

太陽光発電主力電源化推進技術開発

／動向調査等／

太陽光発電の技術および産業・市場動向調査

(含、国際技術協カプログラムへの参画)

杉渕 康一
(株)資源総合システム
2023年2月1日

問い合わせ先
株式会社資源総合システム
E-mail: info@rts-pv.com
TEL: 03-3551-6345
Web: <http://www.rts-pv.com>

事業概要

1. 期間

開始 : 2020年8月
終了(予定): 2025年3月

2. 最終目標

太陽光発電の主力電源化を推進するため、需要地に近接しているが従来技術では太陽光発電の導入が進んでいなかった場所を利用可能にするための太陽光発電システム開発や長期安定的な事業運営確保として現在顕在化している課題解決を目指した太陽光発電主力電源化推進技術開発プロジェクトの推進に資することを目的とし、本調査では太陽電池セル、モジュール、システムおよび太陽光発電が導入される分野に関する国内外の技術や産業・市場動向や今後の太陽光発電の可能性について調査を行う

3. 成果・進捗概要

国内外の太陽光発電に関する市場・産業・技術・研究開発プログラム・普及促進施策等の現状を把握するために、分野毎の最新動向について調査を実施

国際エネルギー機関・太陽光発電システム研究協力プログラム(IEA PVPS)とは

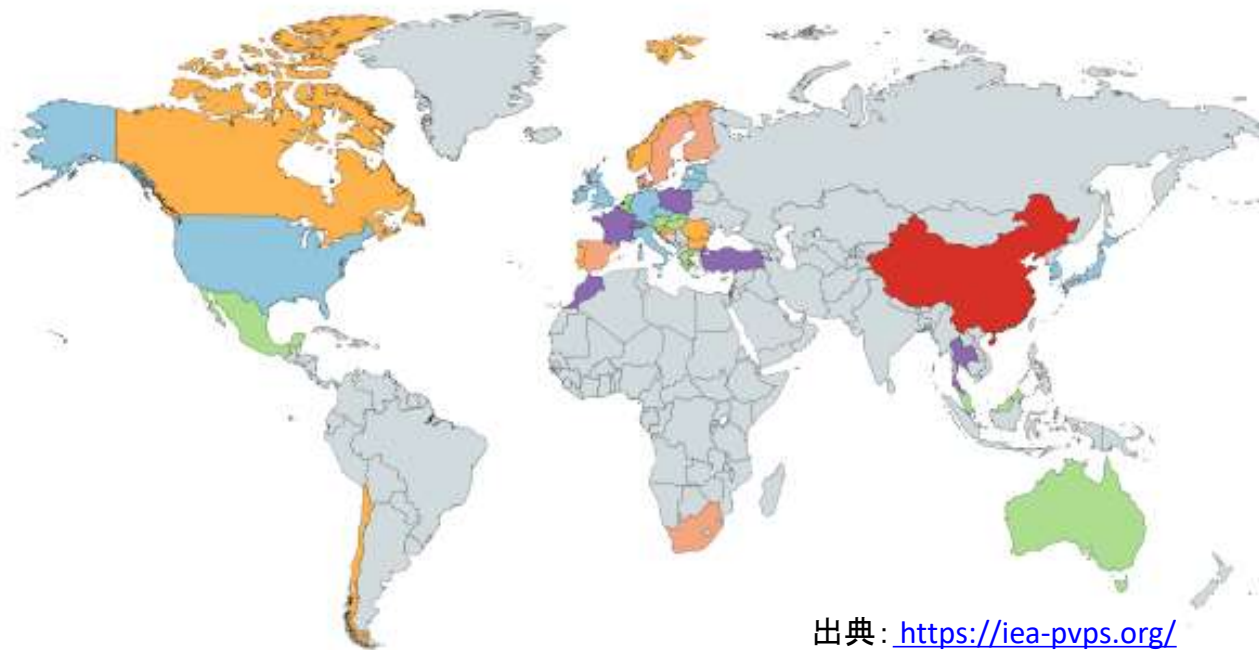


- 1993年に創設された、IEAの枠組みにおける研究プログラムのひとつ
- 32機関（27ヶ国、欧州委員会（EC）、4産業団体）が加盟
- ミッション：持続可能なエネルギーシステムへの転換におけるひとつの礎としての太陽光発電の役割を推進するために国際協力を強化
- ウェブサイトで成果物や活動を報告（<https://iea-pvps.org/>）

IEA PVPS加盟国と
加盟機関



世界市場の90%を網羅

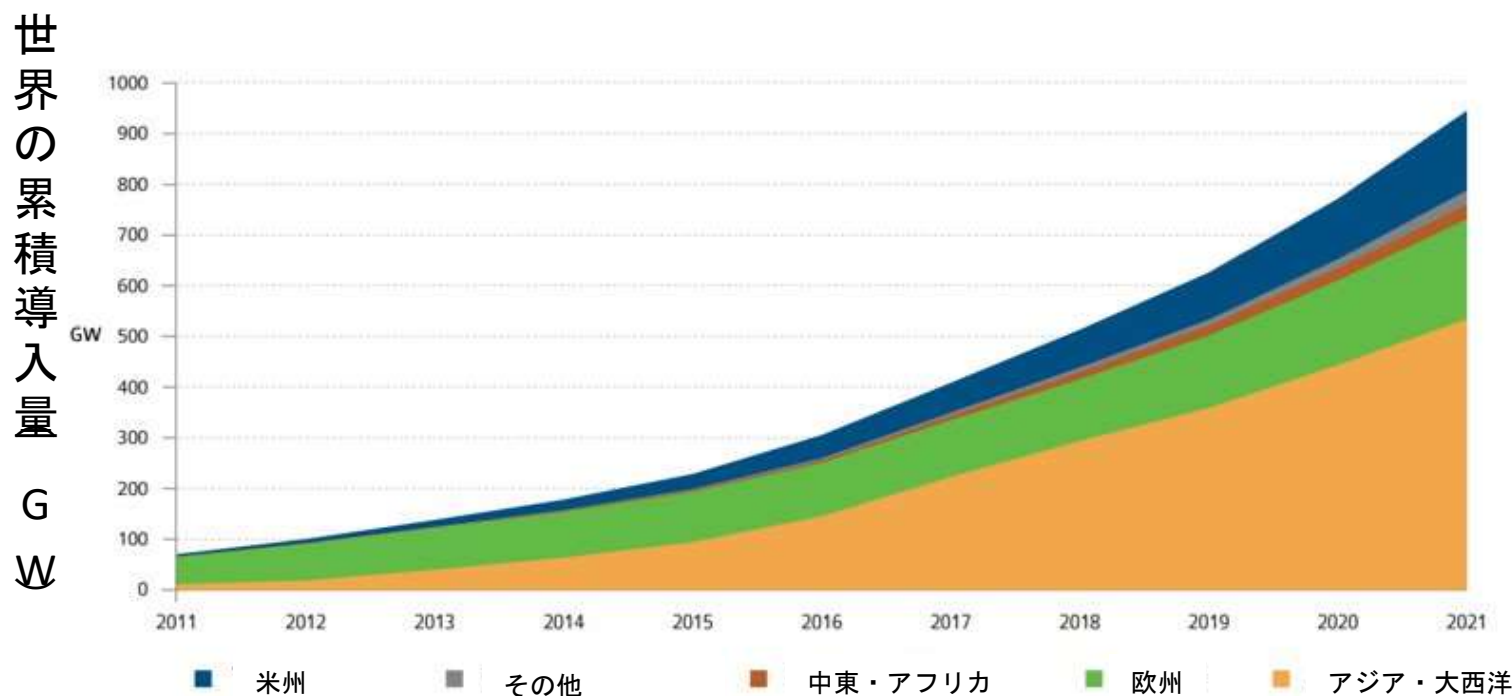


出典：<https://iea-pvps.org/>

PVPS

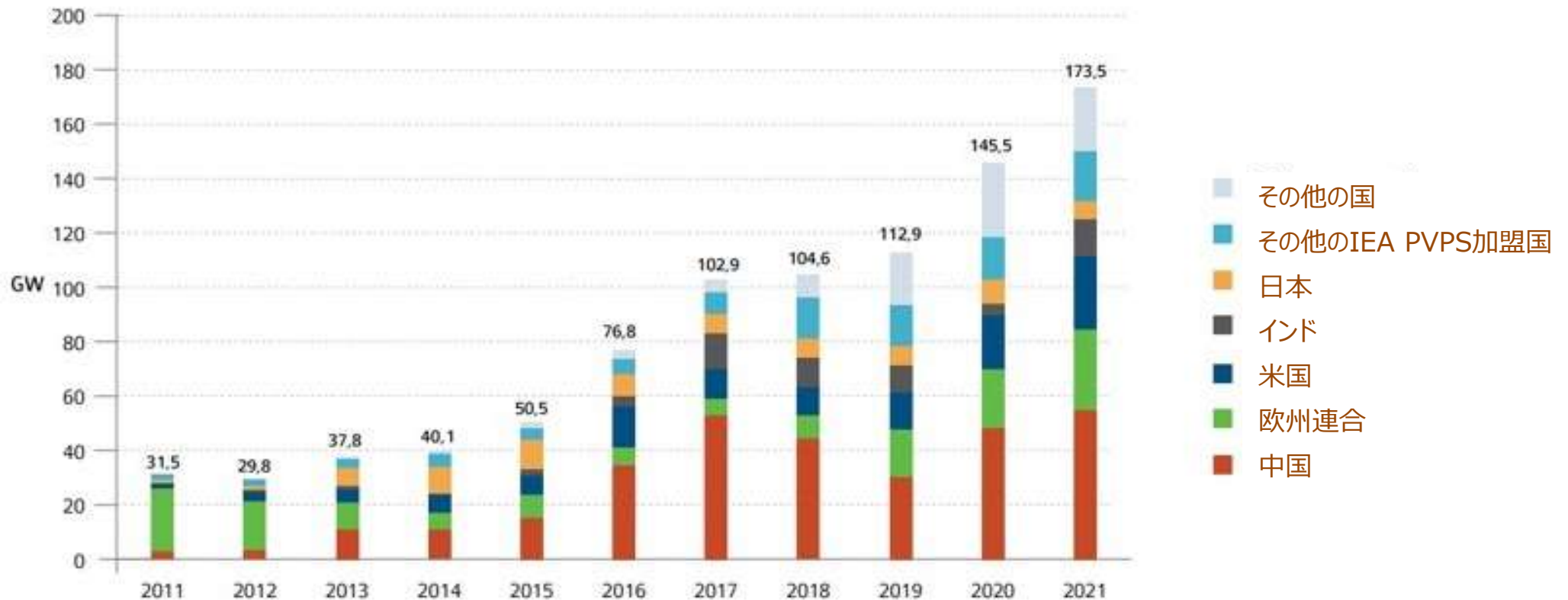


Task1による太陽光発電市場の分析：累積導入量の推移



- 2021年末時点での累積導入量は945GW。2022年上期には1TW = 1,000GW達成
- 欧州が太陽光発電市場の拡大に2000年代から2010年代前半に大きく貢献（スペイン、ドイツ、イタリア及びその他の市場）→リサイクルやリパワリングの取り組みが開始されている
- その後、中国市場の拡大によりアジア太平洋地域が主導（中国、インド、日本、オーストラリア、韓国など）
- 米州市場もアジア太平洋に続いて成長基調
- 中東及びアフリカ市場の成長が開始

年間導入量の推移



- 2021年の導入量は174GW
- 太陽光発電の設置容量は、AC及びDC（太陽電池容量）で報告されているケースがあり、PVPSでは、DCに統一して導入量を分析
- 日本の導入量については、固定価格買取制度の稼働量（AC）及びその他の導入量を分析して報告

年間導入量トップ10国（2019～2021年）

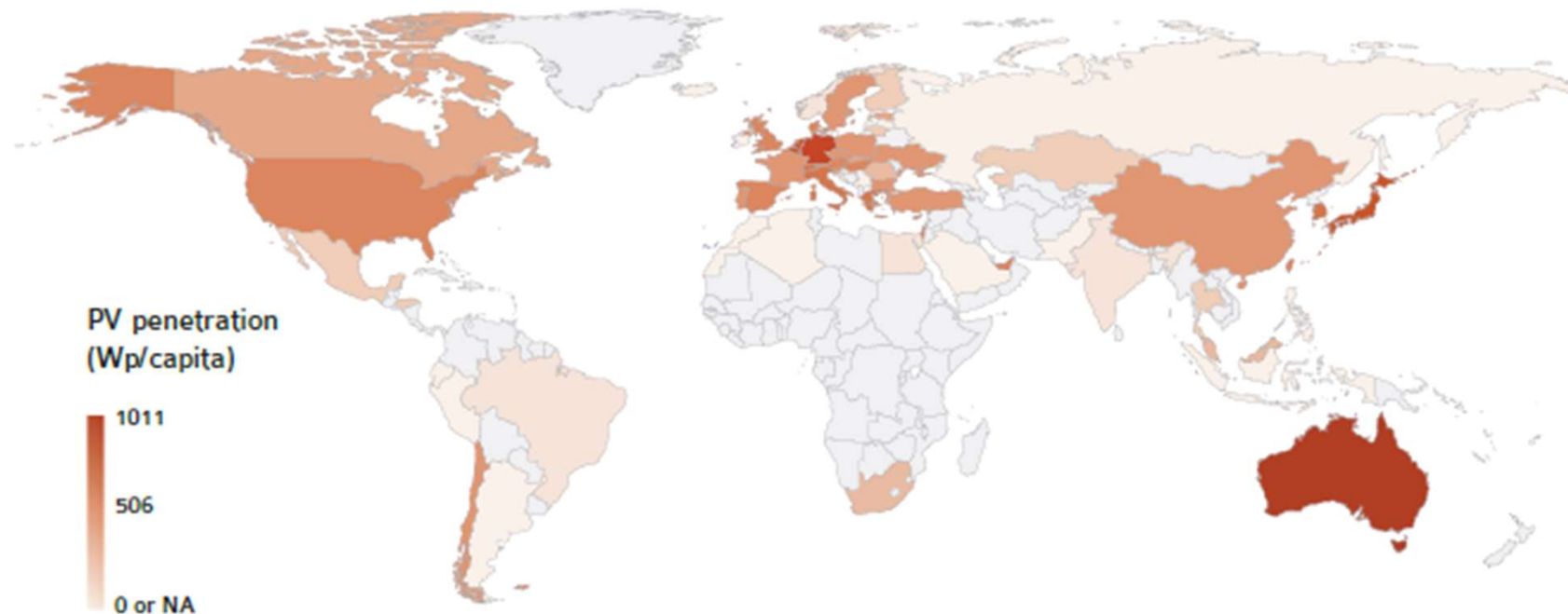


順位	2019年		2020年		2021年	
	国名	導入量 (GW)	国名	導入量 (GW)	国名	導入量 (GW)
1	中国	30.1	中国	48.2	中国	54.9
2	米国	13.27	米国	19.7	米国	26.9
3	インド	9.9	ベトナム	11.0	インド	13.7
4	日本	7.0	日本	8.7	日本	6.5
5	ベトナム	4.8	インド	5.0	ドイツ	5.8
6	オーストラリア	4.76	ドイツ	4.9	ブラジル	5.7
7	スペイン	4.75	オーストラリア	4.5	オーストラリア	4.9
8	ドイツ	3.83	韓国	4.1	スペイン	4.9
9	ウクライナ	3.5	スペイン	3.5	韓国	4.2
10	韓国	3.13	オランダ	3.0	ポーランド	3.7

太陽光発電の普及状況 2021年のハイライト



PV PENETRATION PER CAPITA IN 2021



2021年に42ヶ国が
累積設置容量で少なくとも

1 GWp

を達成

1人当たりの太陽光発電システム設置容量

- | | | |
|----|------------|----------|
| 🇦🇺 | 1位 オーストラリア | 1,011W/人 |
| 🇳🇱 | 2位 オランダ | 818W /人 |
| 🇩🇪 | 3位 ドイツ | 718W /人 |
| 🇯🇵 | 4位 日本 | 622W /人 |
| 🇧🇪 | 5位 ベルギー | 620W /人 |

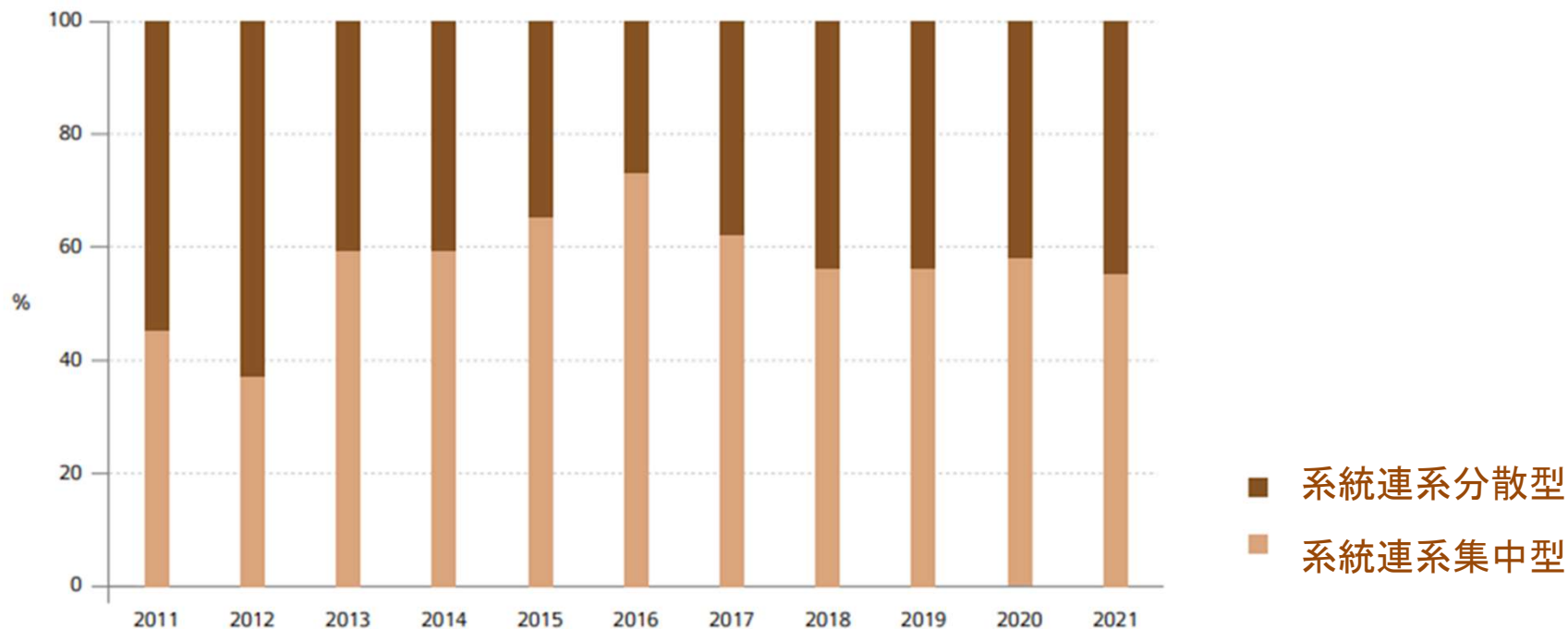
2021年に18ヶ国が
年間設置容量で少なくとも

1 GWp

導入

セグメント別の導入動向

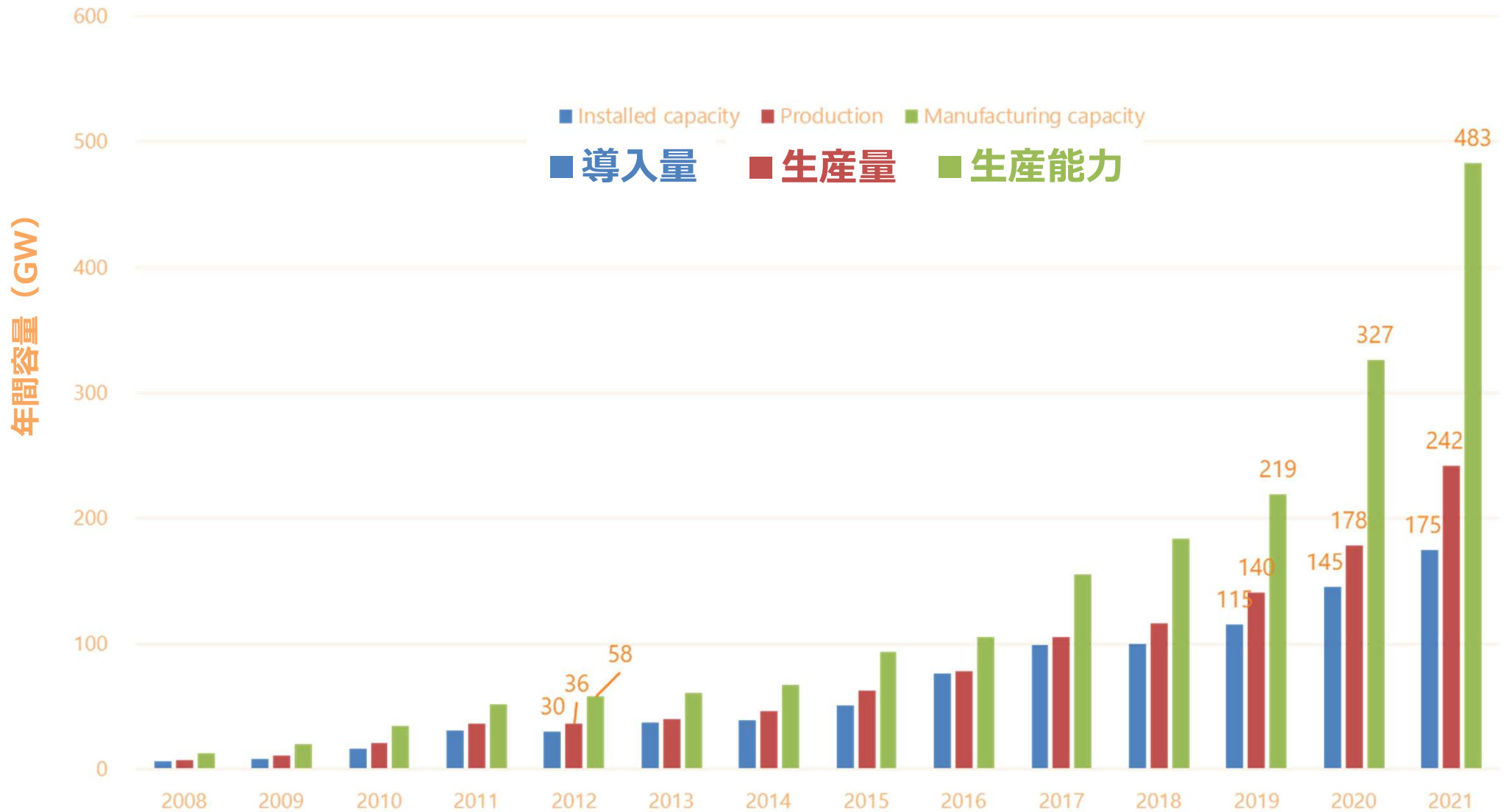
～セグメント別年間導入量(屋根設置(分散型)・電力事業用)～



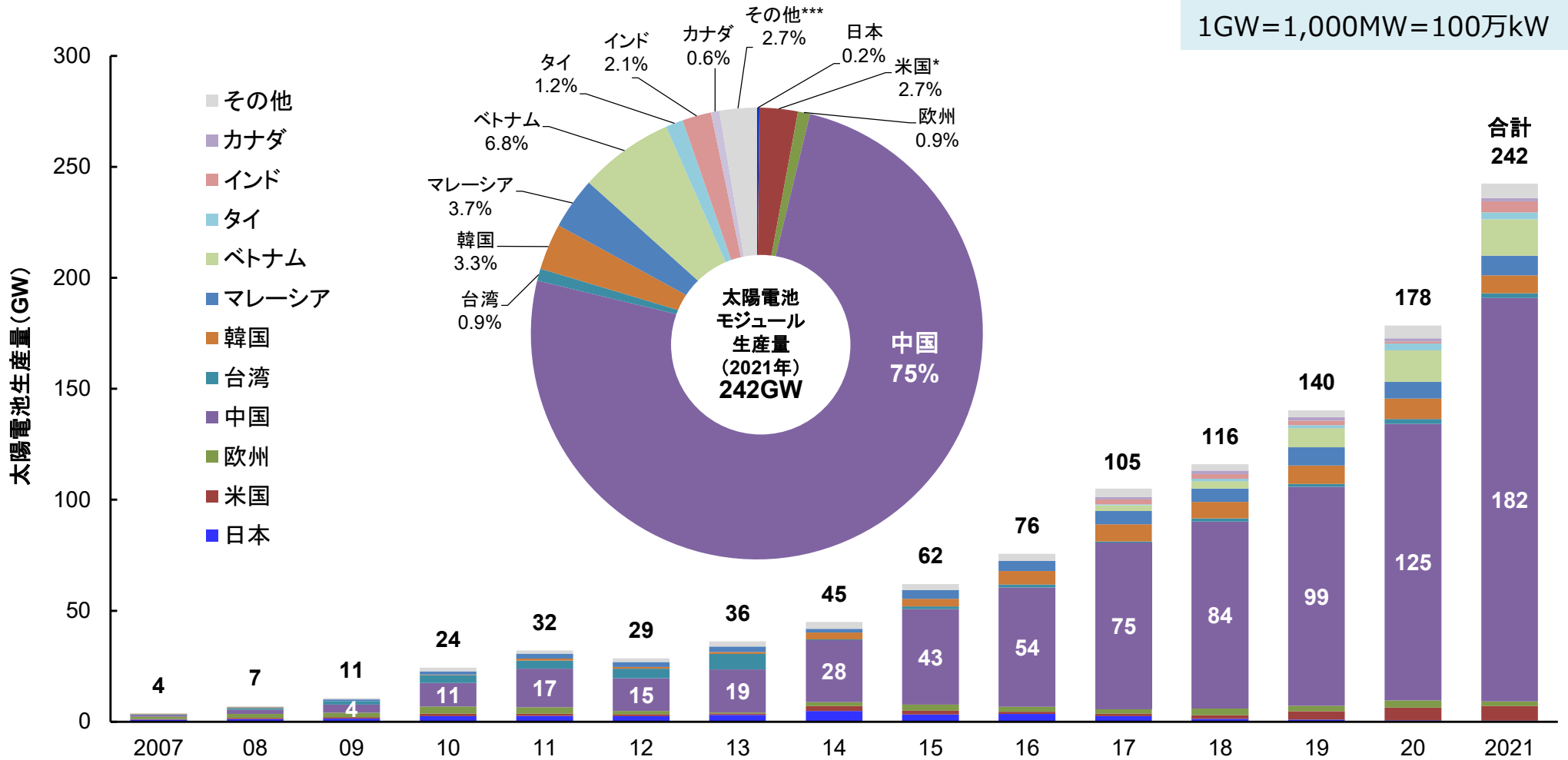
SOURCE IEA PVPS & OTHERS

- 分散型市場が中国、オーストラリア、ドイツ、米国を中心に成長し
- 集中型（電力事業用）は、世界各地で入札制度で拡大。ほとんどが地上設置
- 水上設置、営農型、車載太陽光発電など新たな分野が増えつつある。市場規模はまだ小さい

太陽光発電設置容量・太陽電池生産量・生産能力の推移



世界の太陽電池生産量推移（国・地域別）



* 2013年までは太陽電池セル生産量、2014年からは太陽電池モジュール生産量で集計

**米国は2013年までは米州

***韓国、マレーシア、カナダ、インドは、2013年以前は「その他」に含まれる

- 世界の太陽電池生産量は、市場での需要増加に加え、中国メーカー各社が増産したことにより2021年は前年比36%増の242GWに増加、全体の75%が中国（182GW）で生産された
- ベトナム、マレーシア、タイなど東南アジアや、市場拡大＋国内生産支援政策が実施されているインドでの生産も増加

太陽電池製品のサプライチェーン

結晶系太陽電池は金属シリコンを原料とし、ポリシリコン、結晶シリコン・インゴット、結晶シリコン・ウェハー、太陽電池セル、太陽電池モジュールへと加工されていく。サプライチェーン全体において、中国のシェアが大きな割合を占めている。



ケイ石を還元して製造される金属の一種。ポリシリコンの原料となるほか、有機シリコン（シリコン）、アルミニウム用添加剤、特殊合金の原料でもある。

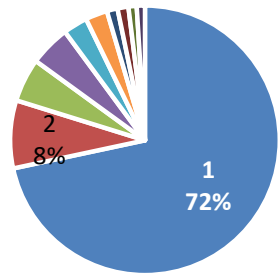
金属シリコンを還元して純度を高めたもの。2020年は中国が世界生産量の76%を占めた。そのうち新疆ウイグル自治区における生産量が約半分を占める。

ポリシリコンを熔融、結晶化させた結晶シリコン・インゴットをスライス・加工したもの。製造工程の違いにより単結晶品と多結晶品がある。中国が生産量の98%を占める。

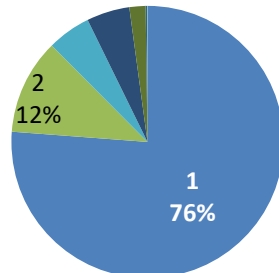
中国が生産量の78%を占める。中国からウェハーを輸出し、マレーシア、韓国、ベトナムなどで太陽電池セルに加工する場合もある。

太陽電池セルを組み合わせ、パネル化した製品。他国で製造したセルを輸入し、加工する場合もある。中国が生産量の70%を占める。

金属シリコン生産シェア (2019年)

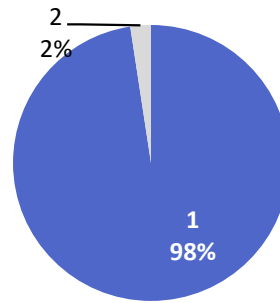


ポリシリコン生産シェア (2020年)



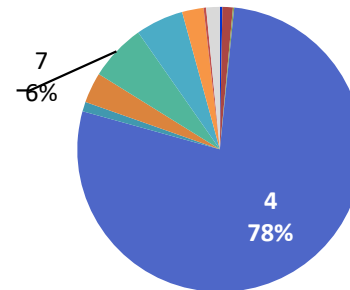
*半導体向けポリシリコン (高純度多結晶シリコン)を含む

結晶シリコン・ウェハー生産シェア (2020年)

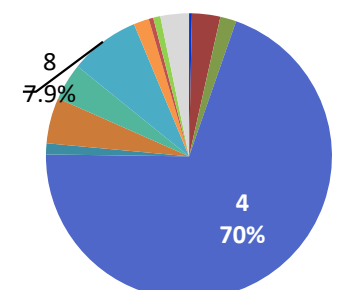


**半導体向けを含まない

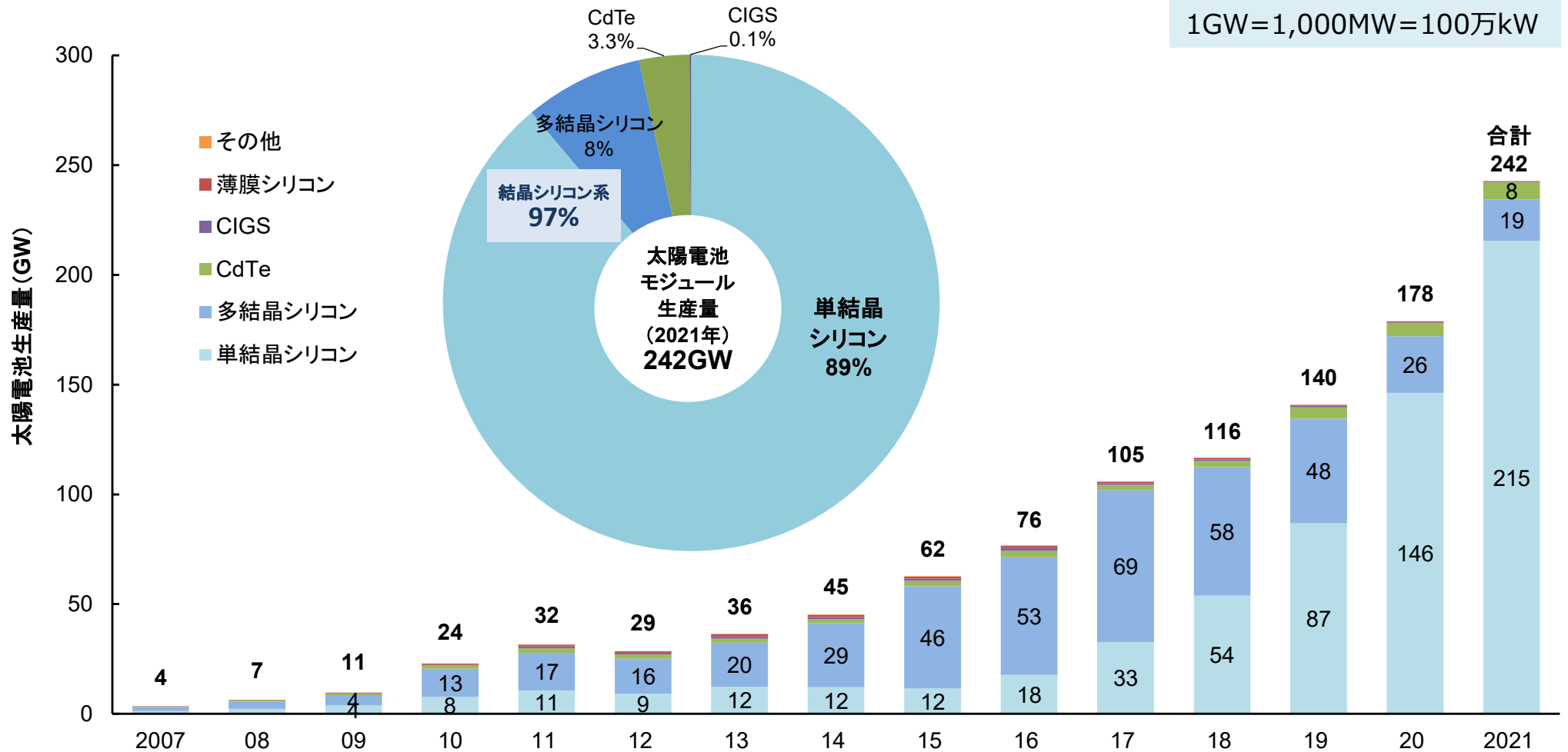
太陽電池セル生産シェア (2020年)



太陽電池モジュール生産シェア (2020年)



世界の太陽電池生産量推移（半導体種類別）

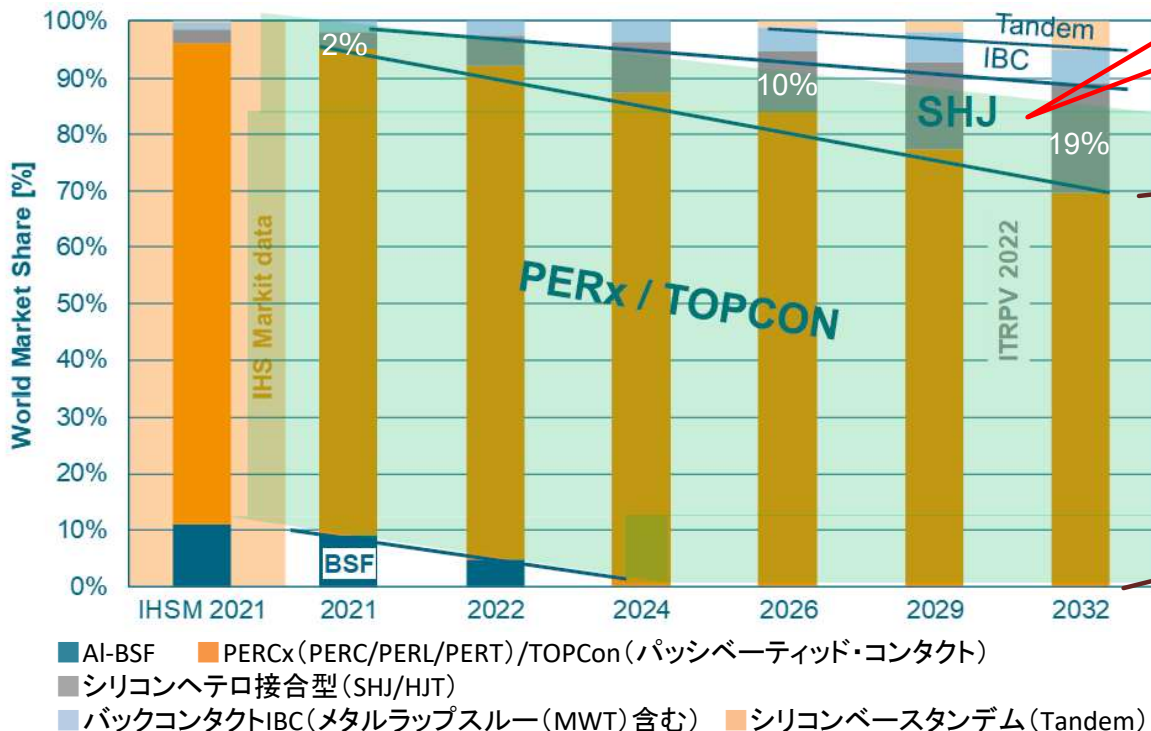


* 2013年までは太陽電池セル生産量、2014年からは太陽電池モジュール生産量で集計

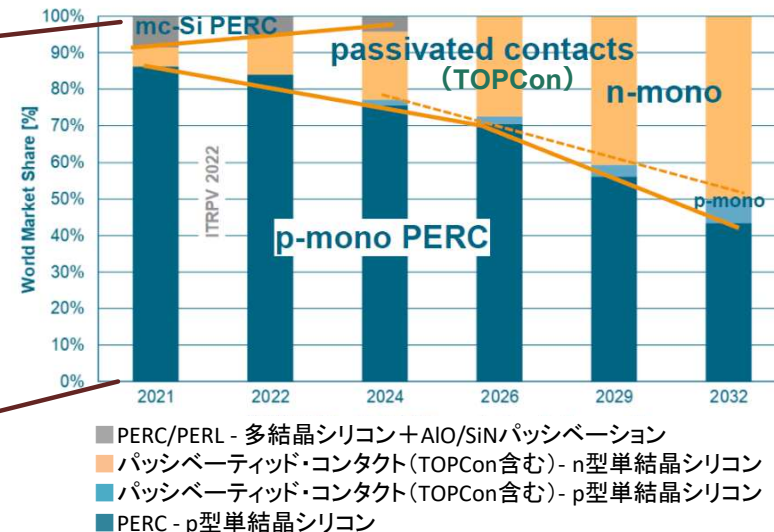
- 2021年の太陽電池モジュール生産量全体の97%が結晶シリコン（236GW）で、単結晶がさらに増加（215GW・89%）
- 薄膜太陽電池は、薄膜シリコン、CdTe、CIGS系が大勢であったが、変換効率伸び悩み、結晶シリコン系とのコスト競争により、薄膜シリコンとCIGSはメーカー各社が相次ぎ事業撤退し減少傾向
- CdTe薄膜は米・First Solar 1社の生産に左右される状況が続いている

結晶シリコン太陽電池セル技術の見通し

結晶シリコン太陽電池のセル技術の見通し



PERx/TOPCon構造の内訳変化の見通し



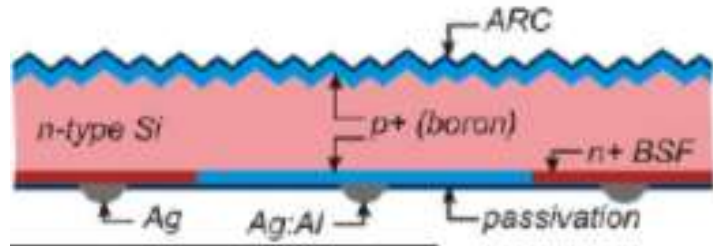
- 太陽電池セル技術では、2013年以降、誘電体層スタックで裏面パッシベーションを使用するセル技術での量産が本格化し、「p型単結晶シリコンPERCセル (p-PERC)」が主流技術となっている
- 今後10年間、PERx (PERC/PERL/PERT) およびTOPCon (パッシベート・コンタクト) 技術の市場シェアが高いまま推移する見通し (2021年実績約85%→2022年90%超→2032年70% (内訳: p-PERC 40%+, パッシベート・コンタクト60%弱))
- シリコンヘテロ接合型 (SHJ/HJT) のシェアが増加の見通し (2021年 約2% → 2026年 10%→ 2032年 19%)
- バックコンタクト型IBCのシェアは大きくは伸びない (2021年 約2% → 2032年 約5%)
- シリコンベースのタンデム型セルは2024~2025年に量産開始の見込み → 2032年 約5%

低コストバックコンタクト型セル「ZEBRA」の使用材料、セル構造、コスト

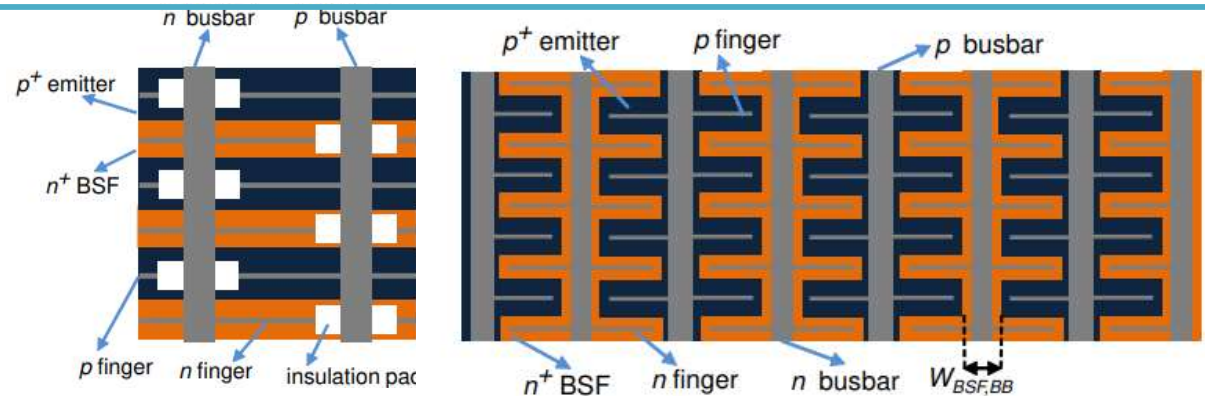
- ・ 独・コンスタンツ大学が開発した量産プロセス使用の低コストバックコンタクト型セル技術「ZEBRA」
- ・ 研究機関の独・ISC Konstanzが量産技術として開発を継続、欧米、中国の一部メーカーで採用（TOPConやヘテロ接合型ほど多くは無い）
- ・ 研究開発セル変換効率24～25%（PERCより1%程度高い）
- ・ 裏面にはnとpのAgまたはAg:Alのフィンガー電極に絶縁パッドが交互に配置され、その上にnとpのAgバスバー電極が交互に配置される
- ・ 欧州で生産した場合のモジュール製造コストは、PERCのコスト低減が進み、ZEBRA-IBCの方が高コストとなるが、販売単価はPERCの2倍弱を維持する

ZEBRA-IBCセル構造

© ISC Konstanz



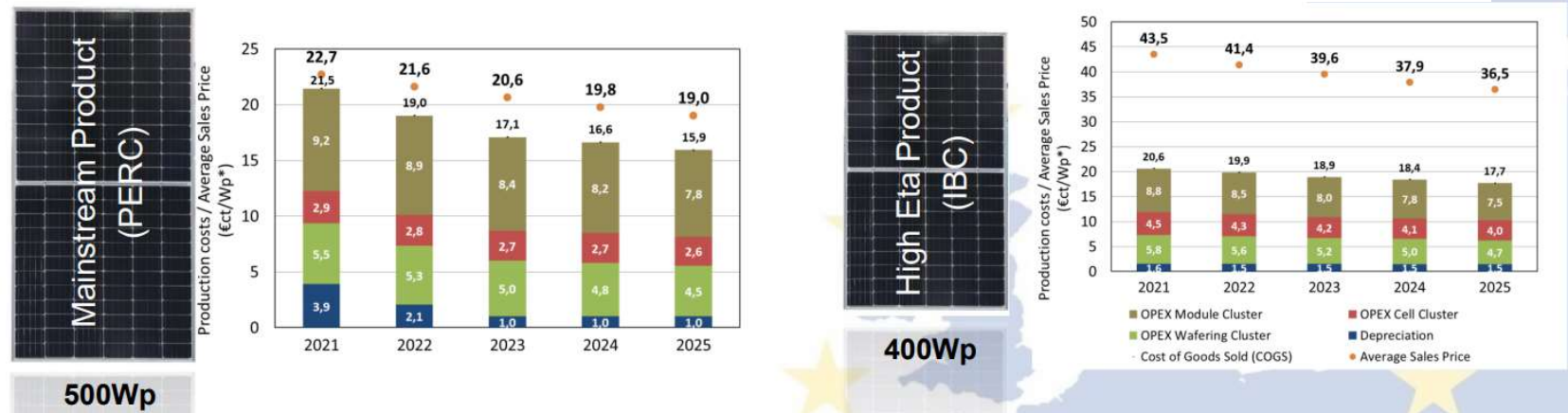
セル断面の概観図



裏面側からの概観図

出典: Valentin Dan Mihailetchi (ISC Konstanz), "A Comparison Study of n-type PERT and IBC Cell Concepts with Screen Printed Contacts" (2015年8月)、Haifeng Chu (ISC Konstanz), "Interdigitated Back Contact Silicon Solar Cells: Metallization and Reverse Bias Characteristics" (2019年4月)

欧州で生産した場合のPERCモジュールとZEBRA-IBCモジュールの製造コストと平均販売価格の見通し



出典: Dr. Peter Fath, RCT Solutions, "5GW+ Green Fab; PV production in Germany / Europe from 2021" (2020年11月24日)

結晶シリコン太陽電池モジュールの高出力化のための技術トレンド



単結晶／
大型フォーマット
シリコン・ウェハー
182mm (M10) /
≥210mm (G12)、
薄型化 ≤160~155μm厚、
p型⇒n型

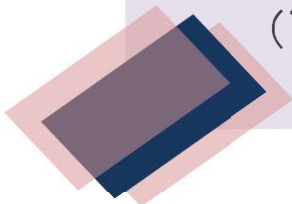
分割セル
ハーフカット1/2、
トリプルカット
1/3...、
ダメージレス・
カッティング

マルチバス
バー (MBB/
SMBB - Super
MBB)
(マルチワイヤ/
スマートワイヤ
(SWCT))

新インター
コネクション
(セルの高密度実装)
Shingle (瓦積み)
/Tiling/Paving/Gapless/narrowed-
spacing



両面発電/両面受光型 (Bifacial)
(両面ガラス、透明バックシート)

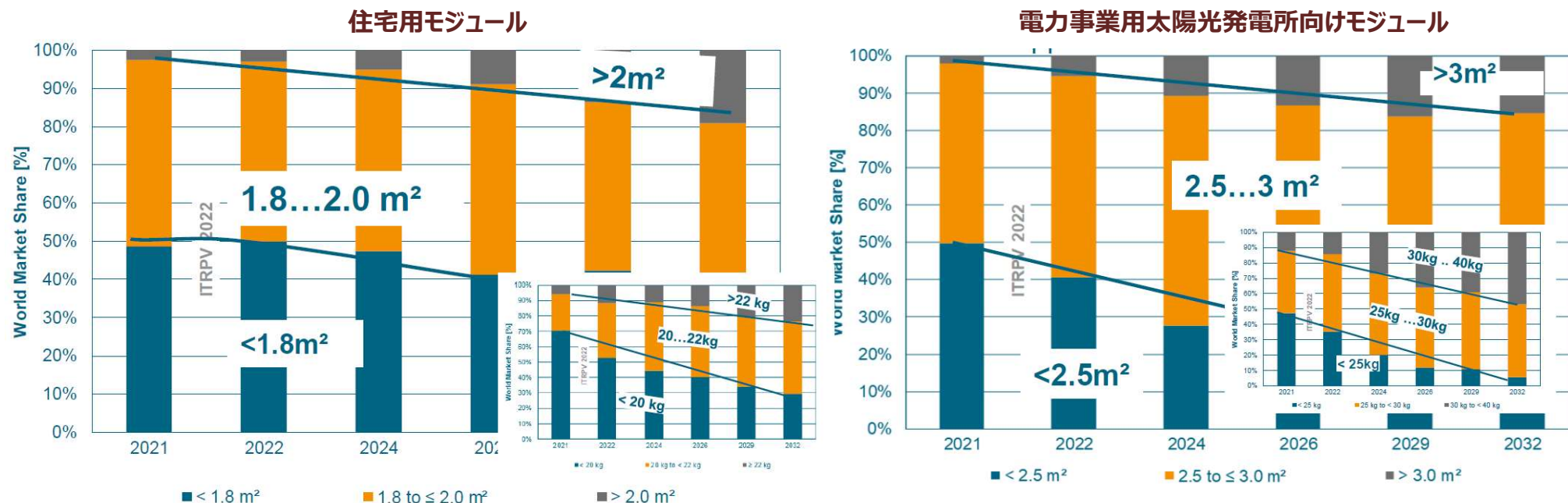


高変換効率セル (ポストPERC)
(ヘテロ接合型 (HJT)、TOPCon、
バックコンタクト型 (xBC)、
タンデム型 (ペロブスカイト/Si or CIGS or
ペロブスカイト、III-V/Si))

モジュール面積と重量の見通し

- 大型ウエハー/セルへの移行により、すべての用途でモジュールの面積および重量は増加傾向となる見通し
- 電力事業用太陽光発電所向けモジュールでは、 2m^2 以下の製品は市場から消え、 3m^2 超の製品が登場する
- 3m^2 を超える出力600W超の大型モジュールが2032年には少なくとも15%のシェアを獲得する見通し
- 電力事業用では大面積化により発電コスト（LCOE）低減が期待されるが、太陽電池モジュール重量の増加による据付コストの増加が課題となる
- 住宅屋根用でも約45%が 1.8m^2 から 2.0m^2 のサイズ（重量は20~22kg）で、今後は 1.8m^2 以下が減少し、10年以内に 2m^2 を超える製品の採用も進み20%程度に増加する見通し
- ただし住宅屋根の面積は今後も変化しないことから、住宅用には特別なフォーマットのモジュール製品が必要になるとみられる

太陽電池モジュールの面積および重量の見通し



出典：ドイツ機械工業連盟（VDMA）、「International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV) 2021 Results – 13th Edition」（2022年3月）

Integrated Photovoltaics (“統合型”太陽光発電)

電力の需要と供給を近づける、生活圏にある限られた場所を効率的に利用する、分散電源化・・・などを目的にさまざまな未利用場所との“**Integrated PV (x-IPV)**”（統合型太陽光発電）がキーワードになっている

建物 (BIPV)

Building-Integrated PV: 1000 GW_p



Road-Integrated PV
(road and rail, noise protection): 300 GW_p

道路・鉄道,防音壁 (RIPV)

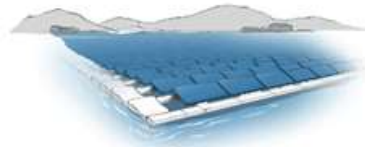


Agrivoltaics: 1700 GW_p

農業・農地 (Agrivoltaics)



Floating PV: 44 GW_p

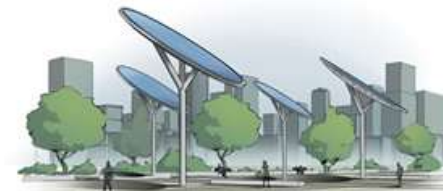


水面・海面 (FPV, Marine PV)

x-IPV

Urban PV (parking spaces): 59 GW_p

都市型 (駐車場,公園等 の公共の場) (Urban PV)



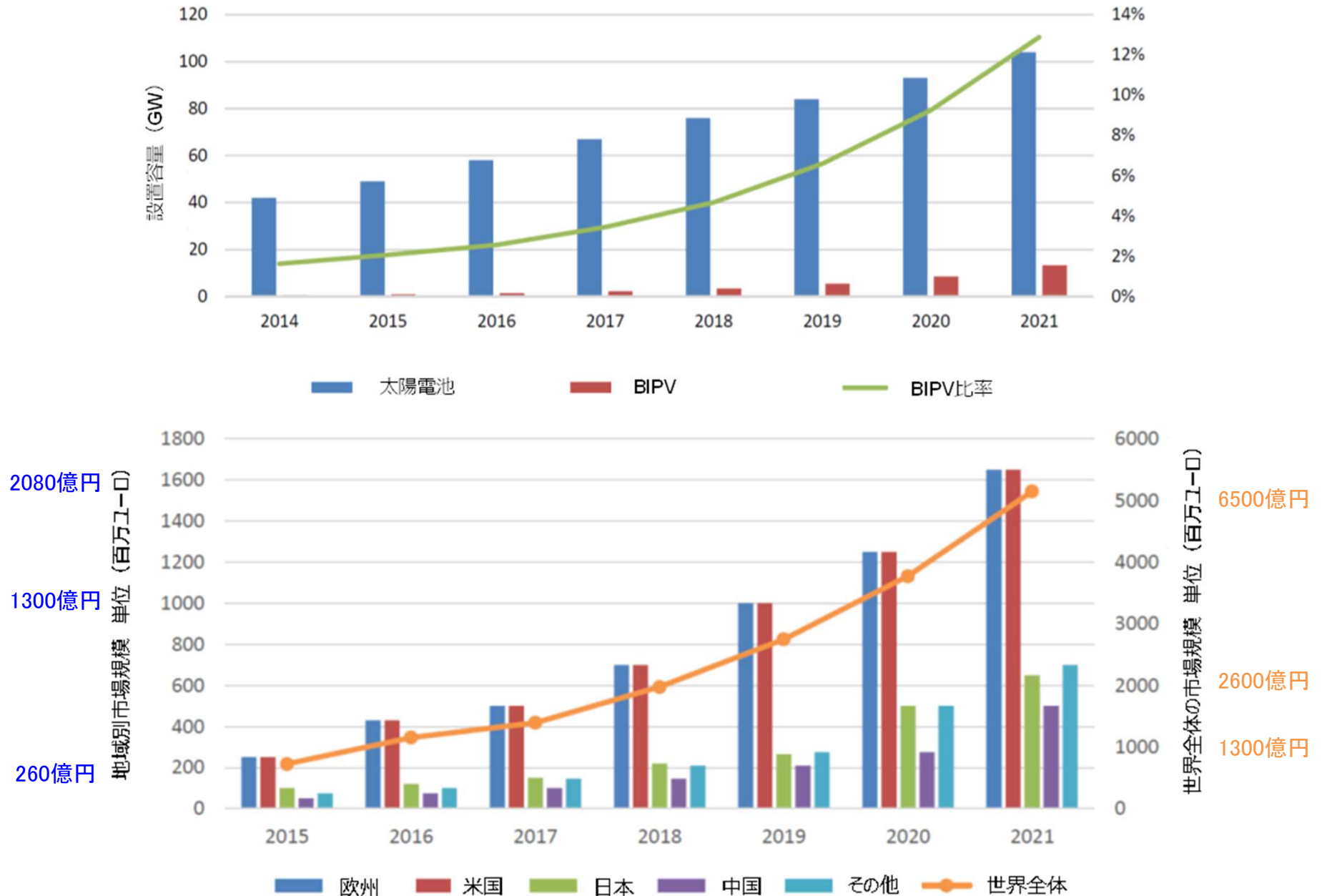
車載 (VIPV)



Vehicle-Integrated PV
(car / truck): 55 GW_p

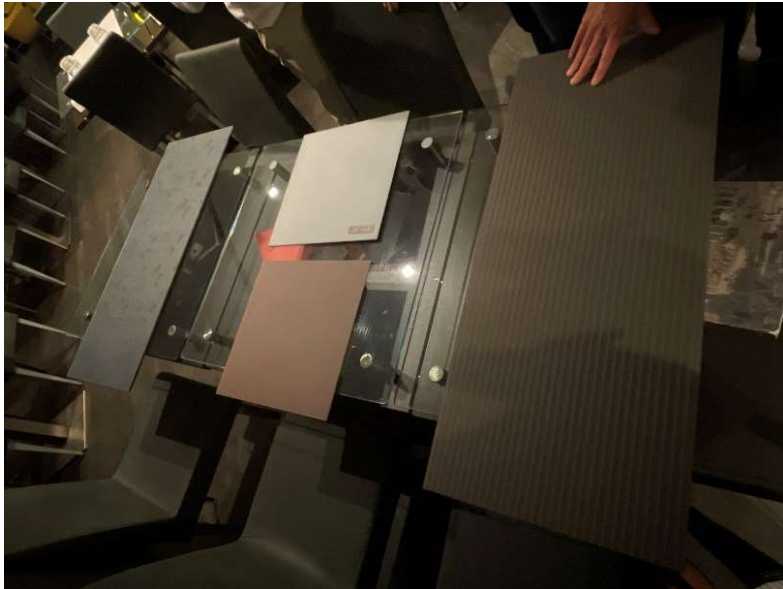
x-IPV;建物一体：BIPVの設置容量・市場規模（世界全体）

設置容量： 欧州・米国を中心に市場が成長し、2021年には10GW超えになると予測



出典： 欧州研究開発プロジェクト「PVSITE」による世界におけるBIPV導入量予測(2016)より作成

x-IPV;建物一体：意匠性を向上させた太陽電池モジュール



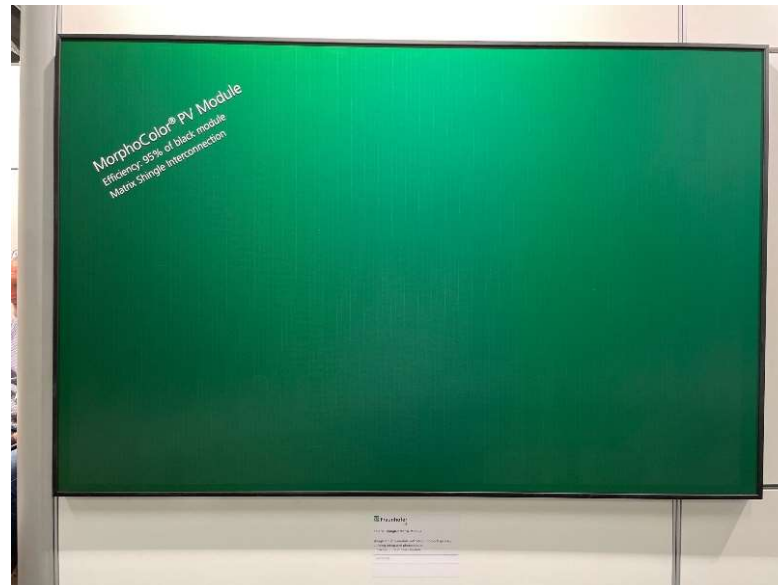
左上：スイス・Sunage SA製の太陽電池に見えない太陽電池モジュール（商品化されているもの）



右上：シンガポール・SERISによる研究開発品。模様による発電性能（FF値）の低下を最小化した太陽電池モジュール



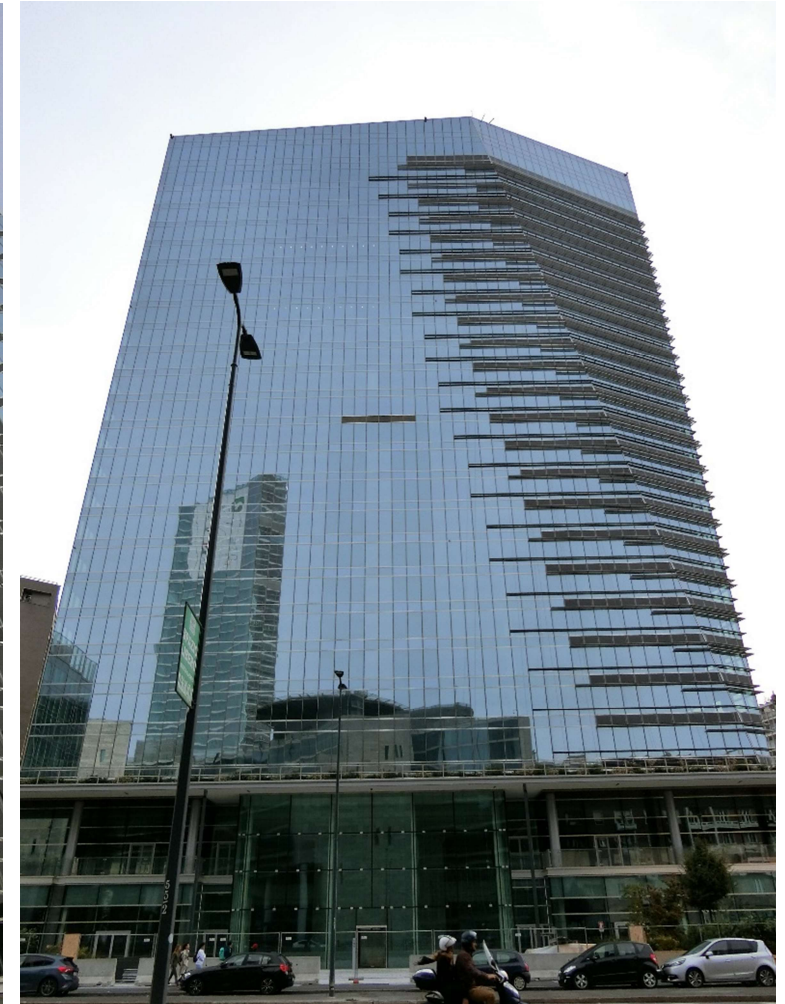
左下：欧州でのCITYSOLRというコンソーシアムでの研究開発品。窓用に透過率を調整でき、模様もつけられる薄膜系太陽用電池。有機系とペロブスカイトのタンデム太陽電池



右下：独・フラウンホーファー研究所による研究開発品。蝶の鱗粉を模して発色させることにより、色をつけても発電性能が低下せず、発電性能と意匠性を両立させる技術

x-IPV;建物一体：海外での導入事例

- 場所：イタリア・ミラノ
- 建設：2017～2022年
- 名称：Gioia22 Building
- 開発：COIMA SRG
- 太陽電池：スペイン・Onyx Solar



- **壁面800kW + 屋上200kW = 1MW** (※世界最大級の建物壁面BIPV)
- 太陽電池面積 5,160 m²
- **Nearly ZEB** (需要電力の65%をPVで供給)
- 26階建て、高さ120m

x-IPV;水上PV : ドイツ・PV2Float 研究プロジェクト

✓ ドイツ連邦経済エネルギー省・第7次エネルギー研究プログラム

✓ 研究開発項目

地域ポテンシャルと立地選定、開発プロセス・マネジメント、信頼性、品質保証、標準化、モジュール開発、試験設備の設置、O&M、大規模プラントの最適化および規模拡大、収益モデル、経済性、持続可能性、環境影響



x-IPV;水上PV：海上太陽光発電（Marine-PV）

- 海上用途に向けたフローティングシステムを複数の企業が開発している
- 既に大型の実証試験やパイロットプラントがスタートしている
- 発電特性や耐久性だけでなく、生物多様性や環境への影響等も研究
- 洋上風力発電とのハイブリッド発電による送電設備の共用
- 東南アジア地域では、既に数十MW規模の洋上太陽光発電が稼働している
- 課題は塩害、構造と係留の波浪対策、送電ケーブル、貝藻類付着の対策、O&M、他



図：Sunseap



Bluewater



Solar Duck



Tractebel

図：オランダ・Deltares



Oceans of Energy

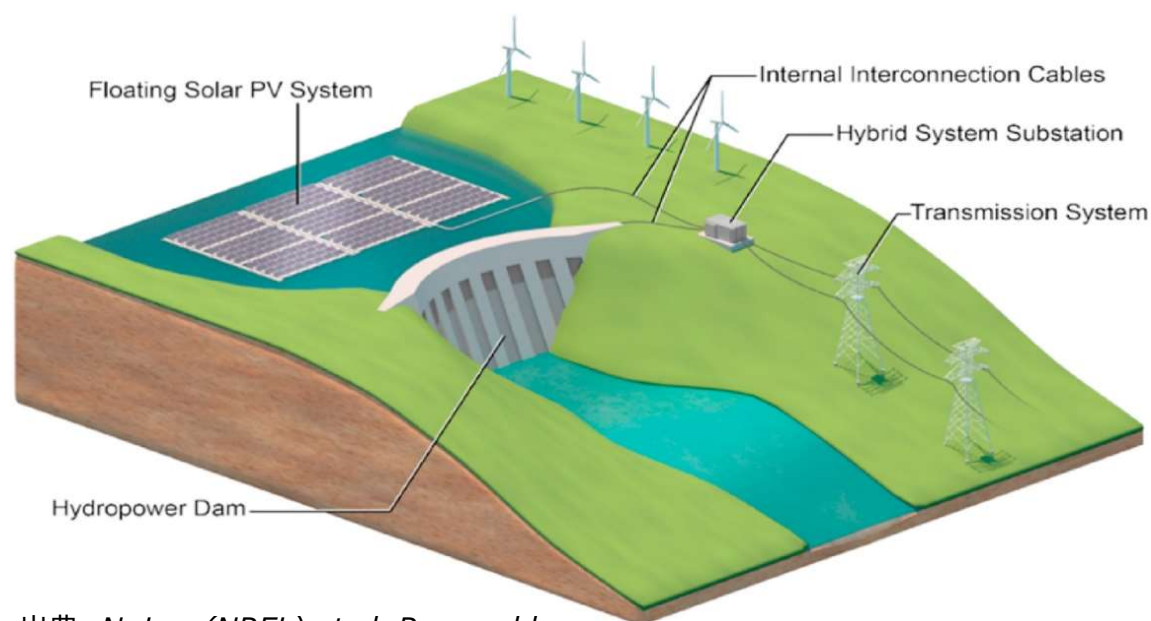
x-IPV;水上PV : 水力発電とのハイブリッド

利点

- ✓ 水力発電ダムの貯水池 = 発電変動調整力(柔軟性)・エネルギー貯蔵
- ✓ (多くの場合)雨季と乾季の補完的な関係
- ✓ 日射条件のよい広大な面積が利用可能
- ✓ (既設の)共通インフラ (場所・電力設備・系統接続・O&M体制)
- ✓ 蒸発による水損失の低減 (用水・水力発電)

課題

- ✓ 水深の深さと変動
- ✓ 水質、他の水利用、環境・動植物への影響
- ✓ 設計・施工、運用、O&Mのノウハウ・標準化
- ✓ ダムの安全性の担保

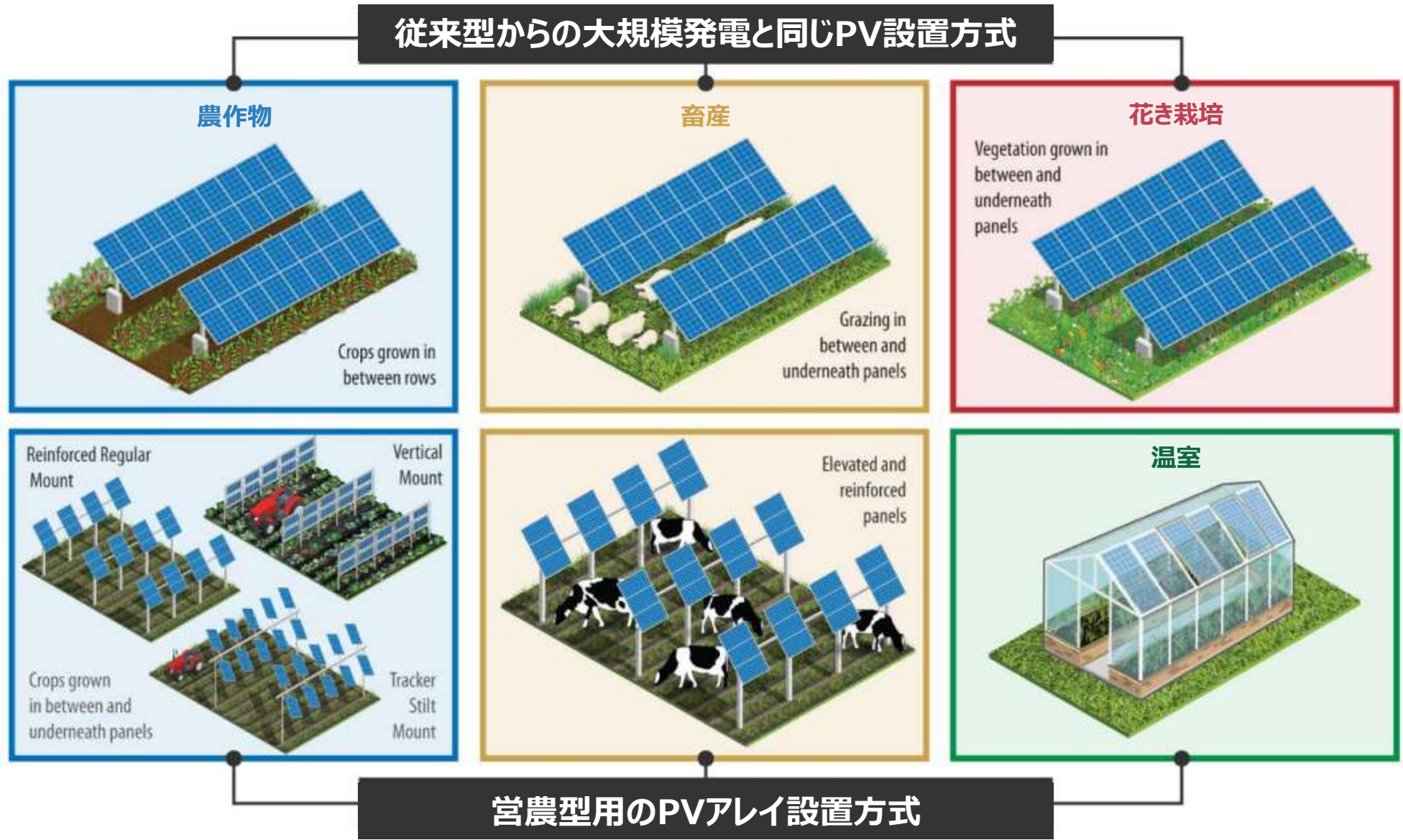


出典: N. Lee (NREL) et al. *Renewable Energy* 162 (2020)

出典: SIEMENS



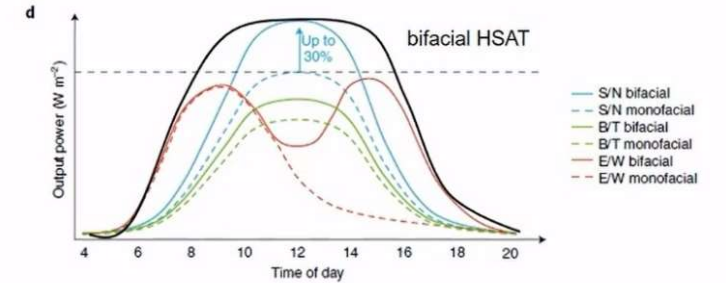
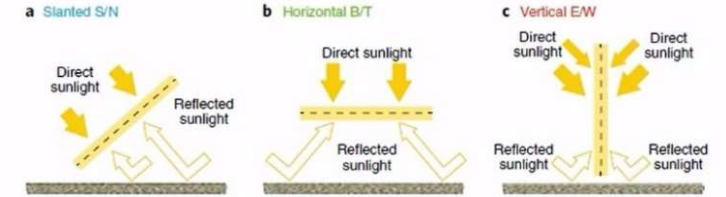
x-IPV; 営農型 : Agrivoltaics



出典 : NREL; The 5 Cs of Agrivoltaic Success Factors in the United States: Lessons From the InSPIRE Research Study

x-IPV; 営農型：農地での垂直両面発電

◆ 農地に両面太陽電池モジュールを垂直設置し、複数アレイの間で営農する。



◆ 養鶏フェンス

x-IPV;営農型：追尾方式

営農型太陽光発電における追尾式の効果

- ✓ 日射調整：下部農地における日射量の最適化、日照の不均一性の改善、強すぎる日射による葉焼けの低減
- ✓ 作物保護：豪雨・冷気・霜・雹・雪、強風といった気象からの保護、雨だれの位置の調整
- ✓ 発電量：追尾による総発電量向上、発電カーブの調整、発電時間のシフト、モジュール設置量の最大化、等
- ✓ その他：汚れ防止、土壌の温度・湿度の調整



出典：フランス・Sun'Agri社

太陽光発電の技術および産業・市場動向調査のまとめ

- 太陽光発電の導入は、2022年には世界全体での累積導入量が1テラワット（1000GW）を超えたと推測され、成長を続けている
- 太陽電池の生産は中国が最大のシェア（75%）を占める状況が続いているが、カーボンフットプリント、人権問題、エネルギーセキュリティ等の観点から、欧米ではサプライチェーンを見直す動きもある
- 太陽電池の種類は結晶シリコン系が97%を占める。セル構造は当面、単結晶シリコンによるPERC系のシェアが高い状況が続くが、2030年に向けてはより高効率なシリコンヘテロ接合型が増加する見通し
- 太陽電池モジュールは各種の高効率化技術を取り込みながら、3m²を超えるような大面積化が進む見通し（出力は600W超え）
- 太陽光発電のアプリケーションは、電力需要の近くでの発電、スペースの有効利用という観点から x-IPV（統合型太陽光発電）が広がっていく
- 建物一体型は欧州・米国を中心に成長している
- 水上太陽光発電は海外では海上・洋上への大規模設置や水力発電とのハイブリッド型が進められている
- 営農型は農業・食糧供給と再エネ利用を両立させるものとして、支援や導入が進められている