環境エネルギー材料学の台本

**案1**

【1. 導入・全体概要担当】（約7分）

近年、地球温暖化の進行や気候変動の深刻化により、二酸化炭素をはじめとする温室効果ガスの排出量削減が急務となっています。その一方で、石油や石炭、天然ガスといった化石燃料は有限であり、価格の変動や地政学的リスクにも左右されやすいため、持続可能なエネルギー源の確保は世界共通の課題です。

このような中で、再生可能エネルギーの導入が進められており、特に太陽光発電は、設置場所の自由度が高く、小規模な家庭用システムから大規模な発電施設まで多様な規模で活用できるという特長があります。

日本国内においては、近年，太陽光発電の導入が急速に拡大しました。また、技術の進歩や製造コストの低下によって、太陽光発電は特別なものではなく、私たちの日常生活に溶け込む身近な存在となっています。今では住宅の屋根や学校、商業施設、さらにはメガソーラーと呼ばれる広大な土地に設置された大規模発電所など、様々な場所で太陽光発電設備を見ることができます。

このように普及が進む一方で、太陽光発電のさらなる展開に向けては、いくつかの技術的・材料的課題も明らかになってきています。たとえば、太陽光発電は自然条件に依存するため、天候や昼夜による発電量の変動が避けられず、電力系統との調整が必要になります。また、太陽電池の変換効率には物理的な限界があり、効率を高めるための材料・構造の最適化が進められています。

加えて、太陽電池が長期間屋外で使用されることにより、水分や紫外線、気温変化などによる劣化が避けられません。これにより発電性能が徐々に低下するため、耐久性を高める素材や構造の開発が求められています。さらに、使用後のパネルのリサイクルや、原材料として使用されるレアメタルの供給確保といった、資源面での課題も無視できません。

そして、発電された電力をいかに安定的に電力系統に接続し、無駄なく利用するかという観点からは、系統連系の仕組みや制度設計の見直しも重要です。電力品質の維持や需給バランスの調整といった点で、従来の集中型電源とは異なるアプローチが必要とされています。

こうした課題についてそれぞれの現状と解決策について述べていきたいと思います。

【2. 太陽電池材料の高効率化担当】（約7分）

太陽電池の変換効率をいかに高めるかは、太陽光発電技術の根幹をなす課題です。高効率な発電が可能になれば、限られた設置面積でもより多くの電力を生み出すことができます。

太陽電池は、太陽光（光子）を受け取ることで、半導体内部の電子が励起され、電流が生じる仕組みです。このプロセスにおけるエネルギー損失をいかに減らすかが、変換効率向上の鍵となります。

現在、最も普及しているのはシリコン系太陽電池です。特に単結晶シリコン太陽電池は高効率で、研究レベルでは26〜27%の変換効率を記録しています。多結晶タイプは製造コストが低く、広く利用されていますが、単結晶に比べ効率はやや劣ります。

近年注目されているのが、ペロブスカイト太陽電池です。この材料は高い光吸収能力と電荷移動特性を持ち、シリコンよりも低コストで同等以上の変換効率を実現可能です。研究ではすでに25%以上の効率が報告されており、商用化に向けた開発が進んでいます。

さらに、ペロブスカイトとシリコンを組み合わせたタンデム型太陽電池は、それぞれ異なる波長の光を吸収することで効率を最大化でき、理論上は30%以上の変換効率が期待されています。

他にも、CIGSやCdTeなどの薄膜型太陽電池も開発が進んでおり、軽量で柔軟性があることから、建材一体型や移動体搭載型など用途が広がっています。また、ナノ構造や光閉じ込め技術による光の吸収効率向上も重要な技術革新のひとつです。

これらの先端技術によって、今後は太陽電池が屋根や地面だけでなく、壁、窓、衣服、電子機器など様々な場所に組み込まれ、社会のあらゆる場面で活用されていく可能性があります。

こうした高効率な太陽電池を長期間安定的に使用するには、材料の耐久性も重要です。次に、その観点からの取り組みをご紹介します。

【3. 太陽電池材料の耐久性向上担当】（約7分）

太陽電池が高効率であることは重要ですが、それと同じくらい、あるいはそれ以上に重要なのが耐久性です。実際の使用環境では、太陽電池は雨、風、温度変化、湿度、紫外線といった過酷な自然条件にさらされます。

例えば、湿気がモジュール内部に侵入すれば金属電極の腐食が起こり、紫外線は封止材や樹脂の劣化を引き起こします。また、温度の上昇と下降が繰り返されることで、材料の膨張・収縮が起き、マイクロクラックが発生して電気的性能が低下します。

このような劣化を防ぐために、以下のような技術開発が行われています：

まず、封止材には従来のEVAに代わり、耐湿性の高いPOEやシリコーン系の材料が用いられるようになっています。これにより、モジュール内部への水分の侵入を大幅に抑制できます。

次に、バックシートは多層構造化されており、耐候性に優れたPETやフッ素系樹脂が使われ、全体の耐久性を高めています。

また、カバーガラスは物理的な衝撃や気候変化に耐えるために強化されており、ARコーティングを施すことで光の透過率を向上させながら保護性を保っています。

最近では、太陽電池モジュールにセンサーを内蔵し、リアルタイムでのモニタリングや故障予知が可能なスマートモジュールの開発も進んでいます。これにより、保守コストの低減や早期修復が可能になります。

さらに、リサイクル性の高い材料や構造の採用も進んでおり、持続可能な社会を支える技術としての進化も見逃せません。

このように、耐久性の向上は太陽電池の信頼性と長期的な経済性を確保するために不可欠な要素です。

次は、発電された電力をいかに社会全体に安定供給していくかという視点で、系統連系の仕組みを見ていきます。

【4. 系統連系の仕組み担当】（約7分）

太陽光発電は分散型電源として優れた特性を持っていますが、発電された電力を既存の電力網にうまく連携させるためには、技術的な工夫と制度的な整備が必要です。

系統連系とは、太陽光発電によって発生した電力を、電力会社の送配電網に接続し、社会全体で利用できるようにする仕組みです。住宅用では低圧、産業用やメガソーラーでは高圧・特別高圧の系統に接続されます。

ここで重要な役割を果たすのがパワーコンディショナー（PCS）です。PCSは、太陽電池が発電した直流電力を商用の交流電力に変換し、さらに電圧・周波数の安定化や最大電力点追従（MPPT）機能により、効率よく電力を系統に送り出すための装置です。

しかし、太陽光発電は天候や時間帯によって出力が変動するため、送配電網にとっては不安定要因になります。これに対して、出力抑制や蓄電池との連携、スマートインバーターによるリアルタイム制御などの対策が必要です。

また、地域内の需給バランスを最適化するためには、エネルギーマネジメントシステム（EMS）や仮想発電所（VPP）の導入も進んでいます。これらは分散化した電源を統合し、需要に応じて最適に運用することを目的としています。

系統連系には設備認定や電力会社との契約といった手続きも必要で、運用上の柔軟性と制度の簡素化が今後の課題です。

続いて、発電された電力の「使い方」に焦点を当て、積極的な活用方法とその課題について考えていきます。

【5. 発電電力の積極利用における問題点担当】（約7分）

太陽光発電によって得られた電力を無駄なく活用することは、再生可能エネルギーの価値を最大化する上で重要です。

従来は、FIT制度により余剰電力を電力会社に売電することで収益を得るモデルが主流でした。しかし、FITの縮小に伴い、自家消費型の運用が注目されるようになっています。

自家消費を促進するために有効なのが蓄電池の導入です。昼間に発電した電力を蓄え、夜間に利用することで、電力の自給率を高めることができます。また、EV（電気自動車）のバッテリーを家庭用電源として活用する「V2H」技術も広がっています。

さらに、地域内で電力を融通する「バーチャルパワープラント（VPP）」や、発電設備を所有する第三者が家庭や企業に電力を供給する「PPA」など、新しいビジネスモデルも登場しています。

これらの活用モデルを実現するには、需要予測、リアルタイム制御、そして柔軟な電力取引ルールといったデジタル技術と制度面の両輪が不可欠です。

以上のように、太陽光発電の利用形態は大きく変化しつつあり、その中で柔軟かつ効率的な電力活用が求められています。

それでは最後に、これまでの話をまとめて、太陽光発電の将来展望を考えてみましょう。

【6. まとめ・質疑応答担当】（約5分）

ここまで、太陽光発電の高効率化、耐久性、系統連系、そして電力利用の観点から、技術的および材料的な課題とその対策について解説してきました。

高効率化に向けては、ペロブスカイトやタンデム型といった次世代太陽電池の開発が進んでおり、変換効率の向上が期待されています。

耐久性の面では、過酷な自然環境にも耐える材料や構造の導入が進み、太陽電池の長寿命化と信頼性の向上が図られています。

また、系統連系においては、電力の安定供給と出力変動への対応を両立するため、スマートな制御技術が重要な役割を果たしています。

さらに、発電電力の積極利用においては、蓄電技術や新しい電力契約モデルの登場により、太陽光発電の価値を最大限に引き出す工夫が求められています。

これらの取り組みが連携し、太陽光発電が安定的で持続可能な主力電源として社会に根付くことで、カーボンニュートラルの実現に向けた大きな一歩となるでしょう。

私たちの発表が、皆様の再生可能エネルギーに対する理解と関心をさらに深めるきっかけとなれば幸いです。

ご清聴ありがとうございました。

**案2**

【1. 導入・全体概要担当】（約8分）

皆さん、こんにちは。本日は「**太陽光発電の現状と課題、将来展望**」について、私たちのチームが各自の担当領域からご紹介いたします。太陽光発電は、再生可能エネルギーの中でも最も注目されている技術の一つであり、持続可能な社会の実現に向けて非常に重要な役割を果たしています。

太陽光発電は、太陽の光エネルギーを電力に変換する技術であり、その最大の特徴は、**クリーンで無限のエネルギー源**である点です。太陽光発電を導入することで、二酸化炭素（CO₂）の排出を削減でき、地球温暖化の防止に貢献することができます。また、太陽光発電は他のエネルギー源と異なり、**地域に依存しない**ため、どの地域でも導入が可能で、特に太陽が多く照らす地域ではその発電効率が最大限に発揮されます。

しかし、太陽光発電が普及するためには、いくつかの課題があります。例えば、**発電効率**を向上させるための技術的な革新や、**耐久性**を高めて長期間安定した発電を実現すること、さらには発電した電力をどのように効率的に利用するかといった問題です。

本プレゼンテーションでは、これらの課題に対する解決策や技術革新の最新の動向について、以下の6つのパートでそれぞれ深掘りしていきます。私たちの発表は、太陽光発電の技術的進歩に焦点を当てるとともに、将来の展望を探る内容となっています。それでは、まず「太陽電池材料の高効率化」についてご紹介いたします。

**【2. 太陽電池材料の高効率化担当】（約10分）**

次に、私が担当する「**太陽電池材料の高効率化**」について、詳しくご説明いたします。

太陽光発電の効率向上は、技術開発の中でも最も注目されている分野の一つです。**太陽電池材料の効率**が高ければ、少ない面積でより多くの電力を得ることができるため、コストを削減することができます。また、発電量が多ければ多いほど、発電所の規模を小さく保ちつつ、より多くの家庭や施設に電力を供給することが可能になります。つまり、効率の向上は、太陽光発電の普及に直接的に貢献します。

**2.1 シリコン太陽電池の限界**

現在、最も広く使われている太陽電池は**シリコン太陽電池**です。シリコンは、半導体として非常に安定しており、広く利用されている材料ですが、**物理的な限界**が存在します。例えば、シリコンの太陽電池は、理論的に最大で\*\*約25%\*\*の効率しか達成できません。この制約を超えるためには、シリコン以外の材料を使用するか、シリコンを他の材料と組み合わせる必要があります。

**2.2 新素材：ペロブスカイト太陽電池**

その解決策の一つとして、注目されているのが**ペロブスカイト太陽電池**です。ペロブスカイトは、シリコンと比較して**高効率**であり、製造コストが低いという利点があります。これにより、**より安価に高効率な太陽電池を製造できる**という可能性が広がっています。ペロブスカイトはその特性として、**光の吸収力が非常に強い**ため、薄膜でありながら高効率な発電を実現します。

さらに、ペロブスカイト太陽電池は**柔軟性**を持っており、建物の外装や車の屋根に取り付けるなど、従来の太陽光パネルではできなかった新しい用途に対応できます。

**2.3 タンデム型太陽電池の研究**

また、最近では、**タンデム型太陽電池**の研究が進んでいます。これは、異なる材料を**重ねる**ことで、光の吸収範囲を広げ、効率を向上させる技術です。たとえば、シリコンとペロブスカイトを組み合わせることで、シリコン単独での限界を超えることができるとされています。この技術は、**30％以上の効率**を目指すことができ、今後商業化が進むことで、**より多くの発電が可能**となります。

**2.4 今後の展望**

今後、これらの技術革新により、太陽光発電のコストはさらに低下し、効率も大幅に向上することが期待されます。特に、ペロブスカイトやタンデム型太陽電池が商業化されると、より効率的で安価な太陽電池が市場に登場し、太陽光発電が普及するための大きな推進力となるでしょう。

**【3. 太陽電池材料の耐久性向上担当】（約10分）**

次に、私が担当する「**太陽電池材料の耐久性向上**」について説明いたします。

太陽光発電システムは、**屋外環境に設置される**ため、長期間にわたって使用されることを前提に設計されています。そのため、**耐久性**は非常に重要な要素です。太陽光発電パネルが長期にわたって高い効率で稼働し続けるためには、**環境要因**に対する耐性を高めることが求められます。

**3.1 太陽光発電の耐久性に関する課題**

太陽電池は、日光や紫外線、風、雨、雪など、過酷な環境に晒されることが多いため、**材料の劣化**や**効率の低下**が問題となります。例えば、シリコン太陽電池は長期間使用することで、**表面の劣化**や**内部の結晶構造の変化**が生じることがあります。これにより、発電効率が低下し、最終的には**発電量が減少**します。

また、**湿気**や**塩害**、**熱膨張と収縮**といった外的要因によって、太陽電池の構造が破損したり、**性能が劣化**することがあります。

**3.2 改善策：新しい材料とコーティング技術**

これらの問題に対処するためには、太陽電池の**材料そのもの**の改良が必要です。現在、研究者たちは、**ペロブスカイト材料**の耐久性を向上させるための技術開発を進めています。ペロブスカイトは、従来のシリコンよりも効率的な光の吸収が可能ですが、その耐久性には課題があります。しかし、コーティング技術や新しい合成方法を用いることで、**高耐久性のペロブスカイト材料**が開発されつつあります。

さらに、太陽電池の表面に**特殊なコーティング**を施すことで、紫外線や湿気から保護し、耐久性を向上させる方法が研究されています。これにより、**長期間安定した発電**が可能となります。

**3.3 長寿命化技術と検査**

また、太陽電池の**長寿命化**に向けた技術開発も進んでいます。太陽電池の寿命を延ばすためには、定期的なメンテナンスや、**劣化の兆候を早期に発見**するための自動診断システムが重要です。さらに、耐久性試験の標準化を進めることで、製品が市場に出る前に**一定の品質基準**を満たすことが保証されるようになっています。

**3.4 今後の展望**

今後、耐久性の向上により、太陽電池は**10年、20年、さらには30年**以上の長期にわたって安定した発電を行うことが可能となります。この進展により、太陽光発電システムのコスト効率がさらに向上し、普及が加速することが期待されます。

**【4. 系統連系の仕組み担当】（約10分）**

次に、私が担当する「**系統連系の仕組み**」について詳しく説明いたします。

太陽光発電は、**分散型エネルギー源**として注目されています。これにより、従来の中央集権型の発電所に依存せず、地域ごとのエネルギー自給自足を促進することができます。しかし、太陽光発電を効率的に利用するためには、発電した電力を送電網に組み込む「**系統連系**」の仕組みが重要です。この仕組みがうまく機能しないと、電力供給の安定性に問題が生じ、太陽光発電の普及が進まない恐れがあります。

**4.1 系統連系の基本概念**

「系統連系」とは、**発電所と送電網を接続**することで、電力を需要に応じて供給する仕組みです。発電所は、電力を生成する施設であり、電力を生産してからそれを広範囲に供給する役割を果たします。太陽光発電所もこの一部であり、**直流電力**を生成し、これを**交流電力**に変換して送電網に流します。

この時、太陽光発電の出力は**時間帯**や**天候**によって大きく変動するため、系統全体の安定性を保つためには、適切に調整された連携が必要です。つまり、太陽光発電が発電した電力を効率よく電力網に供給するための**システム**と、それを管理するための**技術的な仕組み**が重要になります。

**4.2 系統連系における課題**

太陽光発電が電力系統に接続される際には、いくつかの技術的な課題があります。特に、太陽光発電の**変動性**や**不安定性**は、系統運用に大きな影響を与える要因です。太陽光発電は昼間にしか発電できず、発電量も天候や季節によって変動します。これにより、発電量のピークと需要のピークが一致しないことが多く、**需給バランス**を保つための技術が求められます。

例えば、夜間には発電ができないため、電力需要を**夜間の再生可能エネルギー**や**蓄電池**で補う必要があります。また、太陽光発電の発電量が急激に減少することもあり、このような変動を迅速に補うための予測技術や**フレキシブルな電力供給**が重要です。

**4.3 系統安定性を確保する技術**

系統安定性を保つための技術としては、以下のような方法があります：

1. **蓄電池**：   
   蓄電池は、発電過剰時に電力を貯め、需要が高まったときに供給する役割を果たします。これにより、太陽光発電の発電量の変動を吸収し、**平準化**することができます。最近では、家庭用蓄電池や大規模蓄電池が普及し、これらを活用することで、系統の安定性が高まります。
2. **スマートグリッド**：   
   スマートグリッドは、電力供給の効率を最大化するための高度な制御技術を駆使したシステムです。デジタル技術を使って電力需要をリアルタイムで監視し、供給を調整することができます。これにより、太陽光発電が不安定であっても、需要に応じた最適な電力供給が実現できます。
3. **需要側管理（Demand Response）**：   
   需要側管理は、消費者の電力需要を調整する方法です。例えば、電力の需給バランスが崩れた場合、特定の地域や施設に電力消費を一時的に減らすように指示することができます。この技術を活用することで、太陽光発電の出力変動に柔軟に対応できます。
4. **電力予測技術**：   
   太陽光発電の出力は気象条件に大きく依存します。そのため、発電量を正確に予測する技術が必要です。最新の**気象データ**や**AI技術**を用いた予測技術により、太陽光発電の出力を正確に予測することが可能となり、供給計画をより柔軟に調整することができます。

**4.4 再生可能エネルギーの未来**

系統連系の技術は、太陽光発電の普及において重要な役割を果たします。特に、再生可能エネルギーの割合が増えるにつれて、系統の**柔軟性**と**調整能力**が求められます。今後、**マイクログリッド**や**分散型電源**の導入が進むことで、より柔軟で効率的な電力供給が可能になります。また、太陽光発電と蓄電池やその他の再生可能エネルギーを組み合わせることで、安定的かつ持続可能なエネルギー供給が実現するでしょう。

**【5. 発電電力の積極利用における問題点担当】（約10分）**

次は、「**発電電力の積極利用における問題点**」についてご説明します。

太陽光発電は、クリーンで持続可能なエネルギー源として非常に重要ですが、その電力をどのように**積極的に利用**するかが、次の課題となります。特に、太陽光発電の**発電量と需要**のバランスを取ることが非常に重要です。

**5.1 電力のピークシフト問題**

太陽光発電は、**昼間**に発電する一方で、夜間には発電できません。これにより、太陽光発電の電力供給が日中に集中し、**電力需要**が高まる時間帯と一致しないことがしばしばあります。このため、昼間に発電された電力を夜間に利用できるような仕組みが必要です。例えば、昼間に発電した電力を蓄電池に貯めて、夜間に使用する方法が考えられますが、蓄電池の**コスト**や**容量**には限界があります。

**5.2 過剰発電の問題**

太陽光発電は、**晴天時**に非常に高い発電量を記録することがありますが、この時に発電された電力を効率よく消費する仕組みが必要です。過剰に発電された電力は、系統に逆流することになり、**送電網の安定性**に悪影響を与える可能性があります。このため、電力需要に合わせて発電量を調整する技術や、余剰電力を効率的に保存・利用する方法が求められます。

**5.3 発電効率と経済性のバランス**

太陽光発電は、天候や季節によって発電量が大きく変動するため、**発電量**と**コスト**のバランスを取ることが重要です。特に、大規模な発電所では、初期投資の回収に時間がかかります。太陽光発電を導入するためには、発電効率の向上と、**コストの低減**を同時に達成する必要があります。

**5.4 社会的な受け入れとインフラ整備**

太陽光発電を**積極的に利用**するためには、社会全体の理解と支援が必要です。これには、**インフラ整備**や**政策支援**が不可欠です。政府の**補助金**や**税制優遇措置**により、太陽光発電の導入が進むとともに、電力利用の効率化が進むことが期待されます。

**【6. まとめ担当】（約10分）**

最後に、今回のプレゼンテーションの内容を**まとめ**ます。

まず、**太陽光発電の材料と効率化**について、効率向上が持続可能なエネルギー供給において重要な役割を果たすことを強調しました。特に、シリコン系材料の進化や、新しい材料技術が登場し、太陽電池の効率化が加速しています。中でも、**ペロブスカイト太陽電池**が注目され、その高効率化が期待されています。

次に、太陽光発電の**耐久性**については、太陽電池材料の劣化メカニズムを理解し、より長寿命な材料の開発が進められていることを説明しました。これにより、太陽光発電システムの運用コストが低減し、長期的に安定したエネルギー供給が可能になります。

続いて、**系統連系の仕組み**に関しては、太陽光発電の変動性に対応するために、**蓄電池**や**スマートグリッド**の活用が重要であることを示しました。これにより、太陽光発電の発電量の変動を平準化し、電力の安定供給が実現します。

さらに、**発電電力の積極利用における問題点**として、太陽光発電のピークシフト問題や過剰発電、社会的受け入れの課題について触れました。これらの問題を解決するためには、技術革新と社会的なサポートが必要であり、インフラ整備や政策支援が欠かせません。

最後に、太陽光発電技術の今後の展望について触れました。特に、バッテリー技術や電力網のスマート化が進むことで、太陽光発電の安定性や効率性が大きく向上し、より広範囲に普及することが期待されています。また、政策支援や投資が増加することで、再生可能エネルギーの普及が加速し、持続可能なエネルギー社会が現実のものとなります。

これらの要素を総合的に考えることで、太陽光発電が今後ますます重要な役割を果たすことが確実であると言えます。

2(海斗のやつ)

それではここから太陽電池材料の高効率化についてじっくり見ていきましょう。現在、世界で最も普及しているのは結晶シリコン型で、市場シェアは九割を超えます。理論変換効率は二九％ですが、量産セルも二五％台に突入し、残された数パーセントの壁を巡って熾烈な微細改善合戦が続いています。核心を握るのは界面と配線と光管理の三点です。まず界面では、PERCが裏面に極薄の酸化アルミニウムと窒化シリコンを積層して再結合を抑えたのに始まり、TOPConが一・五ナノメートルのトンネル酸化膜とリン高濃度多結晶シリコンを重ね、キャリア選択性コンタクトを実現しました。さらにヘテロ接合技術HJTは結晶シリコンをアモルファスで挟み込み、界面欠陥密度を一桁削減、温度係数をマイナス〇・二五％毎ケルビンへ改善します。配線では銀ペーストを細線化したスマートワイヤ接続や銅メッキ細線が主流となり、影による光損失とシリーズ抵抗を同時に削減。光管理ではマイクロテクスチャリングと高反射バックシートでセル内部の光を逃さず、二〇二七年に二七％、二〇三〇年に二八％というロードマップが公表されています。一方、第二の本命として急速に頭角を現したのが有機無機ハイブリッド結晶、ペロブスカイト太陽電池です。二〇一二年当時の効率は一〇％に満たなかったものの、わずか十数年で二六％を突破。薄膜厚は五百ナノメートル以下とシリコンの百分の一なのに、可視光を九八％以上吸収できます。飛躍の鍵は結晶性、界面整合、組成制御の三位一体でした。FAカチオン主体に少量のCsやRbを添加する溶液プロセスで結晶粒をマイクロメートル級へ拡大し、欠陥密度を一〇の十五乗毎立方センチ以下まで抑制。電子輸送層SnO₂をプラズマ処理でOH基修飾し、正孔輸送層NiOxをLiドープすることでエネルギー準位を合わせ、界面での再結合速度を一〇万分の一に低減。さらにヨウ化鉛主体の三次元格子表面にブチルアンモニウム系の二次元層を自己組織化させ、水分と熱による相転移を抑えながらバンドギャップを一・七三電子ボルトに微調整しました。これらの工夫により実験セルでは電圧ロスが〇・三ボルト未満に縮小し、外部量子効率は六〇〇ナノメートル付近で九七％に達しています。製造面ではブレードコーティングやロールツーロール印刷が一分あたり二十メートルの連続成膜を可能にし、軽量フレキシブル基板への応用も一気に現実味を帯びています。そして両者を重ね合わせるタンデム構造が理論限界突破の切り札です。バンドギャップ一・一二電子ボルトのシリコン下部セルの上に一・七電子ボルト級ペロブスカイト上部セルを積層すると、吸収できるスペクトル範囲が大幅に広がり、ショックレーキー・クイッサー限界は四四％まで跳ね上がります。二〇二四年末にはスイスの研究グループが面積一平方センチのタンデムセルで三三・九％、温度六五℃、一千時間の連続照射後でも九二％の出力保持率を報告し、国際エネルギー機関のロードマップを一年前倒しで上書きしました。既存のシリコン生産ラインを活用できるため追加CAPEXは小さく、発電コストは一キロワット時あたり一円台に下がるとの試算もあります。また、シリコン側では表面テクスチャの最適化により入射光を一六％長く光路に閉じ込める「ブラックシリコン」化が進み、プラズマエッチングで形成したナノピラミッドが短波長域の反射を半減させています。酸化層上にシリコン量子ドットを散布するスペクトルコンバーターも試作され、紫外光を可視へ波長変換してさらなる電流増を狙う動きが加速中です。ペロブスカイト側でもスズ置換による鉛削減が進行し、Pb比率を半減したSn–Pb混晶で二三％超を達成、環境規制をクリアしながら高効率を両立する道筋が見え始めました。イオンマイグレーションを抑制するため、界面にアルキルホスホン酸を自己組織化させ正孔輸送層との化学結合を強化する手法では三千時間のライトソーキング後も九五％の性能を保持しています。三接合タンデムも視野に入り、計算上は理論効率四〇％超が示唆されています。こうした研究開発を下支えするのが高速計算材料科学で、第一原理計算と機械学習を組み合わせたスクリーニングにより、一年で数万系統の組成を仮想合成し、最も低欠陥かつ長寿命な候補を短期間で抽出する体制が整いつつあります。