

低炭素社会の実現に向けた
技術および経済・社会の定量的シナリオに基づく
イノベーション政策立案のための提案書

国際戦略編

温暖化対策のための Integrated Contribution Approach（統合的貢献アプローチ）の中で検討した途上国における太陽光発電システム利用の発電及び CO₂ 排出削減ポテンシャル評価

平成 27 年 3 月

Evaluation of Power Generation and CO₂ Emissions Reduction Potential by PV Application in Developing Countries Considered in the Integrated Contribution Approach for Climate Change Mitigation

Strategy for International affairs

Proposal Paper for Policy Making and Governmental Action toward Low Carbon Societies

国立研究開発法人科学技術振興機構
低炭素社会戦略センター

LCS-FY2014-PP-15
(平成 27 年 4 月印刷版)

概要

温暖化は地球規模の問題であり、LCS では、以下 BOX に示した 4 つの視点から、世界経済の成長と地球温暖化の克服の両立に向けた我が国の国際戦略を検討している。まずは気候変動緩和技術の海外移転とそのための投資の促進の在り方に着目し、2013 年 11 月に「気候変動緩和技術の海外移転の促進」を発行、特にファイナンススキームに焦点を絞り海外技術移転についての提案を行った。続いて、「温暖化対策における技術に着目した Integrated Contribution Approach（統合的貢献アプローチ）と他国への技術協力の在り方への提言」（2014 年 4 月）では、国内外の気候変動緩和に関する努力を一つのスキーム下で統合する形の、技術移転促進のためのフレームワークの提案を行った。

本稿は、Integrated Contribution Approach による他国への技術協力を想定した際の具体的な効果を、太陽光発電を例にとり海外における削減ポテンシャルを試算し、経済的側面からも影響を評価した。2030 年時技術レベルの太陽光発電による社会経済的削減ポテンシャル量は途上国全体で 350Mt-CO₂/yr であり、発電による CO₂ 排出量見込み量 10Gt-CO₂ の 4%に相当する。一方、2030 年の途上国の太陽光発電による技術ポテンシャルは、途上国の発電による CO₂ 排出量の 32 倍、全世界 CO₂ 排出量の約 9 倍であり大きなギャップがある。設備普及のために重要なポイントとして、技術開発・革新などによる発電コスト低減、エネルギー貯蔵の開発・利用、寿命まで利用する管理技術向上、低利率での貸し付けによる利用拡大が挙げられる。

LCS からの次期枠組みに関する提案の基本となる 4 つの視点

- 実質的に GHG 削減につながる、公平かつ実効性のある仕組み
- 民間の投資インセンティブを促進し、途上国の経済発展にある様々なビジネスチャンスを活用する仕組み
- セクター別のエネルギー効率、温室効果ガス排出原単位の改善と評価を基に、国内の次期枠組みと国際的な技術移転の枠組みの双方に展開できる戦略
- オールジャパンとして力を集結し、日本国の持続可能な発展と地球規模問題の改善に貢献する仕組み

Summary

Global warming is a problem of global scale. From four viewpoints shown in the BOX below, LCS has considered the international strategy of our country for compatibility of the world economic growth and overcoming climate change. First we published “Promoting Oversea Transfer of Technology for Climate Change Mitigation” in November, 2013, and proposed about a overseas technology transfer focusing on a finance scheme in particular. Next, LCS suggested the framework for technology transfer promotion of the form to unify efforts about climate change mitigation in Japan and abroad under one scheme in the “Concept of Technology-based Integrated Contribution Approach and Technology Cooperation Scheme to Other Countries against Climate Change,” in April, 2014.

In this paper, taking the photovoltaic (PV) power generation as an example to estimate the reduction potential in overseas, the impact of the specific effects when it is assumed technical cooperation to other countries by the Integrated Contribution Approach, was also evaluated from the economic aspects. Socio-economic reduction potential amount by installation of PV systems of 2030 technology level was estimated 350Mt-CO₂/yr in the whole developing countries, which is equivalent to 4% of the estimated CO₂ emissions amount 10Gt-CO₂/yr by electricity generation. On the other hand, the technological potential of CO₂ reductions by PV in developing countries in 2030 was approximately 9 times of the estimated world CO₂ emissions amount. There is a big gap between socio-economic potential and technological potential. Important points for diffusion and wide spread of PV systemic use are: power generation cost reduction by technology development and innovation; development and utilization of energy storage; improved management techniques for long-term use up to lifetime, and promotion of business level installation by use of low interest rate loan.

Four basic viewpoints of LCS future climate change framework

- Mechanism with fairness and effectiveness for global substantial GHG reduction
- Mechanism to promote a private investment incentive and utilize various business opportunities in the economic development in a developing country
- Strategy both sides of domestic efforts for future climate change framework and international technology transfer, based on sectoral evaluation and improvement of energy efficiency and emissions factors
- Mechanism to gather the forces of all Japan, and to contribute country and global-level sustainable development, by strengthening domestic policies and measures.

目次

概要

1. これまでの提案内容	1
2. Integrated Contribution Approach（統合的貢献アプローチ）における技術の重要性	2
3. 途上国における技術による GHG 削減の技術的可能性	3
3.1 太陽光発電導入の物理、技術的ポテンシャル	5
3.2 社会経済的ポテンシャル	7
3.3 経済的ポテンシャル	8
3.4 二酸化炭素排出削減可能量	10
4. 太陽光発電導入ポテンシャル評価のまとめ	11
5. 結論：統合的貢献アプローチへの示唆	12
引用・参考文献	13

1. これまでの提案内容

これまで LCS では、今後の地球温暖化枠組みに関し、我が国のエネルギー・環境技術の普及促進と移転により、国内と世界双方の温室効果ガス削減に有効なスキームの提案を行っており^{[1],[2]}、特に、技術力を基本とした、Integrated Contribution Approach（統合的貢献アプローチ）（図 1 参照）を国内・国際戦略を進めることについての意義を強調してきた^[2]。

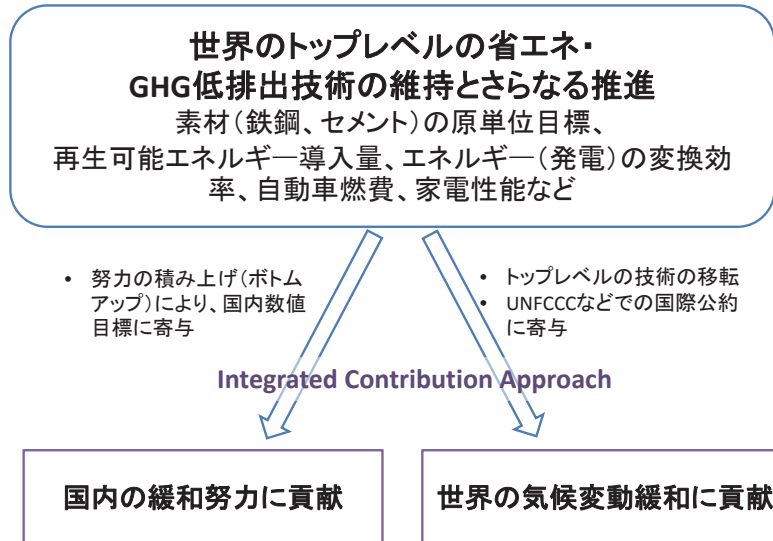


図 1 LCS の考える次期枠組み国内・国際スキーム：Integrated Contribution Approach

このアプローチは、端的にいうと、「日本の技術力の高さを最大限に利用するもの」であり、以下 4 つの柱により成り立っている（図 2 参照）。「統合」は、国内と海外での統合—それは技術開発と普及あるいは目標設定としての統合と、各種スキームの統合、例えば、制度面やファイナンスでの統合を意味する。

1. 国内の分野別温暖化緩和・省エネ技術の水準を向上し（技術 R&D）
2. 技術力を応用して海外への技術移転・協力を進め（技術普及）、
3. これらを合わせて国の温暖化緩和目標として位置づけ（気候変動枠組み関与）、
4. それらプロジェクト推進のための基盤づくりを行う（経済活動貢献）。

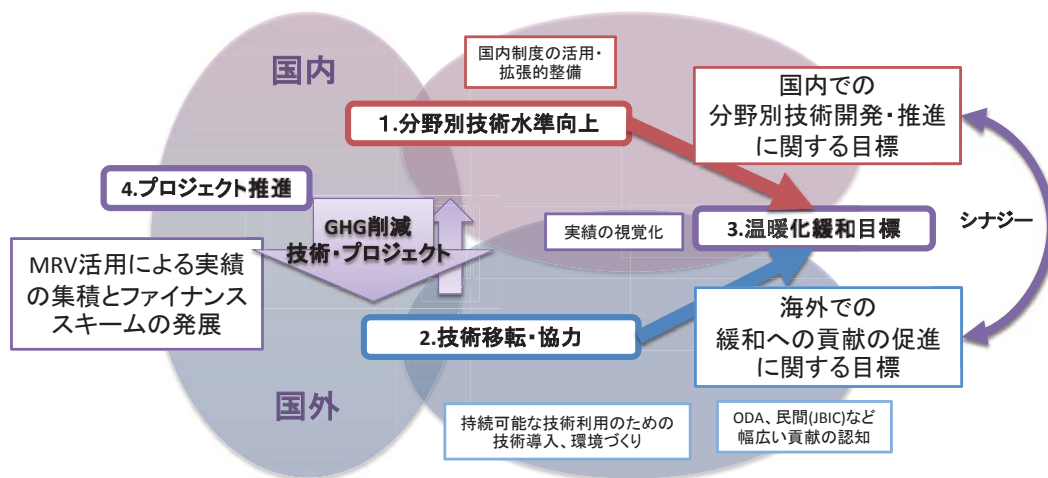


図 2 Integrated Contribution Approach の 4 つの柱

より 4 つの柱を詳しくまとめると以下のようになる。

1. 分野別・技術別の技術の目標値を削減行動目標として掲げるもの
 - エネルギー多消費産業の原単位目標や、発電効率、自動車の燃費、家電性能など分野別指標を利用
 - 国内技術開発の底上げと技術革新につながるもの
 - 高水準の省エネ・環境技術を更に発展させ、世界の技術レベル水準を向上
 - 国内の法制度施行で培った経験と築かれた制度枠組みを活用
2. 技術協力・移転を通じ、地球規模の気候変動緩和に貢献
 - 革新的で高水準の技術により、GHG 削減に期待
 - 国内では浸透し海外で普及率が低い技術の一層の利用拡大
 - 受け入れ国のニーズ、技術的可能性もふまえながら導入普及を促進し、持続可能な技術利用をめざし利用環境を整備
 - 日本にとってグローバル市場の新たな開拓が可能
3. 国内外の技術に関する努力を国レベルの温暖化目標に位置づけ
 - 国内の分野別技術水準向上を目標とする
 - 海外技術移転・協力について、JCM (Joint Crediting Mechanism) だけではなく、JICA による ODA や民間 (JBIC など) による削減貢献を定量的に把握し実績を見える形にし、目標とする
 - 短期的には、INDC (Intended Nationally Determined Contributions 「各国が自主的に決定する約束草案」) の中に反映させる
 - 中・長期的には、UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change) 枠組み如何を問わず、国の地球温暖化目標に組み込む
4. 国内外の温暖化緩和実績に関する知見を一元的に蓄積し、プロジェクト推進へ応用
 - 海外技術移転・協力の実績を整理された MRV (Measurement, Reporting and Verification; (GHG 排出量の) 測定、報告及び検証) 方法論などを通じて蓄積、将来プロジェクトへの情報提供
 - MRV を用いたファイナンススキームの奨励と複数スキームの統合

本稿では、この Integrated Contribution Approach の考えのもと、技術を世界、とりわけ途上国で利用を進めることが、どのような効果があるのか、太陽光発電を例にとり検討した。

2. Integrated Contribution Approach（統合的貢献アプローチ）における技術の重要性

Integrated Contribution Approach では、既存技術の性能向上及び革新的技術開発、そしてその利用促進が核となる内容である。緩和技術レベルが向上することは、最終的にその技術の利用により、場所に問わず GHG 排出削減が進むことにつながる。また、ある技術水準が上がる、あるいは技術革新が起きるといことは、その背景にある基礎となる科学や周辺技術、設備機器性能、管理能力など、技術分野に関する全体のレベルが上がるということである。その点から、技術開発の推進は非常に重要である。

産業分野においては省エネ型生産技術等のレベル向上は、生産にかかるコストの低減となるため日々取り組まれており、さらに今後も改善が望まれる。省エネ型製品の開発も、エネルギーコスト低減を目的とする民生・交通部門での需要があるため、引き続き望まれる。科学的な根拠をもとに、このような技術向上の目標を継続的に立て、それらを実行していくことが重要であり、実際にこれまでの取り組みにおいて有用性が認められている。例えば、経団連による自主行動計画、省エネ法、トップランナー基準などである。これまでの取り組みは、規制や自主協定¹⁾とし

て進められてきた。今後は、これらの経験、実施枠組みを活かし、規制対象としてだけでなく対象を拡大し、科学的に現実的かつ野心的な目標を設定することが肝要である。

地球温暖化緩和に貢献する形で、技術を開発、向上し、さらに、その利用先として、国内のみならず海外に目を向けるというのが、本アプローチの第二のポイントである。製品の輸出という形、日本資本による海外生産拠点と現地生産など、従来の ODA 等「援助」以外にも、技術移転・技術貢献は様々な存在する。良いものを世に送り出すことという、付加価値を高めることで国際競争力をつけた日本の産業にとって、温暖化緩和や省エネの度合いが高いものは、今後の気候変動問題や世界のエネルギー安全保障の観点からも価値がある。したがって、高いレベルの技術の世界的普及促進を積極的に効果的に進めていく必要がある。

3. 途上国における技術による GHG 削減の技術的可能性

一般に、途上国では BAT (Best Available Technology: 利用可能な最良技術) の普及が先進国に比べ遅れていることから、技術導入とそれによる GHG 削減の可能性は高い²⁾。途上国における技術的削減を自国の削減努力として認めてもらう枠組みとして、京都議定書の中で CDM (Clean Development Mechanism) があり、その後は日本が進める二国間クレジット制度 (JCM: Joint Crediting Mechanism) がある。JCM は UNFCCC の枠組みであり、削減量分をクレジットとして計上可能である。2015 年 3 月末現在、JCM では 12 カ国と二国間文書に署名済みであり³⁾、方法論について 22 の提案があがり、うち 7 件が承認されている。実際のプロジェクトについては太陽光発電プロジェクトがパラオで、冷却装置に関するプロジェクトがインドネシアにおいて 3 件登録されており、後者のうち 1 件が承認され、JCM 第一号となっている⁴⁾。承認プロジェクトでは、2020 年までの期間で 800t の CO₂ の削減となると予定されている。

JCM の拡充も重要な日本の気候変動戦略の一つに置かれているが、世界の途上国の技術による GHG 削減ポテンシャルと比べると、JCM のスキームで行うプロジェクトでは数と量を稼ぐことができない。しかし、CDM に比べれば二国間折衝を進めるため手続き面が簡素化されることと、プロジェクト選定面で追加性の問題などがないことから自由度が高いなど利点はある。しかし、ベースラインが保守的に設定されることで削減量が低めに見積もられること、国間で合意し制度設計をしていくため急速な地理的拡大には困難である、といった問題がある。日本は ODA などの公的資金、JBIC などの民間資金ともに、多くの海外技術協力・支援を推進し、多額の拠出を行っている⁵⁾。そして、その対象国は JCM 合意国にとどまらない。つまり、対象国の制約がなければ GHG 削減ポテンシャルは非常に高いものとなる。また、JCM では制度構築プロセスがかかるため、対象技術の範囲拡大も簡単ではない。ODA や JBIC では幅広い技術が対象となり、日本で利用実績の長い省エネ技術などが途上国で利用されている。これらの海外協力を通じ、温暖化緩和貢献としてアピールしていくことが重要である。

¹⁾ 経団連の自主行動計画は、発端が政府と産業界の間に行われる所謂「自主協定」ではないが、政府主導の委員会などでレビュープロセスがあるなど、自主協定の運用に類似するものがある。

²⁾ IPCC 第五次評価報告書第三作業部会 10 章要約 (2014) では、既存の BAT の普及により産業部門におけるエネルギー効率を 25% 向上可能であるとしている。

³⁾ 2015 年 3 月現在、モンゴル、バングラデシュ、エチオピア、ケニア、モルディブ、ベトナム、ラオス、インドネシア、コスタリカ、パラオ、カンボジア、メキシコ。

⁴⁾ 新メカニズム情報プラットフォーム^[3]、2015 年 1 月アクセス。

⁵⁾ 2013 年から 2015 年までは、公的民間資金を合わせて 1 兆 6 千億円支援を予定 (公的資金は 1 兆 3 千億円)。外務省 (2014)^[4]。

本稿では太陽光発電をケーススタディとして着目した。太陽光発電は、海外に生産拠点や利用先として目を向けると大きな導入可能性があり、いくつかの企業が海外展開を既に行っている。このような事業の動きを加速し、一企業の実績を日本からの貢献としてとらえ、地球温暖化貢献を進める視点が必要である。

本稿では、事業投資案件を想定し、系統連携する大規模導入型の太陽光発電を例にとり、途上国における導入ポテンシャル、GHG 削減量を試算し、統合貢献アプローチの概念に沿った技術移転を考慮した場合の途上国への技術普及によるメリットを検討した。

ポテンシャルの定義

ポテンシャルと言ってもいくつかの種類がある。例えば、IPCC 第三次評価報告書では、ポテンシャルを物理的ポテンシャル、技術的ポテンシャル、社会経済的ポテンシャル、経済的ポテンシャル、市場ポテンシャルの 5 種類に分け、それぞれの違いを整理し、各ポテンシャルを下げる障壁要因や、上げるための方策（機会）などまとめている（図 3 参照）。技術や事例によっては、障壁や機会をどこまでどのポテンシャルに含めるか、判断が異なることもあるだろう。本稿では、太陽光発電について以下のようにポテンシャルを定義して評価を行った。尚、IPCC 定義では、実際に導入されるかどうかのポテンシャルとして市場ポテンシャルがあるが、これについては実社会の様々な障壁と機会を勘案せねばならず試算が困難であるため、本稿では、物理的ポテンシャルから経済的ポテンシャルまでとする。

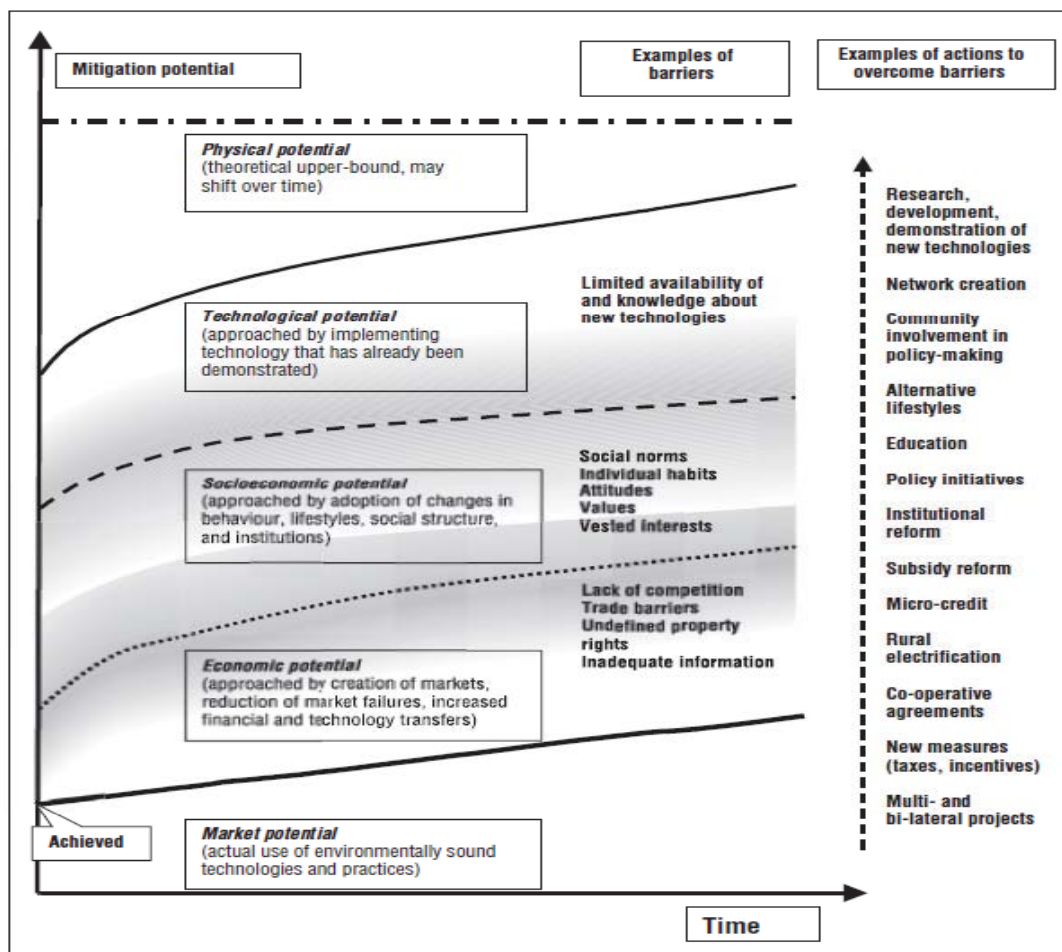


図 3 IPCC による環境調和型技術の普及の概念， IPCC 第三次評価報告書 技術要約（2001）から転載^[5]。

物理的ポテンシャル：太陽光エネルギーの理論到達エネルギーに対し、太陽光発電が設置可能な土地のみ設置するとした場合のポテンシャル (セクション 3.1)

技術的ポテンシャル：現状及び将来見込まれる発電効率を考慮した場合の発電量としてのポテンシャル (セクション 3.1)

社会経済的ポテンシャル：社会的制度的制約などを考慮したポテンシャル。再生可能エネルギーは、例外的な無電化地域などを除けば、単体で用いられることはなく、地域や国全体のエネルギーミックスの中で用いられる。本稿では、電力供給量を上限制約としてポテンシャルを算出した。(セクション 3.2)

経済的ポテンシャル：現在の設置地域の電力料金から導入可否予測を考慮した場合のポテンシャル (セクション 3.3)

3.1 太陽光発電導入の物理、技術的ポテンシャル

太陽光発電を使うということは、第一に、太陽から地表に降り注ぐエネルギーをどれだけ有効に使うかである。ここでは、太陽光発電施設が設置可能な地域に到達する太陽エネルギー量を物理ポテンシャルとし、そのエネルギーを全て太陽光発電により電力に変換した場合のエネルギー量を技術的ポテンシャルとした。

物理ポテンシャル：地形だけから太陽光発電設置が可能と思われる地域を選ぶと、土地利用を考慮していないことになり、居住地、耕作地や自然保護地区などは利用不可能である。また仮に現在未開拓地であっても、他用途との競合が考えられる。Sørensen (1999)^[6] は土地利用毎の集中型太陽光発電の適地割合を想定した⁶⁾。Hoogwijk (2004)^[7] は、世界の土地利用情報から、Sørensen^[6] の提唱した適地割合を用いて、大陸・地域毎に、太陽光発電に適用可能な面積割合を導出した。単位面積あたりの到達する太陽エネルギーの理論量にそれらを掛け合わせることで、設置可能地域面積への太陽光到達エネルギーの物理ポテンシャルを試算した (表 1)。

表 1 途上国における太陽光発電の物理的ポテンシャル (Hoogwijk (2004)^[7] を筆者加工) (有効数字 2 桁)

	当該地域への到達太陽光エネルギー (EWh/y)	適用可能地域への太陽光エネルギーの物理的ポテンシャル (EWh/y)
中南米	28	0.26
アフリカ	49	1.30
中東	10	0.33
アジア	30	0.52
合計	120	2.40

技術的ポテンシャル：太陽光発電効率の仮定がやや古いため、本稿では、最新の評価として LCS/JST (2014)^[8] が発表したセルモジュール効率 (表 2) を用い、現在 (2013 年時点効率利用) と 2020 年、2030 年 (予測値) について、各地域の太陽光発電の技術的ポテンシャルを試算した (表 3)。土地利用情報については、Hoogwijk^[7] が利用した土地情報と現在、そして将来について、大きな変化がないと仮定した。

また、太陽光発電設備容量を次の方法で試算した。日本の場合に単位発電設備容量あたりの年間発電量として 1000Wh /W が簡易的に計算に用いられる。Hoogwijk^[7] の用いた年間日射量

⁶⁾ Sørensen ((1999)^[6] による集中型太陽光発電の適地割合は次の通り。都市部、生物保護地区、森林—0%; 農業用地、灌木地、サバンナ、ツンドラ、草原—1%; 乾燥地域草原、砂漠—5%。3 種の適地割合があり単純化されたもの。

(W/m²) から推定した日本と他国の年間日射量との比を用い、各地域の発電容量当たりの年間発電量 (kWh/W) を想定し (表 4)、設備容量を計算した (表 5)。アフリカでポテンシャルが大きく、発電量、設備容量とも、全体の 5～6 割を占める。次いで、アジアが全体の 2 割である。

表 2 計算に用いた太陽光発電モジュール効率 (LCS/JST (2014) ^[8]) (有効数字 2 桁)

	現在	2020 年	2030 年
モジュール変換効率 (CIGS)	13%	18%	30%

注：2030 年の CIGS はタンデム型の新しいタイプのものを想定。

表 3 途上国における太陽光発電の技術的ポテンシャル (PWh/y) 試算結果 (有効数字 2 桁)

	現在	2020 年	2030 年
中南米	35	48	80
アフリカ	190	260	430
中東	46	63	110
アジア	67	93	150
合計	330	460	770

表 4 本稿で推定した地域別発電容量当たりの年間発電量 (kWh/W) (有効数字 2 桁)

中南米	1.3
アフリカ	1.5
中東	1.6
アジア	1.3

表 5 途上国における太陽光発電の技術的ポテンシャルより求めた発電容量 (TW) (有効数字 2 桁)

	現在	2020 年	2030 年
中南米	27	37	62
アフリカ	120	170	280
中東	29	40	67
アジア	51	70	120
合計	230	320	530

3.2 社会経済的ポテンシャル

本稿では、社会経済的ポテンシャルの定義として、人間活動がある故の社会的、文化的、制度的障壁を勘案したポテンシャルと設定した。太陽光発電の導入の際、そのような障壁は様々考えられる⁷⁾。そこで、ここでは、電力供給量のうちの太陽光発電設備導入可能量割合を考慮した。電力の逆潮流がある場合、系統の安定性を確保するために、日本では発電容量に対し、太陽光発電容量の割合は 1 割に抑える必要があるとしている⁸⁾。本稿では、全電源設備容量に対し、1 割まで太陽光発電設備が導入可能として試算した。

具体的には国際エネルギー機関（IEA）が毎年発表している世界エネルギー展望（WEO）の将来シナリオの、その地域の全電源による発電設備容量を使用した（OECD/IEA（2014））⁹⁾。また、WEO のカテゴリー上データが分かれていない地域については推計した。全電源による発電設備容量に対し、1 割まで太陽光発電設備を入れたとするときの設備量を算出し、表 4 の発電容量当たりの発電量（Wh/W）から発電量を試算し、表 6 に示した。尚、参考までに、OECD/IEA⁹⁾ が試算した太陽光発電による発電量¹⁰⁾を併記した。OECD/IEA⁹⁾では、各国の現在と計画されている政策が実施されるとして技術の導入を仮定している。

表 6 太陽光発電による途上国の社会経済的ポテンシャル、発電量（TWh/y）（有効数字 2 桁）

	現在			2020 年			2030 年		
	発電量 (社会経済 的ポテン シャル)	技術ポ テンシ ャルに 対する 割合	(参考) WEO※	発電量 (社会経済 的ポテン シャル)	技術ポ テンシ ャルに 対する 割合	(参考) WEO※	発電量 (社会経済 的ポテン シャル)	技術ポ テンシ ャルに 対する 割合	(参考) WEO※
中南米	40	0.12%	0	53	0.11%	5	67	0.08%	16
アフリカ	25	0.01%	0	38	0.01%	11	58	0.01%	42
中東	40	0.09%	0	53	0.08%	5	65	0.06%	30
アジア	240	0.36%	11	370	0.40%	165	510	0.33%	364
合計	350	0.10%	11	510	0.11%	186	680	0.09%	452

※ WEO : OECD/IEA(2014)⁹⁾ による太陽光発電見込み量。有効数字は文献通り。

表 5 の技術的ポテンシャル結果と比較するために、表 6 に、技術ポテンシャルに対する社会経済的ポテンシャルの割合を示した。いずれも 0.5%以下である。アジアでは高く、アフリカでは低い。今回想定した社会経済的制約は系統電力のキャパシティであり（全電源発電量の 1 割と仮定）、アジアでは電力消費量の見込みが大きく発電量が大きいため、この割合も比較的大きくなった。しかし、技術的ポテンシャルに比べると非常に小さい値である。より技術的ポテンシャルに近づけていくためには、エネルギー貯蔵（蓄電池など）により、系統電力に対する導入可能割合

⁷⁾ 地理的制約から導入可能とされる地域であっても、その地域の太陽光発電技術に対する低い受容性（好み、景観保護、土地権益や多用途への転用計画など）、あるいは地域の政情の不安定さや教育・情報水準の低さなどが実際の導入への障壁として挙げられる。これら障壁は、限られた地域の評価ではある程度情報も集められ考慮可能だが、途上国地域全体のポテンシャルを概算で求めるという本稿のねらいのもと検討することは困難である。

⁸⁾ 2009 年 1 月経産省の低炭素電力供給システム研究会によると、特異日の出力抑制によって太陽光との連携接続は 2800 万 kW まで可能と見通しが出されている。日本の発電設備総量が約 2.8 億 kW として、およそ 10%。

⁹⁾ OECD/IEA(2014)⁹⁾では、2012 年が最新データである。

¹⁰⁾ 本稿での地域カテゴリーの調整済み。

を増やすなどの工夫が必要となる。状況は異なるものの、ドイツ、イタリアでは太陽光発電容量の全電源設備容量に対する割合は 2012 年で 18%、13%と大きい¹¹⁾。本稿で設備容量の 1 割と仮定した導入割合を現在の欧州並みに 2 割に上げて、技術ポテンシャルに比べると小さい。仮に、蓄電池などを制限なく用いて、全ての電力供給を太陽光発電による電力で賄うとすると、2030 年で全電源設備容量の 2~3 倍の太陽光電力設備容量が必要になると試算される。このとき、太陽光発電量は技術ポテンシャルに対し、中南米で 3%、アフリカでは 0.4%、中東で 2%、アジアで 10% 程度である。つまり、人間活動による電力需要を全て太陽光でまかなうとしても、技術ポテンシャルを超えることはない。

本稿のポテンシャルと OECD/IEA^[9] の推計を比較すると、「現在」では、社会経済的ポテンシャルと WEO シナリオでの導入量には大きな隔たりがあるが、2030 年では、どの地域においても本稿で試算されたポテンシャルに近づく。これは、WEO が考慮しているような各地での政策を推進することで、導入可能な量まで利用が進むことを表している。

3.3 経済的ポテンシャル

現実に導入されるかどうかは、多くの場合はコストによる制約が一番大きい。本節では、年経費率を考慮した LCS 試算による太陽光発電コスト（円 /kWh）を用い、収益率を計算して導入の可能性を検討した。

各地の電気料金は、契約形態や国によって様々である。全ての途上国について詳細な情報は入手困難であるため、インターネット上で入手可能な国の電気料金データを用いた¹²⁾。各地域について、この料金を各国の電力消費量で加重平均し、地域電力料金を設定した（表 7）。これら電力料金が、2030 年までにどう変化するかは見通しが困難なため、本稿では一定と仮定した。

表 7 国別電力消費量を用い加重平均した地域別電力料金

	加重平均電力料金 (US cents/kWh)	計算上検討に入れた、料金データが入手可能であった国
中南米	9 (10 円 /kWh)	メキシコ、ジャマイカ、コスタリカ、ドミニカ共和国、エルサルバドル、ハイチ、ニカラグア、パナマ、トリニダードトバゴ、ブラジル、アルゼンチン、ヴェネズエラ、チリ、コロンビア、パラグアイ、ペルー、エクアドル、ウルグアイ、ボリビア
アフリカ	7 (8 円 /kWh)	南ア、ナイジェリア、コートジボアール、エチオピア、ケニア、エジプト、チュニジア、モロッコ
中東	8 (9 円 /kWh)	イラン、イスラエル、クウェート、ヨルダン、UAE、サウジアラビア、イラク、トルコ
アジア (日本除く)	7 (8 円 /kWh)	中国、韓国、モンゴル、インド、パキスタン、バングラデッシュ、ネパール、インドネシア、マレーシア、フィリピン、シンガポール、タイ、ベトナム、カンボジア、ミャンマー

※各国料金データは次のソースを参考：JETRO(2015)^[12]、INE(2014)^[13]、EIA(2008)^[14]、Sudan Tribune(2012)^[15]；NEA(2012)^[16]，1USD=110 円で計算。

¹¹⁾ JEPIC(2015)^[10]、EDMC(2014)^[11] データより本稿試算。

¹²⁾ 一般用電力のうち一番低い料金をその国の料金とし、一般用データがない場合は業務用電力料金とした。基本料金月額は計算に入れていない。このことから、評価に用いた地域電力料金は、実際よりも、低く見積もられていると考えられる。また、地域内平均料金を採用したが、実際は、地域内の国によって電気料金は高低があり、経済的観点からの導入可否の判断が様々になる。

電力料金と比較する太陽光発電コストは、LCS 試算結果を応用した（LCS/JST(2014)）^[8]。LCS 試算による日本の場合の発電電力量あたりのコストは、人件費、修繕費、管理費、償却費等などを含め、現在及び 2020 年の技術は寿命を 20 年として年経費率 10%、2030 年技術は 30 年として 8% と仮定して計算している。途上国では、システムコストおよび年経費とも下回ることが予想されるが、本稿では、各国の詳細な検討を行わないので、便宜的にこの値を用いた。地域の日射量の違いにより、発電量あたりのコストが変わるため、設備容量あたりの発電量（表 4）による補正を行った。本稿の計算に用いた各地域の発電コストを表 8 に示した。

表 8 計算に用いた太陽光発電システムコストと発電コスト

		現在	2020 年	2030 年
システム全体コスト（JPY/W）		160	97	57
発電コスト （JPY/kWh）	日本（LCS 試算）	18	11	5
	中南米	13	7	4
	アフリカ	11	6	3
	中東	10	6	3
	アジア（日本除く）	12	7	4

※日本の発電コストは LCS 既報の数値（LCS/JST(2014)）^[8]。他地域は、本稿における設定値。

電気料金と比較した場合の経済ポテンシャルは、2020 年、2030 年の技術レベルであれば、全地域において想定した地域別太陽光発電コストが各地域の電力料金より低い。つまり、それだけで見ると、表 6 に示した社会経済的ポテンシャルと同じ最大限まで経済的ポテンシャルがあると試算される。

そこで、2030 年時の効率及びコストの場合の導入後 5 年おきの内部収益率（プロジェクト IRR）を計算した。内部収益率で見ると表 6 の社会経済的ポテンシャルは現実的でないことが分かる（図 4）。2030 年時の予測される技術レベルで導入後 6 年～10 年目でようやく内部収益率が正に転ずる。また、途上国におけるプロジェクト実施という観点からは、国別の投資リスクを反映した貸付利率は勘案すべき事項であり、それを考慮するため、ここでは便宜的にソブリン債金利¹³⁾との比較を行った。ソブリン債金利は国ごとに異なりさらに変動するため、およそのものであるが、図 4 にグレー網掛けで範囲を示した。5 年の短期的な運用を想定すると、IRR は負となり、全地域で導入ポテンシャルがないことになるが、10 年以上寿命までの利用を想定すると、多くの地域で導入可能性が高まる。

地域による差異を見ると、中東や中南米で収益率が高い。本稿におけるやや高めめの電気料金の仮定が影響している。アフリカでも収益率は長期運用で 1 割まで上がるが、ソブリン債金利が高い国も多く、リスクが高い。アジアは、社会経済的ポテンシャルが高い、つまり需要があるが、収益率は低く試算され、経済的ポテンシャルは低い。ただし、本稿では、地域毎に電気料金を設定しており、国別に評価していない。実際にはこれら IRR は国別、国内の地域別、プロジェクト別にも異なる。また、本稿の検討の前提として、太陽光発電プロジェクト実施により、逆潮流あるいは発電事業者となることで、現地で電力を有償（現地の電力料金程度）にて供給できる状況である必要がある。

¹³⁾ ソブリン債は、各国の政府、政府機関等が発行し、保証している債券（国債）であり、その金利は、その国の市中金利の状況を表していると考え、本稿で採用した。

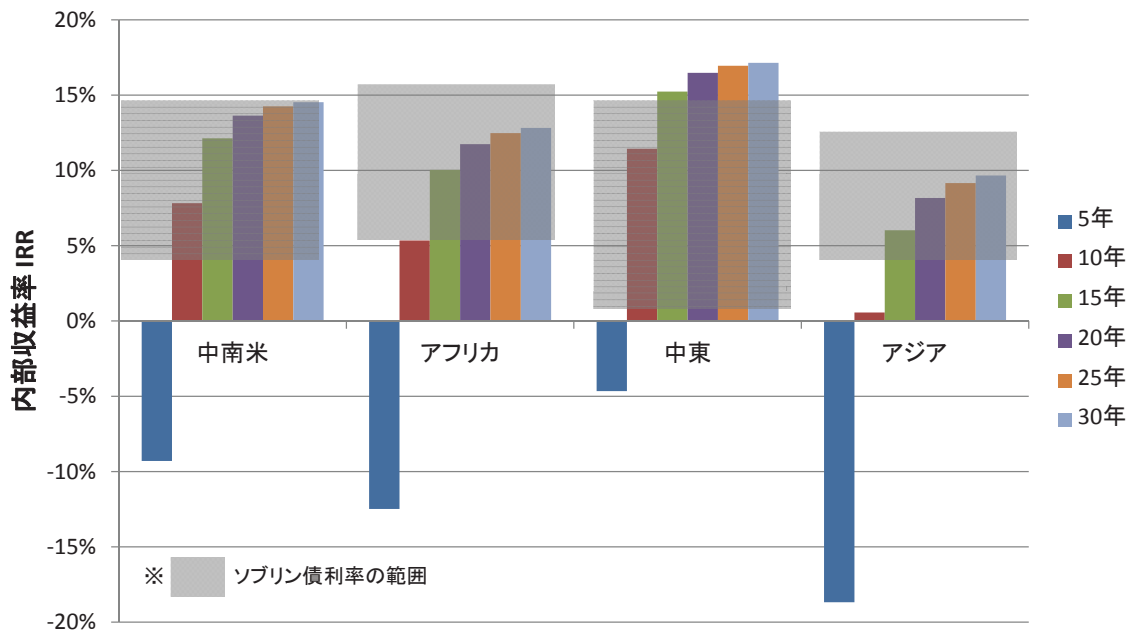


図4 2030年時の太陽光発電技術導入による5年ごと内部収益率

3.4 二酸化炭素排出削減可能量

本稿における、太陽光発電による発電について、系統電力と代替するとして二酸化炭素排出量に換算してまとめて示すと図5となる。系統電力のCO₂排出係数は電源構成によって異なるため、地域毎、年ごとに計算したものを用いた（ベースはOECD/IEA(2014)^[9]の値を用いた）。尚、経済的ポテンシャルは、2030年技術レベルで寿命30年としたときに、全地域で技術導入が可能であり、社会経済的ポテンシャルまで得られると見積もられる。

2030年時技術レベルの太陽光発電による社会経済的削減ポテンシャル量は途上国全体で350Mt-CO₂/yrであり、OECD/IEA(2014)^[9]シナリオの2030年の世界全体のCO₂排出量36Gt-CO₂/yrのおよそ1%、発電によるCO₂排出量15Gt-CO₂/yrの2%を占める。途上国のみでみると、発電によるCO₂排出量10Gt-CO₂/yrの4%である。一方、削減の技術ポテンシャルは、2030年全世界CO₂排出量の約9倍であり、この大きなギャップは、制度的、技術的な障壁を撤廃する努力によって埋めていくことが期待される。経済的ポテンシャルは、例えば、3.3で収益率が10%を超えた、中南米、アフリカ、中東のCO₂削減の社会経済的ポテンシャルである、とすると、64Mt-CO₂/yrとなる。

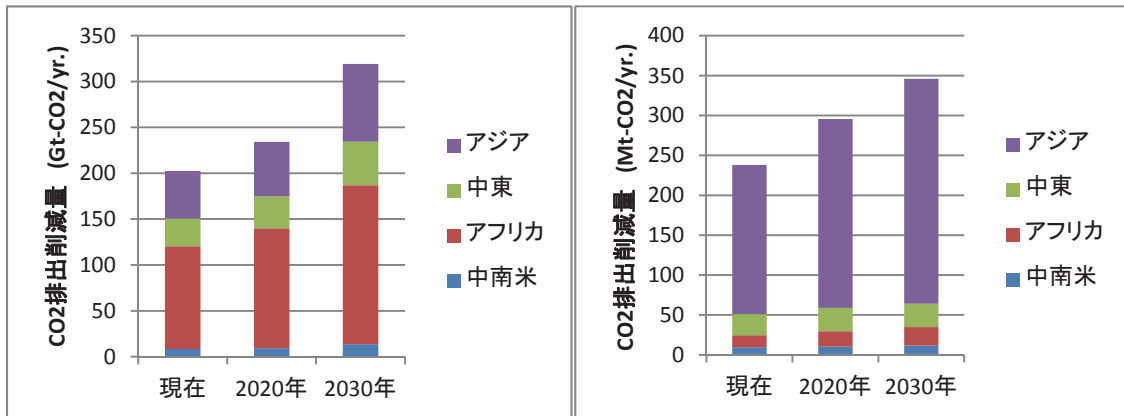


図5 左：太陽光発電設備導入による CO₂ 排出削減の技術的ポテンシャル、
右：同 CO₂ 排出削減の社会経済的ポテンシャル

4. 太陽光発電導入ポテンシャル評価のまとめ

本稿における結果から、太陽光発電設備の途上国導入促進の上で重要なポイントとして次に挙げる事が唆される。

- ・太陽電池のコストダウンのための効率向上、技術革新
- ・現地生産拠点へのシフトも含めた発電コストの低減
- ・エネルギー貯蔵の開発・利用による、需要量を超えた導入
- ・寿命までの技術の運用を可能とする現地での管理・能力育成
- ・海外技術移転・貢献プロジェクトにおいて、より低利率での貸し付けが利用できるスキーム

また、地域的差異をみると、本稿から以下のことが分かった。

- ・技術的ポテンシャルではアフリカ、次いでアジアが大きく、それぞれ、CO₂ 削減量で途上国全体のポテンシャルの 5 割強、3 割弱を占める。
- ・CO₂ 削減費の社会経済的ポテンシャルでは、アジアが途上国全体のポテンシャルの 8 割強で最も高く、続く中東は 1 割程度である。
- ・地域の代表的電気料金、日射量から求めた収益率からでは、中東、中南米地域が導入のメリットが高い。

今回は途上国を大きく地域分けして評価したが、今後、地域内の国による差異を反映させて評価することで、詳細な検討が可能となる。特に経済的ポテンシャルの推計に影響がある。また、社会経済的ポテンシャルについても検討の幅が広がる。

前提としたセルモジュール効率は、継続的な研究開発を要し、技術革新を期待するものである。海外需要が高まれば生産量が増大し、スケールメリットも早期に期待でき、コスト低減への近道ともなるだろう。経済的ポテンシャルを見ると、経済合理性だけでは 2030 年レベルの技術になるまで普及が進まないという結果である。そこで、現在まで行ってきた海外技術支援の枠組みを今後応用することも考えられる。「援助以上、事業未満」の案件として、適切な MRV を通した低金利貸付などを利用するなど、温暖化対策の一環で海外利用を増やしていくことが短期中期的な取り組みとして望まれる。

また、Integrated Contribution Approach の観点からは、以下のように国内外の温暖化緩和の貢献に役立てることができる。

- ・ 技術水準向上目標として：2020 年、2030 年のセルモジュール効率及びコストの具体的な数値を掲げる（例えば、LCS 試算を基にすれば、2020 年に 18% の効率、セルモジュールコストとして 97 円 /W、2030 年には 30%、57 円 /W を達成、など）。
- ・ 国内制度への反映として：それら太陽光発電設備を（効率のみでも）トップランナー基準の対象とする。
- ・ 途上国支援として：2020 年、2030 年時の海外への太陽光発電設備設置の具体的な目標値を定める。
- ・ 世界の温暖化貢献として：MRV を通じて各設備設置プロジェクトの貢献度を定量化し、公的金融機関の低金利枠などを利用し、実際に貢献度を増やす。定量化した情報は総量ベースで公開する。

例えば、内外に向けて掲げる目標（INDC など）としては、「2030 年までに太陽光発電の効率を 30% とし、セルモジュールコストとして 57 円 /W とする；2030 年までに途上国に太陽光発電設備を導入し、CO₂ を年間 60Mt¹⁴⁾ 削減する」など挙げられる。本稿で行った試算のような検討を行うことで、より現実味のある目標設定に近づけることができる。

5. 結論：統合的貢献アプローチへの示唆

本稿の太陽光発電のケーススタディで明らかにしたように、温室効果ガスの今後の大規模な削減には、国内で開発され、成熟した技術を海外へ展開し、国内ではさらなる省エネや緩和技術の革新を進めることが重要である。ファイナンスで緩和技術の世界的普及を後押しし、これらを統合して日本の温暖化緩和貢献への力をアピールすべきである。そして、このような分野別技術別の積み上げ型の定量的目標は、INDC に反映させ、国際的枠組みにおいても進めることが望ましい。

海外への技術展開といっても、実際には様々な形態が考えられる。日本で開発された技術が日本で生産され、海外に援助として提供される場合もあれば、海外で製品として購入される場合もある。日本で開発されたものが海外で現地生産され普及する場合もある。また、日本からの適切な資金援助や貸し付けにより、技術の国籍は問わず海外で技術が生産され利用が進む場合もある。いずれの場合も、技術普及についての日本の貢献があるものとして認められるべきものである。

今後は、太陽光のみならず、省エネなど各種技術を例にとり、これら海外技術協力の形態を整理し、Integrated Contribution Approach の考えのもと、海外への技術協力における緩和貢献のあり方を包括的に検討する予定である。

¹⁴⁾ 2030 年時技術レベルで、収益率 10% 以上の地域へ導入する場合に本稿で試算された経済的ポテンシャル。

引用・参考文献

- [1] LCS/JST (2013), 気候変動緩和技術の海外移転の促進, 低炭素社会の実現に向けた技術および経済・社会シナリオに基づくイノベーション政策立案のための提案書, (独) 科学技術振興機構, 低炭素社会戦略センター, 2013 年 11 月.
- [2] LCS/JST (2014), 温暖化対策における技術に着目した Integrated Approach (統合的貢献アプローチ) と他国への技術協力のあり方への提言, 低炭素社会の実現に向けた技術および経済・社会シナリオに基づくイノベーション製作立案のための提案書, (独) 科学技術振興機構, 低炭素社会戦略センター, 2014 年 4 月.
- [3] 新メカニズム情報プラットフォーム, 二国間クレジット制度(JCM), JCM 実施国の情報、プロジェクト情報, <http://www.mmechanisms.org/initiatives/country.html>, 最終アクセス 2015 年 1 月.
- [4] 外務省 (2014), 「気候変動問題と日本の取り組み」、
<http://www.mofa.go.jp/mofaj/files/000050885.pdf>、最終アクセス 2015 年 1 月.
- [5] IPCC, 第三次評価報告書, 技術要約, 2001.
- [6] Sørensen, B., 1999, Long term scenarios for global energy demand and supply. Four global greenhouse mitigation scenarios, Roskilde University, pp: 213.
- [7] Hoogwijk, Monique M. (2004), On the global and regional potential of renewable energy sources, Universiteit Utrecht, ISBN: 90-393-3640-7.
- [8] LCS/JST (2014), 太陽光発電システム, 低炭素社会の実現に向けた技術及び経済・社会の定量的シナリオに基づくイノベーション政策立案のための提案書, 独立行政法人科学技術振興機構低炭素社会戦略センター, 2014 年 3 月.
- [9] OECD/IEA (2014), World Energy Outlook 2014, ISBN: 978-92-64-20804-9.
- [10] JEPIC (2015), 主要国の発電設備の電源構成 (2012 年). http://www.jepic.or.jp/data/gl_date/gl_date05.html, 最終アクセス 2015 年 3 月.
- [11] EDMC (2014), エネルギー・経済統計要覧 2014, p290.
- [12] JETRO (2015), 投資コスト比較, <http://www.jetro.go.jp/world/search/cost/>, 最終アクセス 2015 年 2 月.
- [13] INE (INSTITUTO NICARAGÜENSE DE ENERGÍA) (2014), La Gaceta- Diario Oficial, 27-08-14, 162.
- [14] EIA (US Energy Information Administration), (2008), Countries, <http://www.eia.gov/countries/>, 最終アクセス 2015 年 2 月.
- [15] Sudan Tribune (2012), Ethiopia and Sudan negotiating for energy trade balance, December 31, 2012, <http://www.sudantribune.com/spip.php?article45028>.
- [16] NEA (NEPAL ELECTRICITY AUTHORITY) (2012), A Year in Review Fiscal Year 2011/12.

低炭素社会の実現に向けた
技術および経済・社会の定量的シナリオに基づく
イノベーション政策立案のための提案書

国際戦略編

温暖化対策のための Integrated Contribution Approach
(統合的貢献アプローチ) の中で検討した途上国における
太陽光発電システム利用の発電及び CO₂ 排出削減
ポテンシャル評価

平成 27 年 3 月

Evaluation of Power Generation and CO₂ Emissions Reduction Potential
by PV Application in Developing Countries Considered in the Integrated
Contribution Approach for Climate Change Mitigation

Strategy for International affairs,
Proposal Paper for Policy Making and Governmental Action
toward Low Carbon Societies,
Center for Low Carbon Society Strategy,
Japan Science and Technology Agency,
2015.3

国立研究開発法人科学技術振興機構 低炭素社会戦略センター

(平成 27 年 4 月印刷版)

本提案書に関するお問い合わせ先

- 提案内容について・・・低炭素社会戦略センター 主任研究員 田中 加奈子 (Kanao TANAKA)
- 低炭素社会戦略センターの取り組みについて・・・低炭素社会戦略センター 企画運営室

〒102-8666 東京都千代田区四番町5-3 サイエンスプラザ4 階
TEL : 03-6272-9270 FAX : 03-6272-9273 E-mail : lcs@jst.go.jp
<https://www.jst.go.jp/lcs/>

© 2015 JST/LCS

許可無く複写・複製することを禁じます。
引用を行う際は、必ず出典を記述願います。
