

太陽光発電技術のこれからの方向性

Future Direction of Solar Photovoltaic Technologies

黒川 浩 助 *

Kosuke Kurokawa

Strategic Research Initiative for Sustainability and Survival,
Institute of Symbiotic Science and Technology,
Tokyo University of Agriculture and Technology
2-24-16 Naka-cho, Koganei, Tokyo, 184-8588 Japan

Abstract

According to Japan's R&D roadmap "PV2030", a base-case scenario is showing that the mass deployment of 100 GW PV aggregation will supply 10% of national electricity up to 2030. PV2030 base case utilizes 1/80 of the whole physical potential over Japan. According to this scenario, aggressive technological and economical targets were set up for PV devices and system components. About a half of this PV installation is assumed to be brought still from residential roof-top applications. In such a state, PV penetration will reach almost 100% in the majority of urban areas. Since the classical grid formation approach does not seem to be a good solution to deal with this issue, the author has already proposed "Autonomy-Enhanced PV Clusters (AE-PVC)" to realize a less dependent PV aggregation on the existing power grids in conjunction with grid power electronics and battery stations. The author also proposes an area deployment scenario for renewable energies autonomously interlinked by a specially-designed power-router between communities.

Key words: Solar photovoltaic; PV2030 Roadmap; Autonomy-enhanced PV clusters

1 まえがき

わが国の太陽光発電技術開発は、第一次石油危機を端緒として1994年に発足したサンシャイン計画が始まる。このとき国家目標として2000年までに太陽電池のコストを100分の1に下げることが基本計画の目標であった。過去30年の開発実績に基づく段階的

な商業化は、とくに1994年の住宅用システム補助金制度の制定をきっかけにして進み、補助金制度が打ち切られた現在でも、世界第一の太陽電池生産国に位置づけられるようになった。しかし、サンシャイン計画開始時期からのコスト低下は、およそ1/50程度でもう一息である。主要なターゲットであった住宅用太陽光発電システムとしては最後のゴール前の上り坂にあり、2010年度には発電コスト23円/kWhをクリアすることが期待されている。

ところで、わが国の現在の太陽光発電技術開発では、

* 東京農工大学大学院

共生科学技術研究院 生存科学研究拠点 教授

2004年に設定された「PV2030³⁾」ロードマップを旗じるしに、なおも積極的な技術開発が続けられている。これは、太陽光発電が住宅用のみならず、産業用(14円/kWh)や電気事業用(7円/kWh)の目標を目指して、わが国の電力供給の中にあって、少なくとも10%程度をまかないたいという方向づけのためである。

太陽光発電は現在まだそのコストが比較的高く、現状やや力不足であるが、その潜在資源量の大きさや非枯渇性から、超長期にわたって人類が生存を続けていくため持続性を保証する究極の再生可能エネルギーである。Fig. 1に示すように世界エネルギーとしても、2030年代から目に見えた導入が始まり、2050年には再生可能エネルギー全体でほぼ半分のシェアを持ち始め、2100年には太陽電気が2/3を供給するというドイツの政府環境諮問会議(WBGU¹⁾)のビジョンも提示されている。

京都議定書制定の際に日本が課せられた、2008～2012年までのCO₂削減目標の1990年比マイナス6%の達成は、+7%レベルまで増加している現状で、実質13%台の削減を目指すことと同義であり極めて苦しい立場にある。またさらに、世界の目はつぎの期間である2020年を目指した議論も行われるようになってきており、欧米が今度は手を結び、日本が窮状に立つことが懸念される。このような状況を座視すること

なく、新エネ・省エネにおいて得意な技術力を発展させることで足腰を強化し、また積極的なメッセージを世界へ向けて発信していく必要性を痛感させられる。

その一つの機会として、「再生可能エネルギー2006国際会議 Renewable Energy 2006」を2006年10月に幕張メッセにおいて開催し、成功を収めた。同国際会議では10大再生可能エネルギー分野の技術発表・討議がおこなわれ、これらの産業力を示す「新エネルギー世界展示会」が併催され、多くの耳目を集めた。このような活動が今後も継続して実施されようとしている²⁾。

2 太陽光発電ロードマップ「PV2030」

筆者は2004年のロードマップ「PV2030」設定に携わったが、その基本的な考え方は、2030年時点でわが国電力供給量少なくとも10%程度のシェアを持ちうる導入量として「1億kW(100GW)」を基本ケースとして最初に設定したことである。このことを可能にするために、国内の利用可能なスペース(物理的可能量)を抽出し、このような立地の性質から決まる競合電気コストを考慮して、これをクリアするための性能と価格を実現できる技術レベルを目標とした。

Fig. 2において、右側に物理限界として設置可能面積が導入形態ごとに積み上げられている。この中で、

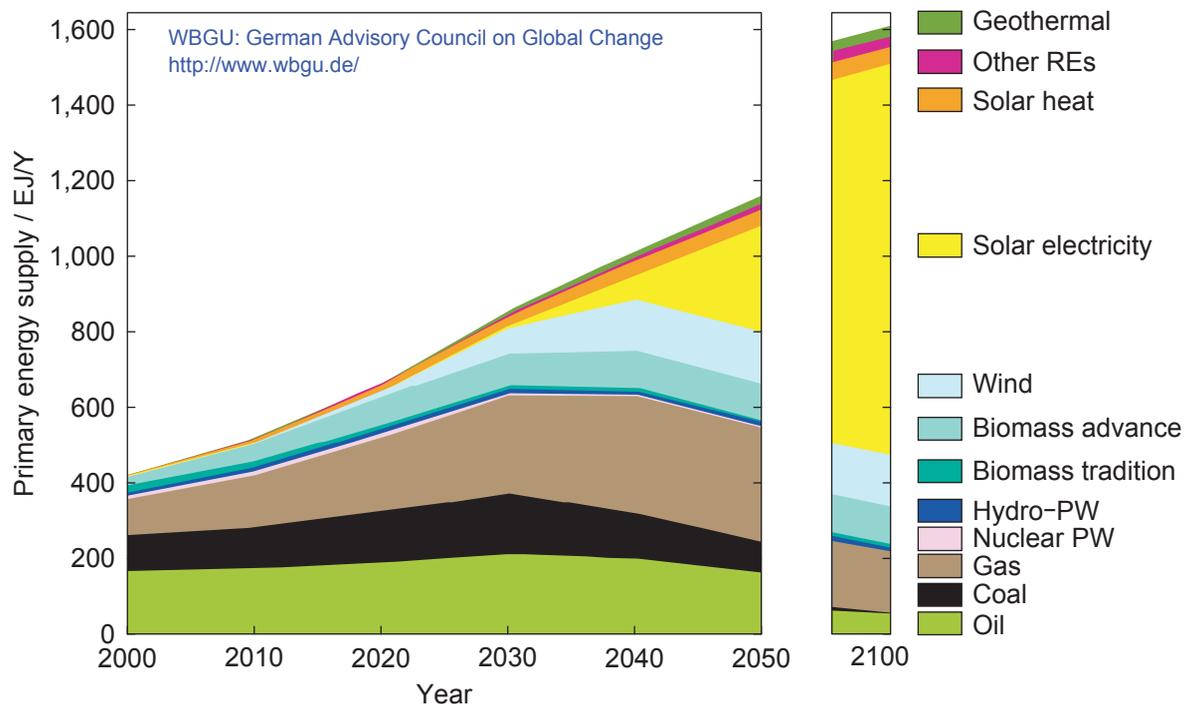


Fig. 1 World energy supply projection up to 2100 by the German Advisory Council on Global Change.

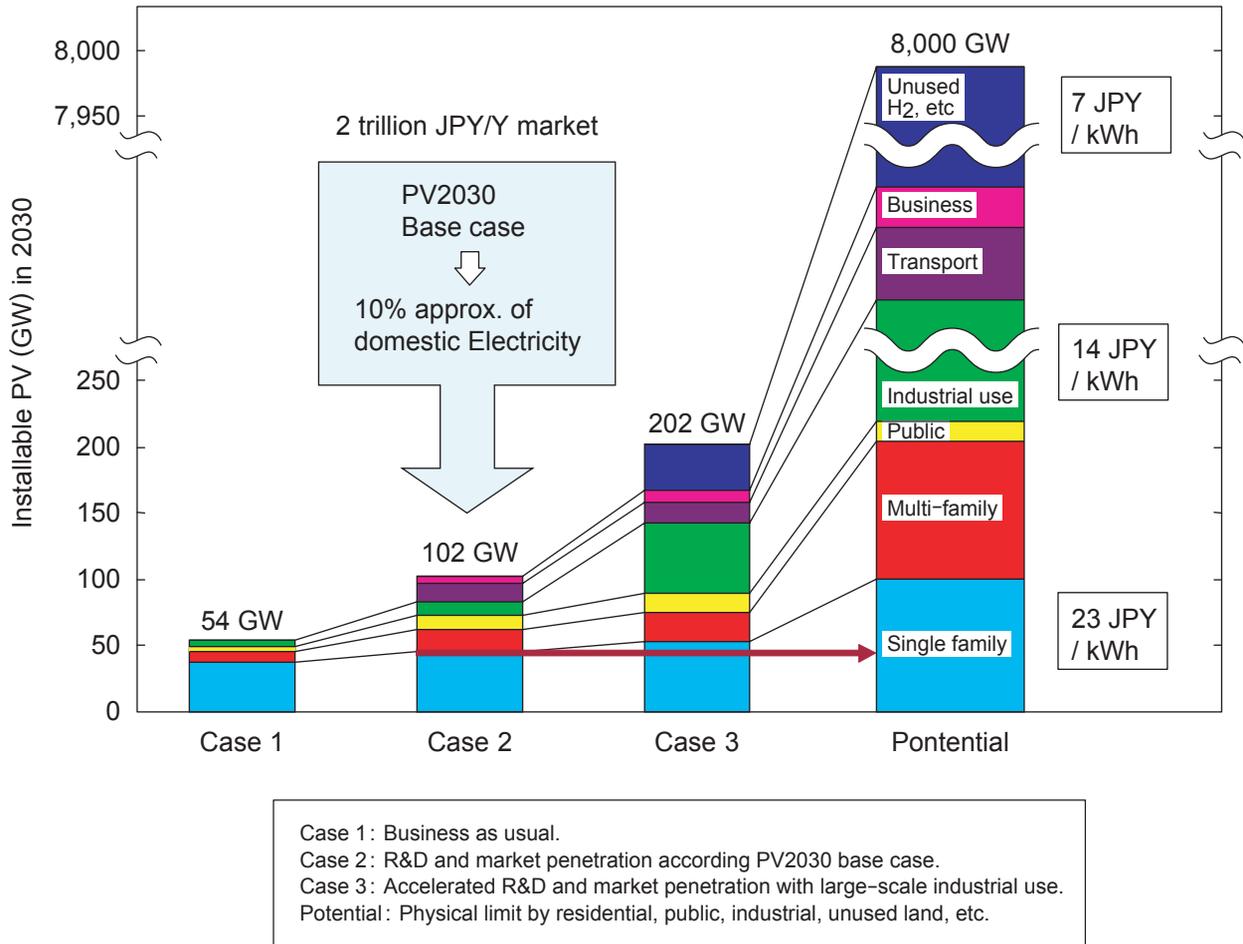


Fig. 2 Domestic potential of photovoltaic systems installable up to 2030 under assumption of technology progresses.

大型産業用とその他(未利用地)は不連続に表示されている。これらの総計値は太陽光発電設置量で8000 GWに達し、わが国総電気供給の約8倍に相当する年間電力量を供給できるレベルにある。

また、これらの導入形態ごとに考慮すべき競合電気料金として、住宅用を23円/kWh、産業用を14円/kWh、卸電力用を7円/kWhを念頭において、もっとも高レベルにある住宅用から先に導入が進むと判断し、2020年には産業用のレベルに到達、2030年には卸電力レベルに到達するというシナリオを採用した。

同図のケース2は「PV2030」のベースケースとして設定した2030年100GW導入の場合のシステム導入形態を示している。採用したシナリオに基づき、個人住宅の40数%程度の屋根に太陽光発電が設置されるという特徴的な姿が2030年に現出する想定である。

Fig. 3はこの導入形態に基づいたシナリオを実現す

るために、あたらしい太陽光発電技術の世代交代を可能にする技術開発を想定したロードマップである。太陽光発電のコストダウンは、おもに太陽電池の製造技術と市場規模に依存する。市場規模が比較的小さい時代の技術最適化と、大規模市場を前提とした大量生産技術ではその究極の生産コストには大きな格差が出てくる。太陽電池容量に換算した本質的な生産速度が上がってきて、かつ、市場規模が大きくなれば、初期投資額の大きさはあまり問題にならず、材料費や運転費などのランニングコストを抑えることが主要な課題となってくる。太陽電池のコストダウンには、技術の質と市場規模の両面のバランスある実現が必要である。

「PV2030」では長期計画として、太陽電池に対しては前述したような発電コストをクリアすることを大目標として課している。また、このために各要素が達成すべき目標もTable 1のように決めている。さらに太

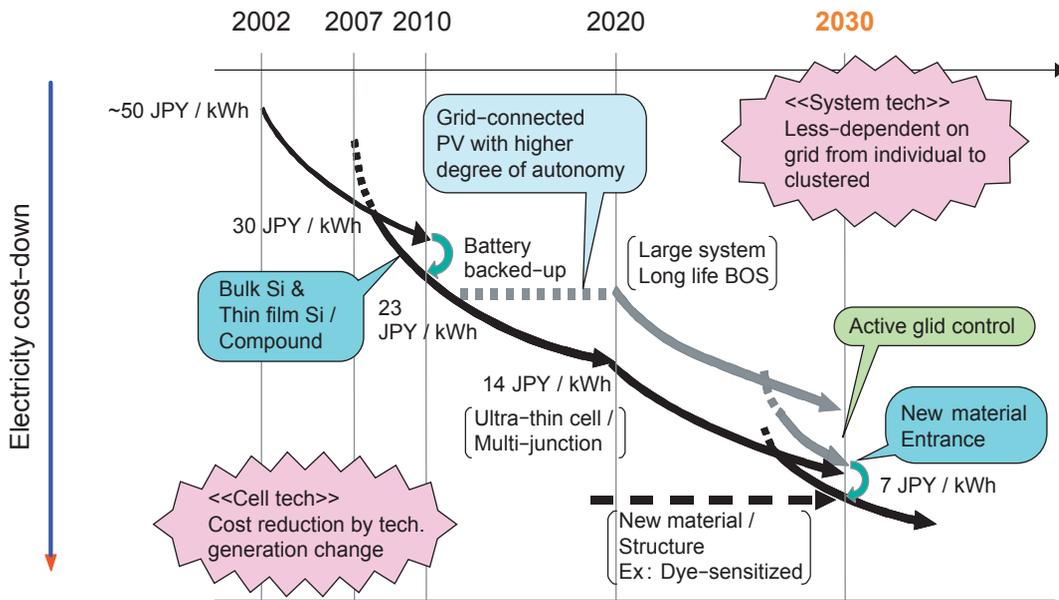


Fig. 3 Economical improvement scenario of photovoltaics according to NEDO's "PV2030" Roadmap.

Table 1 Development targets of individual technological challenges toward 2030.

Items	Development target (Achievement year)
Module	100 JPY / W (2010)
Manufacturing cost reduction	75 JPY / W (2020)
Higher performance module	< 50 JPY / W (2030)
Higher durability performance module	30 years life (2020)
Supply-demand balance stabilization of feed stock	Silicon unit requirement: 1g / W (2030)
Inverter	15,000 JPY / kW (2020)
Energy storage system	10 JPY / Wh (2020)

Table 2 Development target of PV module conversion efficiency in percent.

Solar cell types	2010	2020	2030
Multi-crystalline silicon	16 (20)	19 (25)	22 (25)
Thin film silicon	12 (15)	14 (18)	18 (20)
CIS	13 (19)	18 (25)	22 (25)
Super high efficiency	28 (40)	35 (45)	40 (50)
Dye-sensitized	6 (10)	10 (15)	15 (18)

Note: Cell efficiency target in parentheses.

陽電池については、バルク・シリコン結晶系から、薄膜シリコン、CIS系などの新形薄膜のような各種の太陽電池の登場可能性を想定し、種類ごとに Table 2 に示すモジュール変換効率・価格目標をおいている。ブレイクスルーを想定し、光増感太陽電池についても排除していない。太陽電池の変換効率の想定に当たっては、太陽光発電によるオール電化住宅を可能にする、一軒の屋根当たり、8 kW 程度の設置が可能な効率を求めている。たとえば、シリコン・バルク系では 22% モジュール効率(セル 25%)で 50 円/W のコスト

の実現と、シリコン産業への過大な依存を避けるために厚さ 50 ミクロンの太陽電池セルを求めている。

前掲 Table 1 に示されているように、インバータの目標価格は 15,000 円/kW(2020 年)、蓄電装置については 10 円/Wh(2020 年)が示されていることも特記したい。これらは「PV2030」で目指している「自律度向上形太陽光発電システム」(後述)の実現のために必須の要素技術となるからである。

3 自律度向上型太陽光発電システム実現のために「パワエレ・蓄電機能が必要」

「PV2030」では競合コストの点から主な導入形態が大きく住宅分野に依存している。総導入量 100 GW のうち、40% 以上が個人住宅の屋根上発電を想定。これは全国平均で個人住宅の総量の半分近くに相当するレベルであるが、太陽光発電普及率がほぼ 100% に達するコミュニティが多く出現すると考えるのが自然である³⁾。

また、太陽光発電出力は、日射変動にほぼ比例した出力となり、日射の変動による出力変動が生ずる。このため、現状では電力系統の調整余力でカバーされ、運用上の問題は顕在化してはいないが、太陽光発電導入率は高まるにつれ、系統運用上の導入制約が問題になる可能性が大きい。また、このことにより、外部への余剰電力送電や、外部系統からの応援電力の単価が現状枠組みとは変わってくる可能性もあり、太陽光発電の採算性向上の制約となる問題点も予想される。

このような諸課題を可能な限り回避するために、高度集中した太陽光発電集合を主体にした「自律度向上型太陽光発電システム」と名付けた新しいコミュニティシステム概念が、前出の Fig. 2 の「PV2030」の基本想定には含まれている。

「自律度向上型太陽光発電システム」の基本機能は、住宅コミュニティのすべての電力をまかなえるほどに太陽光発電を導入しても、各家庭間に生ずる過不足調整潮流やコミュニティ変電所へ向かう逆潮流に際しての配電電圧上昇(または下降)問題などの支障がコミュニティ内では系統上で発生しないこと、またコミュニティ全体の発電電力と負荷電力の差に生ずる不規則変動を自ら需給調整して、コミュニティ変電所で連系された外部系統から見れば、コミュニティ全体が制御されたひとつの負荷(または電源)として見えることが要件となろう。外部系統から見た場合には、いわゆるマイクログリッドと問題はほぼ同じであるが、コミュニティ系統内では、(超)分散している負荷と太陽光発電が渾然一体・融合したコミュニティ電力システムを実現するという技術課題が見えてくる。すなわち、現在の配電系統のように変電所側を上流側とする概念ではなく、配電系統での電力フローを両方向に自由に流通する(すなわち 100% の逆潮流を許容)基本デザインが望まれる。この課題を「PV2030」ではアクティブ・ネットワークとして表示している。

「PV2030」が目標とする太陽電池の高効率化により、

ある地域が太陽光発電のみで系統内負荷とバランスすることができる(年ベースで自給可能)という想定に立つと、外部系統とのインターアクションは、現在のよう太陽光発電電力の変動を無計画に吸収することを前提とすることは、電力システムのトータルシステム最適化の観点からは望ましいとはいえない。むしろ、地域の中での平準化をはかりながら、外部系統とのやりとりを計画的に行い、外部系統から見れば、連系点において制御されたひとつの電源または負荷のように運用できれば、連系運用契約上の付加価値は数等高まると予想される。また、季節的な需給調整を電力市場で調達するための技術要件を持つことを意味する。

このようなコミュニティでは、それが持つ太陽光発電ポテンシャルを地域のために 100% 活かすことが可能となる。これはまさしく「ソーラー PV タウン・シティ」と呼ぶことができる。このような基本概念を具体的なイメージに深めるために、平成 17 年度末までに NEDO 技術開発機構委託研究「自律度向上型太陽光発電システム」のフィージビリティ研究が 1 年半にわたって実施されてきた⁴⁻²⁰⁾。

Fig. 4 に、以下のような基本的な諸点を考慮した自律度向上型太陽光発電システム構成・機能の技術イメージを示す。

- (1) 外部系統への不規則な逆潮流(場合によっては系統内の逆潮流)を抑制(需給調整)しながら、地域内全体の太陽光発電電力の有効利用をはかり、また計画的な電力購入も可能とするために、蓄電ステーション(コミュニティ内に集中配置・分散配置など)を設置する⁷⁾。
- (2) 外部系統との相互のやりとりを制御されたものとするための外部系統連系ルータ機能を連系点に具備する。また、系統内部のフィード間や他のコミュニティ系統との間のコミュニティ間ルータも発展形として考慮できる。ルータ機能は SiC などのパワーデバイス技術の進展に伴い、BTB やマトリックスコンバータで構成する。地域系統内の事故や、あるいは外部系統での事故が互いに波及しないように制御・保護することも可能になる。自端情報に基づく自律分散制御を究極の目標としたい。
- (3) 100% の PV 導入状態において自由に逆潮流させ、各家庭間の太陽光発電・負荷の相互融通を可能ならしめること、また、地域系統配電線全体の電圧問題や配電系統設備の稼働率向上・最適潮流制御を解決する手段として、パワーエレクトロニクスを導入したアクティブ・ネットワーク技術を導入

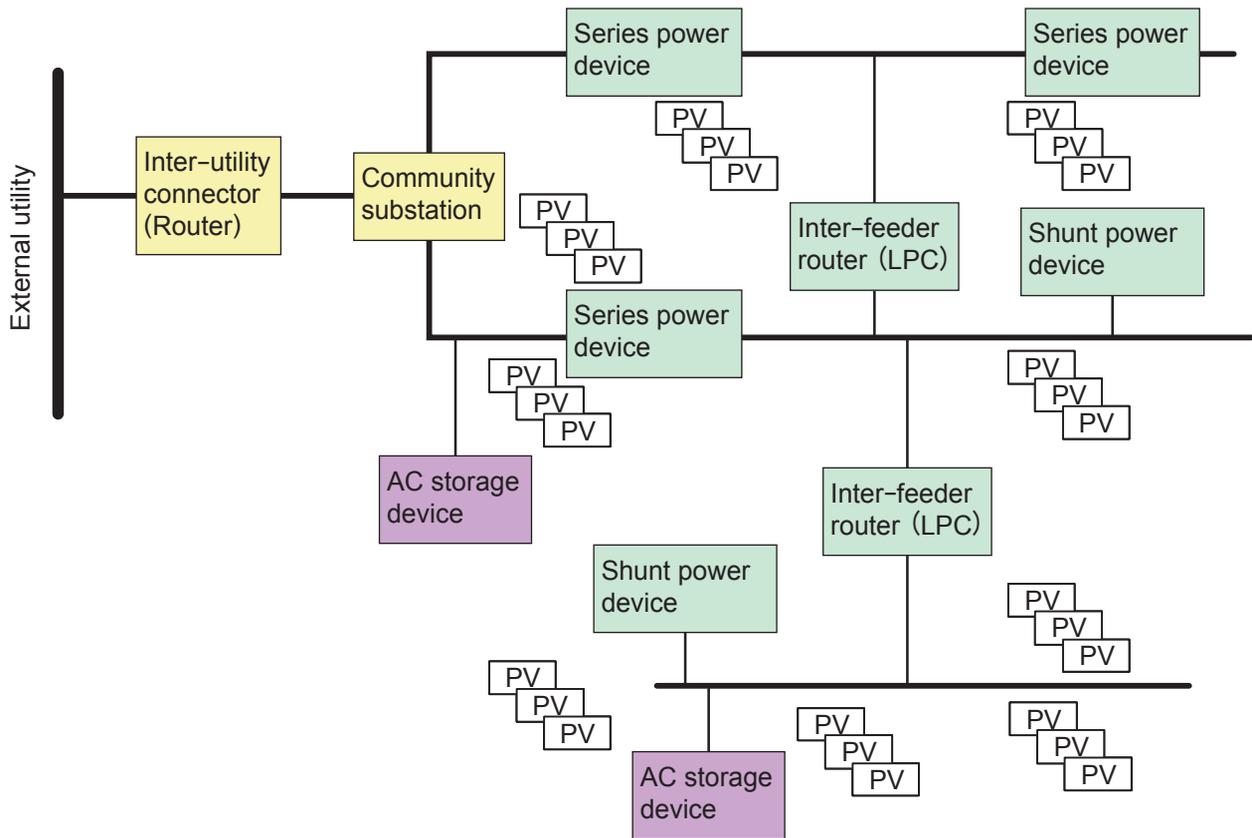


Fig. 4 An image of "Autonomy-Enhanced PV Clusters" employing an active network concept.

する。

また、本研究の進展により、

- (4) おおむね 100 軒以上の小住区を対象とした配電方式として、高圧系を並行して引き回さない低圧系統の可能性を、この概念に追加して検討した⁵⁾。

将来の姿として上記 (4) に示した自律分散的ネットワーク展開のイメージを Fig. 5 に描く。このような構成のネットワークは、あたかもインターネットのごとくに、地域ごとの負荷需要に応じて、身近に得られる再生可能エネルギーを生かしながら、地域だけの意志決定に基づき、自律分散的に拡張・運用・制御できるものでなければならない。このような運用が集中的な全体システムの変更をとまわずに実現しなければ、再生可能エネルギーの本質を有効に生かすことにはならないであろう。このために必要な基本機能を明らかにしていきたい。

4 むすび：太陽光発電のグローバルな可能性へ

本稿で示した「PV2030」の時代の「自律度向上形

太陽光発電システム」という導入形態や規模は、わが国太陽光発電産業が世界トップシェアを占めている現時点瞬間の姿とは大きく異なることを心に描いていただけだろうか。このような大きな潮流にうまく乗っていかなくては本当の未来を期待することはできない。わが国を支えていく新しいメガ産業創生のために、また、再生可能エネルギーが本質的に持つ使いにくさを解決するために、パワーエレクトロニクスやエネルギー貯蔵技術などの強力な支えは不可欠である。このような要素技術分野の大きな可能性を見積もってみることは、それほど難しいことではない。

なお、21 世紀全体を通して見れば、太陽エネルギー利用・太陽光発電が、世界のエネルギー・環境問題、民族間の格差問題を抜本的に解決し、地球上の人類が真に生存・持続できる社会を構築することができる。世界の基幹エネルギーインフラとしての大きな可能性も持つ^{21,22)} ことについてまで言及したかったが、紙数の関係でここに筆をおきたい。

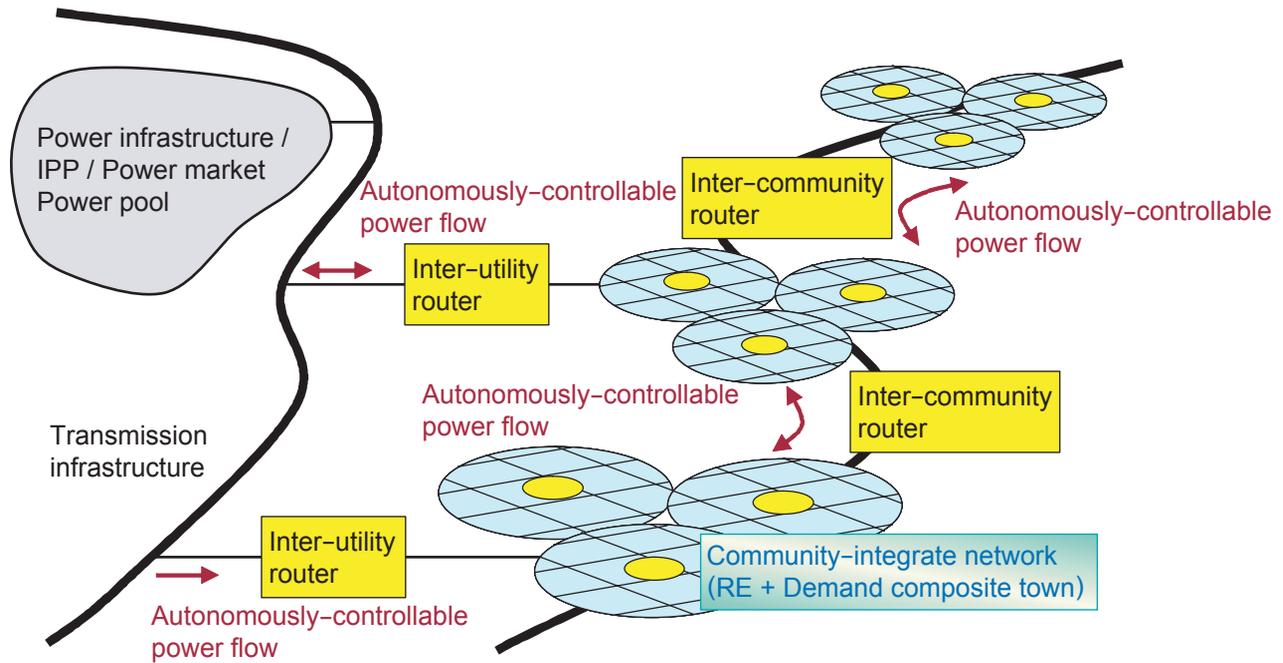


Fig. 5 Area deployment of renewable energies autonomously interlinked by a power-router between communities.

文献

- 1) <http://www.wbgu.de/>.
- 2) <http://www.renewableenergy.jp>.
- 3) http://www.nedo.go.jp/informations/other/161005_1/gaiyou_j.pdf.
- 4) K. Kurokawa: Areal evolution of PV systems, PVSEC-9, PL-II-3, pp.881-884, Nov. 11-15, Miyazaki (1996).
- 5) K. Kurokawa, S. Wakao, Y. Hayashi, I. Ishii & K. Otani, M. Yamaguchi, T. Ishii, and Y. Ono: Conceptual study on autonomy-enhanced PV clusters for urban community to meet the Japanese PV2030 requirements, 20th EU-PVSEC, 6DP.2.3, Barcelona, 6-10 June (2005).
- 6) Shinji Wakao, Yasuhiro Hayashi, Naoki Ueda, Akitaka Onoyama, Kosuke Kurokawa, Masahide Yamaguchi, Kenji Otani, and Yukiyoishi Ono: Investigation of the configuration of autonomy-enhanced PV clusters for urban community, PVSEC-15, PV0654-O5, Shanghai, 10-14 Oct. (2005).
- 7) Masahide Yamaguchi, Tatsuya Kawamatsu, Takafumi Takuma, Kosuke Kurokawa, Kenji Otani, Shinji Wakao, Yasuhiro Hayashi, and Yukiyoishi Ono: Investigation of battery storage station of autonomy-enhanced PV clusters for urban community PVSEC-15, Shanghai, 10-14 Oct. (2005).
- 8) Kyungsoo Lee, Kosuke Kurokawa: Study on D-UPFC in the clustered PV system with grid, PVSEC-15, Shanghai, PV0722-O5, 10-14 Oct. (2005).
- 9) K. Kurokawa, Shinji Wakao, Yasuhiro Hayashi, Hiroshi Yamaguchi, Kenji Otani, Masahide Yamaguchi, Takafumi Ishii, and Yukiyoishi Ono: Autonomy-enhanced, PV cluster concept for solar cities to meet the Japanese PV2030 roadmap, 2nd International Solar Cities Congress, 7E.2. Oxford UK, 3-6 April (2006).
- 10) K. Kurokawa: A conceptual study on solar PV cities for 21st century: WCPEC-4, Hawaii, 8-12 April (2006).
- 11) Kyungsoo Lee, Hirotaka Koizumi, and Kosuke Kurokawa: Voltage control of D-UPFC between a clustered PV system and distribution System, PESC06, pp.1367-1371 Jeju, 18-22 June (2006).
- 12) Kyungsoo Lee, Hirotaka Koizumi, and Kosuke Kurokawa: Voltage sag/swell controller by means of D-UPFC in the distribution system,

- WCPEC-4, Hawaii, April 8-12 (2006).
- 13) Lee Kyungsoo, K. Yamaguchi, H. Koizumi, and K. Kurokawa: D-UPFC as a voltage regulator in the distribution system, Renewable Energy 2006, P-N-5, 10-13 Oct. (2006).
 - 14) T. Kamakura, K. Hayashi, Y. Ohashi, and K. Kurokawa: Considerations on power line router by using matrix converter, Renewable Energy 2006, P-Pv-7, 10-13 Oct. (2006).
 - 15) Y. Nakamura, H. Koizumi, and K. Kurokawa: A new type of scaled-down network simulator for testing PV inverters, Renewable Energy 2006, P-Pv-11, 10-13 Oct. (2006)
 - 16) H. Igarashi, T. Sato, and K. Kurokawa: About the examination of an alternative technique of the motor load according to the resonance load, Renewable Energy 2006, P-Pv-17, 10-13 Oct. (2006).
 - 17) T. Shimada, K. Kurokawa, and T. Yoshioka: Grid-connected photovoltaic system with battery, Storage Conference, Aix en Provence, 20-22 Oct. (2003).
 - 18) T. Shimada, K. Kurokawa: Grid-connected photovoltaic systems with battery storages, Renewable Energy 2006, O-Pv-6-1, 10-13 Oct. (2006).
 - 19) T. Shimada, K. Kurokawa: High precision simulation model of battery characteristics, Renewable Energy 2006, P-Pv.1, 10-13 Oct. (2006).
 - 20) K. Kurokawa: Conceptual considerations on the aggregated network consisting of massive rooftop PVs and domestic loads in urban residential area, Microgrid Symposium, Nagoya 2007 Symposium on Microgrids. (downloadable at http://der.lbl.gov/new_site/DER.htm).
 - 21) K. Kurokawa, ed.: Energy from the Desert, James and James, May (2003).
 - 22) K. Kurokawa, et al, ed.: Energy from the Desert, Earthscan Jan. (2007).