm)	(kg/turbine)	(kg/farm)
Water	3.66E+07	1.88E+08	3.27E+07	1.11E+05
Hard coal	1.89E+05	1.65E+06	9.95E+04	0.00E+00
Iron	1.17E+05	4.84E+04	6.42E+03	3.17E+01
Crude oil	1.01E+05	6.56E+06	8.08E+04	1.07E+04
Quartz sand	9.33E+04	5.45E+04	9.27E+04	1.80E+00
Lignite	7.90E+04	1.16E+06	5.34E+04	4.30E+02
Natural gas	7.76E+04	1.35E+06	5.13E+04	3.39E+03
Limestone	3.37E+04	1.14E+05	1.46E+04	3.02E+02
Sodium chloride	1.45E+04	7.38E+04	1.41E+04	2.60E+02
Zinc	1.12E+04	2.44E+04	2.09E+03	0.00E+00
Clay	8.37E+03	2.11E+04	8.37E+03	1.52E-01
Stone	2.80E+03	1.25E+06	5.57E+05	0.00E+00
Manganese	2.52E+03	1.33E+04	1.81E+03	1.90E-01
Aluminium	1.96E+03	1.22E+05	7.86E+02	1.29E+02
Copper	5.51E+02	2.03E+05	5.25E+02	5.32E+02
Lead	4.33E+00	8.60E+04	4.17E+00	0.00E+00

足利工業大学大学院工学研究科修正課程 安達 陽介「大型風力発電装置のLCA」(平成14年度)において、三菱重工業製の1000kW風車(AT-1000A)の構成要素について以下のように示されている。

機器名	数量 (unit)	重量 (kg/unit)	材質
ナセル	1	43,700	鉄
ローターヘッド	1	19,000	鉄
ブレード	3	4,500	GFRP (ガラス繊維 65%、不飽和ポリエステル 35%)
タワー (下段)	1	18,200	鉄
タワー (中下段)	1	36,900	鉄
タワー (中上段)	1	26,400	鉄
タワー (上段)	1	19,600	鉄
制御盤	2	2,500	鉄
基礎	—	1,477,000	セメント

※基礎部分の重量データはドイツ製の風車との重量比で算出

メーカーへのヒアリング調査によれば、最近の主流である2~3MWの風力発電設備の素材構成は以下の通り。

- 羽根(ブレード)1本が7~8t程度。羽根が3本のタイプが主流であり、合計25~30t程度となる。素材はガラス繊維強化プラスチックであり、近年ガラスの使用率が高まっている(80%以上がガラス)。
- ハブは約30t程度。ナセルは約150t程度。タワーは約120t程度。これらのほとんどは鉄でできている。
- 発電機、トランス、配線など一部に銅が使用されている。
- 永久磁石が使用されている風車のシェアは累積で10%程度(世界の風車の80%はギア式、20%はギアレス。ギアレスの半分はコイル式、残り半分は永久磁石)。永久磁石にはネオジム、ジスプロシウムが使用されている。ギアレス・永久磁石式の風車には、永久磁石が約2t必要。
- 増速機が使用されているタイプの風力発電設備は、潤滑剤として数トンの油が使用されている。また、羽根の角度を変える機構として、電動モータタイプと油圧式タイプがあるが、油圧式タイプの風力発電設備については、ここにも油が使用されている。
- タワーにコンクリートを使うタイプのものが出始めているが、これは5MW、10MWクラスの陸上風車を志向したものである。洋上風車では、設置により多くの時間を要するため、コンクリート製タワーが用いられることは少ない。
- ブレード部分について今後使用を検討する材料としては炭素繊維が考えられる。

【中小水力発電】

中小水力発電の導入の現状

中小水力発電は、水の力を利用して発電する水力発電の中でも、一般的に水を貯めることなくそのまま利用する方式で、中小規模のものである。水力発電は水の利用面に着目して分類すると、流れ込み式、調整池式、貯水池式および揚水式の4種類の方式に分類される。また、落差を得る構造面に着目した分類として、水路式、ダム式、ダム水路式の3種類の方式がある。

利用する水の種類としては、渓流水や農業用水、上下水道、工場内水等があげられる。

中小水力発電は技術的には既に実用段階にあり、資源エネルギー庁の出力別包蔵水力調査によれば、出力区分が10,000kW未満の既開発の合計は3,515MW、1,344地点となっている（一般水力全体の値であり、流れ込み式の他に、調整池式と貯水池式も含まれている）。1,000kW未満の小水力については、RPSの認定設備として2009年11月末現在で件、計202MWの水力発電設備が報告されている。最も古い設備は1897年に運転開始しており、1920年代に急激に出力が増えたが、その後は増加の度合いが緩やかになっている。

なお、2008年に報告された「水力発電に関する研究会－中間報告－」（2008年7月、水力発電に関する研究会）においては、水力発電の開発対象となる新規地点は、奥地化、小規模化してきており、経済性の確保が困難となり、開発が進まなくなってきたこと、また近年、河川維持用水や農業用水、上下水道および工業用水等の未利用落差を活用した、極めて小規模な水力発電に対する関心が高まっていることが報告されている。

主要な水力発電の方式と特徴

中小水力発電としての明確な規模の定義は無いが、NEDO「再生可能エネルギー技術白書」（2010年7月）において、以下のように水力発電の規模により分類している。

図表 8.17 水力発電の規模による分類

分類	規模
大水力 (large hydropower)	100,000kW 程度以上
中水力 (medium hydropower)	10,000kW 程度 ～ 100,000kW 程度
小水力 (small hydropower)	1,000kW 程度 ～ 10,000kW 程度
ミニ水力 (mini hydropower)	100kW 程度 ～ 1,000kW 程度
マイクロ水力 (micro hydropower)	100kW 程度以下

出典：「マイクロ水力発電導入ガイドブック」（2003, NEDO）

また、以下のように水力発電の方式と特徴について記載している。

分類方法	方式	概要
水の利用面からの分類	流れ込み式	<ul style="list-style-type: none"> 河川を流れる水を貯めることなく、そのまま発電に使用する。水量変化により発電量が変動する。
	調整池式	<ul style="list-style-type: none"> 夜間や週末の電力消費の少ない時に池に貯水し、消費量の増加に合わせて水量を調整しながら発電する方式。
	貯水池式	<ul style="list-style-type: none"> 水量が豊富で電力の消費量が比較的少ない春や秋に大きな池に貯水し、電力消費の多い夏期や冬期に使用する年間運用の発電方式。
	揚水式	<ul style="list-style-type: none"> 昼間のピーク時には上池に貯められた水を下池に落として発電し、下池に貯まった水は電力消費の少ない夜間に上池に汲み揚げられる。
構造面からの分類	水路式	<ul style="list-style-type: none"> 川の上流に低い堰を設けて水を取入れ、水路により落差が得られる地点まで導水し発電する方式。 この方式は、流れ込み式と組合わされることが一般的。
	ダム式	<ul style="list-style-type: none"> 高いダムを築いて河川をせき止め水量を確保し、落差を利用して発電する方式。

		<ul style="list-style-type: none"> 貯水池式および調整池式と組合わされるのが一般的。
	ダム水路式	<ul style="list-style-type: none"> ダム式と水路式を組合わせたもので、ダムに貯えた水を大きな落差を得られる地点まで水路で導いて発電する方式。 貯水池式、調整池式および揚水式と組合わされることが一般的。

素材構成情報

(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 年 7 月)において、水力発電(設備容量 10MW)の主要設備の素材構成について以下のように示されている。

素材・燃料必要量	鉄鋼(機械)	904 t/基
	鉄鋼(水圧鉄管)	206 t/基
	コンクリート(ダム)	4,940 t/基
	コンクリート(導水路無圧)	22,743 t/基
	鉄鋼(ダム)	23 t/基
	鉄鋼(導水路無圧)	163 t/基
	鉄鋼(ゲート一般)	105 t/基
	鉄鋼(その他)	404 t/基
	コンクリート(その他)	14,600 t/基
	軽油	481 Kl/基

発電事業者へのヒアリング調査に基づく素材構成情報は以下のとおり。

- 水車周りの材質は鉄・ステンレスが主であり、外装部は炭素鋼が使用されていると思われる。プロペラ式の場合はゴム製のベルトが使われている。その他、ゴム製のパッキンやグリース(潤滑油。流水面には使わない)が使用されている。
- 小水力の場合は採算性を向上させることが最も重要であり、発電設備はなるべく低コストなもの(汎用品等)を採用している。したがって、ネオジム磁石等の高機能材料や最先端の技術を適用した製品は採用されない。

【地熱発電】

地熱発電の導入の現状

地熱発電とは、地下に存在する熱エネルギーを利用して発電を行うことである。地中深くの熱資源に向けて生産井と呼ばれる井戸を掘削し、地上に上がってくる蒸気によってタービンを回し、電気を生産するしくみである（日本の事業用地熱発電所の生産井の深さは350m～3,250m）。

地熱発電は天候に左右されることなく安定した電力供給が可能であり、設備利用率は70%程度となっている。実用化されている地熱発電の方式には、広く用いられているフラッシュ方式と、比較的最近実用化されたバイナリー方式がある。

主要な地熱発電の方式と特徴

NEDO「再生可能エネルギー技術白書」（2010年7月）において、以下のように地熱発電の方式や特徴、実用化状況等について記載されている。

方式		特徴
フラッシュ方式 (蒸気発電方式)	シングルフラッシュ方式	<ul style="list-style-type: none"> 地熱貯留層から約200～350℃の蒸気と熱水を取り出し、気水分離器で分離した後、その蒸気でタービンを回し発電する方式。気水分離器で分離された熱水は、還元井と呼ばれる井戸を通して再び地下に戻される。 日本の地熱発電所のほとんどがこのシングルフラッシュ発電方式。
	ダブルフラッシュ方式	<ul style="list-style-type: none"> 分離した熱水をフラッシュャー（低圧気水分離器）に導き再度熱水と蒸気に分離して、蒸気は一次蒸気と一緒にタービンに送り、熱水は還元井へと送る方式。
バイナリー方式		<ul style="list-style-type: none"> 一般的に80～150℃の中高温熱水や蒸気を熱源として低沸点の媒体を加熱し、蒸発させてタービンを回し発電する方式である。媒体には、ペンタン（沸点36.07℃）やアンモニア（沸点-33.34℃）等の沸点100℃以下の液体が用いられ、タービンを回した後、凝縮器で液化されて反復使用される。 フラッシュ方式では利用できない低温の熱水や蒸気を活用することが可能。

素材構成情報

（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年7月）において、地熱発電設備（設備容量55MW）の素材構成について以下のように示されている。

主要設備		
電気機械設備	タービン及び付属設備	279 t/基
		4.3 t/基
		112.1 t/基
	発電機及び付属設備	122.1 t/基
		36 t/基
		10.5 t/基
		38.6 t/基
		18 t/基
	主変圧器及び付属設備	56.9 t/基
		42 t/基
		0.5 t/基
		1 t/基
		9.8 t/基
	復水器、冷却塔及び付属設備	330 t/基
		97.6 t/基
		400 t/基
	坑口設備	246.8 t/基
		29.3 t/基
	二相流輸送管	508.2 t/基
		23.3 t/基
		273.7 t/基
	熱水輸送管	310 t/基
	軸受冷却水装(モータ)	鍛鋼
		8 t/基
	軸受冷却水装(他)	一般鋼材
		1.5 t/基
		鑄鋼
		15.6 t/基
	配管バルブ	一般鋼材
		428.6 t/基
		ステンレス鋼
		41.7 t/基
		鑄鋼
		333.3 t/基
	計測制御装置	一般鋼材
		19.3 t/基
	本館電気設備(メタクラ)	鍛鋼
		139.8 t/基
	本館電気設備(モータ)	鑄鋼
		74.8 t/基
	本館電気設備(他)	鋼
		5.4 t/基
	屋外変電所(遮断器)	鍛鋼
		2.8 t/基
	屋外変電所(他)	一般鋼材
		14.9 t/基
		鋼
		4.4 t/基
	通信設備	一般鋼材
		4.8 t/基
		鋼
		0.2 t/基
	送電設備	一般鋼材
		375.4 t/基
		アルミニウム
		108.6 t/基
		磚子
		26.6 t/基
	その他雑装置	一般鋼材
		27.9 t/基
	復水器冷却水施設	一般鋼材
		1123 t/基

メーカーヒアリングによれば、設備の大部分は鉄であり、その他、ケーブルのビニル等も使用されている。

3. 再生可能エネルギー設備に関する技術動向調査

再生可能エネルギー設備のリユース・リサイクル・適正処分に関する技術動向を整理した。国内外で現在実際に活用されている技術のみならず、研究開発や、実証実験を実施中の技術も対象とした。再生可能エネルギー設備は、総じて耐用年数が長いため、流通量が限られるケースも多く、リユース・リサイクル・適正処分等に関する技術開発が行われているのは、太陽光発電設備や一部風力発電関連設備等に限定されると予想された。また、当社が過去に実施した関係者へのヒアリング調査によると、大学や研究機関等による研究として実施されているものだけでなく、リユース事業者や解体・処理業者等、個別民間企業においてノウハウとして蓄積されている技術もあると推察された。このため、本調査項目では、より多くの技術に関する情報を得るため、論文等文献資料収集のほか、関連事業者・研究者等へのヒアリング調査を実施した。

加えて、太陽光発電をはじめ多くの再生可能エネルギー設備は、そのものが技術的に成熟期に達しておらず、今後とも改良・改善が進められていく可能性が高い。特に素材や設計面で技術革新が進めば、最適なリユース・リサイクルシステムも変動すると考えられるため、今後の素材、設計面での技術開発動向も把握の上、将来的に導入が見込まれる技術についても調査を行った。

3.1 太陽光発電

3.1.1 調査対象

公開情報を中心に、太陽光発電設備について、リユース、リサイクル及び適正処理に関する技術動向の調査を実施した。調査対象とした文献等は以下の通り。

- 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構による太陽光・太陽熱分野の公募案件(平成 21～23 年度)の成果報告書及び中間年報
- JST 文献検索サービス JDream II , <http://pr.jst.go.jp/jdream2/index.html>
- JPEA 太陽光発電協会 HP, <http://www.jpea.gr.jp/>
- 日本太陽エネルギー学会 HP, <http://www.jses-solar.jp/ecsv/front/bin/home.phtml>
- PVTEC 太陽光発電技術研究組合, <http://www.pvtec.or.jp/index.html>
- nikkei BP, <http://www.nikkeibp.co.jp/>
- 「平成 22 年度産業技術調査事業(太陽光発電研究開発の追跡評価のための調査) 報告書」2011 年 3 月, 株式会社三菱総合研究所
- 「住宅用太陽光発電システムの普及促進に係る調査報告書」2011 年 2 月, 株式会社三菱総合研究所
- 「平成 16～17 年度新エネルギー・産業技術総合開発機構委託業務成果報告書」2006 年 3 月, 太陽光技術研究組合、シャープ株式会社、昭和シェル石油株式会社、旭硝子株式会社、独立行政法人産業技術総合研究所
- 北九州市 HP
- 太陽光発電設備メーカー各社 HP
- 環境省地球温暖化対策技術開発等事業(競争的資金) ウェブサイト

3.1.2 調査項目

3.1.1 に示した文献に記載されている、太陽光発電設備のリユース、リサイクル及び適正処分に
関連する技術について、以下の3点を調査した。

- 技術開発実施者
- 技術の内容・開発状況等
- 研究開発の段階

● 調査した技術は、リユース関連技術、リサイクル関連技術、適正処分関連技術に大別し、さら
に技術の概要によって以下の区分に整理した。

- リユース関連技術
 - ✓ 易リユース設計にかかる技術
 - ✓ 使用済み設備性能及び品質のチェック・評価技術
 - ✓ 中古品流通時に活用可能な性能関連情報集約
 - ✓ リユース対象品の円滑な流通にかかる技術(取り外し、梱包、運搬等技術)
 - ✓ リユースにかかる社会システム関連技術
- リサイクル関連技術
 - ✓ 易リサイクル設計にかかる技術
 - ✓ リサイクルを効率的に行うための取り外し・梱包・輸送等にかかる技術
 - ✓ 分離・解体技術
 - ✓ 有用物質・部品等の回収にかかる技術
 - モジュールのリサイクル
 - モジュールのリサイクルプロセス
 - Siの回収・再生
 - ガラスの回収・再生
 - その他の物質の回収
 - 周辺機器のリサイクル
 - ✓ 再生品の品質確保
 - ✓ リサイクルにかかる社会システム関連技術
- 適正処分関連技術
 - ✓ 有害物質の製品への不使用

3.1.3 調査結果

(1) 調査結果一覧

太陽光発電装置のリユース、リサイクル及び適正処分に関する技術及びその開発状況は次ページに示す表の通りであった（参照した文献は表下部に記載の通り）。

リサイクル関連技術、特にモジュールのリサイクルに関する技術開発が進められており、国内外で結晶 Si やガラスの回収技術の研究が行われている。また、リサイクル関連の技術は、既に実用化している技術も複数存在する。

一方でリユース関連、適正処分関連の技術についての研究・開発は、現時点ではあまり多く行われていないが、今後検討が必要であると指摘されている項目が複数確認された。

表 3-1 太陽光発電のリユース・リサイクル・適正処分に係る各種技術

技術区分	技術概要	技術開発実施者	技術の内容・開発現況等	研究開発の段階					
				出典	未着手	研究中	実用化・事業化		
リユース関連技術	リユース設計にかかわる技術	結晶シリコン系リサイクルモジュール(二重封止型モジュール)	産業技術総合研究所	セルEVAの間に非接着フィルムを追加積層する二重封止型モジュール(非接着シートを封止材とセルの間に挟む)。 現状のモジュール製造工程を大幅に変更することが無い点や、中間製品であるSセルを簡単に回収し、リユースすることが出来る。	13, 15		○		
	使用済設備性能及び品質のチェック・評価技術	出力測定(ソーラーシミュレータ)によるI-V測定によるI-Vグラフ形状の確認 絶縁抵抗検査	—	現時点で検討・開発はされていない模様であるが、今後以下の点に対する検討が必要と考えられる。 ・出力数値だけでは、各種劣化の兆候を見逃してしまふリスクがある。 ・現状では、I-V測定結果から劣化の有無を判断する明確な数値基準はないため、劣化の可能性と箇所について、グラフ形状から判断する専門的知識、経験が必要となる。 現時点では、IECの性能試験規格が参照されている模様。今後以下の点に対する検討が必要と考えられる。 ・安全性を担保するための必要最低限の測定基準	9	○			
		EL検査	N社(長野県K市)	洗浄後の使用済モジュールに対し、絶縁検査、外観検査(ひび、バックシート)、I-V検査に加えてEL検査を実施。	2			○	
		モジュール・機器耐久性評価技術	秋田県	ELシミュレータを用いたリユース評価試験を実施。 ・新規信頼性試験方法の開発を実施。 ・電圧電圧サイクリック試験を実施し、外観劣化(傷、影)を確認するとともにI-V特性の劣化(Rsh, Rs)を促進する試験として有効であることを確認した。 ・荷重・振動方式の試験を実施し、試験槽温度-30℃においてガラスとセルに割れが発生した。今後は異なる部材や、異なるモジュール化条件で作製した試料について検討が必要。 ・モジュール内水蒸気侵入経路調査方法の研究開発を実施。	5, 9		○		
		モジュールの寿命の評価	—	現時点で検討・開発はされていない模様であるが、今後以下の点の検討が必要と考えられる。 ・リユース・リサイクルの入口論構築のために、モジュールの寿命を評価する仕組み(仕組みの構築)により、モジュールが寿命を超えていればマテリアルリサイクルに、まだ寿命が残っていれば中古市場に値付されて出ていく、ということが可能となる。	3	○			
		システム点検技術	(株)システム・ジェイディー 他	故障診断システムのプロトタイプ開発を実施。 ・多重故障について実測とシミュレーションを実施し、パルス印加の方向を変えて2つの故障に関しては判定可能である見通しを立てられた。 ・複合故障については、シミュレーション上で、断線と短絡が同一箇所でも発生しない限りそれぞれの故障は検出可能であるということが確認できた。	4		○		
			(株)システム・ジェイディー 他	故障位置特定技術の開発及びそれを利用した故障劣化センシング装置のプロトタイプ開発を実施。 ・太陽電池ストリング中に存在する100の抵抗値を持つ故障箇所をモジュール1枚以内の精度で検出する方法を確立した。 ・抵抗値が異なる組み合わせによる良品モジュールと劣化モジュールを、複数枚直列接続し、TDR法によるI-V測定することで、数〜100程度の測定が可能であることが確認できた。 ・良品モジュールと劣化モジュールとの位置の違いにより、TDR法によりえられた電圧波形から反射波に差が表れる。その波形のピークレベル、反射開始位置などを解析することで、不良モジュールの位置の特定が行えた。	4		○		
			産業技術総合研究所	オンサイト発電性能点検技術の検討を実施。 ・約10年経過後に200V以下の住宅システムを対象に発電量のデータの経年特性の評価を実施。また、日射量のデータを利用した場合のオンサイト発電性能点検技術として、線形内挿法の適用について検討を実施。実証設備を利用して、信頼的な見直しを発生し、日射パルスにて短絡電流低下モードにおける10%出力低下について発見可能である見通しを得た。	5		○		
			東京大学、産業技術総合研究所、シャープ	信頼性向上のための遠隔故障診断に関する技術開発を実施。 ・分散PVシステムでの運転データをネットワーク経由で自動収集し、遠隔故障診断を可能とする手法を確立することにより、低コストでPVシステムの信頼性を確保するシステムを構築することを目的として、技術開発を実施している。 ・実用化に向けた課題抽出や、故障診断手法の実用化に向けた技術開発が実施されている。	20		○		
		中古品流通時に活用可能な性能評価情報集約のデータベース化	補助金申請書類に記載された性能情報のデータベース化	—	現時点で検討・開発はされていない模様であるが、今後以下の点の検討が必要と考えられる。 ・補助金を受けて設置された住宅用太陽電池モジュールに関する情報のデータベース化及び中古品流通への活用(現在はこれらの情報はJPECE(太陽光発電普及拡大センター)に集約されている)。	9	○		
		リユース対象品の円滑な流通にかかわる技術(取り外し、梱包、運搬等)技術	太陽電池モジュールの適切な取り外し	—	現時点で検討・開発はされていない模様であるが、今後以下の点の検討が必要と考えられる。 ・太陽電池モジュールの適切な取り外しを促すための制度の整備(現在、住宅用太陽電池モジュールの撤去については「PV施工士(仮称)」など、適切な設置を促すための制度が検討されている)	9	○		
		劣化部位等の補修技術	使用済モジュールの洗浄技術 使用済モジュールの材料、裏面フィルム、アルミ枠、端子ボックス等の新規部材への交換技術 使用済モジュールの裏面フィルム等の補修技術	N社(長野県K市) — シャープ(株)	回収した使用済モジュールについて、性能検査前に洗浄を実施。 今後以下の点の検討が必要と考えられる。 ・補修モジュールの実現、屋外暴露による実用性の確認(更なる市場での実用性確認並びに市場導入済みモジュールとの差異を調査するため)	2 16 15		○ ○ ○	
		リユースにかかわる社会システム関連技術	リユースにかかわる社会システム関連技術	—	今後以下の点の検討が必要と考えられる。 ・将来(補助金制度が終了する頃)、低コストな新品太陽電池モジュールに対して、中古太陽電池モジュールの市場価格と住宅からの除去・回収費用が見合うかどうか	9	○		
	リサイクル関連技術	リサイクル設計にかかわる技術	インパースエンジニアリング技術	—	・CIS系薄膜太陽電池モジュール構造として、従来のCISのモジュールに比べ、非接着性プラスチックシートを余分に積み込む構造を検討。 ・非接着性プラスチックとしてはポリエチレン樹脂が現状では最適な材料であり、結晶Si系太陽電池モジュール並の耐久性確保が確認された。 ・ポリエステル使用に伴うシステムの出力低下を引き起こさない技術開発が今後の課題。	13		○	
			リサイクルモジュール構造(フィルム・セル間の光学的接触条件の改善技術)	産業技術総合研究所	・リサイクルモジュール構造の実用規模での実証を行うため、16直列モジュールによるリサイクル試験を実施。 ・セルの物理的回収率は99.7%であるとともに、耐候性試験後のモジュールの劣化も認められず、良好な結果を得られた。 ・LCA評価の結果、従来型に比べ投入エネルギー量が約7%、CO2排出量が約7%減少(9セル直列試作モジュール)と効果が確認できた。	7		○	
		環境により優しいEVA剥離剤の開発	横浜油脂工業(株)、(株)極東商事	・環境により優しい水性かつ中性のEVA剥離剤の開発を実施し、所期の結果を得られた。	2		○		
		リサイクルを効率的に行うための取り外し・梱包・輸送等にかかわる技術	結晶系太陽電池モジュールのリサイクルコスト予測	—	・加熱処理プロセスとウェットエッチング処理プロセスとの組み合わせにて、得られる回収物、処理コスト及びリサイクル率を算出する。	14		○	
		分選・解体技術	アルミ枠解体支援装置	(財)北九州産業学術推進機構	・モジュールローダー・アンローダー後処理装置(アルミ枠解体支援装置)の開発を実施。 ・電気ヒータにより200℃程度の熱風を加熱炉内で循環させてモジュール全体を加熱し、アルミ枠と端子箱を接着している封止材を軟化させ、排出されたモジュールを回転テーブル上で回転させながら手作業にてアルミ枠を解体し、その後端子箱をナイフエッジ上の器具を用いて解体する。 ・性能試験の結果、封止材の種類がアルミフレームであるモジュールについては、手作業で容易にアルミ枠を解体できることを確認した。 ・封止材にシリコンゴムが使用されるモジュールの場合、封止材が軟化しなかった。これらについて、非加熱方式(エアシリンダーを用いて解体)に改造した装置で性能試験を実施したところ、対応可能であることを確認した。	6		○	
		有用物質・製品の回収にかかわる技術	モジュールのリサイクルプロセス	昭和シェル石油(株)	CIS系薄膜太陽電池モジュールのリサイクルプロセスの検討を実施。 以下の処理プロセスを提案。 ・アルミ枠、接続箱、ケーブル、エッジシールド材の回収(手作業) ・バックシート(プラスチック粉)の回収(ワイヤラシによる削り落とし) ・カバーガラスの回収(オープン中での加熱分離) ・銅製リボン(部分的に鉛フリー半田付)の回収(手作業) ・ZnO系基板/高抵抗バックシート層とCIS系光吸収層から回収された金属粉、Mo裏面電極層付き合板ガラスの回収(スクレーピング法)	15		○	
			結晶Si太陽電池モジュールのリサイクルの基本プロセス	旭硝子(株)	結晶Si太陽電池モジュールを対象としたリサイクルの基本プロセスを明確化。 ・ガラスの回収率を上げるため、新たなリサイクルプロセスを開発し、ガラスの回収率90%以上を達成した(CO2削減に有効であることを確認)。 ・薄膜シリコン系太陽電池のガラスのリサイクルについても薄膜を除去せずに板ガラス原料として使用可能であることを示した。	7		○	
			Sの回収・再生	—	・リサイクル促進策として想定される太陽電池モジュールの使用後処理工程(結晶Si系太陽電池モジュールからのS材料回収技術)として以下が想定されている。 ・薄膜Si系太陽電池モジュールにおいては、破壊しない状態でSの回収が困難であるため、S原料としての再生を想定。 ・手作業でフレーム、端子ボックス(絶縁ケーブル含む)、シール材を除去後、加熱処理によってフロントカバー(ガラス)/EVA/結晶Siセル/EVA/バックカバー(プラスチックフィルム)の構造を分離	13		○	
			回収Siからの不純物除去及び再生Siの評価技術	シャープ(株)	・大量処理時に低コストでSをリサイクルできる技術の開発のため、回収Siからの不純物除去及び再生Siの評価を実施。 ・多結晶Siインゴットの作製においては問題がなかった。 ・回収材から作製したSiウェハをセル化した場合、再生Si添加率2%程度までのセル特性は、リファレンスと比較すると、インゴット形成及びセル作製プロセス中での諸特性に与える影響の誤差範囲内であると考えられた。 ・回収材から作製したモジュールについては、再生Si添加率5%以下のサンプルにおいては、リファレンスと遜色のないレベルで作製できていると判断できた。	16		○	
			太陽電池モジュールのウエハへの再生技術	ドイチエソーラー	・太陽電池モジュールのウエハへの再生技術の検討を実施。 ・熱処理工程によりプラスチック系材を除去し、エッチング処理による電極露出・裏、放射防護、拡散層の処理する。 ・ウエハの厚さにより回収率が異なる。薄型ウエハではわれが発生し回収困難との報告がある。 ・ウエハ再生ができなければインゴットの原料となり、コスト高となる。	14		○	
			リサイクルSiの利用技術	Solar World	・リサイクルSiの利用技術を開発。 ・Virgin SiとリサイクルSiをブレンドすることにより、Si原料に伴うGWPPの20%低減が可能である。	10		○	
			シリコン等のリサイクル事業化	秋田県	・シリコン等のリサイクル事業化の検討を実施。 ・平成21年の調査では、シリコンを有価物としてリサイクルするのは困難、という結論に至った。	1		○	
		ガラスの回収・再生	カバーガラス分離装置	昭和シェル石油(株)	・カバーガラス分離装置の開発を実施。 ・30cm×30cmサイズモジュールの分離実験で、80%以上の成功率を確認した。 ・回収したCIS系薄膜太陽電池デバイス部から、有価物として、カバーガラス、金属粉末、Mo裏面電極層付き基板ガラス(または、Mo裏面電極層からの金属スラッジ及び基板ガラス)を分離・回収する乾式プロセスを開発した。	7		○	
			バックシート剥離装置	(財)北九州産業学術推進機構	・低コスト汎用バックシート剥離装置の開発を実施。 ・CIS系の新品については、処理速度10分/枚で80%程度の確率で剥離できることを確認した。 ・耐用年数を過ぎたバックシートが脆くなったモジュールや、加熱してもバックシートとEVAの接着力が低下しないモジュールに対しては、適用不可、これらのモジュールについて、切削装置を借用したFS試験を実施した結果、各種モジュールに対応可能であることを確認した。	6		○	
			EVA熱処理装置	(財)北九州産業学術推進機構	・低コスト汎用熱処理装置の開発を実施。 ・2012年1月に装置が完成。性能試験の結果、各種モジュールに対し、炉内酸素濃度3%未満に制御可能で、かつガラスの破壊なしで処理できることを確認した。	6		○	
		モジュールからのガラス回収技術(加熱・選別)	旭硝子(株)	・以下の手順による太陽電池モジュールからのガラス回収技術の検討を実施。 ・ガラス溶解槽の排ガス利用による熱回収の利点は認められないが、ガラスの回収率を90%と高められることが確認できた。	13, 15		○		
		薄膜Si太陽電池モジュールからのガラス回収技術	—	・薄膜Si太陽電池モジュールからのガラス回収技術として以下が検証されている。 ・結晶Si系太陽電池モジュールの場合と比較してセル原料の回収率が非常に低いため、ガラス回収が主目的。 ・手作業でフレーム、端子ボックス(絶縁ケーブル含む)、シール材を除去後、加熱処理によってカバーガラス(薄膜Siセル付)/EVA/バックカバー(プラスチックフィルム)の構造を分離	13		○		
		CIS系太陽電池モジュールからのガラス回収技術	—	・CIS系太陽電池モジュールからのガラス回収技術として以下が検証されている。 ・手作業でフレーム、端子ボックス(絶縁ケーブル含む)、シール材を除去後、加熱処理によってフロントカバー(ガラス)/EVA/基板(CISセル付青板ガラス)/EVA/バックカバー(プラスチックフィルム)の構造を分離	13		○		
		CdTe、CIGSモジュールのリサイクル技術(高純度材料回収技術)	First Solar社	・CdTe、CIGSモジュールのリサイクル技術及び回収したCdTeの利用技術を開発。 ・PVモジュールへ直接使用可能なレベルで材料回収が可能である。 ・モジュールに使用されていたガラスの90%は新しいガラス製品としてリサイクルされ、半導体材料の85%が新しい太陽電池モジュール材料としてリサイクルされる。 ・CdTe化合物(Filter cake)は他社にて精練し、太陽電池原料として利用している。 ・モジュールとしてのリサイクル率は90%、CdTe化合物のリサイクル率は95%である。	10, 12		○		
	その他の物質の回収	太陽電池モジュールからのSe、Cl、In(Ga)の抽出技術	SN Plus社	・太陽電池モジュールからのSe、Cl、In(Ga)の抽出技術(CIGS PV Modules Recycling Technology Status)を開発。 ・モジュールよりEVAの除去後、低温(400〜500℃)の過熱化で物理的・科学的手法を加え、CIGSの粉末を抽出し、Se、Cl、In(Ga)に分離する。	11		○		
		CIS層の除去装置	(財)北九州産業学術推進機構	・CIS層の除去装置(薄膜スクレーパー)の開発を実施。 ・EVA除去処理後、基板ガラス表面に残された薄膜層の除去を装置。 ・1250mm×950mmのガラス基板上に成膜された薄膜層を約35秒で除去できることを確認し、装置への基板のロード・アンロード時間を含め、基板1枚当たり60秒、年間20MWの処理に相当。	6		○		
		薄膜金属粉の回収装置	(財)北九州産業学術推進機構	・薄膜金属粉の回収するための「粉塵回収装置」の開発を実施。 ・薄膜金属を除去した基板ガラス表面には、ほとんど薄膜金属粉は認められず、良好な粉塵回収率を確認した。	6		○		
		回収した金属粉からのセレン除去技術	—	現時点で検討・開発はされていない模様であるが、他の製品において確立している産業廃棄物のリサイクルルートに即して問題なく処理されたいと考えられる。	6	○			
	周辺機器のリサイクル	周辺機器(BOS)の使用後処理技術(各製品のリサイクル)	—	現時点で検討・開発はされていない模様であるが、他の製品において確立している産業廃棄物のリサイクルルートに即して問題なく処理されたいと考えられる。	13		○		
		周辺機器(BOS)の使用後処理技術(パワーコンディショナ、接続箱のリサイクル)	—	現時点で検討・開発はされていない模様であるが、他の製品において確立している産業廃棄物のリサイクルルートに即して問題なく処理されたいと考えられる。	13		○		
		周辺機器(BOS)の使用後処理技術(配線材料のリサイクル)	—	使用されている銅線が高価であるため、現状で既に回収ルートが確立されている。	13		○		
	再生品の品質確保	再生Siの評価技術	シャープ(株)	・再生Siの評価技術の開発を実施。 ・多結晶Siインゴットの作製・セル化、モジュール化を順次行うことで、再生したSiが太陽電池用Siにリサイクルできるかどうかを確認した。	16		○		
適正処分関連技術	リサイクルにかかわる社会システム関連技術	自社製品回収・リサイクルシステム	First Solar社	・自社製品回収・リサイクルシステムを開発。 ・回収した製品は、同社のリサイクル場において各種行程を経て分解され、半導体や銅線などが処理場までの輸送コストを含む使用済みPVモジュールに再利用されている。 ・廃棄物の引取りを約束した上で販売、購入者への利用者登録の義務付け、無料回収サービスの提供(取扱い、梱包は含まない)等を実施している。 ・ユーザーからのリサイクル申請のための連絡先を設けている。	9, 10		○		
		リサイクルシステム構築にかかわるコスト検証	旭硝子(株)	・PVモジュールのリサイクルシステム構築にかかるコスト検証を実施。 ・リサイクルプロセスのコスト概算を提示している。	7		○		
		PVモジュールのリサイクル・リユースシステムを実現するための必要な事項(ガイドライン)の策定	PVTEC	・PVモジュールのリサイクル・リユースシステムを実現するために必要となる事項として、以下の項目について整理を実施。 1) PVモジュール設計ガイドライン・PVモジュールの設計段階からリサイクルし易いモジュール構造にする。モジュール製造メーカーが対応する条件である。 2) 除去及び回収ガイドライン・PVシステムからPVモジュールの除去、回収を確実に低コストで行う。モジュール製造メーカー、PV施工・販売業者が対応する条件である。 3) リサイクル処理ガイドライン・回収したPVモジュールを低コストでリサイクル処理できる技術と体制を築く。PV関連業界(団体)が固く協力して対応する条件である。	7		○		
		広域対象のPVシステム汎用リサイクル処理方法に関する研究開発	(財)北九州産業学術推進機構 他	・広域対象のPVシステム汎用リサイクル処理方法を検討。 ・調査期間は2010〜2014年。 ・調査内容は①低コスト汎用リサイクル処理技術の基本技術開発、②LCA調査、③広域対象のPVシステム汎用リサイクル処理に必要な社会システムの調査・提案。	3, 19		○		
		ライフサイクル評価	ドイツ連邦環境省、EPIA、BSW-SOLAR	・CIS、アルファス(Si)およびCdTeを対象とし、回収場所から処理場までの輸送コストを含む使用済みPVモジュールの回収(リサイクル)と廃棄(埋没)までを対象とした評価を実施。 ・WEEE指令適用ケース、自主的取組ケース(WEEE指令適用ケース)に加えてガラスのリサイクルを実施)を適用した場合のライフサイクルCO2排出量を推計。 ・自主取組ケースでは、WEEEケースと比較して2020年時点での7割程度の削減効果を示すとの結果を報告。	21		○		
			CystalClearコンソーシアム	・オランダエネルギー研究センター(ENI)とロンドン大学(オランダ)によってライフサイクル分析(LCA)を実施(独自のLCAインプットデータを産業界から入手)。 ・アルミニウム・フレーム、ガラス、銅、シリコンといった原料の再生による環境へのプラス効果の方が、モジュール回収とリサイクルプロセスにより生じる環境負荷よりも大きいことが示された。 ・LCAによる分析結果は、シリコン原料から太陽電池モジュールまでのCrystalClear技術オプションの中から最適なものを選択する際の指針として利用されており、環境破壊の可能性への早期警告としての役割も果たしている。	11		○		
			(財)北九州産業学術推進機構	・CO2排出量を、ベースケース(現状産業される場合)でも、アルミフレーム)のリサイクル効果があるため、「全量埋立て」に比べて削減効果が見られる。 ・廃棄物の発生量ではガラスのリサイクルが大きな削減効果を生むため、ガラスのリサイクルが可能であれば、2020年に九州地区だけで650トン、2030年には6,400トンの埋立て量削減が見込まれる。	6		○		
			船フリーの製品を開発	三菱電機(株)	・船フリーの製品を開発。 ・海外向け製品(無鉛はんだ太陽電池モジュール、大規模発電用)を2005年から、国内住宅用を2010年から市場投入。	17, 18		○	

参考文献
DOWA エコジャーナル, http://www.dowa-ecoj.jp/sonomichi/solor_recycle/01.html, 2013年1月30日及び同社ヒアリング
「新規EVA剥離剤による太陽電池モジュール高効率リサイクル技術の開発」太陽エネルギーVol.38 No.6, 2012年11月, 木村真典, 奥二敬郎
「太陽電池リユース・リサイクルの国内動向」2012年11月, 太陽エネルギーVol.38 No.6, 小澤祥司
「平成21年度中間報告 新エネルギー技術研究開発/新エネルギーベンチャー技術革新事業(太陽光発電)/太陽電池アレイ故障診断技術の開発」2012年12月, 株式会社システム・ジェイディー, 阪和電子工業株式会社, 独立行政法人産業技術総合研究所
「平成23年度中間報告 太陽エネルギー技術研究開発/太陽光発電システム次世代高性能技術の開発/発電量評価技術等の開発・信頼性及び寿命評価技術の開発」2012年6月, 産業技術総合研究所
「平成23年度中間報告 太陽エネルギー技術研究開発/太陽光発電システム次世代高性能技術の開発/広域対象のPVシステム汎用リサイクル処理方法に関する研究開発」2012年6月, 財団法人北九州産業学術推進機構
「平成22年度産業技術調査事業(太陽光発電研究開発の進捗評価のための調査)報告書」2011年3月, 株式会社三菱総合研究所
「使用済み太陽電池モジュールの国内外でのリサイクル動向とJPEAリサイクル部会での検討内容」2011年2月9日, 太陽光発電協会リサイクル部会 日野光敏
「住宅用太陽光発電システムの普及促進に係る調査報告書」2011年2月, 株式会社三菱総合研究所
「平成21年度成果報告書 新エネルギー技術研究開発 太陽光発電システム共通基盤技術研究開発EVA PVPSプログラム タスク8の活動に関する国際協力事業」2010年2月, みずほ情報総研株式会社
「平成21年度成果報告書 新エネルギー技術研究開発/太陽光発電システム共通基盤技術研究開発/太陽光発電技術開発動向等の調査」2010年2月, 株式会社 資源総合システム
「国内外における使用済み太陽電池モジュールのリサイクルに対する動向」2010年2月4日, 太陽光発電協会技術部会 日野光敏
「平成19〜20年度新エネルギー産業技術総合開発機構委託業務成果報告書 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年3月, みずほ情報総研株式会社
「欧州におけるPVリサイクルの取り組み状況と日本の対応について」2008年8月1日, 太陽光発電協会技術部会 日野光敏
「PVTECニュース」(2006 Vol.49, 9月号), 2006年9月 PVTEC太陽光発電技術研究会
「平成16〜17年度新エネルギー産業技術総合開発機構委託業務成果報告書」2006年3月, 太陽光技術研究会, シャープ株式会社, 昭和シェル石油株式会社, 旭硝子株式会社, 独立行政法人産業技術総合研究所
三菱電機プレスリリース「無鉛はんだ太陽電池モジュール」新製品発表のお知らせ」2005年2月16日, 三菱電機株式会社
nikkei BP, net, http://www.nikkeibp.co.jp/article/news/20100302/213490/, 2013年3月4日
北九州府スリル「国の太陽光発電システム技術開発プロジェクトに採択 一全国初のリサイクル拠点の形成に向けた研究開発プロジェクトが始動」2010年7月7日, 北九州産業経済局, 北九州環境局, (財)北九州産業学術推進機構
「平成23年度地球温暖化対策技術開発事業報告書 太陽光発電システムにおける信頼性向上のための遠隔故障診断に関する技術開発」2012年3月, 東京大学学生産技術研究所, 産業技術総合研究所 太陽光発電工学研究センター, シャープ株式会社
EPIA/BSW STUDY ON THE DEVELOPMENT OF A TAKE BACK AND RECOVERY SYSTEM FOR PHOTOVOLTAIC PRODUCTS/, 2007

(2) 主要技術個票

太陽光発電装置のリユース、リサイクル及び適正処分の主要技術のうち、以下の観点から選定した技術について、次ページ以降に個票として整理した。

- リユース関連技術、リサイクル関連技術、適正処分関連技術のそれぞれから、1 つ以上の技術を選定
- 各種区分において、複数者が取組んでいる技術等、特に注力されていると考えられる技術を選定
- 技術開発実施者に重複が生じないように選定
- 技術開発の実施年度が比較的新しい技術を選定

個票として整理した技術は以下 8 つの技術である。

- 「結晶シリコン系リサイクラブルモジュール(二重封止型モジュール)」(独立行政法人産業技術総合研究所)
- 「システム点検技術」(株式会社システム・ジェイディー 他)
- 「回収 Si からの不純物除去及び再 Si の評価」(シャープ株式会社)
- 「モジュールからのガラス回収技術」(旭硝子株式会社)
- 「CdTe、CIGS モジュールのリサイクル技術(高純度材料回収技術)」(First Solar 社)
- 「広域対象の PV システム汎用リサイクル処理方法に関する研究開発」(公益財団法人北九州産業学術推進機構 他)
- 「鉛フリーのモジュール製造」(三菱電機株式会社)

No	1
テーマ	リユース関連技術
技術区分	易リユース設計にかかる技術 「結晶シリコン系リサイクラブルモジュール(二重封止型モジュール)」
実施者	独立行政法人産業技術総合研究所
技術概要	<p>結晶シリコン系リサイクラブルモジュール(二重封止型モジュール)開発</p> <ul style="list-style-type: none"> リサイクル時のセル回収過程を容易にするとともに、製造時にも大きな負担増とならないような、リサイクラブルモジュールの開発を目的とし、「二重封止型モジュール」(非接着シートを封止材とセルの間に挟む)を開発。 <p>1: 表面ガラス 2: 封止材=EVA 3: 太陽電池セル 4: 裏面材 5: 非接着シート 6: インタコネクタ</p> <p>図 二重封止型モジュールの構成</p> <ul style="list-style-type: none"> 平成13～15年度に、単セルモジュールとこれを用いた9セルモジュールの製作、回収試験、モジュール効率を低下させる非接着シート材料について、効率を低下させないような材料および構造の検討・探索を実施(非接着シートとしてフッ素樹脂系を採用し、91%の回収率が実現)。 平成16～17年度に、フィルム材の樹脂塗布方式の検討(平成13～15年度とは異なる方式)により、モジュール効率低下の低減を図ると共に、二重封止型以外の構造(粘着シートやマジックテープを封止材の代わりに使用)の検討や、16直列モジュールによるセルの回収試験を実施。1サイクル後：99%、2サイクル後：100%、3サイクル後：100%(トータルの回収率：99.7%)という結果を取得。耐候性試験、電気特性の測定の結果、1～3サイクル後の各モジュールについて回収後のモジュール劣化の観測はなし。また、開発当初は従来型比0.8だった回収による効率低下は0.94まで向上。
リサイクル上のメリット	<ul style="list-style-type: none"> 現状のモジュール製造工程を大幅に変更することがない。 中間製品である「セル」を回収し、リユースすることが出来る。 多結晶シリコンセルの再利用による効果により、リサイクラブルモジュールのCO2排出量は従来型モジュールの約70%となる。
適用時期・実用化想定時期	記載なし
出典	「平成19～20年度新エネルギー・産業技術総合開発機構委託業務成果報告書 太陽光発電システムの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年3月、みずほ情報総研株式会社

No	2
テーマ	リユース関連技術
技術区分	使用済設備性能及び品質のチェック・評価技術 「システム点検技術」
実施者	株式会社システム・ジェイディー（代表委託先） 阪和電子工業株式会社 独立行政法人産業技術総合研究所
技術概要	<p>故障診断システムのプロトタイプの開発</p> <ul style="list-style-type: none"> 直列抵抗の故障を仮定し、その故障モデルを挿入した際のPV システムの反射波を、SPICE を用いてシミュレーションを行い、その結果と実測値との合わせこみを行うことで、±10%以内の近似度で測定する技術。 <div style="text-align: center;"> <p>SPICEシミュレーション TDR波形</p> <p>実測TDR波形</p> <p>太陽電池モジュール1枚あたりの往復伝搬遅延tPVsim = 84.9ns</p> <p>太陽電池モジュール1枚あたりの往復伝搬遅延tPVact = 85.4ns</p> <p>シミュレーション誤差 = $t_{PVsim} / t_{PVact} - 100\%$ = -0.6% (目標の±10%以内を達成)</p> </div> <p>図 実測波形とシミュレーション波形の一致</p> <ul style="list-style-type: none"> 取得波形の微分処理をベースにした故障位置の判定アルゴリズムを作成し、太陽電池モジュール1枚以下の精度で故障箇所が特定できることを確認。反射波形の振幅が減衰するモデルを作成し、任意の箇所にある故障がどの程度のものかを推定することができるようにアルゴリズムを作成。
リサイクル上のメリット	<ul style="list-style-type: none"> 多重故障について実測とシミュレーションを実施し、パルス印加の方向を変えることによって2つの故障に関しては判定可能である(見通し)。 複合故障については、断線と短絡が同一箇所が発生しない限り、それぞれの故障を検出可能である。
適用時期・実用化想定時期	記載なし
出典	「新エネルギー技術研究開発／新エネルギーベンチャー技術革新事業(太陽光発電)／太陽電池アレイ故障診断技術の開発」平成21年度～平成22年度のうち平成21年度分中間年報

No	3
テーマ	リサイクル関連技術
技術区分	分離・解体技術 Siの回収・再生技術「回収Siからの不純物除去及び再Siの評価技術」
実施者	シャープ株式会社
技術概要	<p><u>回収Siからの不純物除去</u></p> <ul style="list-style-type: none"> 大量処理時に低コストでSiをリサイクルできる技術の開発のため、回収Siからの不純物除去手法を検討。検討手法は以下2通り。 <ul style="list-style-type: none"> ➤ 塩酸とフッ化水素酸及び硝酸を用いたエッジング ➤ 水酸化ナトリウムとフッ化水素酸によるエッジング <p><u>再生Siの評価</u></p> <ul style="list-style-type: none"> 多結晶Siインゴットの作製においては問題なし。 回収材料から作製したSiウェハをセル化した場合、再生Si添加率 2%程度までのセル諸特性は、リファレンスと比較すると、インゴット形成及びセル作製プロセス中での諸特性に与える影響の誤差範囲内であると考えられた。
リサイクル上のメリット	<ul style="list-style-type: none"> 回収材料から作成したモジュールについては、再生Si添加率5%以下のサンプルにおいては、リファレンスと遜色のないレベルで作製できていると判断できた。
適用時期・実用化想定時期	記載なし
出典	「平成 16～17 年度新エネルギー・産業技術総合開発機構委託業務成果報告書」 2006年3月, 太陽光技術研究組合、シャープ株式会社、昭和シェル石油株式会社、旭硝子株式会社、独立行政法人産業技術総合研究所

No	4
テーマ	リサイクル関連技術
技術区分	分離・解体技術 「カバーガラス分離装置」
実施者	昭和シェル石油株式会社
技術概要	<p><u>カバーガラス分離装置の開発</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 2枚のガラスが貼り合わされた構造であるCIS系薄膜太陽電池モジュールについて、モジュール全体を加熱することで接着剤として使用するEVA樹脂を軟化させた状態で、カバーガラス(白板ガラス)と基板ガラスに対して反対方向の外力を加えることで、カバーガラスが分離できる(CIS系薄膜太陽電池モジュールを分解できる)原理を活用した装置。 ・ 回収したCIS系薄膜太陽電池デバイス部から、有価物として、カバーガラス、金属粉末、Mo裏面電極層付き基板ガラス(または、Mo裏面電極層からの金属スラッジ及び基板ガラス)を分離・回収する乾式プロセスを開発。これにより目標コストを達成できる見通しを取得。
リサイクル上のメリット	<ul style="list-style-type: none"> ・ 30cm×30cmサイズモジュールの分離実験で、80%以上の成功率を確認。
適用時期・実用化想定時期	記載なし
出典	「平成22年度産業技術調査事業(太陽光発電研究開発の追跡評価のための調査)報告書」2011年3月、株式会社三菱総合研究所

No	5
テーマ	リサイクル関連技術
技術区分	モジュールのリサイクル技術 「太陽電池モジュールからのガラス回収技術」
実施者	旭硝子株式会社
技術概要	<p>太陽電池モジュールからのガラス回収技術</p> <ul style="list-style-type: none"> 以下の手順による太陽電池モジュールからのガラス回収技術の検討を実施。 <ul style="list-style-type: none"> 回収したモジュールからアルミフレーム、端子ボックス、配線を取り外す。 モジュールを加熱処理し、有機化合物を燃焼、アルミ箔とバスバーを分別する。 ガラスカレットとセル片を分別する。 選別したガラスカレットを、珪砂等のガラス原料と混合し、板ガラスの原料とする。
	<p>図 太陽電池モジュール用ガラス選別プロセス</p>
リサイクル上のメリット	<ul style="list-style-type: none"> ガラス溶解窯の排ガス利用による熱回収の利点は得られなくなるが、ガラスの回収率を90%程度と大幅に高められる。
適用時期・実用化想定時期	記載なし
出典	「新エネルギー技術研究開発／新エネルギーベンチャー技術革新事業(太陽光発電)／太陽電池アレイ故障診断技術の開発」平成21年度～平成22年度のうち平成21年度分中間年報

No	6
テーマ	リサイクル関連技術
技術区分	有用物質・部品等の回収にかかる技術 Siの回収・再生技術「CdTe、CIGSモジュールのリサイクル技術(高純度材料回収技術)」
実施者	First Solar
技術概要	<p>CdTe、CIGSモジュールのリサイクル技術(高純度材料回収技術)の開発</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 自社製品のモジュールを自ら無料で回収し、リサイクルを行っている。リサイクルされた原料は、再びPVモジュール製造に投入することが可能である。 ・ ユーザーからのリサイクル要請のための連絡先を設置している。 ・ PV産業初の総合的、事前積立のソーラーモジュール回収及びリサイクリングプログラムである。モジュールが販売されるときに、将来の回収・リサイクル費用を予測し、回収・リサイクル専用準備金を独立した講座に移しており、2011年までに167.4百万ドルの準備金がある。 ・ 処理手法は以下の通り。 <ul style="list-style-type: none"> ▶ ホッパー貨車によりモジュールを回収し、つり上げ機でシュレッダーに入れる。シュレッダーで破碎後、ハンマーミルによりガラスピースをさらに4・5mm大まで砕く。 ▶ ゆっくり回転するステンレスドラム缶で、酸と過酸化水素の追加によって半導体フィルムを除去し、固液分離、ガラスラミネート分離の後、ガラスを洗浄する。 ▶ ガラスカレットはガラスとして再生し、CdTe 化合物 (Filter cake) は他社にて精練し、太陽電池原料として利用する。
リサイクル上のメリット	<ul style="list-style-type: none"> ・ モジュールに使用されていたガラスの90%を新しいガラス製品として、半導体材料の95%を新しい太陽電池モジュール材料としてリサイクルすることが可能。
適用時期・実用化想定時期	<ul style="list-style-type: none"> ・ 実用化済み
出典	<p>First Solar 社 HP http://www.firstsolar.com/</p> <p>「平成 21 年度成果報告書 新エネルギー技術研究開発 太陽光発電システム共通基盤技術研究開発 I E A P V P S プログラム タスク 8 の活動に関わる国際協力事業」2010 年 2 月, みずほ情報総研株式会社</p> <p>「国内外における使用済み太陽電池モジュールのリサイクルに対する動向」2010 年 2 月 4 日, 太陽光発電協会技術部会 日野光敏</p> <p>Collection and Recycling Program Technical Overview, http://dev.firstsolar.com/~media/Files/Sustainability%20-%20Sustainability%20Documentation/Sustainability%20Documentation/BrochureCollectionRecyclingProgram-NA.ashx</p>

No	7
テーマ	リサイクル関連技術
技術区分	リサイクルにかかる社会システム関連技術 「広域対象のPVシステム汎用リサイクル処理方法に関する研究開発」(実施中)
実施者	中核機関：公益財団法人北九州産業学術推進機構 連携機関：北九州市、昭和シェル石油(株)、(株)新菱、みずほ情報総研(株)、北九州市立大学
技術概要	<p>低コストかつ汎用リサイクル処理技術の開発</p> <ul style="list-style-type: none"> 実証プラントを設置し、構造・材料が異なる太陽電池モジュールに対応可能な汎用処理技術を確立する。また、処理プロセスの自動化等の工程設計についても検討し、処理量20MWで10円/W、200MWで5円/Wの低コストを実現する技術を確立する。この検討結果をもとに、PVリサイクル処理センターの建設を前提にしたパイロットプラントの設計を行う。 <p>広域対象のPVシステム汎用リサイクル処理に必要な社会システムの提案</p> <ul style="list-style-type: none"> 九州・中国地方を対象とした広域リサイクル処理センターの北九州市への設置を想定し、消費者宅からの回収方法、廃棄物処理や個別リサイクルに関する法制度の整備、規制緩和等の検討を行い、国への提案を行う。 <p>図 各種太陽電池の処理工程 (案)</p>
リサイクル上のメリット	・
適用時期・実用化想定時期	<ul style="list-style-type: none"> 開発したリサイクル処理技術や新たな社会システム構築の検討結果を国に提案し、太陽光発電システムメーカーを中心とした関連機関と、本格的なパイロットプラントを建設・運営するリサイクル処理組合を目指す。 処理施設の安定稼動に必要なノウハウを蓄積し、普及型のビジネスモデルを平成32年までに構築し、全国・アジアへの普及を促進する予定。
出典	北九州市プレスリリース「国の太陽光発電システム技術開発プロジェクトに採択～全国初のリサイクル拠点の形成に向けた研究開発プロジェクトが始動～」2010年7月7日、北九州市産業経済局、北九州市環境局、(財)北九州産業学術推進機構 「住宅用太陽光発電システムの普及促進に係る調査報告書」2011年2月、株式会社三菱総合研究所 「平成21年度成果報告書 新エネルギー技術研究開発 太陽光発電システム共通基盤技術研究開発 I E A P V P S プログラム タスク8の活動に関わる国際協力事業」2010年2月、みずほ情報総研株式会社

No	8																				
テーマ	適正処分関連技術																				
技術区分	有害物質の製品への不使用 「鉛フリーのモジュール製造」																				
実施者	三菱電機株式会社																				
技術概要	<p><u>海外向け鉛フリーのモジュール製造(大規模発電用途に適した大出力タイプ)</u></p> <ul style="list-style-type: none"> 無鉛はんだ太陽電池モジュールの海外市場向け戦略商品として、欧米を中心に拡大が見込まれる大規模発電用途に最適な高効率大出力タイプを、2005年4月1日に発売した。 従来よりも少ない枚数で大型システムを構成できるため、モジュールを支える架台の部材量削減等、発電システムトータルでのコスト低減が可能となる。 製品特徴は以下の通り。 <ul style="list-style-type: none"> ▶ 新製造プロセスにより、多結晶シリコン太陽電池セルでトップクラスのセル変換効率15.1%を達成。 ▶ 高効率太陽電池セルの採用により、多結晶タイプでトップクラスのモジュール変換効率13.5%を達成し、モジュールを170Wに大出力化。 ▶ 「無鉛はんだ太陽電池モジュール」により環境負荷を低減。 <p style="text-align: center;">表 製品仕様</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: center;">製品名</th> <th style="text-align: center;">無鉛はんだ太陽電池モジュール</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">形名</td> <td style="text-align: center;">PV-MF170EB3</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">セルタイプ</td> <td style="text-align: center;">多結晶シリコン</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">公称最大出力</td> <td style="text-align: center;">170W</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">公称最大動作電圧</td> <td style="text-align: center;">24.6V</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">公称最大動作電流</td> <td style="text-align: center;">6.93A</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">公称最大システム動作電圧</td> <td style="text-align: center;">DC 780V</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">質量</td> <td style="text-align: center;">15.5kg (34.2lb)</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">外形寸法</td> <td style="text-align: center;">1580×800×46mm (62.2"×31.5"×1.8")</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">モジュール変換効率</td> <td style="text-align: center;">13.5%</td> </tr> </tbody> </table> <p style="font-size: small;">各太陽電池モジュールの表記の数値:標準試験条件(AM1.5、放射照度 1000W/m²、モジュール温度 25℃)での値。</p>	製品名	無鉛はんだ太陽電池モジュール	形名	PV-MF170EB3	セルタイプ	多結晶シリコン	公称最大出力	170W	公称最大動作電圧	24.6V	公称最大動作電流	6.93A	公称最大システム動作電圧	DC 780V	質量	15.5kg (34.2lb)	外形寸法	1580×800×46mm (62.2"×31.5"×1.8")	モジュール変換効率	13.5%
製品名	無鉛はんだ太陽電池モジュール																				
形名	PV-MF170EB3																				
セルタイプ	多結晶シリコン																				
公称最大出力	170W																				
公称最大動作電圧	24.6V																				
公称最大動作電流	6.93A																				
公称最大システム動作電圧	DC 780V																				
質量	15.5kg (34.2lb)																				
外形寸法	1580×800×46mm (62.2"×31.5"×1.8")																				
モジュール変換効率	13.5%																				
リサイクル上のメリット	<ul style="list-style-type: none"> 架台の部材量削減。 モジュールはんだ付け部の鉛使用量がゼロ(0g)で、製品自体の環境への負荷も低減。 																				
適用時期・実用化想定時期	<ul style="list-style-type: none"> 実用化済み 																				
出典	三菱電機プレスリリース「三菱電機海外向け「無鉛はんだ太陽電池モジュール」新製品発売のお知らせ」リ本 No.0509, 2005年2月16日, 三菱電機株式会社																				

3.2 風力発電

3.2.1 調査対象

公開情報を中心に、風力発電方式の装置について、リユース、リサイクル及び適正処分に関する技術動向の調査を実施した。調査対象とした文献等は以下の通り。

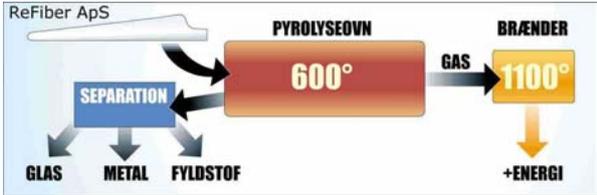
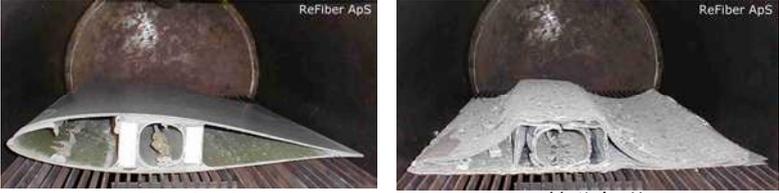
- 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 HP
- JST 文献検索サービス JDream II , <http://pr.jst.go.jp/jdream2/index.html>
- 各種新聞記事、ウェブサイト 等

3.2.2 調査結果

風力発電装置のリユース、リサイクル及び適正処分に関して開発が確認された技術について、次ページ以降に個票として整理した。

具体的な技術の開発状況等に関して得られた情報は、ブレードの破碎装置や、ブレードからのガラス繊維等の回収技術の開発であった。いずれも再生材に対する需要の低さや、採算性が今後の課題点として挙げられている。

No	1
テーマ	リサイクル関連技術
技術区分	有用物質・部品等の回収にかかる技術 「 The REACT Project 」
実施者	KEMA、 ICRI(Polish Industrial Chemistry Research Institute)、 HEBO Engineering、C-it、 Fiberforce Composites Ltd、Hamos GmbH、Plasticon、 ZPT、ECRC(European Composite Recycling Services Company)
技術概要	<p><u>繊維強化プラスチックのリサイクル</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 2003年から2005年にかけて、欧州委員会のCRAFTプロジェクトから資金援助を受けて実施。 ・ HEBO及びKEMA により、2.5t/時の粉砕力を持ち、繊維の内部損傷を最小限に留めつつ繊維強化プラスチックを15～25mmまで粉砕可能なシュレッターを設計、構築。 <ul style="list-style-type: none"> ➢ ハンマーにて繊維構造から合成樹脂を取り除く方法を採用。 ➢ 研削時の危険を回避するため、C-itは揮発性有機化合物（VOC）の電子センサーを開発。 ・ 粉砕後、ICRIが開発した再活性化法により繊維は新マトリックスとの新たな化学結合により強化される。 ・ HAMOSにより、異なる長さを持つ繊維の分離と不純物の除去の技術も開発されている。 ・ 本技術における課題点は以下の通り。 <ul style="list-style-type: none"> ➢ 粉砕された繊維には合成樹脂成分が残っているため、新しい樹脂と結合させることが難しい。 ➢ 再生材に対する需要が小さい。 ➢ 再生材の使用に際しての品質保証に課題がある。 ➢ 再生材はバージン材よりも短く、古い合成樹脂がコーティングされているため、強度向上が困難である。 ➢ ガラス粉砕にエネルギーを要するが、再生材の価値が低く、採算性が低い。
リサイクル上のメリット	<ul style="list-style-type: none"> ・ リサイクルが困難であった従来のタービン、特にブレードのリサイクル手法の開発に寄与している
適用時期・実用化想定時期	<ul style="list-style-type: none"> ・ 近い将来、セメント工業のブレードの熱処理が可能になる見通し。
出典	KEMA 社 HP, 「Recycling of Wind Turbine Blades」 http://www.dnvkema.com/services/ces/hse/recycling/recycling-blades.aspx

No	2
テーマ	リサイクル関連技術
技術区分	有用物質・部品等の回収にかかる技術 「ガラス繊維ブレードからの有用物質抽出」
実施者	ReFiber APS 社
技術概要	<p>ブレードのガラス繊維質部分とプラスチック部分への分離及び再利用</p> <ul style="list-style-type: none"> ブレードを裁断後、無酸素状態で加熱によりプラスチックを合成ガスに変換し燃料とする。処理後のガラス繊維は強度が低下するためブレード素材としての再利用はできず、断熱材として再利用される。処理手法は以下の通り。 <ul style="list-style-type: none"> ➤ 素材は500°Cの無酸素回転炉に連続的に供給し、プラスチックを熱分解し合成ガスにする。生成されたガスは、発電や回転炉の加熱に利用する。 ➤ 第二回転炉でガラス繊維素材を洗浄する。 ➤ ガラス繊維に少量のポリプロピレンを混ぜ、炉の中でPP繊維が解けてガラス繊維と結合し、安定した絶縁スラブになる。 <div style="text-align: center;">  <p>図 リサイクルプロセス概要</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>熱分解前 熱分解後</p> <p>図 熱分解前後のブレード</p> </div>
リサイクル上のメリット	<ul style="list-style-type: none"> 試算では処理により得られる燃料のエネルギーが処理に必要なエネルギーを上回る(運搬のエネルギー除く)。 ガラス繊維の引張強度を維持することが可能である 最終製品は、主に耐熱性の絶縁材である。繊維は繊維強化の充填材、接着剤、塗装材、熱可塑性物質部品、アスファルト、コンクリート、新しいガラス繊維の原材料としても使用可能である。 生成されたエネルギーは、発電や地域暖房に使用可能である。
適用時期・実用化想定時期	<ul style="list-style-type: none"> 技術としては確立しているが大規模の正規生産のプラントは有しておらず、また処理コストと生産される断熱材の質の問題があり需要が少ない。
出典	Reinforced plastics.com 「Recycling wind」, 2009年1月31日 http://www.reinforcedplastics.com/view/319/recycling-wind/

3.3 その他の発電方式

3.3.1 調査対象

公開情報を中心に、太陽熱、中小水力、地熱の各種発電方式の装置について、リユース、リサイクル及び適正処分に関する技術動向の調査を実施した。調査対象とした文献等は以下の通り。

- 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 HP
- JST 文献検索サービス JDream II , <http://pr.jst.go.jp/jdream2/index.html>
- 各種新聞記事

3.3.2 調査結果

太陽熱、中小水力、地熱の各種発電方式の装置に関しては、リユース、リサイクル及び適正処分についての技術開発に関する情報が得られなかった。