

アグリボルタイックス 農業とエネルギー転換の機会

2020年10月

指針
ドイツ

識語

編集部

フラウンホーファー研究機構 太陽エネルギーシステム研究所
ISE Heidenhofstraße 2
79110 フライブルク (ドイツ)
電話 +49 761 4588-0
www.ise.fraunhofer.de/en

著者紹介

Max Trommsdorff (Fraunhofer ISE)
Simon Gruber (Fraunhofer ISE)
Tobias Keinath (Fraunhofer ISE)
Michaela Hopf (Fraunhofer ISE)
Charis Hermann (Fraunhofer ISE)
Frederik Schönberger (フラウンホーファーISE)
apl.ペトラ・ヘギー教授 (ホーエンハイム大学) サビ
ーネ・ジケリ博士 (ホーエンハイム大学)
Andrea Ehmann (University of Hohenheim)
Axel Weselek (University of Hohenheim)
ウルリッヒ・ボドマー教授・博士 (ヴァイエンステファン・ト
リースドルフ応用科学大学)
Dr. Christine Rösch (Karlsruhe Institute of Technology KIT)
Dr. Daniel Ketzer (Karlsruhe Institute of Technology KIT)
Nora Weinberger (Karlsruhe Institute of Technology KIT)
Stephan Schindele (BayWa r.e.).
Jens Vollprecht, Dipl.-Forestry, Attorney (Becker Büttner Held
Attorneys at Law, BBH)氏。

APV-RESOLAプロジェクトアドバイザーボード

Hans-Josef Fell (Energy Watch Group) APV-RES-OLA プロジェ
クトアドバイザーボード議長
シルヴィア・ピラースキー・グロッシュ (BUND, Friends of
the Earth Germany) フランツ・ペーター (Solar Cluster
Baden-Württemberg e.V.)
アドルフ・ゲッツベルガー教授 (フラウンホーファーISE、研
究所長、退役軍人)。

Ralf Ries (GLS ゲマインシャフトバンク eG)
Manfred Oetzel (州農民組合BaWü) Dr. Florian
Brahms (弁護士、エネルギー法)
Winfried Hoffmann博士 (ASE - Applied Solar Expertise)
Daniel Buhr教授 (University of Tübingen)

Special Thanks

Hofgemeinschaft Heggelbach
Solar Consulting GmbH
Forschungszentrum Jülich GmbH
inter 3 - 資源管理研究所
ライプニッツ農業工学センター (ZALF) e.V. ヒルバーソーラー
社
AMA FILM GmbH

免責事項

本ガイドラインは、太陽光発電の潜在的な可能性について
説明するものである。このガイドラインは、太陽光発電の
可能性について説明し、技術の現状と既存の法的枠組みに
ついての情報を提供します。また、特に農家、自治体、企
業に向けて、その活用のための実践的なヒントを提供して
います。本ガイドラインは完全なものではありません。紹
介されているすべての適用方法は、あくまで例としてとら
えるべきものである。本ガイドラインは細部に至るまで細
心の注意を払って作成されているが、作成に携わった関係
者はその内容に関して一切の責任を負わない。太陽光発電
事業の計画・実施にあたっては、個々の案件を個別に検討
し、必要に応じて技術的・経済的・法的な助言を得ること
が必要である。

2020年10月初版

目次

1.	アグリボルタイクスによる省資源型土地利用	4
2.	データ&ファクト	8
2.1	土地利用競争を緩和する新しいアプローチ	9
2.2	定義と可能性	9
2.3	ドイツの研究拠点	10
2.4	ヘッゲルバッハ研究工場背景と成果	12
2.5	国際開発	14
3.	農業関連	17
3.1	プロジェクト「APV-RESOLA」の研究成果	17
3.2	作物の栽培と選別	18
3.3	経済性とビジネスモデル	22
3.4	農家からの報告	26
4.	技術情報	28
4.1	アグリボルタイクスへの取り組み	28
4.2	モジュール技術	30
4.3	取付構造・基礎	30
4.4	ライトマネジメント	32
4.5	水管理	33
4.6	PVシステム規模	33
4.7	承認、設置、操作	34
5.	社会	36
5.1	市民・ステークホルダーの参画	36
5.2	参画のためのアプローチと方法	37
5.3	成功要因	38
6.	政治・法律	40
6.1	法的枠組み	40
6.2	政治的提言	44
7.	アグリボルタイクスの推進	46
8.	文献・資料	48

序文



Anja Karliczek 連邦教育・研究大臣

写真 : © BMBF/Laurence Chaperon



ユリア・クロックナー
連邦食品・農業大臣

写真 : © CDU Rheinland-Pfalz

読者の皆様へ

気候変動は世界中で起こっており、特に農業分野はその影響を直に受けています。だからこそ、私たちは今すぐ行動を起こし、研究の機会を実現し、食糧安全保障とエネルギーの持続的な供給が両立するような気候保護対策を設計する必要があるのです。

2050年までに気候ニュートラルになることを目指しているのは、ドイツだけではありません。ドイツのEU理事会議長国として策定中の欧州気候法では、この野心的な目標の達成に向けて、EUで初めて共同コミットメントを行う予定です。この目標を達成するためには、再生可能エネルギーの拡大を継続する必要があります。また、土地の必要性と効率的な土地利用も、この文脈で考慮されるべき2つの側面です。

連邦教育・研究大臣および食糧・農業大臣として、我々は密接に連携し、食糧や飼料生産のための土地利用と、再生可能エネルギーによる発電という相反する利益を両立させるための科学的調査や実用的な検証を支援しています。再生可能エネルギーの利用が増え続け、そのために必要な土地も増えているため、この課題はますます困難になってきています。

アグリフォトルタイクス（APV）は、この2つの利用方法を組み合わせることができる有望なコンセプトです。農業と太陽光発電の二重利用は、利用可能な土地の不足を補い、農村地域の持続可能な発展に貢献する可能性を秘めています。農家は、土地の生産性を落とすことなく、新たな収入源を得ることができるのです。

また、この技術により、気候変動に対する農業ビジネスの耐性を高めることができます。
APVモジュールは、過度の日射、熱、干ばつ、雹（ひょう）から保護することができます。暑くて乾燥した夏には、太陽光発電の収益に加え、平均以上の作物収量を意味します。これは、明らかにWin-Winの効果をもたらします。

APV-RESOLA研究プロジェクトの一環として実施された最近の研究では、2018年の暑い夏にまさにこの効果が検証されました。さらに、それほど極端でない夏であっても、発電による収益は、作物の収量がわずかに減少する可能性を補って余りあることが示された。これらの結果は、APVパイロットプラントの実用化への適性を明確に証明するものです。

ドイツ連邦教育研究省（BMBF）とドイツ連邦食品農業省（BMEL）は、すでに2つのアグリフォボルタイクス研究プロジェクトに支援を提供しています。このように、私たちは現場で実証された使用事例を増やし、植物技術をさらに最適化することができます。アグリフォボルタの実用化には、さまざまな栽培・生産方法と組み合わせた経験が不可欠です。そうして初めて、まだ未解決の問題に答え、将来の方向性を定めることができるのです。

このハンドブックは、アグリフォボルタイクスに関する包括的な情報と、現在までの成果や経験を提供するものです。我々は、フラウンホーファーISEとそのパートナー、およびAPV分野の他のプレイヤーの関与を明示的に歓迎します。BMEL と BMBF は、今後もこの技術の研究とテストを続けていきます。

COVID-19のパンデミックは、私たちが直面している課題に対して、よりの的を射た対応をするために、迅速かつ協調的な予防行動が有効であることを明確に示しています。

気候変動が進む中、ここでもスピードが命です。その影響は明らかに顕著です。農業セクターもコミットしているエネルギーと気候の政策目標に到達するために正しいステップを踏むことは、ますます要求が高くなっています。そのためには、さまざまなツールを駆使してこそ、成功につながると確信しています。アグリフォボルタはそのひとつになり得るのです。

Two handwritten signatures in blue ink. The signature on the left is 'Anja Karlic' and the signature on the right is 'Julia Gieseler'.

1. アグリボルタイクスによる資源効率の高い土地利用

ドイツの農業は、耕作可能な土地資源の不足という問題に直面しています。その理由のひとつは、新しい居住地や道路の開発が進んでいることです。しかし、エネルギーの転換期には、太陽光発電のためのより広い面積も必要とされる。土地需要の高まりにより、農地の賃貸料は上昇傾向にあります。アグリボルタイクスは、土地の二重利用により、土地の競合を減らす可能性があります。アグリボルタイク技術は、食料生産のための耕作可能な農地資源を奪うことなく、再生可能な電力を生成します。

農業は、気候変動による大きな問題にますます直面するようになっています。水不足、異常気象、世界的な気温の上昇により、植物や土壌を環境の悪影響から守るための新たな対策が求められています。ドイツの多くの地域の農家は、法的枠組みの条件や経済的な不確実性から、プレッシャーにさらされています。一方では種や水の保護、他方では作物収量の増加や安定化の間で、行動を起こす余地はほとんどない。

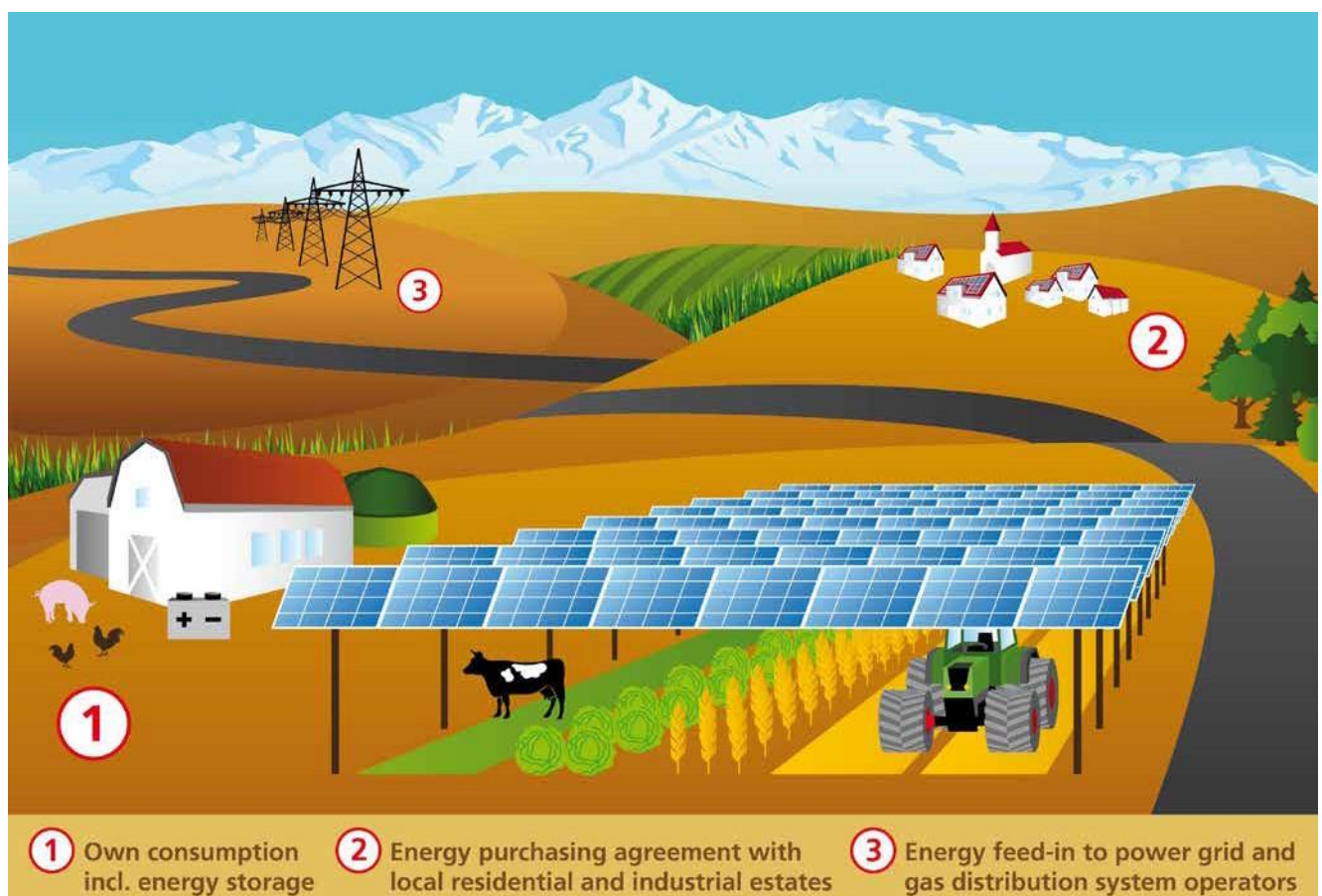


図1：アグリボルタイクシステムの図解。© Fraunhofer ISE

もうひとつの問題は、ドイツだけでなく世界的に土地がますます不足してきていることです。住宅地や商業地、道路などの土地需要に加え、エネルギー転換により農地が求められている。その結果、土地利用競争が起こり、農業の賃貸料が上昇している。特に、肥沃な土壌と温暖な気候によって農業文化に魅力を感じ、高い日射量によって地上設置型太陽光発電システムに適している地域は、その影響を受けている。地上設置型太陽光発電システム用地の需要推移が果たす役割はますます大きくなっています。一方、継続的なコストダウンのおかげで、政府からの補助金がなくても経済的に採算がとれるようになりました。

農業部門は、温室効果ガス、特にメタンや亜酸化窒素（笑気ガス）の最大の排出源の一つとして、より注目されています。そこで、これらの課題をどのように解決していくかが問われています。

2015年のパリ気候会議の決議とドイツ政府の野心的な気候目標の

耕作地の二重利用

耕作地の二重利用もその一つである。アグリボルタイクスとは、大規模な地上設置型太陽光発電システムを農地に設置し、同時に食糧生産に利用するものである。太陽光発電は、長期的には将来のエネルギー供給の重要な柱になると考えられており、その容量を増やすことが必要不可欠だ。フラウンホーファーISE（太陽エネルギーシステム研究所）の試算によると、ドイツの太陽光発電設備容量は、今後、**1.5倍程度に増加させる必要がある。**

また、気候変動に左右されないエネルギーシステムとして、**2050年までに8～10倍の発電量を実現します。**^[1]同時に、アグリボルタイクシステムが提供する太陽光発電の効率的な統合は、植物と土壌を環境への悪影響から守り、気候保護と回復力を高めることができます。

フラウンホーファーISEの創設者であるアドルフ・ゲッツベルガー教授とアーミン・ザストロー博士は、**1981年**に「**Sonnenenergie**」誌（「**Kartoffeln unter dem Kollektor**」（コレクターの下ジャガイモ））で、この土地利用の二元形態を最初に指摘した。^[2]**2014年**、APV-RESOLAイノベーショングループ（「**Agrivoltaics: Contribution to resource efficient land use**」）は、**1980年代**のこのコンセプトを取り上げ、さらなる疑問を解決するために研究を拡大した。連邦教育研究省（BMBF）は、FONA研究プログラム（持続可能な開発のための研究）の範囲内で、このプロジェクトに資金を提供しました。このプロジェクトでは、**2020年**までの現実的な条件下で、アグリボルタイク技術の経済的

、技術的、社会的、生態的側面がパイロットプラントで検討されました。

プロジェクトのパートナーは、フラウンホーファーISE（管理と調整）、ホーエンハイム大学、カールスルーエ工科大学（KIT）の技術評価・システム分析研究所（ITAS）³、BayWa r.e. Solar Projects GmbH、Regionalverband Bodensee-Oberschwaben, Elektrizitätswerke Schönau、およびHofgemeinschaft Heggelbachです。このプロジェクトの目的は、太陽光発電の基礎研究です。アグリバイオ技術の基礎を学び、その実現可能性を示す。

2016年、ボーデン湖畔のヘッゲルバッハにパイロットプラントを設置し、プロジェクトパートナーは同じ土地で太陽光発電と植物の収穫を組み合わせることを検討しました。1/3ヘクタールの耕作地に、設置容量194キロワットピーク（kWp）の二面型太陽光発電モジュール720枚を5メートルのクリアランスで設置しました。2017年と2018年には、土地利用効率が60～84%向上したほか、乾燥期の適応性も向上したことが確認されました。現在、このシステムはさらなる研究に活用されています。

図2：APV-RESOLAプロジェクトパートナー。

ガイドラインの目的

本ガイドラインは、APV-RESOLAプロジェクトの主要な研究成果を示したものである。本ガイドラインは、APV-RESOLAプロジェクトの主要な研究成果を紹介するものである。また、農家、自治体、企業に対して、技術や利用の利点、現状と可能性を概観し、技術利用に関する実践的なアドバイスを提供します。

図3：ボーデン湖にあるフラウンホーファーISEのアグリボルタ研究施設。© Fraunhofer ISE



さらに、このガイドラインでは、成功したアプリケーションの例を示し、ドイツにおけるアグリボルタイクス利用の障害や課題を指摘しています。また、どのようにすればアグリボルタイクスを普及させることができるのか、その提案も行っています。

歴史的経緯

近年の太陽光発電技術の発展は、非常にダイナミックなものです。現在では、世界中のほぼすべての地域で普及しています。設置容量は指数関数的に増加し、**2012年には約5メガワットピーク（MWp）**でしたが、**2020年には少なくとも2.8ギガワットピーク（GWp）**に達するでしょう。このような状況を実現させたのは、**2012年に実施された政府の資金援助プログラム**です。

日本（2013年～）、中国（2014年頃）、フランス（2017年～）、アメリカ（2018年～）、そして直近では韓国です。^[4]

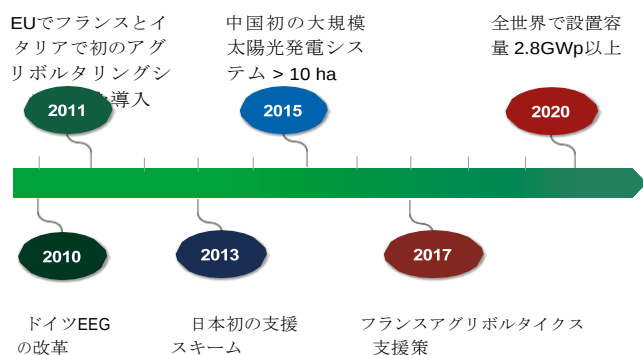


図4：2010年から今日までのアグリボルタイクスの展開。

© Fraunhofer ISE

機会

アグリボルタイク技術は、人口の多い国々で現在起こっている紛争を解消する可能性がある。ただでさえ少ない耕作地を、食糧生産に使うべきか、それとも太陽光発電に使うべきか。世界人口の増加に伴い、食料の需要も増加している。同時に、気候変動の危機を克服するために、グリーン電力発電のための土地も必要とされている。^[6] 農業と太陽光発電を組み合わせたアグリボルタイクスは、エネルギー分野と農業分野の双方にメリットをもたらします。アグリボルタイクスという形で農業と太陽光発電を組み合わせることで、エネルギーと農業の両分野にメリットがある。

土地の利用効率を高めるだけでなく、アグリボルタイクスも可能です。適切な技術設計がなされていれば、レジリエンスと農業収量を増加させることができる。このことが実証されたのが

APV-RESOLAプロジェクト。雹（ひょう）、霜、干ばつなどの被害が増加している果実や特殊な作物には、PVモジュールによる部分的な屋根の保護が有効な場合があります。^[7]

アグリボルタイクス早分かり

- 全世界で少なくとも2.8GWpの設備容量を持つ
- ドイツにおける技術的潜在力の推定値：約1700GWpの設備容量

アドバンテージ

- 地上設置型太陽光発電システムと農業の調和
- 雹、霜、干ばつによる被害からの保護など、農業への追加的な利点が期待できる。
- 小型屋根設置型太陽光発電システムに比べ、低い標準化電力コスト（LCOE）。
- 農家の収入源の多様化

課題

- ゾーニングマップにおける「封鎖区域」としての宣言を避け、アグリボルタシステムを「電気施設/商業区域」ではなく「特別区域：アグリボルタイクス」として特定すること。
- 小型の太陽光発電システム（750kWp未満）に対して、EEGに基づく固定価格制を確立する。
- 大規模太陽光発電システム（750 kWp以上）に対するEEGの革新的入札を、基準に基づき確立する。
- BauGBの特権。認可プロセスを簡略化するため、土地利用中立性と典型的な屋外設置に基づき、ドイツ建築基準法（BauGB）第 35 条に従って、太陽光発電システムを特権的なプロジェクトとして分類してく

ださい。

- ドイツでアグリボルタイクスの研究開発プログラムを実施する。
- 農業用太陽光発電システム構築のための非技術的成功要因を分析し、適切な場所を特定するために、市民と様々な利益団体の早期かつ広範な参加を奨励する。

アグリボルタイクスは、太陽光発電と農業の相乗効果として、以下のような更なる可能性を持っています。

- 灌漑の必要性を最大20%削減⁸⁾
- 雨水貯留の可能性
- 風食
- 保護ネットやフویلにPV取り付け構造を使用する。
- 耕作物への光利用を最適化する。
例：PVトラッキングシステム
- 対流を良くしてモジュール効率を上げる
冷却
- バイフェイシャルモジュールの方が高効率。
地面と隣接するモジュール列までの距離

アグリボルタイクスの利用は、地域に付加価値を生み出し、農村開発に貢献することができます。さらに、アグリボルタイクスは、農場で自家消費するための再生可能な電力を生成する機会を提供します。農場で直接使用する太陽光発電は、送電網から高価な電力を購入する必要性を減らすことで電気料金を下げ、農場が第二の財政基盤を確立することを可能にします。

課題導入の障壁

アグリボルタイクスの技術的・経済的な実現可能性は多くの国で証明されていますが、現在の規制の枠組みは、その活用を阻む最大のハードルとなっていると思われます。

の可能性がある。例えばドイツでは、太陽光発電と農業のための土地の二重利用は現在法律で定義されておらず、再生可能エネルギー源法（EEG）でも十分な補償が規定されていない。ドイツの法的枠組みに関する詳細な情報は、6.1節を参照されたい。

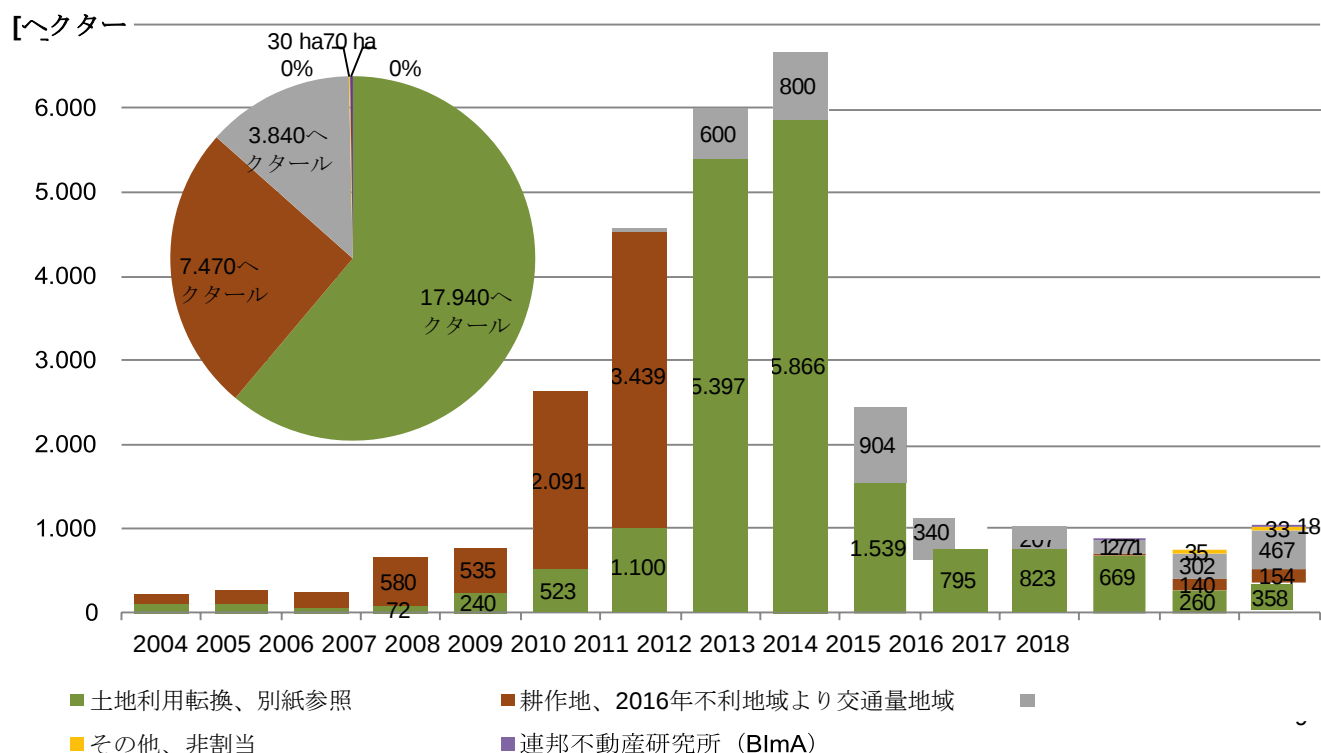
社会的な受け入れは、地域によっては太陽光発電システムの使用にとってさらなる課題となります。そのため、計画されたアグリボルタシステムが建設される自治体の利害関係者や市民を早期に巻き込むことが、このガイドラインの重要な活動分野の一つとなっています。このテーマについては、第5章にて紹介する。

さまざまなアプローチ、考えられるシナジー効果、受容性の問題などについて、より信頼性の高い説明をするためには、最初の大規模なパイロットプラントを設置し、さらに研究プロジェクトを実施することが必要である。そうすれば、生態学的・経済的なチャンスとリスクだけでなく、非技術的・社会的な成功要因もより詳細に検討することができる。同時に、投資意欲を高めるためのアプローチを開発し、プレーヤー、市民、経済企業を勇気づけることができる。

を使い、創造的な解決策を開発する。6.2項では、次のようなガイドを提供しています。

政治的行動の可能な分野

[Hektar]



ソンビュアー・ニット・ズーデン ビー

図 5: ドイツにおける 2004 年以降の地上設置型太陽光発電システムの土地利用、ポートフォリオ合計と年間成長率。¹⁹ © BMWi

2. データ&ファクト

ドイツの気候保護目標を達成するためには、再生可能エネルギーの利用を積極的に拡大する必要があります。ここ数年、太陽光発電は、世界の多くの地域で利用できる最も魅力的で経済的な再生可能エネルギー技術の一つとなっている。さらに、太陽光発電は、他の発電方法と比較して、一般に強く受け入れられています。しかし、太陽光発電は、風力や化石エネルギーに比べ、比較的多くの土地を必要とする。特に、大規模な太陽光発電所では、十分な広さの土地を確保することが困難な場合が多くあります。

太陽光発電システム。例えば、建物や湖、交通路など、人間環境のさまざまな部分に太陽光発電を組み込むことは、土地を多目的に効率よく利用するための一つの解決策です。一方、アグリボルタイクスは、土地の消費を抑えることができる。土地利用の矛盾

エネルギーと食糧の競合から生じる問題を、アグリボルタイクスによって軽減できる可能性があり、利用可能なスペースが限られている地域では特に重要である。

太陽光発電と風力発電は、将来のエネルギー供給における最も重要な柱と考えられている。ドイツにおける太陽光発電のEEG固定価格買取制度は、2000年以降、右肩下がりに移行しています。一方、PVモジュールの価格は、2009年から2019年にかけて一貫して約90%下落しています。そのため、新規の太陽光発電所は、この間、ドイツで最も魅力的な電力源のひとつとなっています。現在、電力の平準化コストは、システムの規模にもよりますが、1キロワット時（kWh）あたり4～9セントの範囲にあります。

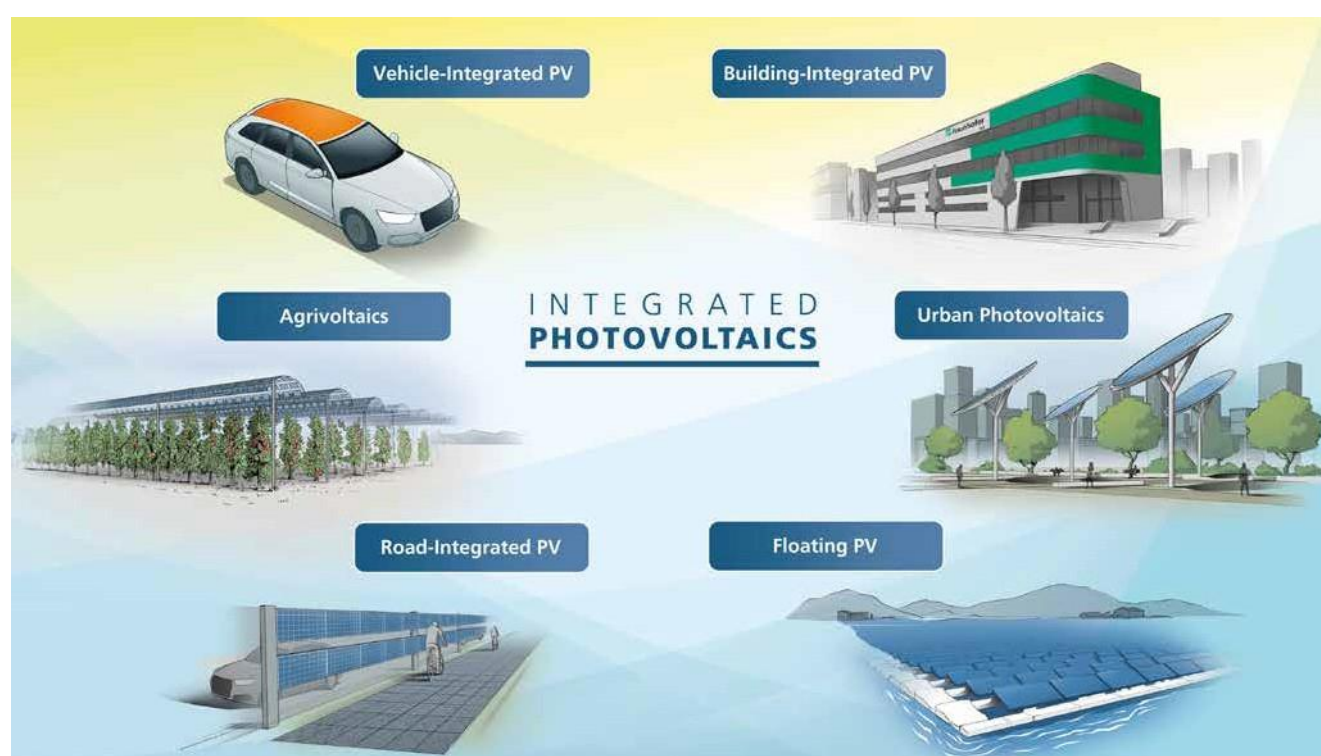


図6：太陽光発電の統合のためのアプリケーション。© Fraunhofer ISE

2020年半ばの時点で、ドイツには約52GWpの太陽光発電設備が設置されています。屋根設置型が約75%、残りは地上設置型である。¹⁹⁾しかし、さらに多くの太陽光発電設備が必要とされている。Fraunhofer ISEの計算では、2050年までに500GWpの設備容量が必要とされている。建物、車、道路、農地、水域、都市の公共空間などに太陽光発電を設置することで、太陽光発電のポテンシャルが高いエリアを確保することができる。

技術的に実現可能なポテンシャルのうち、どれだけが実用的かつ経済的に利用できるかは、経済的、規制制、技術的な制約が複雑に絡み合っている。また、社会的な受容性も重要な役割を果たす。一般に、統合型太陽光発電の平準化された電力コストは、単純で大規模な地上設置型発電所よりも高くなると予想される。一方、統合型太陽光発電は利害の衝突を避けることができる。

相乗効果を実現することができます。例えば、太陽光発電システムは、建物のファサードや防音壁としての役割も果たすことができます。また、太陽光発電を組み込むことで、電気自動車の航続距離を伸ばしたり、耕作地の二重利用を可能にしたりすることもできる。この場合、太陽光発電の付加価値が高ければ高いほど、統合は成功するという原則が適用される。

2.1 土地利用を軽減する新しいアプローチ コンペティション

地上設置型太陽光発電システムの増加により、土地利用の競争が激化する。確かに、EEGの補助金や入札を受けた地上設置型太陽光発電システムは、封鎖区域、転用区域、高速道路や鉄道の沿線、（農業）不利な地域にしか建設が許可されない。太陽光発電の電気代は平準化されている。



図7：地上設置型太陽光発電システム。© Fraunhofer ISE

過去数年間、テイクス（taics）は非常に減少しており、大規模なPVプラントはすでにEEGの入札以外で建設されている。その結果、貴重な農地を守るためのEEGの舵取り効果はなくなってしまった。

耕作可能な土地が限られていることを考えると、土地需要の増大は新たな次元の土地利用競争を引き起こし、経済的、生態的、政治的、社会的対立の新たな構図を生み出す可能性がある。このような背景のもと、今後の土地利用の重要性を議論する。

このようなグローバルな課題を解決するために、ドイツが先駆的な役割を果たすという観点からも、迫り来る目的と価値の衝突を和らげるために、地方を新しい技術の拠点とすることが重要である（ハイテク戦略2025）。

2.2 定義と可能性

アグリボルタイクスは、農業と太陽光発電を同時に行うことができる土地活用法です。同じ土地で食用作物と電気を収穫することができます。動物のためのシェルターを提供するPVモジュールもアグリボルタイクスのコンセプトに含まれますが、従来のPV屋根を改造するための適切なデザインコンセプトがまだここにあります。

地上設置型太陽光発電システムと同様に、農業用太陽光発電システムも、剛体設置型と1軸または2軸の太陽追尾型のいずれでも実現できる。このような追尾型システムは、農業と発電の両方において、より柔軟な光管理を可能にします。フラウンホーファーISEは、ドイツ標準化機構DINおよび科学・産業界のパートナーとともに、現在アグリボルタイクスの標準的な定義に取り組んでいます。

2021年3月までに規格の発行が予定されています。

農業に太陽光発電を取り入れるための技術的なアプローチは、農業そのものと同じように多様である。大まかには、「農地」、「草地」、「温室」に分類することができる。永年作物や一年草・多年草などの栽培植物を用いたアグリボルタイクスでは、一般的に栽培に適応したPVモジュール用の特別な支持システムが必要であり、地上設置型太陽光発電システム用の従来の設置構造-場合によっては

草地でのアグリボルタリングには、一般に小規模な改良が施されたものが使用される。このガイドラインでは、主に「農地」カテゴリー（カテゴリーI）を検討し、野菜、果物、ワイン栽培、耕作地などの特殊な作物への適用を包含している（表1）。恒久的な草地への適用も、それほど

ではないが検討されている（カテゴリーII）。温室のような密閉されたシステムは対象外である（カテゴリーIII）。

表1：アグリボルタイクスの様々なカテゴリーと応用例

#	アグリボルタイムのカテゴリー	事例紹介
I	耕作地 (一年生、多年生、永年作物)	果樹園、ベリー類、ブドウの木、野菜などの耕作地。
II	草地 (永久草地)	牧草地・干草地
II	温室 (閉鎖系での植物育成)	温室、ビニールトンネル

カテゴリーIでは、ガイドラインの一部で、耕作地を永年作物と特殊作物にさらに区別している。これらのサブカテゴリー内でも用途は多岐にわたるが、これによって作物間の最も重要な差異を簡略化して特定することができる。カテゴリーIとIIにおけるさまざまな技術的アプローチに関するさらなる情報は、セクション4.1に記載されている。

高いポテンシャルがある

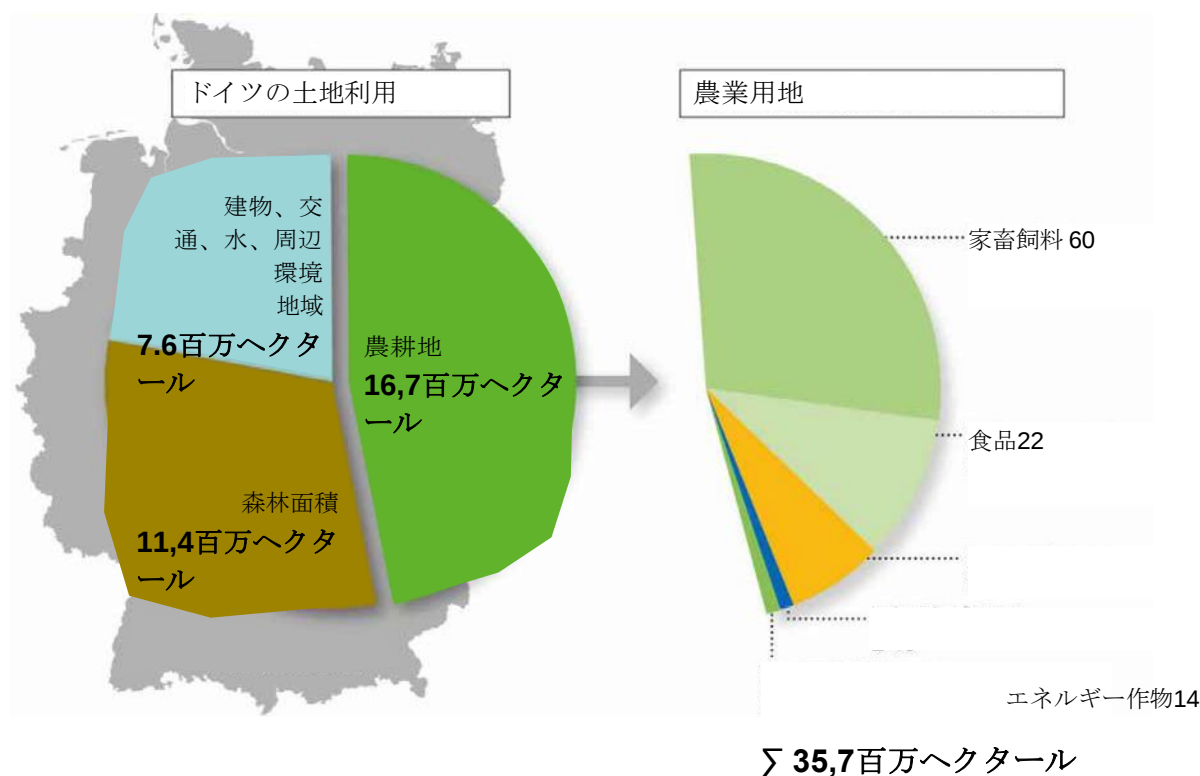
統合型太陽光発電のすべてのアプローチの中で、アグリボルタイクスは最も大きな可能性を秘めている。ドイツの現在の総電力需要（最終エネルギー）をバランスシートでカバーするために必要な耕作地は、わずか4%程度である（約500GWp）。の初期評価によると

フラウンホーファーISE、アグリボルタイクスの技術的な可能性についてドイツだけでも約1700GWpあり、大部分はカテゴリーIの耐陰性作物をベースにしています。この1700GWpのうち10%でも利用できれば、ドイツの現在のPV容量は3倍以上となる。エネルギーの観点からは、耕作地を作物とエネルギーの収穫のために二重利用することは、現在ドイツの農地の14%を占めているエネルギー用の植物栽培だけよりもかなり効率的である（図8）。

2.3 ドイツの研究拠点

現在、ドイツでは3つの研究用アグリボルタシステムが稼働しています。2011年、ヴァイエンステファン・トリースドルフ大学の園芸研究所で、小型のダミー地上設置型システム（南向き）の予備実験が行われました。屋根紙を使用してPVモジュールの遮光をシミュレートし、レタスなどを栽培しました。遮光量の違いや土壌水分の変動により、ダミーモジュール列の直下と北側の遮光エリアでは植物の生育に大きな差が生じた。実務では不向きと思われる結果。

その後、2013年に東西に追尾式のモジュール列を持つ実際のアグリボルタシステム（下記模式図参照）が建設されました。このトラッキングシステムにより、アグリボルタシステムが引き起こす過剰な日陰の問題が緩和されました。



業	工	用原材料	2 % 非生産的土
		地	2 %

図8 ドイツの土地配分© Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. 連邦統計局、BMEL (2017) による。^[4]

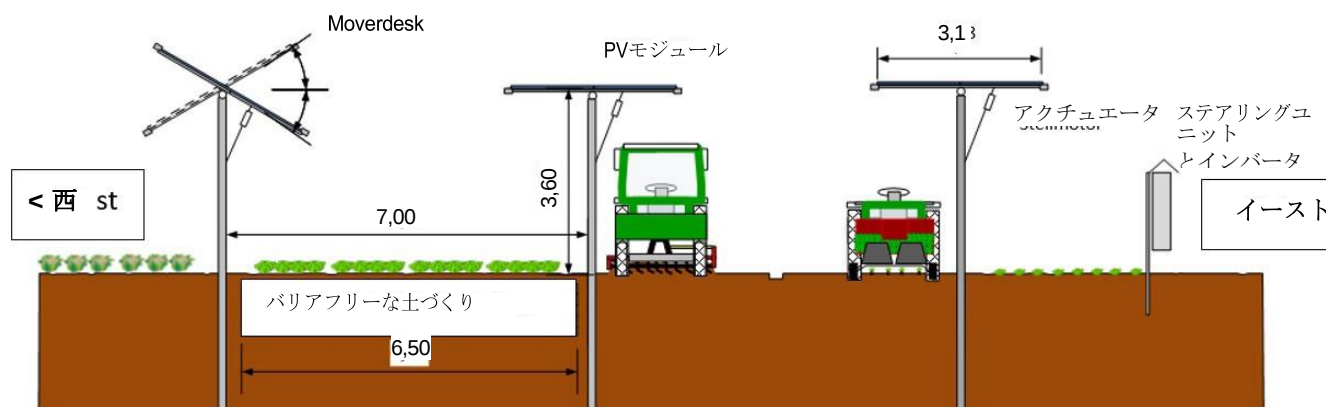


図9：ヴァイエンシュテファンのアグリボルタイプの発電所の断面図。© 2020 B. Ehrmaier, M. Beck, U. Bodmer

システムの技術データです。

面積: 21×23m=483m²。

ムーバーデスク: 3,2×21m×30モジュールあたり 3個
1.6m²あたり

トラッキング 東西方向、カレンダー制御

PVモジュール: CSG 245Wp、200Wp/m² (平均
値)、245Wp×90=22kWp、45Wp/m²
(平均値)。

生産量/a: 約35.000kWh

用途: 自家消費、補助金なし

植物の収穫量に対する太陽光発電モジュールの影響を調査しました。例えば、レタス (Lollo Rosso) の試験では、PVチューブの下での収量は、アグリボルタシステムを導入していない基準植物の収量よりも15%未満低くなった。このように、少なくとも日陰に弱い植物については、このようなモジュールでアグリボルタイクス利用の新しい展望が開ける可能性があります。完全な評価のためには、平準化された電力コスト (LCOE) を、植物生産から得られる利潤 (副産物として言及される) を考慮して検討する必要があります。

モジュール列のモジュール間の距離を変えて、さまざまな遮光量が植物の収量に与える影響を調べ、最高の収量をもたらす最適な距離を特定するための調査が行われている。ハクサイを使った実験では、遮光による収量の減少が29～50%であった。この結果は、遮光の度合いによって異なり、次の表に示すとおりです。

太陽光発電システムによる作物収量減少の原因として、システム建設時の土壌圧縮、モジュール軒下の植物へのダメージが挙げられる (図9)。特に冬場は、軒先に雨どいを設置することで新たな問題が発生し、水平に配置された高架式のチューブ型モジュールの効果が発揮されるようになった。



図10：キャベツの苗の被害状況。

© 2020 B. Ehrmaier, M. Beck, U. Bodmer.

表2：アグリボルタイクスとオープンランドとの植物収量の比較。© 2020 B. Ehrmaier, M. Beck, U. Bodme

モジュール列を密に設置、モジュール間の距離は0cm	25 cmモジュール距離	66 cmモジュール距離	比較のためのシステム外での栽培

アグリボルタイクスによる白菜の平均頭重（2014年）	1348 g 隣接するオープンフィールドでの収量は50%程度	1559 g 隣接するオープンフィールドでの収量が約56%に	1970 g 隣接するオープンフィールドでの収量が約71%に	2762 g
----------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------	--------

、建物の暖房に利用しています。

INFO BOX

- APV-RESOLA研究プロジェクトの詳細については、ウェブサイト (<https://agri-pv.org/en>) でご覧いただけます。ご興味のある方は、アグリボルタイクスのニュースレ

2015年、ヴァイエンステファン大学は、チューブソーラー社とともにドイツで2番目の研究工場を建設しました。ここで研究者たちは、チューブ型PVモジュールの日常的な使用への適合性をテストしました。設置容量は14kWp。ジャガイモとレタスの品種を栽培した。

APV- RESOLAプロジェクト（2.4節）の一環として、2016年にドイツで3番目のアグリボルタ研究プラントがボーデン湖に建設された。

Ulrike Feistel教授・博士が率いるドレスデン近郊のチームは、アグリボルタシステムが土壌の水分供給に与える影響を調査しました。調査した作物は、ほうれん草、豆類、エンドウ豆、チャード、大根です。

2020年、フラウンホーファーIMWはBiWiBiプロジェクトを立ち上げ、種の保存と同時に農業を行うための垂直二面体ソーラーシステムと野草帯の持続可能な相乗効果を、経済的、生態的、受容性の問題を考慮しながら調査しています。^[12]

このような研究施設の他に、ドイツには民間のアグリボルタシステムも存在します。Elektro Guggenmos社は、2008年からバイエルン州のWarmesriedで、ジャガイモ、小麦、ネギをアグリボルタシステムで栽培しています。

2.4 ヘッゲルバッハ研究工場背景と成果

ボーデンセー・オーバーシュヴァーベン地方のヘッゲルバッハにあるデメーテル社の農場が、研究工場の敷地として選ばれたのである。

ホフゲマインシャフト・ヘッゲルバッハGbRは、30年以上にわたって、合計約165ヘクタールの混合農場の有機・動的管理に携わっています。デメーテル農場の背景にあるのは、農場全体を見渡すというホリスティックなコンセプトです。2003年以降、農場コミュニティはエネルギーについて深く考察してきました。自家用も含めたさまざまな太陽光発電システムのほか、スパナー社による最初の本質ガスプラントも稼働している。木質チップを熱エネルギーに変換し

副産物として電力が供給されます。2009年には、その革新的なエネルギーコンセプトが評価され、ドイツのソーラー賞を受賞しています。

2.4.1 サイトの背景情報

ボーデン湖地域は、この地域にある3つの地域のうちの1つである。この地区の再生可能エネルギーの割合は、ドイツの平均を大きく下回っており、2022年には再生可能エネルギーの割合を10%（2013年時点）から26%に引き上げることが目標となっている。その中で最も大きな割合を占めるのが、15%の太陽光発電である。しかし、これは屋上設置型システムだけでは実現できません。^[6]ボーデン湖周辺では、農地や畑の数が非常に限られています。

そのため、新しいアプローチが必要とされています。特に、早い段階から市民を意思決定に参加させることができれば、太陽光発電技術は重要な要素になり得ます。プロジェクトAPV-RESOLAに参加しています。この地域では、代替案である風力発電の可能性は非常に限られています。風力発電は現在、この地域の電力需要のわずか1%しかカバーしていません。これは、アルプスの景観やパノラマを守るための努力によって、社会的な受容度が低いことが原因です。2022年までには、風力発電はこの地域の電力需要の最大6%をカバーできるようになる可能性がある。2022年までに2%の貢献が見込まれるバイオマス発電の利用拡大も、スペース効率の低さ（通常の地上設置型太陽光発電システムに比べ、発電量は約40分の1）、排出量の多さによって限界がある。

バイオガスやバイオメタンでは、発電量1kWhあたりのCO₂換算係数が約2〜3倍高くなる）、また、CO₂換算係数が低下しています。

は、地元住民に受け入れられています。

Heggelbachのアグリボルタシステムでは、冬小麦、ジャガイモ、セロリ、そして草とクローバーの混合植物を試験栽培しました。高さ7mを超える二面ガラスの太陽電池モジュールと南西に配置された太陽電池モジュールの間の畝の距離を大きくすることで、作物の生育を確実にします。

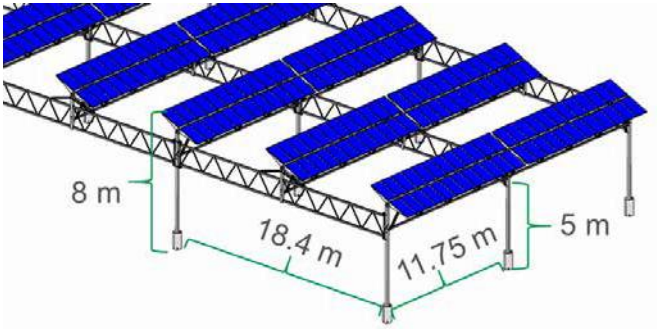


図11：ヘッゲルバッハのアグリボルタイックリファレンスプラントのスケッチ。© Hilber Solar

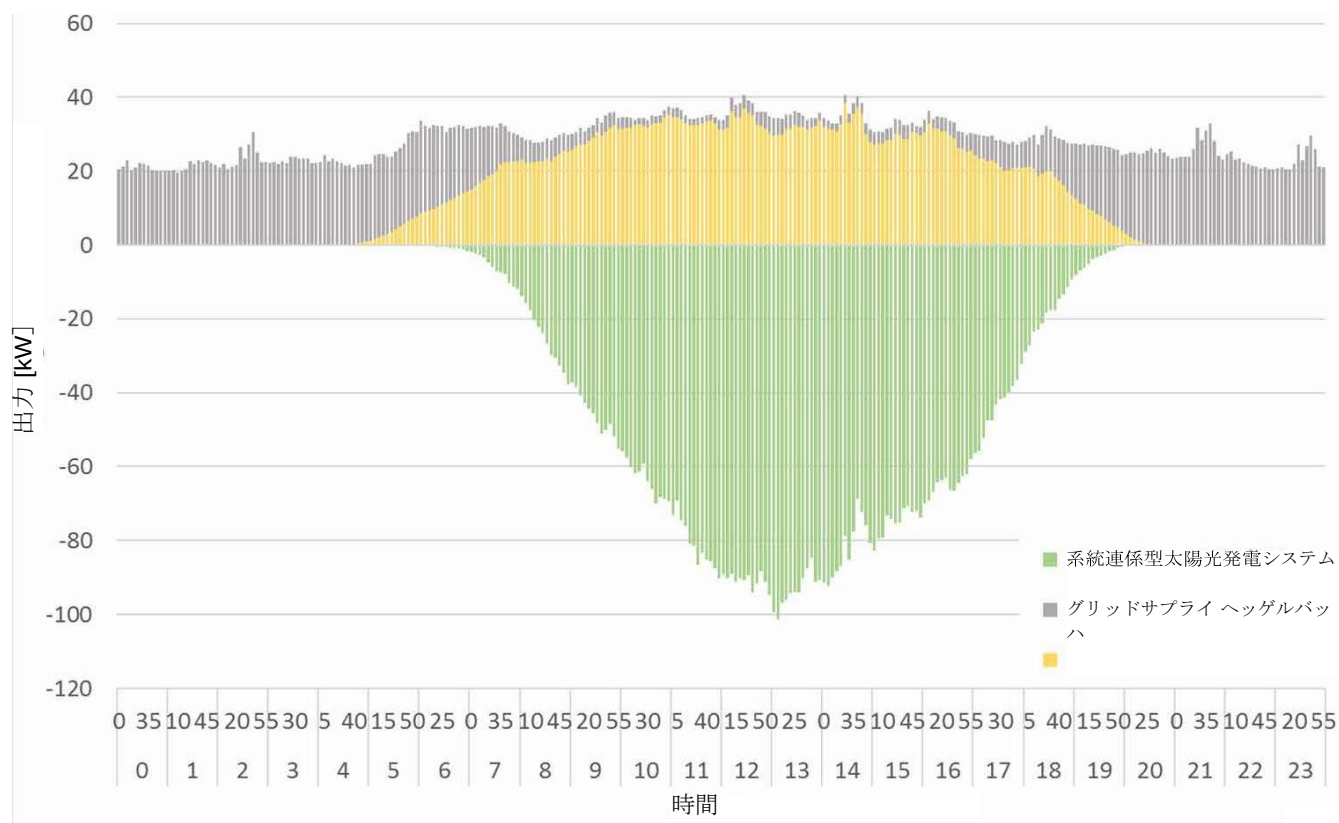


図12 : Hofgemeinschaft Heggelbachは、2017年の夏、アグリボルタシステムで発電した電力でほぼすべての電力需要を賄うことができた。

© BayWa r.e.

の植物に、可能な限り均等に日光を当てることができます。また、5mの高さと間隔があるため、コンバインなどの大型農業機械による栽培も可能で、大きな制約がない。研究プラントの設置容量は、平均して4人家族62世帯の年間供給量に相当します。従来の地上設置型に比べ、畝間が広いと、1ヘクタールあたりの設置容量が小さくなっています。平均設置面積が2ヘクタールであることから、このシステムのコストはすでに小規模な屋根設置型太陽光発電のコストに匹敵するものとなっています。

2.4.2 結果 2017年

土地利用率の160%への向上は、初年度である2017年にすでに実証されています。このように、アグリボルタシステムは日常的な使用に適していることが証明されました。モジュール下の作物収量は、ソーラーモジュールなしの基準区画と比較して、重要な80パーセントのレベルを超えて推移したため、経済的に採算がとれました。

アグリボルタシステムは、最初の12カ月間（2016年9月～2017年9月）、設置容量1kWpあたり1,266kWhの電力を発生させました。この結果は、ドイツ全土の平均値である1kWpあたり950kWhを3分の1上回っています。その理由は、一方では比較的高い水準の

の日射量と、二葉型モジュールの使用による収率の向上が期待されます。

畑に設置したPVアレイの1日の発電量カーブは、農場の負荷カーブとよく一致する。発電された太陽光発電の約40%は、電気自動車の充電や製品加工に、農場コミュニティで直接使用された。夏場は1日の負荷のほぼすべてを太陽光発電システムでまかなうことができました。消費行動を最適化し、150kWhの蓄電池を利用することで、デメーテル農家は自家消費電力の比率を70%まで高めようとしている。余剰電力は、プロジェクトのパートナーであるElektrizitätswerke Schönau（シェーナウ）が買い取っている。

2.4.3 2018年の暑い夏に結果を残す

2018年の夏は特に暑かったため、前年の実績をかなり上回りました。太陽電池モジュールの下の部分的な日陰が農場の作物収量を増加させ、高い日射量が太陽光発電の生産量を増加させました。ジャガイモの土地利用効率は86%上昇した。

研究パートナーは、2018年の暑い夏、半透明の太陽電池モジュールによる遮光のおかげで、植物が乾燥状態をよりよく補うことができたと考えています。この発見は、乾燥地域に対するアグリボルタイクスの可能性を浮き彫りにしています。

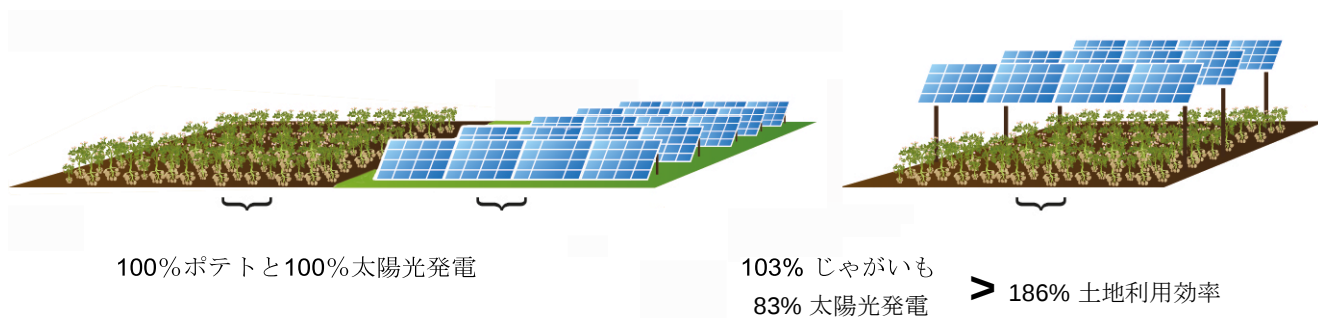


図13: 土地の複合利用により、ヘッゲルバッハのテストサイトでのアグリボルタイクスによる土地利用効率は最大186%に達しています (ジャガイモのイラスト © HappyPictures/shutterstock.com)

が、他の気候地域や追加の作物でさらに試験を行う必要性も指摘しています。2018年の太陽放射量は1,319.7kWh/m²で2017年より8.4%増加しました。これにより、2018年の太陽光発電量は2%増の249,857kWhとなり、設置容量1kWpあたりの比収率が1,285.3kWhと異常に高いことが相関しています。

ヘッゲルバッハでのパイロットプロジェクトの結果は、アグリボルタの収量安定化効果を示しています。特に干ばつ時には、栽培植物に日陰ができるため、その恩恵を受けることができます。^[4]

2.5 国際開発

アグリボルタイク技術の複数の利点は、特に乾燥・半乾燥地域の閾値と発展途上国で活用することができます。作物や放牧動物に日陰を提供する（同時に水の消費量を減らす）ことに加え、アグリボルタイクスは集水と処理のための電気も供給する。これは、砂漠化・土壌劣化の防止にもつながります。日射量が多く、乾燥した暑い半乾燥地では、通常栽培できない品種の果物が栽培できる。



図14：ヘッゲルバッハのアグリボルタシステムにおける二面性モジュールを用いたモジュール列。©Fraunhofer ISE

は、アグリボルタイクスで耕作することができます。分散型太陽光発電は、公共の送電網から離れた村におけるもう一つの付加的な利点です。アグリボルタイク技術は、人々が情報、教育、より良い医療（例：ワクチンや薬の冷却）へのアクセスを得るのを助け、食糧生産から土地を取り上げることなく、新しい収入源を開発することを可能にすることができます。

同時に、アグリボルタイクスは、ディーゼル発電機の使用など、農村コミュニティにおける化石燃料への依存を減らすのに役立ちます。太陽光発電は、農産物の冷却や加工に利用できるため、日持ちが良く、市場性があり、収穫後の季節に販売することができます。その結果、より高い収入を得ることができます。多くの国で開発協力のために存在する高い技術的可能性を実現するためには、政治的・経済的な課題を克服しなければならない。特に、政治的な安定と限られた埋蔵量は、技術移転とアグリバイオ技術への長期投資のハードルとなっています。

世界には280万kWpを超える太陽光発電設備が設置されていますが、中国が約190万kWpで最大のシェアを占めています（2020年時点）。世界最大のシステムが中国にある。ゴビ砂漠の端で栽培されるベリー類の上に700MWpの太陽電池がそびえ立ち、砂漠化防止に役立っています。アジアでは日本や韓国も太陽光発電の可能性を認めているが、両国とも「太陽光発電の普及には限界がある」と考えている。を小型のシステムで瞬時に実現しました。日本では、現在1800台以上のシステムが設置されている。都市部への移住が盛んな韓国では、農家の退職金（月1000ドル程度の売電収入）として、農家に10万台の太陽光発電システムを建設し、農村の消滅を遅らせる計画がある。

ブラウンホーファーISEがインドのマハラシュトラ州で行った予備調査では、太陽光発電システムによる遮光と蒸発の減少の効果が示されています。



図15：フラウンホーファー・チリ研究所のパイロットプラント（CuracaviとLampa）。フラウンホーファー・チリは、どのプラントが日射量低減の恩恵を受ける。© Fraunhofer Chile

は、トマトや綿花の収量を最大40%増加させることができます。^[13]研究者たちは、この地域の土地利用効率がほぼ2倍になると予想しています。

EUの「Horizon 2020」プロジェクトの一環として、フラウンホーファーISEの研究者は、アルジェリアのパートナーと協力し、アグリボルタイクスが水の供給に与える影響を調査しました。蒸発量の減少や気温・地温の低下だけでなく、PVモジュールによる雨水収集も重要な役割を担っています。特に干ばつの頻度が高まる中、ドイツの一部を含む多くの国々で、PVモジュールを用いた雨水収集が大きな関心を集めています。^[14]

2.5.1 チリでの研究プロジェクト

2018年春に終了したフラウンホーファー・チリの協力によるアグリボルタプロジェクトでは、サンティアゴ近郊に各13kWpのシステムを3基建設しました。

エル・モンテ、クラカビ、ランパの各市町村にある。この地域は、日射量が多く、年間降水量が少ない。ただでさえ乾燥した晴天が続く中、旱魃が続いているため、ここ10年で降水量は20～40%減少している。このような気候条件から、農家は植物を日焼けや乾燥から守るための遮光設備を積極的に探しています。このような場合、アグリボルタイクスの利用は大きな相乗効果をもたらす可能性を秘めています。

地元自治体が支援するプロジェクトでは、プロジェクトパートナーが、どの作物が日射量の減少による恩恵を受けるかを調査しました。その結果、3つの農園はそれぞれまったく異なる特徴を示しました。ある農場では、ブロッコリーとカ

リフラワーを栽培し、洗浄、包装、冷却などのポストハーベスト工程に太陽光発電を導入するプロフェッショナルな手法で栽培しています。2つ目のパイロットプラントは、家族経営の農場に建設されました。

は、ハーブの栽培に特化した工場です。3つ目の工場は、インフラが整備されておらず、電力供給が不安定な遠隔地にあります。この工場は、7つの家族に信頼できるエネルギーを供給しています。特に、鶏卵を孵化させるための孵卵器には大きな役割を果たしています。

チリの3つの施設は、ラテンアメリカで初めてのものです。この3つの施設をもとに、それぞれの国の気候や経済状況に合わせたアグリボルタイクスの適応と最適化が検討されました。作物生産と太陽光発電の結果は、非常に良好なものでした。その結果、フラウンホーファー・チリは、地元自治体の支援を受けながら、この地での研究を拡大していくことになりました。現地で稼働中の3つのパイロットプラントのモニタリングは、2021年まで継続される予定です。^[15]

2.5.2 フランス

フランスもアグリボルタイクスを推進しています。2017年からアグリボルタイクスの個別入札が実施されており、年間15MWの設置容量が計画されています。契約は、一部が募集価格、一部がプロジェクトの革新性に基づいて行われる。これまでに確認されている農業文化に対するシナジー効果もポジティブである。プロジェクトの規模は最大で3メガワットの設備容量（MWp）です。第1回公募では、温室のみが落札されました。第2回、第3回では、100kWpから3MWpの太陽光発電所向けに、それぞれ140MWpの入札が行われる予定です。採択されたプロジェクトは、20年間の固定価格買取制度が適用されます。2020年3月に40MWpが落札された。フランスでも追尾式のアグリボルタシステムが見られる。2018年、これまでで最大の追尾型システムはブドウ栽培に使用されており、オクシタニア地方のピレネー・オリエンタール県トレセールにある。

にもかかわらず、フランスではアグリボルタイクスが受け入れられにくいという大きな問題があります。第一次入札では、アグリボルタイクスの明確な基準がなかったため、農業生産物の割合が非常に低い、あるいは存在しないプロジェクトもある。このようなデッドウェイト効果により、特に農業分野ではアグリボルタイニシアチブに対して抵抗感があるようです。現在、フランスの環境・エネルギー機関であるADEME（Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie）が、アグリボルタイクスに対する明確なガイドラインを作成中である。

2.5.3 米国

アメリカでもアグリボルタシステムは導入されています。例えば、マサチューセッツ州の研究工場では、作物生産と発電のデュアルユースを実証することができた。州は2018年からデュアルユースのための資金を提供した。この資金援助は、特定の条件と結びついています。農業用地に建設され、2MWpを超えないシステムのみが対象となります。モジュールの下端は、非追尾型または固定型のシステムでは2.4m以上、モジュール追尾型のシステムでは3m以上の高さが必要です。また、主要な生育期間において、畑のどの地点も50%以下の日陰であることは許されない。^[4]

また、米国農務省はREAP（Rural Energy for Advancement Program）の枠組みの中で、農村部での太陽光発電設備の設置を支援する資金を提供しています。このことも、農地転用型太陽光発電システムの普及を後押しする可能性があります。

このほか、アリゾナ州、コロラド州、インディアナ州、オレゴン州にも設置されています。特に、農業利用に特化するのではなく、多様な生物が生息できるような施設に人気が集まっています。いくつかの大学や研究機関が、効果的なビジネスモデルの開発に取り組んでいる。

農業用を中心とした太陽光発電システムをより魅力的なものにするために。



図16 フランス・モンペリエ大学のアグリボルタ研究システムにおける各種レタスを用いた研究。

© Christian Dupraz

3. アグリカルチャー（AGRICULTURE）

農業分野では、気候変動や水資源の確保、高収量化などの課題に対応するため、作物保護対策が進んでいます。温室やホイルトンネルでの作物栽培のほか、果樹園での防雹ネットの使用なども含まれます。

特に高価な特殊作物では、暖房用ワイヤーや防霜キャンドル、ガスやオイルの固定式バーナーから、ヘリコプターや雲底に超微粒子のヨウ化銀を撒くクラウドシーダーまで、霜やひょうの保護対策は多岐にわたる。このような技術的・機械的な植物保護対策は、気候変動により今後数十年で重要性を増すと予想される。

ここ数年の異常気象は、地球温暖化が単に抽象的な危険ではなく、すでにドイツの農業に大きな影響を及ぼしていることを示している。春の降水量は植物の生育に特に重要であり、ここ数年、実際に減少している。^[16]灌漑を追加することで、こうした干ばつ期間を埋め、収量を確保することができる。ドイツの農業部門における灌漑の必要性の高まりと、地下水と地表水の取水に関する既存の制限に照らして、適応のためのさらなる可能性を検討する必要がある。豪雨や雹などの極端な気象現象は、しばしば地域的に限定されるため、栽培植物の生育を危険にさらす。また、収穫量の変動が激しいため、農家は経済的な問題に直面することが多くなっています。

農地を食料生産と太陽光発電のために二重利用することは、これらの課題の多くに同時に取り組む機会を提供します。アグリボルタイクスは、農場に収入を多様化させ、内部の運営サイクルを閉じる機会を提供します。蒸発率が低く、雹や霜に対する保護が強化されていることは、ここでの重要な要素です。既存のフレームワーク構造を利用することで、追加の保護システムをコスト効率よく統合することができます。これにより、農地の生産性と価値を大幅に向上させることができます。

しかし、この点については制約や課題もあります。

アグリボルタイクスには、農業生産への貢献もあります。特に、照明条件の変化や、支持構造による栽培の難しさが挙げられます。リスクを最小限に抑え、相乗効果を最大限に発揮させるためには、作物の選定と適切なシステム設計を組み合わせる必要があります。

3.1 プロジェクトAPV-RESOLAによる研究成果

研究プロジェクトAPV-RESOLAでは、ヘッゲルバッハのパイロットプラントにおいて、バイオダイナミック農法に基づき、牧草とクローバーの混合、冬小麦、ジャガイモ、セロリなどの作物が栽培されました。スーツは



図17：ヘッゲルバッハで調査した作物（小麦、セロリ、ジャガイモ、草・クローバー混合物）。© University of Hohenheim

アグリボルタイクスによる植物栽培の実証に成功。作物収量の天候変動への高い依存性も証明されました。例えばジャガイモでは、アグリボルタシステム下での作物収量は、基準システムと比較して、**2017年のマイナス20%から2018年の高温・乾燥の年にはプラス11%まで変動した。**

太陽光発電システムによる農作物の栽培は、地域や気候条件によって、蒸発量を減らし、強い日射から守ることができる。

中欧では熱波が頻発しており、この点はドイツでも重要になるでしょう。^[17]ジャガイモの場合、アグリボルタイクスによって、市場に出せる塊茎の割合を増やすことができることも判明しました。

ホーエンハイム大学の科学者たちは、アグリボルタシステム下とPVモジュールなしの基準区画の両方で、作物の発育、収穫量、収穫物の品質、微気象条件などのデータを収集しました（図18）。アグリボルタシステム下での光合成有効放射量は、基準圃場と比較して約**30%減少**した。日射量以外では、アグリボルタイクスは主に降水量の分布と地温に影響を与えた。アグリボルタイクスの場合、春と夏には後者が基準圃場と比較して低くなった一方、気温は変わらなかった。**2018年の暑く乾燥した夏には、小麦畑の土壌水分は基準圃場と比較して高くなった。**

2017年の試験圃場における収量の初期結果は、有望なものでした。草・クローバー混合物の場合、作物収量は基準圃場と比較して、**5.3パーセントのわずかな減少**にとどまりました。一方、ジャガイモ、小麦、セロリについては、遮光による収量減が**18～19パーセントとやや顕著**になりました。

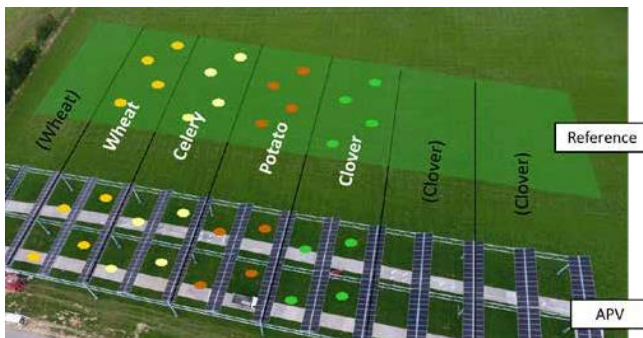


図18：2017年テストセットアップの計測を伴うフィールドレイアウト

ステーション© BayWa, 修正：ホーエンハイム大学
28

2018年の非常に乾燥した年、PVモジュールなしの基準圃場と比較して、冬小麦、ジャガイモ、セロリでより高い収量が得られました。セロリは収量が**12%増加**し、最も恩恵を受けた。ジャガイモとウィンナー小麦の収量は、それぞれ**11%と3%増加**しました。一方、牧草とクローバーの混合植物は、基準圃場と比較して収量が**8%減少**した。収量減少の合計を計算するためには、実際には耕作できない支持体間の土地損失も考慮しなければならず、約**8%**でした。

3.2 作物の栽培と選別

適切なシステム設計を行うことで適応策を減らしても、PV下での作物栽培は

モジュールは、露地での農業や園芸とは異なります。これらには、畑仕事（3.2.1）、作物管理（3.2.2）、作物選択（3.2.3）の実践的な側面が含まれます。

3.2.1 取付構造の調整

農機具用

太陽光発電システムの設置にあたっては、農作物栽培への影響を最小限に抑えるため、農業の現場を考慮する必要があります。圃場作業と同じ方向に設置することが重要であり、架台の支柱間の距離は、従来の農業機械の高さや幅に適合していなければならない。アグリバイオシステムでの栽培は、特に初期に支柱への衝突を防ぐため、ドライバーの注意力を高める必要がある。そのため、ヘッゲルバッハのパイロットプラントでは、支柱にフェンダーを設置し、システムの損傷を防いでいる。サポートに起因する実際の土地損失

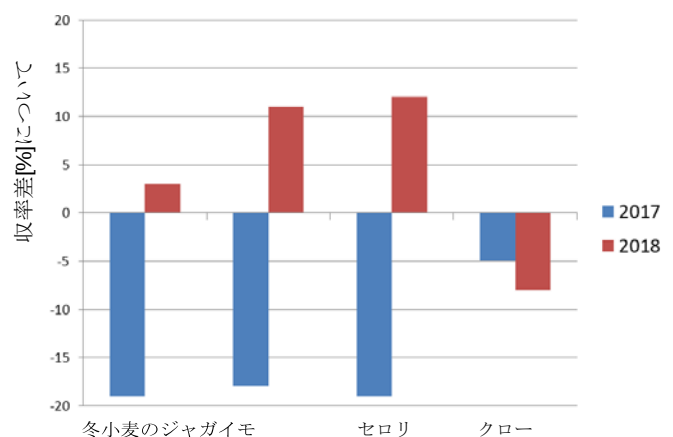


図 19：レファレンス圃場と比較したアグリボルタイクスの下での作物収量の違い。ヘッゲルバッハの2017年（青）と2018年（赤）（支持による土地ロスを除く）。データはこちら。ホーエンハイム大学

とフェンダーの使用量は、ヘッゲルバッハの耕地面積の1%未満でした。しかし、機械で作業する場合、支持体の間の帯状の部分を耕すことは現実的ではないため、耕作地の約8%が使用できないことになります。手作業による耕作や列作では、土地の損失は実際に封鎖された面積に縮小されます。

革新的なケーブル配線技術がこの問題を解決するのに役立つ（4.3項）。精密農業と自動誘導システムの使用により、栽培が容易になる。

3.2.2 太陽光発電システムにおける微気候について

フィールドに影ができると、モジュールの下での微気候がわずかに変化する。上記のヘッゲルバッハでの研究以外にも、アメリカ^[18]やフランス^[9]でも微気候に与える影響の可能性が調査された。研究者たちは、システムの位置とデザインによって微気候に様々な変化があることを発見した。しかし、APV-RESOLAで得られた知見に関連して、以下のまとめが一般的に適用可能であると思われる。

1. 工場で利用できる日射量は、技術設計（PVモジュールの距離や向きなど）により異なる場合があります。ドイツでは、日射量を3分の1程度に抑えることが許容範囲とされています。

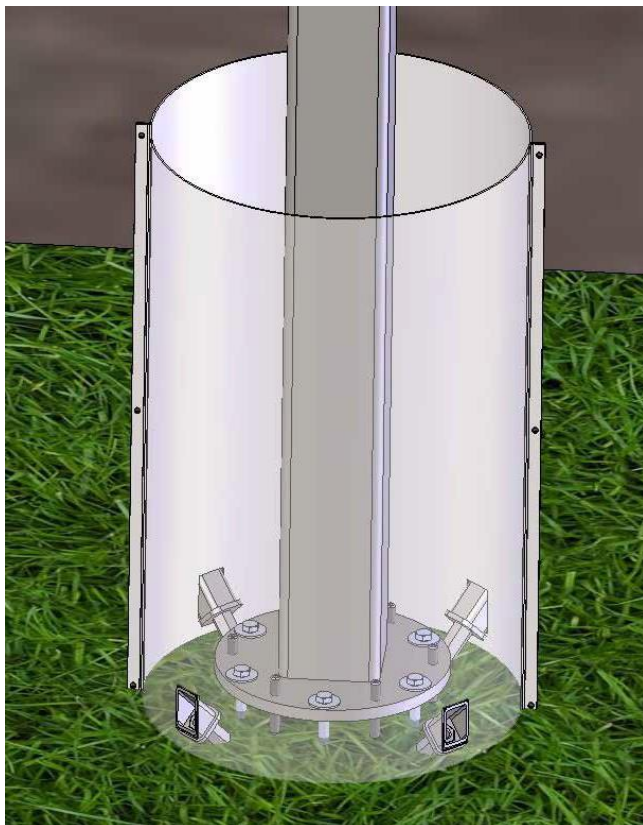


図20：Heggelbachのシステム支持部には、農業機械からの損傷を防ぐためのフェンダーが設置されている。© Hilber Solar

2. 支持体の高さが低いほど、微気候の変化が顕著になる。
3. 特に暑い日には、地温や気温が下がります。
4. 風速は、システムの向きや設計によって減少したり増加したりすることがあります。つまり、風洞の影響や植物の生育への影響を考慮した上で、システム計画を立てる必要があるのです。
5. アグリボルタイクスでは、土壌の水分損失が減少し、同時に空気中の水分量が増加することがあります。

耕作地に部分的に屋根があると、PVモジュールのドリップエッジに降水が偏る。土壌侵食のリスクと、栄養豊富な表土の流出、シルト化、苗木の流失、地表水の富栄養化などの関連問題を最小化するための対策が必要である。いくつかの可能な対策は、技術的なセクション（セクション4.4）に記載されている。

このプロジェクトで得られたこれらの知見は、農業の実践に重要な役割を果たす。例えば、雨を部分的にしか遮らない、あるいは全く遮らないシステムでは、作物の種類を選ぶ際に、空気循環、空気湿度、真菌症の感染リスクなどの変化を考慮する必要がある。植物体温が低いと、作物が成熟するまでの時間が長くなることもある。したがって、適切な作物選択によって、適時かつ均一な成熟を確保しなければならない。

実用的な考察とは別に、アグリボルタイクスの微気候効果に関する知識は、適した栽培植物の選択の基礎となるものである。特にシステム下の部分的な遮光は、適切な作物を選択するための決定的な要因になります。



図21：アグリバイオリング園のイメージ図。

© Fraunhofer ISE

3.2.3 適した作物

現在の知見に基づけば、あらゆる種類の作物が一般的に太陽光発電システムの下での栽培に適しているが、日陰の影響により収量に異なる影響が予想される。特に、葉物野菜（レタス）、野草飼料（イネ科・クローバー科）、各種果実、ベリー類、ソフトフルーツ、その他特殊作物（ワイルドガーリック、アスパラガス、ホップなど）など、耐陰性の高い作物が適していると思われる。

恒久作物・特殊作物

アグリボルタイクスは、ワイン栽培、果樹園、野菜栽培などの特殊な作物との相乗効果が最も期待できると思われます。これは、単位面積あたりの価値創造が高いため、比較的繊細な作物は、保護措置の必要性が高い場合が多いのです。アグリバイオ構造の有意義な設計により、雨、雹、風などの環境影響から直接保護することができます。さらに、支持体は、ひょうよけネットやホイルトンネルなどの追加の保護要素の統合に使用することもできます。アグリボルタイクスは、フォイルの使用と、それに伴うプラスチックによる土壌汚染を減らすのに役立ちます。従来の保護対策にかかる費用と収量リスクを同時に削減することができます。

アグリボルタシステムは、レタスを使った葉物野菜の栽培で、すでに肯定的な経験があります。ヘッゲルバッハのセロリと同様に、レタスも約30%の減光に反応し、葉面積が増加しました。^[19]

ワイン生産において、気候変動による日射量の増加や気温の変化は、ブドウの品種によっては収穫物の品質に強く影響することがあります。また、日焼けやブドウの木での果実の乾燥にもつながる可能性があります。



図23：ラズベリーの天候保護としてのアグリボルタシステム。オランダのBayWa.r.e.による300kWpのテストシステム。© BayWa r.e.社

地球温暖化により、ブドウの糖度が上がり、ワインのアルコール度数が上がり、品質が低下する。その結果、栽培地域や収穫時期がずれてしまう。そのため、高気温下での部分遮光は、生育に好影響を与え、同時に早熟を防ぐことができる。^[20]ワイン栽培では、他の農業と比較して、アグリボルタシステムに必要な高さは2～3mで済みます（図22）。そのため、架台のコストを大幅に削減することができます。また、既存の保護構造物にアグリボルタシステムを組み込むことができるため、コスト削減にもつながります。

アグリ

フランスでは、ブドウ園での太陽光発電システムの利用が、ますます資金を集めて実施されるようになっている（2.3.2項）。

リンゴのような果実と組み合わせたシステムも有望である。ドイツでは、収量へのリスクを軽減するために、コストのかかる保護システムが必要とされることが多い。と気候変動によるリンゴの品質低下。アグリボルタイクスは、これらのコストを削減することができます。同時に、わずか60～70%の



図22：フランスにおける太陽追尾型アグリボルタイクス。

© Sun'Agri



図24：ベリー栽培のデモプロジェクトは、農業における高い付加価値を示している。© BayWa r.e.



図25: コンバインによる小麦の収穫。

© Fraunhofer ISE



図 27:Next2Sun GmbHが建設したEppelborn- Dirmingen ソーラーパーク（ザールラント州、容量2MWp）の垂直配向型バイフェイシャルモジュール。© Next2Sun GmbH

は、リンゴの収穫量を最適化するのに十分な光量です。^[21] フラウンホーファーISEは、ラインラント・プファルツ州の有機果樹園にパイロットプラントを計画し、従来の保護装置を使用した場合と比較して、害虫の発生や作物の収量に対するPVモジュールの効果を調査しています。ホップ栽培においても相乗効果が期待されます。ホップとPVモジュールの両方に架台を使用できるため、栽培コストの大幅な削減が期待できます。一方、湿気によるカビ病の発生を抑えることができない作物や栽培体系には、あまり適していないようです。

ベリー類の保護栽培も、特殊な作物への応用分野のひとつです。太陽光発電モジュールは、雨や雹を防ぐためのホイルトンネルの役割を果たすことができる。

恒久作物や特殊作物への応用では、経済性（セクション3.3）、社会的受容性（セクション5）、規制の実現可能性（セクション6）について、さらなるメリットが期待されている。

耕種農業

ヘッゲルバッハで行われた様々な農作物栽培の結果は、特に乾燥地帯では、アグリボルタシステムによる遮光が明らかに有効であることを示しています。暑くて乾燥した年には、収穫量に対するプラスの効果が特に顕著になります。一方、降水量の多い平年では、ジャガイモ、小麦、その他の穀物（大麦、ライ麦、ライ小麦）のような作物では、固定された架台の下で最大20%の収量減少が予想されます。トウモロコシはC4植物（熱と光の要求が高い）であるため、温帯地域の部分日陰での栽培には不向きである。カノーラ、カブ、マメ科植物など他の重要な作物については、まだ経験が浅い。

一般的な推奨事項は、住民や農業部門に広く受け入れられるよう、総収量減少が20%を超えないようにすることである。Heggelbachの結果は、ドイツに関連する特定の耕作作物について、適切な光管理によってこれを達成することができることを示しています（モジュール密度の低減、および、耕地面積の縮小）。

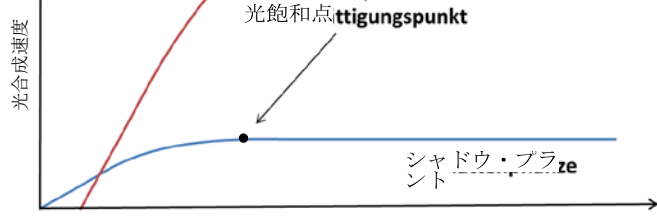


図26: 模式図。光合成速度の光量依存性

日向と日陰の植物の強度 (出典: 図26をもとに修正)

っては、ある光量で光合成の速度が停滞する（図26参照）。光飽和点は、アグリボルタイクスに対する作物の適性を判断する重要な基準である。この時点から、植物はさらに光を光合成の出力に変換することができなくなり、ダメージを受ける可能性さえある。この光飽和点が低い植物ほど、太陽光発電に適している。は、太陽光発電システムで栽培するためのものです。[21]

モジュールのアライメントを調整しました。可動式の太陽光発電システムでは、重要な成長段階において有効な光量を増やすことができるため、収量損失を低減することができます。

草地

ドイツでは、地上設置型太陽光発電システムと羊の飼育の併用が一般的に行われています。この方法では、一般的に太陽光発電システム側のみが最適化されます。期待されるシナジー効果は、単位面積当たりの農業価値創造に伴い、他の太陽光発電システムと比べて低い傾向にある。しかし、この分野での具体的な研究結果はまだ出ていない。

垂直型太陽光発電システムの設置は、地面に近い場所に支柱があっても、土地の耕作をほぼ可能にする新しいアプローチである（図27）。ドイツでは、Donaueschingen（バーデン＝ヴュルテンベルク州）とEppelborn（ザールラント州）の2つの基準システムが既に建設されている。植物の生育に効果があるのは、主に風の強い地域、例えば海岸付近で、モジュールが防風林の役割を果たし、風食の減少に役立つと期待されている。

3.3 経済性・ビジネスモデル

農業用太陽光発電のコストは、設置容量、農業管理、圃場の位置、選択した太陽電池技術などの要因によって、ケースごとにかなり異なる可能性があります。一般的に設備投資額は、従来の地上設置型太陽光発電システムに比べて高くなりますが、これは主に架台が高く、より精巧に作られていることが原因です。また、架台の高さや架台間の距離も重要な要素となります。そのため、農業機械が小型化され、人の手による作業工程が多くなれば、ほとんどの場合、経済性にプラスの影響を与えるはずですが、また、多年生の連作作物では、耕作面積を大幅に減らすことなく、支持体を連作に組み込むことができるため、コスト面でも有利です。従来の地上設置型太陽光発電システムとは異なり、アグリボルタシステムでは一般的にフェンスが不要であるため、このようなコスト要因が発生しません。

アグリボルタシステムでは、モジュールの下での雑草取りなどの作業は通常の作業で行われるため、運用面で若干の節約が期待できる。不要な雑草が広がるのを防ぐために、耕作できない支持体の間の帯状部分のみを維持する必要があります。また、借地では兼用によるコストダウンも期待できる。

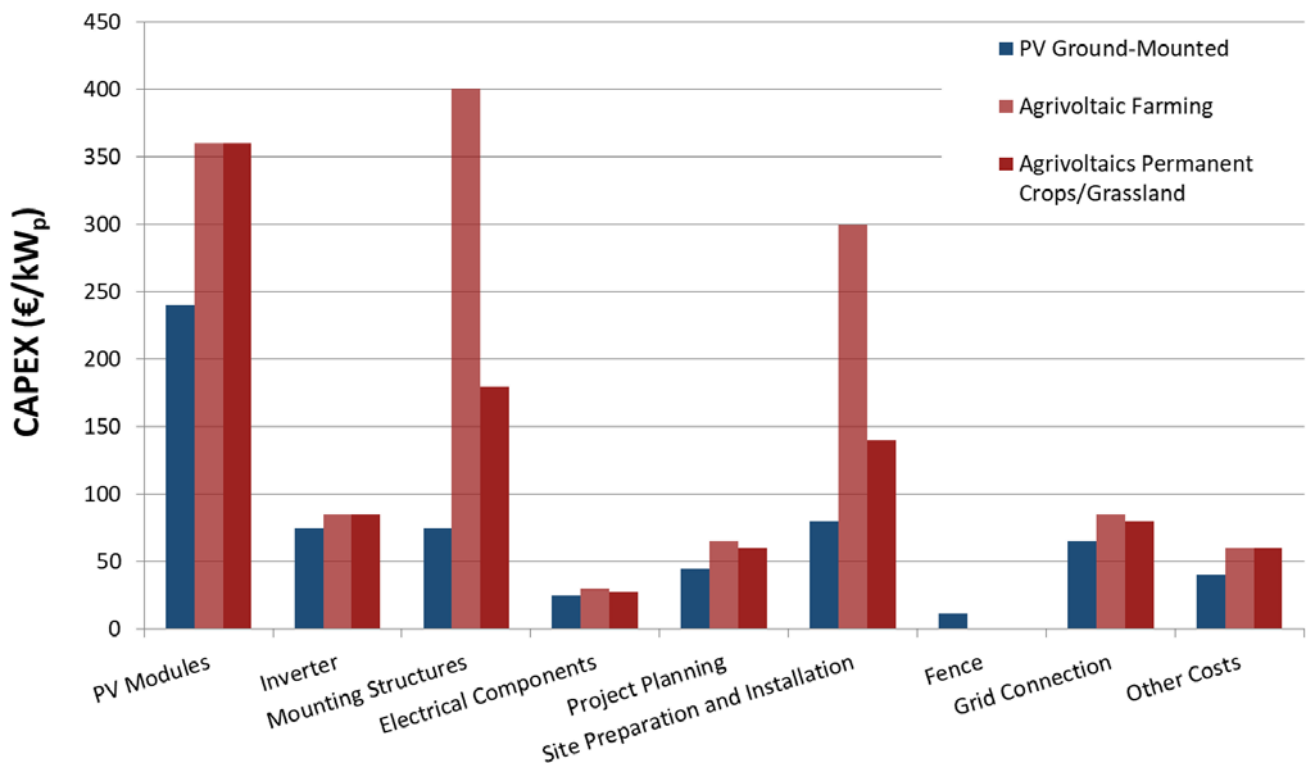


図 28: 地上設置型太陽光発電システムとアグリボルタイクスの投資コスト。データは^{4,29}より

以下のコスト試算では、耕作用、常用作物用、特殊作物用を区別している。これらは、地上設置型太陽光発電システムおよび屋上設置型太陽光発電システムのコストと比較される。この試算では、農業の収入と経費は考慮されていない。

その結果耕作地では、経済的にアグリボルタイクスを導入するために、より高い設置容量のシステムが必要となる傾向があります。小型のシステムは、永続的な作物や特殊な作物との組み合わせで、有利な条件下で実現可能なようである。永続的な作物の場合

一貫した作物管理により、太陽光発電の設計を技術的に完全に農業の必要性に適合させることが可能である。輪作のある栽培では、栽培されている異なる作物の平均値に基づいて、太陽光発電の設計を行う必要があります。

3.3.1 投資コスト

投資コストの試算は、1システムあたりの面積を2ヘクタール、屋上システムの場合、設置容量を10kWpとして行っています。日陰が少ないため

そのため、ドイツの小麦、大麦、キャノーラなどの典型的な耕作地では、単位面積当たりの収量が低くなるため、耕作地のコスト試算では1ヘクタール当たり600 kWpの容量を想定しています。設置構造のクリアランス高さと支持間隔は、ヘッゲルバッハのシステムの寸法に対応しています。高さの低い永続的な作物、例えばベリー栽培では、1ヘクタールあたり700kWpの容量と、クリアランスの高さと幅をそれぞれ3メートルと10メートルと仮定しています。

地上設置型太陽光発電システムについては、1ヘクタールあたり1メガワット・ピークを想定した。楽観的なシナリオと保守的なシナリオは、それぞれ予想されるコストの範囲を反映している。2020年時点で追加される可能性のあるリスクプレミアムや追加の法的コストは、太陽光発電のシナリオでは考慮されていない。したがって、この値は、農業用太陽光発電システムを導入した場合に、中期的に想定されるコストに相当する。

太陽光発電の市場投入地上設置型太陽光発電システムと農業用太陽光発電システムの予想投資コストの違いを図28に示す。

この投資コストの違いは、主に3つのコストセンターに起因しています。

1. 例えば、気温が低い場合、植物の生育に必要なサイズや光透過率に合わせなければならないため、モジュール価格が上昇する可能性があります。構造高さ（セクション4.2）。そのため、サンプル計算では、二面性ガラスモジュールを使用した場合、標準的なPVモジュールと比較して、1kWpあたり平均220ユーロから360ユーロに増加すると仮定した。これらの追加費用は、設置容量あたりの発電量の増加によって部分的に埋め合わされる。
2. 耕作地における架台の平均コストは、地上設置型太陽光発電システムの場合、1kWp当たり75ユーロであるのに対し、400ユーロと予想される。しかし、この見積もりにはかなりの不確実性が含まれており、設計、学習効果、規模の経済によって1kWpあたり320～600ユーロの間で変動する。特殊作物や常用作物のための架台費用は、1kWpあたり130～220ユーロとかなり低い。

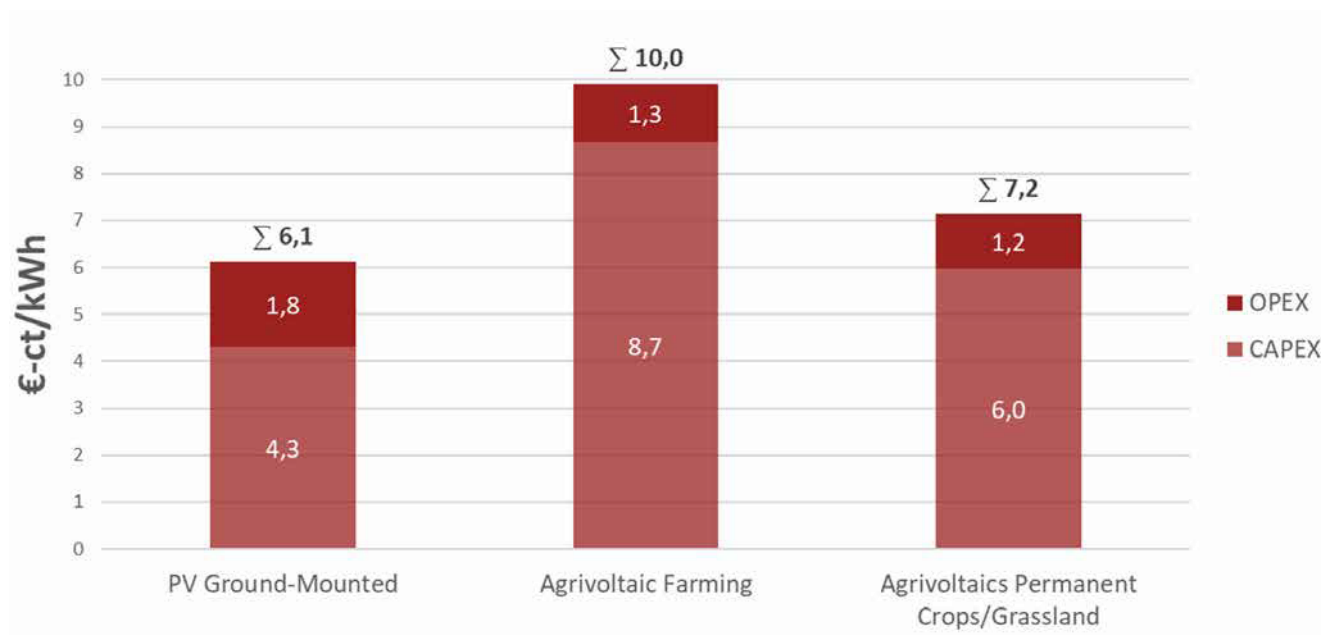


図 29: 地上設置型太陽光発電システムとアグリボルタイクスのCAPEX / OPEXの比較。データは^{4, 22)}より

3. また、敷地の整備や設置にかかる費用もかなり高く、耕作地では1kWpあたり250～350ユーロ（地上設置型太陽光発電システム：1kWpあたり70～100ユーロ）と見積もられています。コストの要因としては、建設用道路の使用などの土壌保護対策や、農業の耕作期間に合わせて計画を立てる必要があるため、設置に関する自由度が低くなることが挙げられます。特殊な作物や永続的な作物の場合は、1kWpあたり120～180ユーロと、コストの増加はかなり抑えられると予想されます。

上記の点を除けば、インバーター、電気部品、プロジェクト計画などのコストは、現在の知見ではほとんどの場合同等であり、平均的には地上設置型太陽光発電システムとほとんど変わりません。フェンスを省略すれば、小規模な節約は可能です。

3.3.2 営業費用

投資コストとは対照的に、運用コストについては、地上設置型太陽光発電システムよりも節約できる傾向がある。節約分の主な内訳は以下の通りです。

1. 土地を提供するためのコストは、約3から10に低下します。
耕作地では1kWpあたり0.8ユーロ、永年作物や特殊作物では1kWpあたり1ユーロである。この試算は、太陽光発電システムの土地代が農地リース料と同額で、農家と太陽光発電システムの運営者の間で均等に分配されるという仮定に基づいている。しかし、この値は所有形態やビジネスモデルによって大きく異なる可能性がある。耕作地では、永続的な作物や特殊な作物に比べて一般的に低いリース料が予想されるため、潜在的な節約効果は高くなる可能性があります。
2. 農業用では、モジュール下の土地維持のためのPV側コストが不要になります。
3. 一方、モジュールの清掃やシステムの修理は、高所作業や昇降装置などを使用するため、より高いコストがかかることが予想されます。しかし、ドイツでは定期的に雨が降るため、モジュールの洗浄コストはほとんどかかりませんから、この追加コストは管理可能なものです。しかし、汚れの多い地域では、洗浄の技術によっては、洗浄のための追加コストがかなり重くなる可能性があります。肥料や植物保護剤が架台や太陽電池モジュールに与える長期的な影響については、今のところ経験がない。

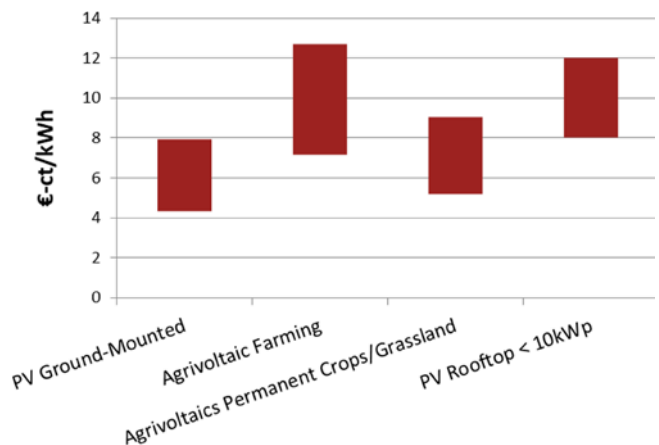


図 30: 地上設置型太陽光発電システムとアグリボルタイクスの平均平準化電力コストの推定、Fraunhofer ISE による表現、データは^{13, 4, 23, 24)}から。

3.3.3 電力平準化コスト

耕作地での20年間の発電量は、平均で1kWhあたり9.93ユーロセントと、地上設置型太陽光発電システムの約2倍であり、小型の屋上設置型と同程度のコストである。一方、高さの低い永続的な作物の場合、平準化された電力コストは平均 7.13 ユーロセントで、地上設置型太陽光発電システムに比べて約 3 分の 1 しか高くない。図30は、地上設置型や屋上設置型と比較した農地転用型太陽光発電の平準化電気料金の範囲を示している。

このコスト見積もりでは、耕作地での太陽光発電システムにおける規模の経済性（および圃場面積が大きくなる傾向）が、特殊作物や永年作物と組み合わせたシステムと比較して、コスト面での優位性をもたらす可能性があることは考慮されていない。この経済的優位性は、プロジェクト計画の固定費にも適用されるはずである。例えば、グリッド接続は、総固定費にとって重要な要素であり、したがって小規模システムの経済的実現可能性を左右するからである。一方、小規模システムは、農場で発電した電気をその場で使用することで経済的な利益を得ることができる。対応する規制の枠組みがあれば、消費者に近い場所で発電を行うことで、農業用太陽光発電システムの建設に対するさらなるインセンティブを生み出すことができる。

3.3.4 自家消費と電気料金収入 太陽光発電所の電気は、自家消費することで外部からの電力購入量を直接減らすことができるため、最も価値があります。商用電力価格を14～16 セント/kWh^[25] と、平準化された電気代が 9 セント/kWh 前後であることから、例えば 5～7 セントの節約となります。

per kWh を実現することができます。発電プロファイルに近い消費プロファイルで、日中と夏の半期あたりにピークがあり、直接消費量が多い場合に有利です。

冷房などの蓄熱機能を持つアプリケーションでは、日々の消費プロファイルを蓄熱による発電に適合させることができる。発電プロファイルは、電気自動車のバッテリーを充電する際にも考慮することができ、それによって自己消費量を増やすことができる。

定置型蓄電システムのコストが下がっていることを考えると、有利な消費プロファイルでの使用も経済的であり、ケースバイケースで検討する必要がある。直接利用も蓄電もできない太陽光発電の電力は、需要家を探さなければならない。この場合、EEGモデルや電力供給契約が一般的に適している。

現在、EEGの報酬は、農業用発電所が高速道路や鉄道沿いの土地に建設された場合のみ可能である。公称出力750kWp以上の発電所では、入札への参加が義務付けられており、自家消費は認められていない。

様々なエネルギー供給会社が、電力供給契約に基づいて太陽光発電事業者から電力を購入することを提案しています。例えば、UmweltBankは、電力購入契約（PPA）に基づき、地上設置型太陽光発電プロジェクトのための電力供給契約のサンプルを作成しました。

3.3.5 ビジネスモデル

農業部門が含まれているため、太陽光発電のビジネスモデルの複雑さは、地上設置型太陽光発電システムのそれを上回ることがよくあります。プロジェクトパートナーの構成によって、異なる機能を持つさまざまな関係者が実施に携わることになります。

ここでは、少なくとも4つの機能を区別することができる。

1. 土地の提供（所有権）
2. 土地の農業経営
3. 太陽光発電システムの提供（所有・投資）
4. PVシステムの運用

最もシンプルなビジネスモデルでは、4つの機能すべてを1つの当事者（通常は農場）が処理することができます。このモデルは、投資コストが管理可能で、土地の所有権もありそうな場合、主に旧連邦州の小規模な農地での太陽光発電システムに期待されている。プロジェクトの計画や契約交渉にかかるコストが低いことや、高度に分散化されていることもさることながら、農業レベルと太陽光発電レベルの相互作用が同じ経済単位に影響を与える場合、アグリボルトシステムで考えられるメリットとデメリットをより容易かつ動的に考慮できることが大きなメリットとなる。これは、2つのレベル間の相互依存が考えられるため、太陽光発電システムに特に関連する。例えば、バイフェイシャル太陽電池の場合、作物の選択と農業管理によって、アルベドを増加させ、電気三重収率を向上させることができる。また

表3：様々なアグリバイオビジネスモデルの構成（⁴⁴に基づく）。

ビジネスモデル	機能			
	土地の提供	農業経営	を提供する。 太陽光発電システム	を操作する。 太陽光発電システム
1.基本ケース	ファーム			
2.外部土地所有権	土地所有者	ファーム		
3.外部PV投資	ファーム		PV投資家	ファーム
4.栽培・運営のみ	土地所有者	ファーム	PV投資家	ファーム

5.栽培のみ	土地所有者	ファーム	PV投資家	PVオペレータ
--------	-------	------	-------	---------

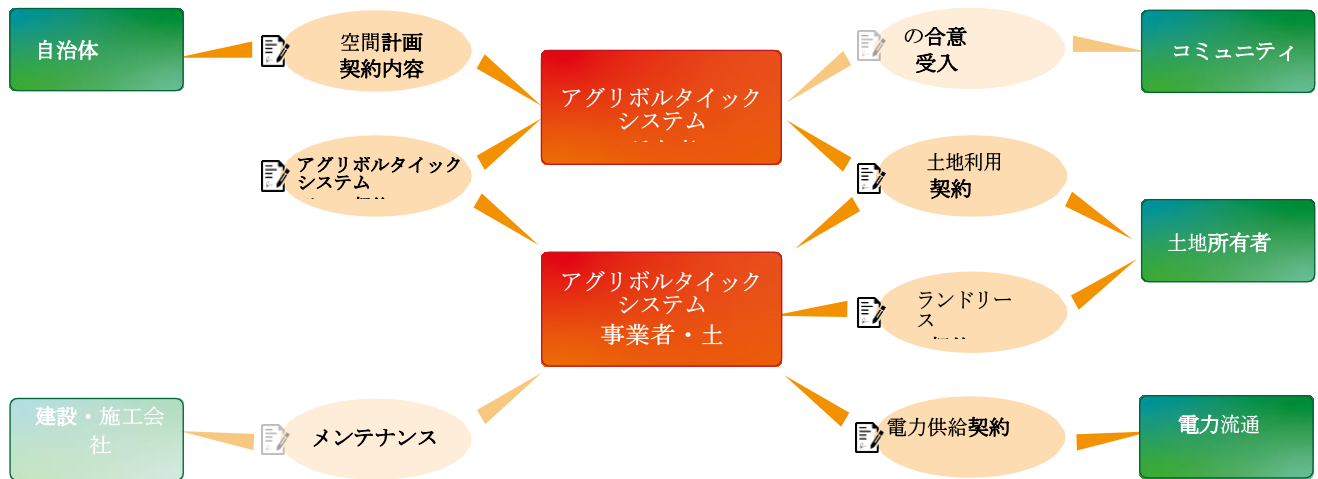


図 31: ステークホルダーと契約モデル

また、発電した電気をその場で使えることや、多くの農家が屋上設置で太陽光発電システムの運用を経験していることも、このビジネスモデルを後押ししている。

しかし、多くの場合、その土地は農場の所有物ではない。これは、ドイツ、特に新連邦州における賃貸の割合が高いことが示している。^[26]他のすべての機能が農場にある場合、このコンステレーションによって相乗的な付加価値も一か所で発生する。地上設置型太陽光発電システムと同様、土地の賃貸・使用には長期契約が不可欠であり、一般的には20年程度の期間が必要である。

大規模な太陽光発電システムでは、太陽光発電システムを所有することはおそらく一般的ではなく、外部からの投資を受ける可能性が高くなります。部分的な所有権により

この場合、土地の相乗的な二重使用のためのインセンティブ構造。しかし、外部資本の比率が高ければ高いほど、操業中に両方の生産レベルの利点を念頭に置くことは難しくなる。このビジネスモデルは、規模の拡大と分業による最適化が可能であることが有利に働く。

ヘッゲルバッハのプレーヤー構成は、比較的複雑である。土地やPVシステムの所有権も、農園やPVシステムの運営も、片手間ではない。この場合に必要となる契約の基本的な構成は図31の通りである。ドイツでどのようなコンツェルンが確立されるかは、現時点では未解決であり、大きく依存するは、将来の規制の枠組みに関するものです。また、複数の農家が協力する協同組合モデルも考えられる。

3.4 農家からの報告

ヘッゲルバッハの農家の体験はほとんどポジティブなものですが、ドイツの法的規制の限界を明確に示しています。Thomas SchmidとFlorian Reyerは、インタビューの中で、なぜアグリボルタシステムを採用したのか、どの程度実現可能なのか、そしてどのように法的規制を変更すべきなのかを説明しています。Thomas Schmid（トーマス・シュミット）共同設立者

1986年に設立されたDemeter-Hofgemeinschaft Heggelbachの創設者である。その間、現役の農業従事者から引退し、デメーテル協会の監査役会のメンバーであり、バーデン＝ヴュルテンベルク州でコンサルタントとして働いています。Florian Reyerは、2008年からHofgemeinschaft Heggelbachの株主として、再生可能エネルギー、技術、耕作、野菜栽培を担当しています。

ファームが理想とするものは何なのか？

経済的に有利な要素

アグリボルタイックスの実現

- 列栽培
- 恒久的な作物
- 保護育成
- 機械の雇用が少ない／クリアランスの高さが低い
- 広大で連続した地域（1ヘクタール以上）
- 低傾斜
- 高く柔軟なエネルギー消費（冷却、乾燥、加工など）
- 投資意欲



図 32: Thomas Schmid と Florian Reyer。© AMA Film

農業実践パートナーとして、パイロットプロジェクトに参加し、パイロットプラント用に土地を提供することになった動機は何ですか？

トーマス私たちは15年前から、農場でのクローズドな操業サイクルに加えて、クローズドなエネルギーサイクルを実現するという理想を追い求めてきました。そのため、過去にすでにさまざまなエネルギー源（注：木質ガス発電、屋上太陽光発電）に投資してきました。2011年にフラウンホーファーISEが私たちに接触してきたとき、すでにエネルギー転換は大きな問題でした。私たちは、アグリバイオがエネルギー転換の成功に貢献し、土地の二重利用を通じて、農地でのバイオガス生産に代わる選択肢を示すのに適した方法であると考えました。

フロリアン：私たちは、再生可能エネルギーの分野での革新的な開発にも、一般的に非常に興味を持っています。

計画や施工はどうだったのでしょうか？土壌の機能維持など、ご要望はすべて考慮されたのでしょうか？

トーマスとフロリアン私たちの農業のニーズや土壌の肥沃度を維持するための高い要求が当初から考慮されたため、フルプラクティスのパートナーとして、計画の全プロセスに関わり、あらゆる面での決定に参加しました。例えば、システムを設置するために仮設道路を建設し、特別なアンカーシステムによってコンクリートの基礎を省略することができました。

あなたにとって、このシステムでの栽培はどの程度実現可能なのでしょうか？

フロリアンデュアルユースのメリットを考えれば、絶対に実現可能です。栽培には一定の制約がありますが、それは関係ありません。やりたければ、やればいいのです。

での発電のメリットは何ですか？システムですか？

トーマス私たちの目標は、発電した電力をできるだけ自分たちで使い、エネルギーコストを削減することです。そのため、自家消費量をさらに増やし（注：固定価格買取制度がないため）、実務パートナーのElektrizitätswerke Schönau（EWS）の協力を得て、蓄電・管理・消費を発電に適合させようとしているのです。

から、もう一度このシステムを構築することを決めますか？今日の視点？

フロリアン研究工場としてはそうですが、現在の状況下ではそうではありません。

なぜですか？今後、アグリボルタイクスの応用を成功させるためには、何が変わらなければならないとお考えですか？

フロリアンそれは前提条件の問題です。すべてが変わらなければならないのです

トーマスドイツでは現在、これらは支給されていません。このシステムを構築することで、土地の農業補助金を受けられなくなります。同時に、発電した電力に対するEEGの固定価格買取制度も受けられなくなります。

フロリアン新しい技術を実際に導入するには、後押しが必要です。そのためには、それに応じて枠組みを適応させる政治的な意志も必要です。

トーマスまた、この技術をホップ栽培や果樹園、慣行農業など、他の分野にも応用できるよう、さらなる研究が必要

です。

4. テクノロジー

発電の仕組みは、アグリボルタイクスと地上設置型太陽光発電システムで同じです。しかし、農業用太陽光発電システムでは、土地耕作の関係上、システムの技術的なコンポーネントやサポートに対する要件がまったく異なります。システムの高さや位置合わせ、設置構造や基礎、場合によってはモジュールの設計など、すべてが農業機械による耕作と植物のニーズに適応していなければならないのです。収穫量を最大化するためには、高度な光と水の管理も重要である。

農地を耕作と発電の両方に利用するため、太陽電池モジュールは通常、畑から3~5メートル（成長著しいところでは7メートル以上）の高さに設置される。そのため、コンバインなどの大型農業機械が太陽光発電システムの下で農作業を行うことができる。また、植物に十分な光と雨を与えるため、従来の地上設置型太陽光発電システムに比べ、モジュール列の間隔が広がっているのが一般的です。そのため、表面積は3分の1程度に抑えられています。高さのある支柱と組み合わせることで、均一な配光を実現し、植物の生育を均一にします。また、追尾型モジュールを設置することで、栽培植物の発育段階やニーズに合わせた光管理が可能になる。^[27]

この場合、架台や太陽電池モジュールの選択は、一般的に地上設置型太陽光発電システムとは全く異なる。様々な技術や設計が、その場所特有の要件や農業条件を満たすものでなければならない。そのため、システムを計画する際には、光の管理を考慮することが推奨される。一般的に、太陽光発電システムは最先端のものでなければならず、一般的に受け入れられている規則や標準に準拠したものでなければなりません。

4.1 アグリボルタイクスへの取り組み

例えばフランスや日本のように、太陽光発電システムは高い支柱に取り付けられることが多い。ここでいうクリアランスとは、地面と最も低い構造要素との間にある、垂直方向に遮るものがない空間のことである。農地の二重利用のさまざまな可能性について、以下に説明する。



図 33: 空間的に分割された太陽電池とプロテクティブ機能を持つPVモジュール（オランダ）。© BayWa r.e.



図 34: ポテトハーベスターでモジュールの下を耕すことができる、高い取り付け構造を持つシステム。

© Hofgemeinschaft Heggelbach

背の高い支柱を使ったシステムは、相乗効果が期待できる（第3章）。しかし、PVモジュールの下での栽培を可能にする必要がある。（図34）。

また、PVモジュールは、雹や雨、夜間の霜などの異常気象に対する重要な保護機能を担うことができる。図 33 は、果樹園の上にある BayWa r.e. 社の研究プラントである。ネザールランドにあるこの工場では、セル間隔を広げたモジュールを使用しており、屋根と保護機能を強化すると同時に、他の太陽光発電システムよりも植物に多くの太陽光を供給している。

相乗効果は、地面に近い場所に設置されたモジュールでも実現できます。Next2Sunでは、これを垂直方向に設置するバイフェイシャルモジュールで実現しています。このタイプのシステムは、取り付け構造の高さが低いいため費用対効果が高くなりますが、利用できる光管理オプションも少なくなります。しかし、地上に近い場所に設置されたシステムは、風速を抑えることができ、蒸発に影響を与えるという利点もあります。



図 35: 垂直方向に設置されたバイフェイシャルモジュール（Donauessingen）。

© Next2Sun GmbH



図 36: フォイルトンネル上のPVモジュール。

© BayWa r.e.

TubeSolar AG社が開発した、支柱に水平に設置するチューブ型太陽電池も選択肢のひとつです。パートナー企業であるアグラティオ社は、この斬新なモジュールと低コストな支柱を組み合わせています。パートナー企業であるAgratio GmbHは、この斬新なモジュールと低コストの支持体を組み合わせています。ここでは、ソーラーチューブがステータに取り付けられ、耕作地の上に吊り下げられています。

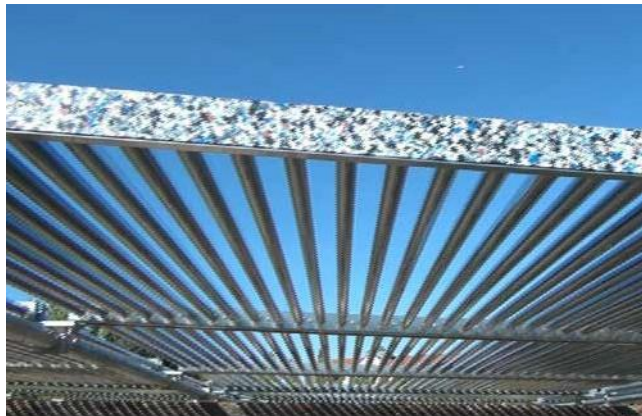


図 37: のフレキシブルPVストリップを使用した特殊チューブモジュール。
会社名 TubeSolar. © TubeSolar AG



図38: TubeSolar 社によってテンションケーブルの間に設置されたチューブ型太陽電池モジュールによる半日陰。© SBP SONNE GMBH



図 39: 高さのある架台と幅の狭い PV モジュールを組み合わせたシステム。© REM Tec

日本では「ソーラーシェアリング」という名称で、耕作地の上に非常に細いモジュールを設置し、光の利用を調整している。このように、太陽光発電システムは、農家の副収入源や老後の備えとして役立っている。このほかにも、さまざまなメリット・デメリットを持つ技術的なソリューションが考えられる。

4.2 モジュール技術

基本的に、太陽光発電システムにはあらゆる種類の太陽電池モジュールが使用可能です。世界の太陽光発電市場の約95%は、ウェハー型シリコン太陽電池を搭載したモジュールで占められている。前面にガラス板、背面に白色のカバーフィルムという構成が一般的である。不透明な太陽電池を2〜3mmの距離で直列に接続し、その間にラミネート加工を施した。取り付けと安定化のために金属フレームが使用されます。

透明な背面カバー（ガラス、箔）の場合、セルとセルの間の空間が光を大きく通し、下の植物に届く。従来のモジュールでは、セル間の空間は表面積の4〜5%を占めていました。この空間を大きくしたり、モジュールのフレームをクランプマウントに置き換えたりすることで、光の透過率を高めることができる。透過率の高いモジュールは、光の利用効率を下げずに、植物を環境から守ることができる。

また、バイフェイシャルモジュールは、裏面に入射する外光を発電に利用することができる。裏面に入射する光の強さによって、発電量は異なります。



図 40: 高い架台と連続したPVモジュールの列を持つシステム。© Sun'Agri

を最大25%増加させることができます（通常、1.5倍）。

5 と15%）。アグリボルタイクスでは、列間距離が大きくなり、支持体の高さが高くなる傾向があるため、モジュールの裏面で得られる光量が特に多くなる。そのため、二面採光型はアグリボルタイクスに適している。ヘッゲルバッハの研究プロジェクトでは、二面性のあるガラス-ガラスモジュールが使用されました。また、二重ガラス構造のモジュールは、ガラスが割れても強度が保たれるため、労働安全衛生上も有利である。

薄膜モジュール（CIS、CdTe、a-Si/ μ -Si）は、フレキシブル基板上で実現できるため、円筒形の曲げ加工が可能である。同じ構造であれば、ウェハー型シリコン太陽電池モジュールと比較して、単位面積あたりの質量が約500g/m²（グラム/平方メートル）小さくなる。

ただし、効率は多少落ちます。また、薄膜モジュールの単位面積あたりのコストは若干下がります。

これは、有機薄膜太陽電池（OPV）にも当てはまります。

OPVの活性層の選択的な分光調整も原理的には可能であり、太陽光スペクトルの一部を透過させ、その下に生育する作物に利用させることも可能である。しかし、OPVはまだ市場投入の段階にある。低効率や耐久性などが課題として挙げられる。

集光型太陽光発電（CPV）では、レンズやミラーで光を小さな光活性面に集光する。CPVモジュールは、非常に低集光率のシステムを除いて、太陽追尾で実装する必要がある。拡散光は大部分が透過する。現在、農業用太陽光発電に使用されるOPVとCPVモジュールのサプライヤーは、ごくわずかである。

4.3 マウント構造およびファンデーション

4.3.1 実装構造の設計

取り付け構造の種類は、特定の農業用途とそれぞれのニーズに適合させる必要があります。例えば、システムの高さやスチールサポート間の距離の計画などです。ここでは、使用する農業機械のヘッドランド、クリアランスの高さ、作業幅を考慮して決定することが重要です。ヘッゲルバッハの研究施設は、大型のハーベスターでも下を走行できるように設計されています。地面から構造物の底までの距離は5メートル。シナジー効果（第3章）の可能性もさることながら、クリアランスの高さを大きくすることで、土地への車両のアクセスが容易になり、システム下の光の分布がより均質になるというメリットもある。一方、投資額

一般に、クリアランスハイトが低いほど、必要な鋼材が少なく、静的な要求も少なくなるため、マウント構造のコストは低くなります。

太陽光発電システムの列の間隔、配列、高さは、光の利用可能性を決定するのに役立つので、非常に重要です。これらのパラメータは、アグリボルタシステムの下で栽培される作物のニーズに合わせて、常に調整する必要があります。例えば、ヘッゲルバッハの研究施設では、モジュール列の幅を3.4メートルとして、列の間隔を9.5メートルとしています。栽培する植物の耐陰性によって、これより高い値も低い値も可能です。しかし、畝の間隔を大きくすると、必要な土地が増えるため、発電量に見合ったシステムコストがかかる。

4.3.2 1軸と2軸のトラッキング

例えばフランスでは、以下のようなシステムがあります。

1軸または2軸の追尾式で、太陽電池モジュールが追尾機構によって太陽を追尾する方式。1軸追尾では、太陽電池モジュールは太陽の入射角（仰角）に応じて水平に、または太陽の軌道（方位角）に応じて垂直に太陽を追尾します。2軸追尾型はその両方を行うため、エネルギー収量が最大になる。しかし、大きなモジュールテーブルを持つ2軸システムは、モジュールの下に日陰を作り、フィールドの他の部分には全く日陰ができないことがあります。ヘッゲルバッハのシステムの予備調査では、PVモジュールの追尾はドイツ国内のサイトでは不経済であると考えられていました。

取得と維持のコストは高いが、トラッキングは植物栽培のためのエネルギー収量と光管理を最適化することができる^[27] (セクション 4.4 ライト)



図 41: フランスにおける太陽光発電システム実証実験の一軸追尾シ

管理)。平屋根を利用することで、2軸のトラッキングシステムは、雹や強い日差しから植物を守りながら、成長段階での日陰を減らすことができる可能性を持っています。

4.3.3 アンカーとファンデーション

アンカーや基礎は、太陽光発電システムの静止と安定を保証します。これらの安全要件を満たしていることの証明は、システムを構築する際に提供されなければならない（セクション 4.8.2.設置および運用）。太陽光発電システムの場合、貴重な農地を保護するために、永久的なコンクリート基礎は推奨されない。代替案として、杭打ち基礎やスピナン・カー・アンカーによる特殊な固定がある。コンクリートを使用しないため、跡形もなく解体することができます。

モバイル太陽光発電のコンセプトは、システムを組み立て、再び分解し、大きな機械を使わずに別の場所に設置することを可能にします。また、建築物の改造ではないため、建築確認が不要になるというメリットもあります。このように、モバイルアグリボルタは、危機的状況下での自然発生的な展開も含め、農業への柔軟な対応を可能にします。

図 42: アンカープレートとネジ式ロッドを備えたスピナンカー
アンカーは、設置システムの基礎となる。スピナンカー





図43: 東西、南、南東の方位を持つ様々なタイプの太陽光発電システムの図解。© Fraunhofer ISE

4.4 ライトマネジメント

農地の日陰は、太陽の一日の動きや、一年のうちで変化する位置によって変化します。植物の健全な生育、均一な裂け目、相乗効果の最大化のためには、均質な光が望まれる。これは様々な方法で達成することができます。

1. Heggel-bachでは南向き（0°）は選択されませんでした。シミュレーションと実測の結果、南西または南東の方位が最も適しており、それぞれ南からの偏差は45°であった。計算では、約5%の発電量の減少が含まれています。実際の配置は、地域の状況により異なる場合があります。
2. また、日本のソーラーシェアリングのように、南向きのまま幅の狭い太陽電池モジュールを使用する方法もあります。
3. また、モジュールを東西に並べることで、均質な照明を得ることができます。この方向では、日中の日陰の移動が最大になる。固定されたモジュールの下に、光を全く通さないアンブラができないように、モジュール列の横幅は、モジュール列の高さよりかなり小さくする必要があります。

方式を採用しています。目安としては、クリアランスの高さはモジュール列の幅の少なくとも1.5倍であるべきです。追尾型モジュールの場合、このファクターは少なくとも2であるべきです。一方、親モジュールの場合は、光透過の度合いに応じて、いずれの場合もファクターが減少する（4.3.2トラッキング参照）。

4. 太陽光発電モジュールの2軸追尾は、選択的な光管理と高い発電量を実現するためのもう一つの選択肢である。しかし、4.3.2 節で述べたように、これは高い投資とメンテナンスコストを伴う。モジュールテーブルが大きく、2軸追尾のシステムは、モジュールの背後にアンブラがあるため、栽培植物の栽培には適さない傾向がある。そのため、圃場の他の部分は常に太陽光にさらされることになる。

ヘッゲルバッハでは、傾斜角20°の太陽光発電モジュールの列の間隔が、従来の地上設置型太陽光発電システムに比べて約60%拡大し、全太陽光の約69%を植物に利用できるようになりました。

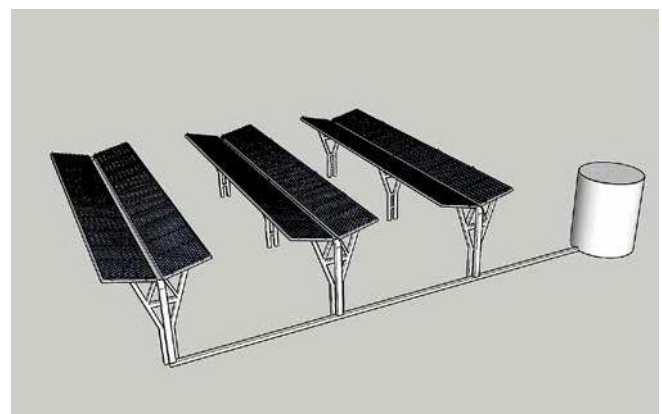


図44. 太陽電池モジュールの下にある遮光帯は、太陽の位置によって移動する。© Universität Hohenheim

図45. 地下貯水槽を備えた雨水利用システムのコンセプト。© Fraunhofer ISE

4.5 水管理

モジュールの軒先から流れ出る雨水は、土を流して土壌侵食の原因になることがあります。

リスクのある場所や用途で植物の生育に悪影響が出るのを避けるために、システム設計では様々な水管理方法を検討することができる。光源管理と同様に、幅の狭い、あるいはチューブ状のPVモジュールは、モジュール端の下に大量の水が溜まるのを防ぐことができる。一方、作物の構造的な保護を目的とする場合は、PVモジュール^[28]を追跡して軒先からの降雨を分散させたり、雨水を流したりする方が良い選択肢である。後者の場合、灌漑によって十分な水を供給する必要がある。雨水を集めて貯めることで、特に乾燥地帯では地下水資源の保全につながったり、そもそも農業を可能にしたりすることができる。

4.6 PVシステムの大きさ

太陽光発電システムの平均設置面積は、国によって大きく異なる。経済性、分散性、社会性はもちろんのこと、景観への影響や社会的受容性も重要な判断基準となっています。例えば、日本では30～120kWの小規模なシステムが主流です。一方、中国には数百MWpの発電所がすでに建設されている。



図46:194kWpの容量を持つヘッゲルバッハの太陽光発電システム。
© BayWa r.e.



図47 : Next2Sunによる縦型PVモジュールを搭載した2MWpの
Solarpark Eppelborn-Dirmingen。© Next2Sun GmbH

技術的適合性のためのチェックリスト

- 現地でどのようなことが起こっているのか、どのようなことが起こっているのか、どのようなことが起こっているのか、どのようなことが起こっているのか。
方向、農業機械のヘッドランドなど、様々な分野で活用されています。
の配列に影響を与えます。
モジュール？
- の実装構造、寸法は大丈夫ですか？

作業幅に合わせたサポートとキャリア
農機具のフェンダーは必要ですか？
を搭載していますか？
- どのようなモジュール技術を使うか？選択
は、常に農業用途に適応させるべきであり

の製品を使用しています。
- どのようなアンカーまたは基礎システムを使用するか
跡形もなく確実に撤去するために？
- 降水量が非常に多い地域なのでしょうか？その

雨水分配器や集水器を設置する

システムが有効な場合があります。
- 蓄電池の利用は技術的にも環境的にも大丈夫か？
というのも、このような場合、「合理的である」ということが重要です。
- 乾燥した好条件の土壌は何月に発生するかが存在し、建設が可能なのか？休耕地はいつですか？
機械用地盤を敷けるように？これは
は、土壌の圧縮を防止します。
- を防ぐために、どのような対策を講じればよいのでしょうか。
耕作地の障害？

- 風荷重、雪荷重はどの程度か、また、どの程度か。
の支持高による追加荷重が発生します。
マウント構造？

表4：アグリボルタイクスの認可ステップの概要。

プロセスステップ	インスティテューション	コメント
建築許可証	自治体	ゾーニングマップおよび開発計画
必要な専門家の意見	認定エキスパート	環境・土壌・防眩報告書。風荷重試験。
地役権の記録	公証人	権利関係や所有権構造など
保険	保険会社	Gothaer Versi-cherung 保険会社と共同で行った調査では、太陽光発電システムの保険金額は、同等の従来型太陽光発電設備よりも著しく高額にならないはずであることが示されました

ドイツが今後どのような道を歩むかは未知数であり、地域によって見方が異なるだろう。小型のシステムは、特殊な作物の上に設置されるのが一般的で、以下のような特徴を持つ南ドイツの地域に対応しています。

また、土地の面積が小さく、美的感覚に優れているため、大規模な農業用太陽光発電システムを設置することができます。一方、ドイツ北部や東部の広大な土地を持つ地域では、大規模な農業用太陽光発電システムが、規模の経済によって低い年間日射量を環境的に補償するために、理にかなっているかもしれません。

農業用太陽光発電システムは、同じ公称出力の地上設置型太陽光発電システムに比べ、通常20～40%高い土地が必要とされます。現在アグリボルタシステムは1ヘクタールあたり500～800kWp、従来の太陽光発電システムは設計により600～1100kWpの発電能力があります。

バイフェイシャルモジュールを使用することで、電力の収量を増やすことができる。ヘッゲルバッハの研究プラントでは、稼働初年度の出力が1kWpあたり1284kWhであったのに対し従来の太陽光発電設備では、1kWpあたり1209kWhの発電量にとどまっています。

4.7 承認・設置・運用

4.7.1 アグリボルタシステムの承認プロセス アグリボルタシステムの建設には、いくつかの具体的な承認プロセスを考慮する必要があります。必要なものの文書は、技術パートナーとの緊密な連携のもとに作成さ

れる必要がある。必要な許認可、専門家の意見、書類の概要は表4のとおりです。

ヘッゲルバッハの研究所では、アグリボルタシステムの
下にある耕地が特別利用区域に認定された。このため、
耕作が続いても、農地補助金の請求権は永久に失われた
。さらに、アグリボルタイク技術は、地上設置型太陽
光発電の入札に関する条例やEEGの固定価格買取制度の
対象にはなっていない。認可プロセスに関する詳しい情
報は、6.1節を参照されたい。

ドイツには、現在、太陽光発電システムの認証制度はあり
ません。Fraunhofer ISEは現在、プロジェクトパートナー
と協力して、入札、資金調達の適格性、または簡略化され
た計画プロセスの基準となる品質基準を定義するDIN仕様
の作成に取り組んでいます。これには、VDE（電気・電子
・情報技術協会）やTÜVのような認証機関が適用できる、
太陽光発電の指標とそれに対応する試験方法の定義が含ま
れています。

図 48. 土壌の圧縮を防ぐための建設用道路。

© BayWa r.e.



4.7.2 ヘッゲルバッハを例としたアグリボルタシステムの設置について

太陽光発電システムは、それぞれの地域の条件や栽培方法に適合させる必要があります。プロジェクト計画や土地利用計画などは、通常、専門業者が担当します。ヘッゲルバッハの研究施設では、BayWa r.e.がこれらの業務を請け負った。

テクニカルパートナーは、システムの構築・設置・運用に関わる全ての企画・工程を担当します。これには

- 余剰電力を買い取るパートナーを見つけることやグリッドに供給するための
- 資材調達・物流計画
- サイトセットアップと土壌保全の構築
- システムセットアップ
- 接続・雷防護・監視のコンセプト
- グリッドコネクション
- 技術的な保守と除去

Herdwangen-Schönach市議会による研究プラントの開発計画に関する最初のヒアリングは2015年10月13日に行われ、わずか半年後の2016年4月6日に建築申請書が提出されました。フラウンホーファーISEは、2015年7月24日にNetze BWからグリッド接続の認可を取得しました。建築許可証は

2016年5月3日に発行されました。しかし、工事承認は、独立した試験技術事務所による静力学の審査に結びついた。また、基礎の実際の保持力を計算し、記録するための土質報告書が作成されました。

この専門家による報告書の結果やテストエンジニアからのフィードバックは、アグリバイオ搭載構造の改訂に反映されました。

太陽光発電システムの設置は、養生条例に基づき各社に発注され、施工順序はヘッゲルバッハ協会と綿密な打ち合わせの上、調整された。太陽光発電システムのパワーエレクトロニクスと配線は、完成後すぐに送電線に接続できるように設置されました。静力学計算が行われ、それに応じてアグリボルタシステムが適合されました。特に、アグリボルタシステムの基礎には、スピナンカーアンカーに加え、アルピナンカーアンカーを設置する必要があった。

当初のスケジュールでは、着工は2016年の7月を予定していました。しかし、さまざまな建築法の遅れから予備工事が間に合わず、着工は2016年の8月までずれ込んだ。それでも、2016年9月18日のオープニングセレモニーに間に合うように、無事にシステムが完成しました。

4.7.3 稼働中のアグリボルタイクス

太陽電池モジュールは、作物の栽培や支持構造の高さにより、常時完全にアクセスできるわけではありません。そのため、メンテナンスや修理は、畑が休耕状態のときに行う必要があります。安全が第一であり、すべてのメンテナンス用車両が畑での使用に適しているわけではありません。今後、メンテナンスの間隔や作業範囲、コストの計算など、メンテナンスと修理のコンセプトを確立していく予定です。



図 49: ヘッゲルバッハのアグリボルタシステムのメンテナンス作業。

5. 社会

太陽光発電の技術的、経済的、環境的な側面もさることながら、計画段階から様々なステークホルダーや影響を受ける市民と信頼関係を築き、協力していくことが非常に重要である。

再生可能エネルギーの分散型発電、貯蔵、利用とともに、地域の食糧生産、自然保護、耕作地やレジャーの景観保護など、達成すべき持続可能性の目標について共通の理解を深めることが特に重要である。学際的、横断的なアプローチは、様々な興味や期待だけでなく、好みや懸念も考慮に入れ、受け入れの問題を軽減し、地元の投資家と共に現場でエネルギー転換を推進するのに役立ちます。このように、投資家側のプレーヤーと地域の価値創造の幅が広がり、太陽光発電システムの建設決定に至るまで、住民の利益が考慮されるようになるのです。

再生可能エネルギー発電の加速的な拡大は、一般的にあらゆる社会階層で広く受け入れられています。近年の世論調査でも、70～90%の支持を得ている。また、「未来をつくる金曜日」のような若者の運動も、より早く、より一貫したエネルギーシステムの変革に取り組んでいる。しかし、再生可能エネルギーの供給拡大は、計画法や自治体の政策に従ったとしても、地上設置型の太陽光発電システムや風力発電システムの建設に適した場所の確保や、具体的なプロジェクトの実現には至っていないのが現状である。^[29]エネルギー転換を地方で実現するために、再生可能エネルギー発電システムの拡充が社会的に一般的に受け入れられ、非常に具体的で敵対的な態度になるのには、様々な理由がある。しかし、リスクと便益の主観的な秤量が重要な役割を果たす。特に、土地配分や景観など、環境に対する地域的な変化に伴う経済的、健康的、景観的なデメリットの可能性を懸念している。^[29]

特に、ドイツではEEGの補助金がなくても大規模なソーラーパークが建設されている。ブランデンブルク州のSolarpark Wee-sow-Willmersdorfは、政府からの補償金なしで計画された顕著な例である。164ヘクタールの土地に180メガワット以上の設備容量を持ち、約5万世帯に持続可能なエネルギー供給を提供している。ソーラーパークに必要な土地は、限られた面積の農地への需要を増大させる。そのため、地域の土地利用競争が激化し、賃貸料の高騰や社会的な論争を引き起こす可能性があります。

5.1 市民・ステークホルダーの参画

紛争を防ぐためには、インフラプロジェクトに市民やその他のステークホルダーを早い段階から参加させる必要があります。そこで、APV-RESOLA研究プロジェクトの一環として、カールスルーエ工科大学（KIT）の技術評価・システム分析研究所（ITAS）は、地域の住民とその関係者を対象とした調査を実施しました。



図50 : APV-RESOLA プロジェクトにおける市民とのワークショップの様子。

© ITAS

プロジェクトに関わるステークホルダーや地域住民の期待や関心事を分析し、さまざまな社会的視点や認識を把握。^[30]これにより、さまざまな社会的視点や認識を把握することができました。

このプロジェクトでは、意見と規範的な価値体系、起こりうる障害、推進要因をアプリケーションごとに特定し、分析することに焦点を当てました。^[31]ここでは、持続可能な分散型エネルギー供給に関する成功要因を探り、社会的に重要な将来の疑問に答えることを意図しています。したがって、この技術開発プロジェクトにおける調査は、市民やステークホルダーの洞察、経験、視点、好みを把握し、アグリバイオ技術に対する個人の認識、評価、評価における類似点と相違点を分析し、対立の可能性を早い段階で特定するために行われたのである。そのうえで、市民や関係者に代わって、技術開発プロセスや制度設計の中で、適切な周辺条件や許容される条件について検討することになった。

太陽光発電システムは、農業とエネルギー供給という分野横断的な事業であるため、すべての参加者とのコミュニケーションが非常に重要である。

この研究プロジェクトは、農業、エネルギー部門、ネットワーク事業者、自治体、市民が一体となって、利害関係、好み、懸念事項の相互理解を確立し、エネルギー転換に関する共通のビジョンを策定し、成功のための条件を検討し、適地を特定することがいかに重要であることを示しました。これは、分散型の再生可能エネルギー供給と、貴重な農地、生物多様性、「手つかず」のレクリエーション景観を保護するための具体的な計画を作成するのに役立ちます。

5.2 参画のためのアプローチと方法

研究プロセスに市民やステークホルダーを参加させるには、参加のための明確な枠組みが必要であり、人為的な気候変動などの問題に対する理解の共有や、分散型エネルギー移行などの共同で策定したビジョンに基づく必要があります。また、市民やステークホルダーの役割や参加プロセスに関する誤解を避け、誤った期待を抱かせないために、研究やプロジェクトの目的は明確かつオープンに伝えられなければなりません。^[29]この条件が満たされないと、様々な期待が裏切られることで失望や対立が生じ、それまで築いてきた関係者間の信頼の絆が損なわれたり、破壊されたりする可能性がある。コミュニケーション・プロセスは、以下を可能にするものでなければならない。

参加者の固有の論理と利己主義を克服しなければならない。一方は、拡張性のある解決策を求め、科学的基準に沿った出版に関心を持つ科学者であり、他方は、オーダーメイドで、簡単に実行でき、効果的で、市場価値のある解決策を求める実務者である。^[29]

トランスディシプリナリーリサーチは、実証的な社会科学の手法とツールをベースに、問題や課題に応じて、市民フォーラムからステークホルダー・ワークショップまで幅広いアプローチで行われる。科学、産業・経済システム、政治・行政、社会が共同で実用化に向けて取り組むトランスディシプリナリーな研究形態は、技術開発におけるコ・デザイン・アプローチに特徴的である。市場導入に先立ち、これらの開発を「現場」で小規模に試行錯誤することで、対立軸を早期に特定し、新技術の受容基準や投資判断のあり方を探ることができる。

APV-RESOLAプロジェクトでは、ボーデン湖畔の

Hofgemein- schaft Heggelbachが所有する土地で、市民やステークホルダーを巻き込むために、様々な形式とタイミングで多段階の横断的プロセスが実施されました。技術評価・システム分析研究所（ITAS）は、関係者向けの説明会の後、パイロットプラント建設予定地の近辺に住む18歳から80歳の市民全員に、このプロセスへの参加に関心があるかどうかを尋ねました。そして、アグリボルタイクスの可能性と課題に関するオープンなブレインストーミングを関係者全員で実施した。そして、システム建設から1年後、再び第1回目の参加者を招き、市民ワークショップを開催しました。この市民ワークショップの目的は、次のような分析でした。



図 51: ヘッゲルバッハの作業所向け太陽光発電システムのモデル。© Fraunhofer ISE

意見・価値観が変化する可能性があります。また、ビジネスゲームも開発し、立地選定基準の作成に活用した。第2回目の市民ワークショップの前に、アグリボルタイックのコンセプトに基づく第1回目の市民ワークショップの結果と、パイロットプラントを実際に視察した市民の感想を比較するためのアンケートを実施した。

その後、技術開発、マーケティング会社、政治、自治体、地域、州行政、農業、自然保護、エネルギー部門、エネルギー協同組合、観光、市民の関係者が、市民ワークショップの結果や、アグリボルタイック技術やそのフレームワークのより持続可能な設計のための市民の提案やアイデアについて議論した。その結果、いくつかの点が重要な成功要因として確認され、試験段階でも実施されました。発電した電気を地域で貯蔵・利用することで資源効率を高めることは、その顕著な例である。

5.3 成功要因

アグリボルタプロジェクトにおける学際的な研究により、アグリボルタイック技術の重要な成功要因として以下の10項目が挙げられました。

1. 屋根、工業用建物、駐車場など、既存の太陽光発電の可能性を活用することは、太陽光発電システム用地の特定よりも優先されるべきです。
2. 太陽光発電システムは、太陽光発電を現場で使用したり、灌漑、冷却、農産物の加工など、より高い価値を生み出すプロセスで使用するために、分散型エネルギー供給に統合する必要があります。
3. 太陽光発電システムは、蓄電システムと組み合わせることで資源効率を高め、利用可能な電力を地域の需要に対応できるようにする必要があります。
4. 太陽光発電システムの下で農業を行うことは、太陽光発電モジュールの下で「擬似農業」を行い、発電量の一方的な最適化を防ぐために、義務化されなければならない。
5. アグリボルタシステムは、栽培植物の熱ストレスを軽減するための遮光や、発電・蓄電など、土地の二重利用による相乗効果が期待できる場所に建設する必要があります。

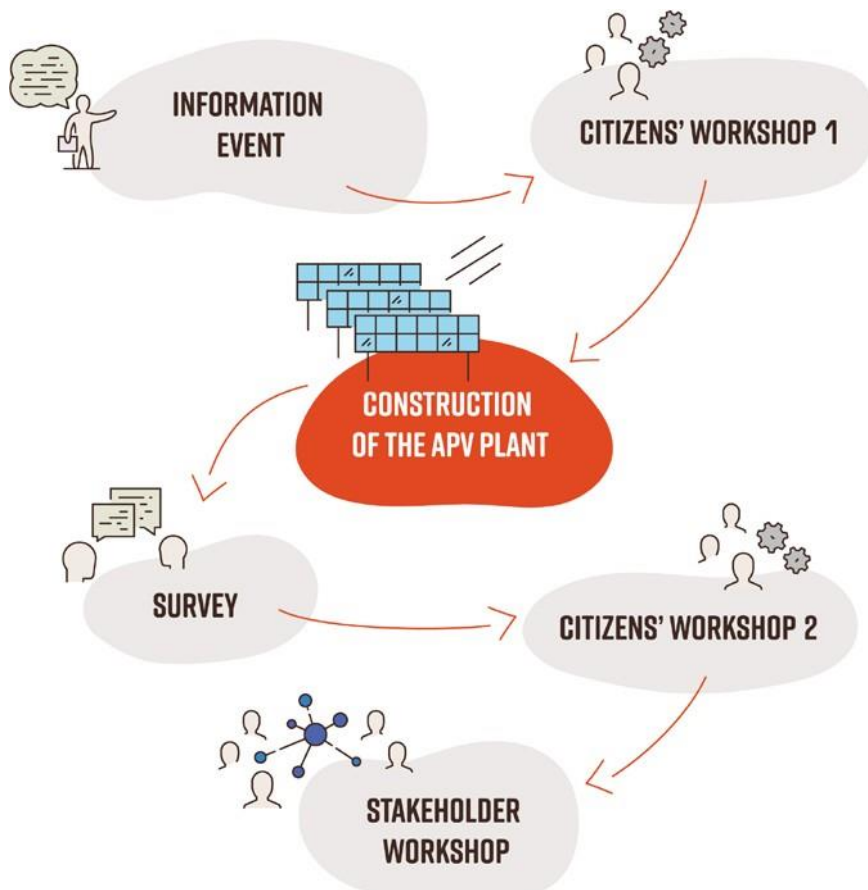


図52. 多段階の学際的なアグリボルタイック研究アプローチ。© ITAS

また、作物の灌漑に電気を使ったり、デジタル土地耕作を行うこともできます。

電化や将来の自律的なシステムとの融合が可能です。

6. また、風力発電と同様に、住宅地までの最短距離を、地域の特性や社会的な要望を考慮しながら設定する必要があります。
7. 太陽光発電システムは、地域のレクリエーションや観光、景観の魅力に悪影響を与えるものであってはならない。自然な形で視界から遮られる場所（例：森の端）や平坦な場所は、システムが景観に最もよく溶け込み、「見えない」ようにするために好まれるはずである。
8. 農業用太陽光発電システムの認可は、農業セクターのための特権的な建築法のためにバイオガスプラントで見られたような農業用太陽光発電の無秩序な成長を避けるために、厳しい法的規制と市民参加に従って発行されるべきです。自治体と市民は、太陽光発電システムの設置場所を特定する際に、共同決定権を持つべきである。
9. 農業用太陽光発電システムは、地元の農場、エネルギー協同組合、または地域の投資家によって建設・運営されることが望ましい。
10. アグリボルタシステムに沿った耕作不可能な土地は、侵食防止に使用し、農業文化景観の生物多様性を維持するためのコリドー・ビオトープとして機能させるべきである。

様々な農業用途に対する受容度の違い

一般に、耕作よりも特殊作物や永年作物の方が、より社会的な受け入れが期待される。ひとつには、クリアランスの高さが低いため、視覚的なインパクトが軽減されることが挙げられる。

もう一つは、景観の外観は、アグリボルタイクスでなくても、ここではすでにホイルトンネルやひょうよけネットによって影響を受けていることである。特殊作物や永続的な作物に対する農業用太陽光発電のアプリケーションの可能な付加価値は、人口や潜在的なユーザーの間でおそらく高い受容性の最も重要なドライバーの1つです。農業の付加価値は、日陰による栽培植物の熱ストレスの軽減、侵食防止、再生可能電力による灌漑、生物多様性の拡大、またはより困難な条件下でも安定した収量など、太陽光発電システムからのさまざまな利益で構成することができる。

また、気候変動による気候条件の変化にも対応しています。このような利点の証明と実現は、農業用太陽光発電システムの住民への受容性を向上させ、農業への太陽光発電の統合に関連する可能性を実現するために、重要な役割を果たすと思われます。

特殊作物や永年作物の圃場面積は耕作地に比べて通常小さいので、システムサイズも通常小さくなるはずである。これは、景観へのアグリボルタシステムの統合を改善し、PV電力を自家消費することを可能にし、その結果、受け入れに良い影響を与えるだろう。



図 53: アグリボルタシステム内で耕作できない中間帯は、耕作地の生物多様性を維持または増加させるために利用できる。© Fraunhofer ISE

6. 政治と法律

ドイツ連邦政府は、2035年までに再生可能エネルギーによる発電の割合を電力総消費量の65%まで高めるという目標を掲げています。現在、2021年のEEG改正案では、温室効果ガスニュートラルの達成を目標に掲げています。

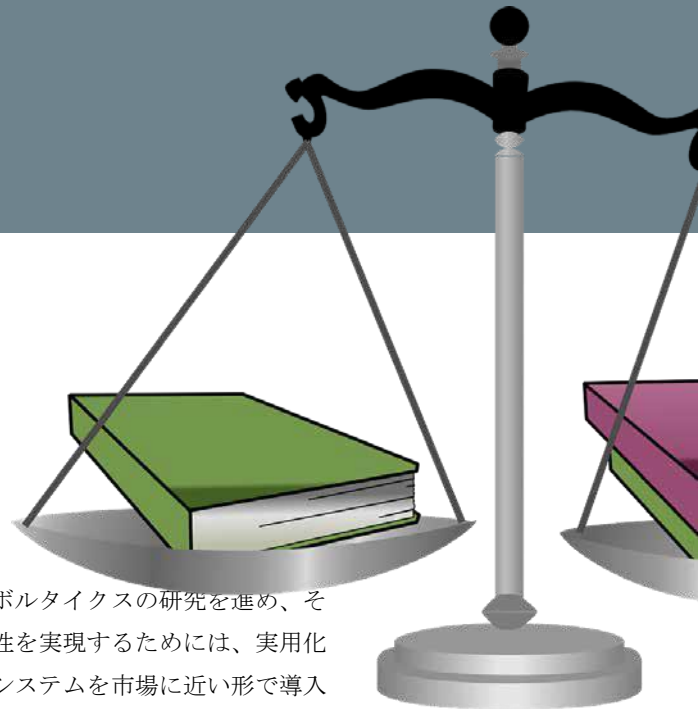
2050年までにドイツ国内の全電力を太陽光発電でまかなうことを目標としています。シナリオによると、この目標を達成するためには、PVを最大で500GWpまで拡大する必要があります。これは、現在の太陽光発電容量をおよそ10倍にする必要があることを意味する。太陽光発電の拡大のかなりの部分は、現在最もコストの低い地上設置型システムで実現されると思われる。

しかし、地上設置型太陽光発電システムの拡大は、土地使用量の削減という政治的目標と相反する。そこで、2030年までに居住地と交通のための新たな土地利用を1日あたり30ヘクタールまで減らし、2050年までには完全にゼロにすることが求められている。これは特に、食料生産に必要な肥沃な土壌を確保することを目的としている。現在、ドイツでは1日あたり約56ヘクタールの土地が新たに居住地や交通機関用に指定されている。これは、サッカー場約79面の土地消費に相当する。

屋根やファサード、密閉された場所、露天掘りの湖などに設置する太陽光発電システムのほか、アグリボルタイクスもスペースニュートラルで、同時に気候にやさしい発電に貢献する可能性があります。

しかし、法的枠組みへの統合がなければ、ドイツにおけるアグリボルタイクスの経済的な導入は、近い将来ほとんど不可能になるであろう。農業補助金、規制認可、再生可能エネルギー法（EEG）に基づく資金援助は、規制の厳しい農業や発電所において非常に重要である。

エネルギー部門特に、学習効果と規模の経済がまだ実現されていないにもかかわらず、既存の技術と競争しなければならないような新しい技術に当てはまります。



アグリボルタイクスの研究を進め、その可能性を実現するためには、実用化されたシステムを市場に近い形で導入することが必要です。

そのため、さらなる研究プロジェクトに加えて、このような方法をとることが賢明であると思われます。これにより、農家や太陽電池事業者とともに、この技術の受容性、経済性、さまざまな応用分野についての見識を深めることができる。ドイツは、フランスの経験から学び、適切な資金調達手段を用いて、この技術のさらなる発展のための道を開く機会を得たのである。EEGの特別入札とそれに伴うアグリボルタイクスのための土地面積の拡大は、次の論理的ステップとなり得る。

6.1 法的枠組み

以下では、法的枠組みの主要な側面について概観する。すべての法的側面、事例、状況をここで検証することは不可能である。最終的には、それぞれのケースを個別に検討する必要がある。

6.1.1 EUダイレクトペイメント

EUは農業政策の一環として、主に農業に使用される土地に対して直接支払いを行っています。そこで重要なのは、農地がアグリボルタイクスの使用によって財政支援の資格を失うかどうかということです。この文脈で興味深いのは、トウモロコシ迷路と呼ばれるものに関する連邦行政裁判所（BVerwG）の判決である。¹。連邦行政裁判所の意見では、このようなトウモロコシの迷路は、簡潔に言えば、土地

の農業利用を大きく制限するものではないので、財政支援の資格に影響を与えないとされています。この判決からアグリボルタイクスに対して何が導き出されるのだろうか。

縦置き、横置きともに、太陽光発電と農業を同じ敷地内で混在させることができる。垂直設置型では列と列の間のスペースで農業が行われ、水平設置型ではモジュールの下を耕作する。ここでは、その土地がほとんど農業に利用されているかどうかが決め手となる。直接支払い実施規則（DirektZahlDurchfV）第12条第3項では、農地利用のためのシステムを備えた土地面積は、農地利用のためのシステムを備えた土地面積と規定されている。

は、主に非農業的な活動に使用されています。連邦政府の見解に従えば

しかし、この規定は、欧州法を考慮して解釈されなければならない。

重要な基準は、アグリボルタイクスの強度、種類、期間、タイミングのすべてが、以下の通りでないことです。

土地の農業利用を厳しく制限している。この観点は、レーゲンスブルク行政裁判所でも、次のような判決で踏襲されました。

太陽光発電システムの下で羊が放牧された場合²

。農業利用の深刻な制限は、他の活動が並行して行われているために、それぞれの事業が農業活動を行う上で現実的かつ重大な困難や障害がある場合に存在すると考えられます。問題のケースでは、これは与えられなかった。したがって、裁判所は、付与されるべき経済的支援は であると判断した。³

農業用太陽光発電システムの適切な計画と設置により、農業利用は損なわれないか、あるいはごくわずかであるため（例えば、取り付け構造のサポートによる）、農場はEU法の直接支払いの要件を満たしているという見解を支持する十分な論拠がある。したがって、太陽光発電システムが設置されていても、EUの耕作補助金を受けることができますし、受けるべきです。このことを国内のDirektZahlDurchfV（直接支払い実施規則）で具体的に定義すれば、事業者の計画信頼性が確立されるかもしれません。そうでない限りは、早い段階で当局に相談し、要件を満たしていることを納得してもらうことが一般的である。

6.1.2 公法

太陽光発電システムは、建築規制法の観点からは、一般に物理的な構造物とみなされます。その建設には、通常、建築許可証（⁴）が必要です。これは、公法上の規制が反対を唱えていない場合に発行されます。公法上の規制には、建築規制法の要件（州の建築基準法に従って決定）と建築設計法の要件（連邦建築基準法BauGBに従って決定）が含まれます。

建築設計法における許可は、土地の立地条件によって異なります。土地が開発計画の対象となっている地域にある場合、開発計画の要求事項を考慮する必要があります（BauGB第30、31、33条参照）。開発計画の対象外の土地では、建築設計法上の許可は、プロジェクトが市街地の一部であるか（BauGB第34条参照）、市街地外であるか（BauGB第35条参照）によります。

一般的に、問題となるのは都市部以外の地域である。ここでBauGBは、特権的なプロジェクトとそれ以外のプロジェクトを区別している。BauGB第35条第1項による特権的なプロジェクトは、公共の利益に反する場合にのみ、例外的に禁止されます。一方、都市部以外のその他のプロジェクトは、公共の利益に反しない限り、BauGB第35条第2項により一般的に禁止されています。特定の公益は、35条3項BauGBに明示的に列挙されています。ゾーニングマップでの描写や土地利用計画での要求事項がそれにあたります。

BauGB第35条第1項には、特権的なプロジェクトの完全なリストが記載されています。これらの特権的なプロジェクトには、例えば、以下のようなプロジェクトが含まれます。

- 農業または林業に従事し、営業施設のごく一部を占めるにすぎない（No.1）。
- 園芸生産業務に従事している（No.2）、または
- は、構造上建物に付属するものであれば、許可された建築物の屋上や外壁で太陽放射エネルギーを利用することができます（No.8）。

したがって、アグリボルタインは特権的なプロジェクトとして明示的にリストアップされていない。このため、農業用太陽光発電を特権的な事業として分類することを正当化するために必要な労力は、かなり増大する可能性がある。連邦行政裁判所によれば、この要件は、「合理的な農家が、ほぼ同じ目的、ほぼ同じ設計、構成でこのプロジェクトを実施する場合」にのみ満たされる。さらに、このプロジェクトが具体的なプロジェクトに割り当てられていることが、外部に認識される必要がある。

¹ 連邦行政裁判所、2019年7月4日の評決、ファイルNo.3 C 11.17.

² 2018年11月15日の評決、ファイルNo.を参照。RO 5 K 17.1331を参照。

³ また、EuGH, verdict of 2 July 2015, file no.C-684/13 (Demmer verdict)を参照。

ミュンヘン高等行政裁判所、2016年4月19日の評決。

ファイル番号21 B 15-2391。

⁴農業用発電システムは、連邦排出ガス規制法（BimschG）実施のための第4条例（第4連邦排出ガス保護条例（BimSchV））の付属書に記載されていないため、連邦排出ガス規制法は適用されない。

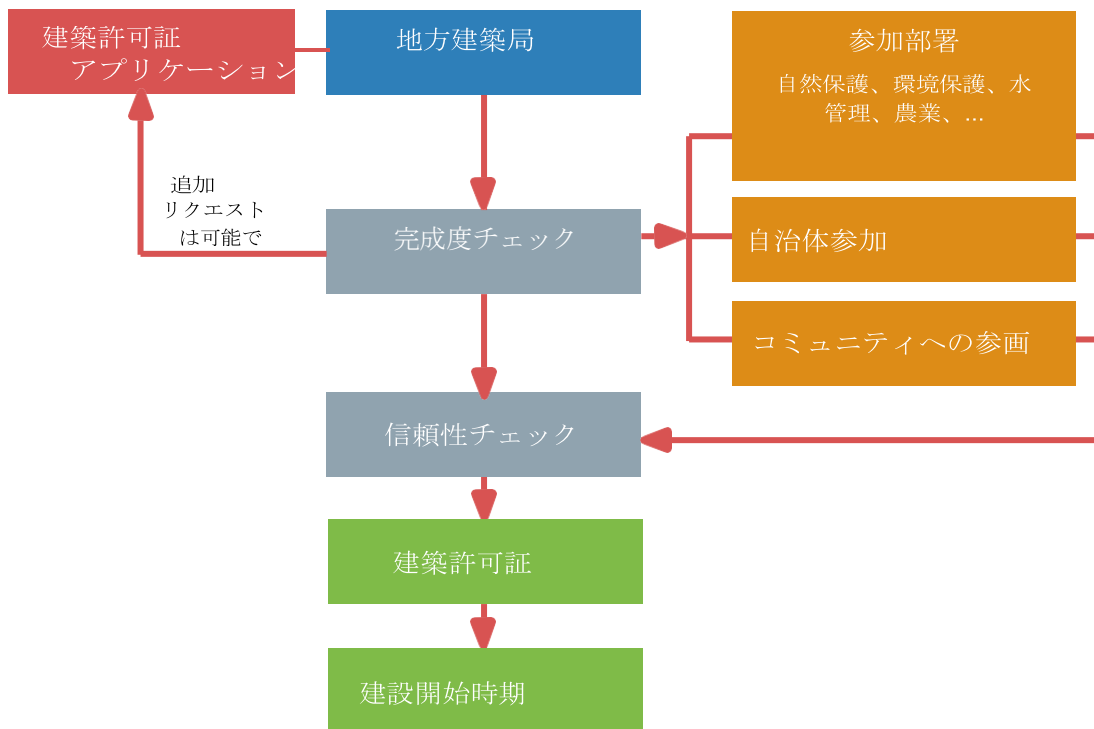


図 54: 建築申請時の処理例。

の操作」⁵。これは、アグリボルタシステムにとってどのような意味を持つのでしょうか。建物や生産活動にエネルギーを供給するために必要なシステムは、基本的にこの要件を満たしている。システムの総容量に占める発電量の割合が重要な意味を持つかどうかは、決定的である。公共送電網に供給するための割合を大幅に上回らない場合、システムの「供給」機能は欠如している。連邦行政裁判所は、風力発電所の発電量の約3分の2を農業に利用することを、「農業のための電力供給」とみなしている。十分である⁶。また、プロジェクトによる運用の形成には、運用プロセスの焦点に太陽光発電システムが物理的に近接していることが必要であると思われます。

BauGB第35条第1項で使用されている農業という用語は、BauGB第201条で別途定義されています。園芸の生産もそこに記載されている。したがって、35条1項2号による特権はしたがって、BauGB第35条第1項第2号による特権は、鉢、容器、その他の容器、特に温室で植物を栽培する事業にも適用されるはずである。

BauGB第35条に基づき、都市部以外でのプロジェクトが許可されない場合、開発計画の作成（ゾーニングマップの一部修正で可能）を検討する必要があります。その場合、開発計画の要件「のみ」を満たす必要がある。しかし、「標準化要件」と呼ばれるものは、この点で問題であり、自治体は、以下の規定に拘束されるからである。

BauGB 第 9 条と連邦土地利用条例（BauNVO）。BauNVO 第11条に基づき、「太陽光発電」を「特別地域」として設定することが解決策となる可能性があります。しかし、その場合、農業利用を同時に規定することができるのかという問題が生じる。プロジェクト固有の開発計画と呼ばれるものを通過させることで、自治体は第9条BauGBとBauNVOを考慮せずにプロジェクトを許可できるため、計画法の余裕を活用することが可能である。しかし、BauGB⁷とBauNVOの規定は、常に指導的な役割を担っています。そのため、プロジェクト固有の開発計画⁸の範囲内であっても、秩序ある都市開発は守られなければならない。

太陽光発電は自然環境に介入するものなのか、という疑問が常につきまとう。介入を避けることが優先され、避けられない重大な損傷は補償されなければならない⁹。しかし、この文脈では、適正農業規範の規則に従った土地利用は介入に当たらないという特権が存在する¹⁰。ある地域が使用されている場合

⁵ 連邦行政裁判所、1972年11月3日の評決、ファイル番号。4 C 9.70.

⁶ 連邦行政裁判所、2008年11月4日判決。

ファイルNo.4 B 44.08..

⁷ 特に第9条BauGB。

⁸連邦行政裁判所、NVwZ 2003, 98

⁹ BNatSchG 第13条(1)を参照。

¹⁰BNatSchG 第13条(2)を参照。

を発電に使用することは、現在、ドイツ連邦自然保護法（BNatSchG）第14条1項に基づく介入にあたります。例えば、APV-RESOLAの研究プロジェクトも介入とみなされ、エコアカウント条例（ÖKVO）に従ってエコポイントを利用する必要がありました。この条例では

バーデン・ヴュルテンベルク州では、介入プロジェクトの補償措置として後日割り当てられる、事前の自然保護および景観保護措置（エコアカウント措置）の認識と評価に関する要件を定めています。

アグリボルタイクスによる土地の農業利用のメリットは大きいので、少なくとも検討する必要がある土地の割り当てが適正農業規範に則っており、ドイツ連邦自然保護法（BNatSchG）に基づく介入にあたらないかどうか。この概念をさらに推し進めれば、次のようなことも考えられる。
農業用太陽光発電システムがÖKVOに基づくエコポイントを獲得できるかどうか尋ねてください。

6.1.3 再生可能エネルギー法（EEG）

アグリボルタシステムは、EEG第3条第1項に基づく再生可能エネルギーによる発電システムである。アグリボルタシステムの運営者は、EEG第8条1項に従い、系統運用者による優先的な系統接続を受ける権利がある。このためには、経済的な総コストが最も低い系統連系オプションを決定する必要がある。このオプションが特定されると、誰がどのコストを負担するかが明らかになる。具体的には、系統拡張コストは系統運用者が負担し、系統接続コストは系統運用者が負担する。

太陽光発電システムの運営者は、EEG第11条第1項に基づき、発電された電気を優先的に購入する権利も有している。ただし、システム運用者は、電気を系統に供給する必要はなく、原則として、電気を直接利用することもできる⁽¹¹⁾し、系統に供給する「前に」第三者に供給することもできる⁽¹²⁾。

系統に供給される電力の固定価格買取制度は、もっと

を複雑にした。まず、インストールされているシステムのオペレーターが100kWpを超える容量の電力は、第三者に販売することが義務付けられている。そのため、系統運用者は例外的にしか電気を買い取ることができない¹³。しかし、補助金をもらって直接販売する場合、系統運用者はEEG第20条に従って「マーケット・プレミアム」を得る権利があり、さらに直接販売業者から納入された電気に対する合意された報酬を受け取る。

エンタイトルメント¹⁴。入札手続きの対象となったシステムの電力は、原則として自家発電に使用することはできない。750kWp以下のシステムについては、EEG第48条の規定が適用され、常に電圧降下を考慮しなければならない。

地上設置型については、EEG38a(1)項の5番目に定義されている「10MWp制限」等も遵守しなければならない。それ以上の規模のシステムについては、資金援助は受けられない。

固定価格買取制度は、システムの運転開始日から20年間支払われます。ただし、法律で財政支援が定められたシステムについては、20年目の12月31日まで支払いが延長されます。

EEGに基づく固定価格買取制度の一般的な要件に加え、太陽光発電についてはさらに特別な要件を遵守する必要がある。しかし、これらは概略を説明するのみであり、以下では完全には説明しない。

EEG第48条に規定されているように、システムが建物内または建物に設置されている場合、財政的支援を受ける資格があります。

または太陽光発電以外の目的で主に建設されたその他の物理的構造物。最終的には、「とにかく」使用している場所に太陽光発電システムを設置することです（「デュアルユース」）。また、太陽光発電システムは、屋根⁽¹⁵⁾として設置することも可能です。例えば、温室に太陽光発電システムを設置する場合、温室を実際に使用することに重点を置く必要があります。特に、温室を必要としない植物を栽培する場合は、この限りではありません。これについては、個々のケースについて詳細な検討が必要です。ただし、BauGB第35条に基づく無計画な地方における「非居住用建築物」については、以下の通りです。

- 温室などの場合、EEG第48条3項の制限に従わなければならない。

750kWpを超えるシステムの運営者は、入札に参加する必要がある。サーチャージと"payment"がなければ、EEGに従って系統運用者に固定価格買取を請求することができない。

¹¹この場合、脳波の賦課は軽減される可能性があります。

¹²このコンステレーションでは一般供給網は使用されないため、ネットワーク料金は発生しない。これは、ネットワーク料金や課徴金（コージェネレーション課徴金、**StromNEV19条2項**課徴金、オフショアネットワーク課徴金、コンセッション料金など）にも当てはまります。したがって、システム運用者は、例えば、顧客に有利な価格で電気を提供することができる。

¹³**第21条第1項第2号**参照。

¹⁴**EEG22条3項**参照。「750kW制限」を決定する際には、**EEG24条1項**および**2項**に含まれる「システム組み合わせルール」も遵守する必要がある。

¹⁵EEGについては、2004年連邦司法裁判所（BGH）の判決も参照。
2010年11月17日、ファイルNo.viii zr 277/09.

これらの要件が満たされない場合、資金調達の資格は決していない。EEG第48条1項3号：このような場合の前提条件は、常に承認された開発計画の利用が可能であることである。この開発計画が2009年9月1日以降に太陽光発電設備の建設を目的に作成または修正された場合、太陽光発電システムは、高速道路や鉄道の沿線、道路の外縁から110m以内の通路、または変換領域と呼ばれる特定の領域に設置されなければならない。

この土地面積の拡張は、入札に参加しなければならないシステムでのみ可能である。固定価格買取制度は、開発計画の策定・修正決議時に耕作地または草地として使用されていた区画にも適用される。簡単に説明すると、その地域がEEG第37条(1)項に記載された土地カテゴリー以外に割り当てられておらず、不利な地域に位置していること¹⁶。ただし、これは連邦政府が規制を可決した場合にのみ適用される。の入札が行われました。現在までのところ、バイエルン州、バーデン・ヴュルテンベルク州、ヘッセン州、ザールラント州、ラインラント・プファルツ州でのみ行われている。

6.2 政治的提言

6.2.1 太陽光発電システムの明示的な優遇措置

農業用太陽光発電システムは、農業用であることから屋外の自然の一部であり、BauGB第35条1項による明示的な特権は、基本的に合理的であると思われる。公共の利益は、太陽光発電システムによってほとんど影響を受けない。このシステムは、気候保護に役立ち、気候の回復力を向上させ、水の消費を減らす。しかし、景観は太陽光発電システムによって損なわれる。したがって、森林の端にあるような特徴的な景観の外側にある場所を優先する必要がある。

実例、ラズベリー農園。ラズベリーを雹や強い日射から守るために、エスパリエの果実の上にPVモジュールを並べることで、2つの恩恵を受けることができる。しかし、バリューチェーンの中では、ラズベリー栽培がPVレベルより優先される。

6.2.2 BauNVOへの「特別な太陽光発電エリア」の追加 建築計画における規制の可能性に関する上記の不確実性のために、「特別な太陽光発電エリア」という形で、BauNVOに新しい「決済要素」を追加する必要があります。

6.2.3 補助金交付の基準とシナリオ EU、連邦、州・自治体の相互関係において、それぞれアグリボルタイク普及のための異なるフレームワークを構築することができる。30分野のプロ

グラム/100フィールド・プログラムは、補助金支給のシナリオの一つである。1990年代の太陽光発電システムのための1000ルーフプログラムに相当するもので、フィールドプログラムはアグリボルタイクスを後押しする可能性があります。その結果、太陽光発電技術の研究開発が大幅に加速される可能性があります。また1000ルーフプログラムでは、連邦政府と州がシステムと設置費用を補助しました。

EEGにアグリボルタイクスを追加することは、補助金制度として可能である。このように、農地の保全と農産物へのプラスの効果は、補償される可能性がある。EEGの改正は、可能な限り「最小限の集中的」であるべきである。アグリボルタイクスは農業とエネルギーの二重利用を意味するので、その状況は、建物やその他の物理的構造の二重利用¹⁷と同様である。このことは、規定の法的設計において、両方の構成要素を同等に扱うことに有利に働く。そして、EEGの観点から、一定の地域区分が存在する場合には、開発計画を省略することができる。農業の継続的な利用は、ほぼ制限なく可能でなければならない。これは受け入れ側の理由だけでも重要であり、EEGの中での価値観の矛盾を回避することができる。これを確実にするために、EUの直接支払いに関する前提条件が適用されるべきです。これは法的な確実性を高めるものでもあります。そして、適用されるjurisprudence¹⁸は、EEGの「新しい」規定に移管される可能性がある。実施方法はどのようなものになるのだろうか。

特に、NO.2の後に新しいNO.2が追加される可能性があります。1の後に、新たにno.2を追加することができる。そうすると、規制は次のような文言になる。

「太陽光発電システムからの電力については、その適用価値が法律で定められている場合、1キロワット時あたり[...]セントになります。

[...]

号は農地に建設されており、この地域の農業活動は、本システムの稼働の強弱、種類、期間、時期によって大きく制限されることなく行われています。

[...]”

¹⁶第37条第1項第1文のh.)およびi.)を参照。

¹⁷また、上記no.第1文の1、第48条(1) EEGを参照。

¹⁸また、DirektZahlDurchfVについては上記をご参照ください。

前提条件の証明の観点から、文1の後に以下の文2を追加することが考えられる。

"文1、No.2の前提条件の 証明は、特に、共通農業政策の枠組み内の支援スキームの下で農民への直接支払いのための規則を確立し、それぞれの現行版の理事会規則 (EC) No 637/2008および理事会規則 (EC) No 73/2009 (2013年12月20日の官報L 347、ページ608) を廃止する2013年12月17日の欧州議会および理事会の規則 (EU) No 1307/2013の観点から運営プレミアム配分についてこの地域の通知を提出する形をとることができます。"

EEG第37条1項などの改正が必要である。

現在、アグリボルタシステムやその他の土地利用中立的な太陽光発電所の投資コストは、従来の地上設置型太陽光発電システムに比べてやや高くなっています。

EEGでは、テクノロジー・プレミアム (1kWhあたり数セント) を導入することができる。

このような革新的なシステムに必要な市場の後押しをするために、法律で定められた報酬 (EEG第48条参照) が必要です。法律で定められた報酬 (EEG第条を参照)。

それに応じて増額され、その後

は十分である。このプレミアムは年々減少し、新しい太陽光発電技術が競争力を持ち、市場の後押しが不要になれば、すぐにゼロになるであろう。現在の入札では (EEGの37項参照)、土地利用に中立的な太陽光発電技術は、そのコスト構造から、今日ほとんどチャンスに恵まれていない。テクノロジープレミアムは、このような競争上の不利を補うことができる。つまり、入札の終了後に初めて考慮される。したがって、入札者はより低い入札額で入札に参加することができ、従来の地上設置型太陽光発電システムとの競争力を高めることができる。

農家にとってのメリットを確実に実現するために。

また、太陽光発電システムの要件も満たす必要があります。

は規則で正確に定義されています。DIN規格の性能数値とテスト方法は、以下の通りです。

現在、フラウンホーファーISEが幅広い協力のもと、ドイツ向けに準備している。

コンソーシアムが出発点となる可能性があります。



7. アグリボルタイクスの推進

人類は、気候変動、水不足、エネルギーや食料の需要の右肩上がりなど、これまで経験したことのない大きな課題に直面しています。

人類がこの地球規模の課題を克服できるかどうか、またどのように克服できるかは、今後数年の間に決定されるでしょう。先進国での生活の質を維持し、途上国や新興国での生活の質を向上させるためには一見相反する目標に到達するための方法を見出すこと。繁栄を維持し、発展と住みよい未来を可能にし、天然資源の消費と気候に有害な物質の排出を削減することです。アグリボルタイクスは、ここに貢献できるのです。

本ガイドラインは、太陽光発電技術の現状とその可能性、そして様々な応用分野を説明する。アグリボルタイクスは、土地の有効利用の他に、農業における水の消費量を減らし、農場に安定した追加収入源をもたらし、多くの農場を収穫ロスに対してより強くすることができる。アグリボルタイクスの具体的な導入には、地域住民の早期参画が成功の鍵となる。

アグリボルタイクスは、1kWhあたり7～12ユーロセントの電力コストで、現在すでに他の再生可能エネルギー源に対して競争力を持っています。しかし、ドイツでアグリボルタイクスを導入することは、環境的に可能です。

は、対応する法的規制の枠組みがないため、非常にまれなケースでしか実現できません。規制の枠組みを農業用太陽光発電の技術開発に適応させることは、例えば以下のようなことを包含し得る。

- 農業経営のための土地補助金を維持するために、DirektZahlDurchfVでアグリボルタイクスを認識すること、例えば12条3項における例外として。
- BauGB第35条(1)に基づくアグリボルタイクスの特権により、承認プロセスを容易にする。
- EEGに基づく太陽光発電システムからの電力に対する報酬は、地上設置型太陽光発電システムと屋上設置型太陽光発電システムの間位置し、例えば太陽光発電のための特別入札の形で提供されます。

園芸用途は、アグリボルタイクスの市場投入に特に適していると思われる。その理由としては、栽培地が農園に物理的に近いことが多いこと、栽培植物の相乗効果が高いこと、サポートコストが低いこと、永年作物の管理方法に比較的簡単に統合できること、などが挙げられます。また、認可に関するメリットも園芸には期待できる。農業の価値創造が全般的に向上することも、園芸における利点の一つである可能性がある。なぜなら、多くの園芸文化アプリケーションは生産性が高いからです。このような生産性の高さは

農地の1.3%、園芸は農業の付加価値の10%以上に貢献しています。創造する





そのため、園芸分野でのアグリボルタイクスへの補助金によって、農業経営がこの分野でより活発になるようなインセンティブを与えることは、アグリボルタイクスに使用する土地の割合が非常に少なくても、ドイツの農業生産全体へのテコ入れとなる可能性があります。これは、特にベリー類の生産に当てはまります。

アグリボルタイクスに関する議論では、ドイツではしばしば、まず屋根のポテンシャルをもっと活用すべきだという主張がなされる。屋根置き型は、分散型であることや土地利用が中立であることなどから、今後も太陽光発電の拡大において重要な要素であり続けることは間違いありません。しかし、既存の再生可能エネルギー発電技術を補完するものとして、アグリボルタイクスも推進することには十分な理由がある。一つは、アグリボルタイクスは、特に大規模なシステムの場合、規模の経済性により、屋上システムよりも平均的にコスト効率よく実現することができ、再生可能エネルギーの価格を維持することに貢献することである。また、屋上型は土地利用が中立的であるのに対し、アグリボルタシステムは、最良の場合、植物の生育にプラスに働くことが期待できます。

これまでに研究されたシステムの大部分において、作物収量の減少が観察されたことは事実です。しかし、2018年のヘッゲルバッハの研究プラントの収穫結果は、この技術の初期段階であっても、アグリボルタイクスが、農家が直面する様々な課題、中でもドイツで増加している干ばつ期間に対する可能な答えを提供できることを示していました。平均気温、異常気象、そして中央ヨーロッパの場合は気候変動により日射量が増加するという事実は、植物用PVモジュールの保護機能の可能性が今後より重要になることを示唆している。

その他、蓄電池との組み合わせ、有機薄膜太陽電池、太陽熱水処理・配水などの研究を行っています。電動農業機械による収穫

が考えられる。将来的には、太陽光発電システムのもとで、小型の自動化された農業機械が働き、必要なものを収穫する「群れ農業」が考えられている。

エネルギーを直接畑に供給することができます。化学薬品を使わず、土壌や地下水を汚染することなく、自律的に除草したり、レーザーを使ってイモシを駆除する機械は、すでに存在しているのだ。このように、農業は、気候にやさしい駆動システムだけでなく、インテリジェントな技術によって、より持続可能なものになりうるのです。太陽光発電システムは、このようなスマート農業の要素を組み込むのに適した構造であり、発電も可能です。現在、フラウンホーファーISEでは、1.2 x 3mの耕作地で試験を行うため、自動耕作をアグリボルタシステムの架台に組み込んでいます。

長期的には、太陽光発電はエネルギー供給の主要な柱になると思われます。気候変動や水不足の深刻化により、農業は経済的・生態学的な回復力を高めるために、新たな取り組みが求められています。土地利用の競合を緩和するために、アグリボルタイク技術は、食料生産のための資源である農地を保全しながら、PV容量を拡大する方法を提供します。農地の二重利用は、土地利用の効率を大幅に向上させます。暑さ、大雨、干ばつなど、ますます頻繁に起こる厳しい気象現象にさらされる土壌を、同時に保護することができます。アグリボルタイクスはまた、農業経営の需要をカバーするために、気候にやさしいエネルギーを提供することができます。

ドイツの最初のプラントは、この技術がうまく機能することを示している。今後、研究、産業、政治を通じたさらなる発展があれば、アグリボルタイクスの大きな可能性を実現することができるだろう。これは、気候のためだけでなく、ポジティブな展開となるだろう。





8. 文献・資料

8.1 参考文献

- [1] P.Sterchele, J. Brandes, J. Heilig, D. Wrede, C. Kost, T. Schlegl, A. Bet, and H.-M.Henning, Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem - Die deutsche Energiewende im Kontext gesellschaftlicher Verhaltensweisen (2020).
- [2] A.Goetzberger and A. Zastrow, Sonnenenergie 3/81 (1981).
- [3] Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS), APV-RESOLA - Innovationsgruppe Agrophotovoltaik: リソースの有効活用のための土地活用 (o.J.)
- [4] S.シンデレ、M. トロムスドルフ、A. シュラック、T. オーバーグフェル、G. ボップ、C. ライズ、C. ブラウン、A. ヴェセレク、A. パウアーレ、P. ヘギー。
A.Goetzberger, and E. Weber, Applied Energy 265 (2020).
- [5] T.Kelm, J. Metzger, H. Jachmann, D. Günnewig, P. Michael, S. Schicketanz, K. Pascal, T. Miron, and N. Venus, Vorbereitung und Begleitung bei der Erstellungsberichts gemäß 97 Erneuerbare-Energien-Gesetz e. Erfahrungsbericht:第II章 c:Solare Strahlungsenergie (2019). https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/bmwi_de/zsv-bo-schundpartner-vorbereitung-begleitung-eeg.pdf?blob=publicationFile&v=7.
- [6] D.Ketzer, Dissertations in Physical Geography, Vol.4: Land Use Conflicts between Agriculture and Energy Production.Systems Approaches to Allocated Potentials for Bioenergy and Agrophotovoltaics (Department of Physical Geography, Stockholm University, 2020) [英語].
- [7] D.H.-J. Luhmann, P. D. M. Fishedick, and S. Schindele, Stellungnahme zur BMWi-Konsultation "Eckpunkte für ein Ausschreibungsdesign for Photovoltaik-Freiflächenanlagen." :Agrophotovoltaik (APV) als ressourceneffiziente Landnutzung (2014).
- [8] Y.エラムリ、B. シュビロン、J.-M.Lopez, C. Dejean, and G. Belaud, Agricultural Water Management 208 (2018).
- [9] Bundesverband Solarwirtschaft e.V. (BSW-Solar), Entwicklung des deutschen PV-Marktes:評価とグラフィック連邦ネットワーク庁の統計データ (2020年版) .
- [10] A.Weselek, A. Ehmann, S. Zikeli, I. Lewandowski, S. Schindele, and P. Högy, Agronomy for Sustainable Development 39, 4 (2019).
- [11] ドイツ難燃性有機化合物協会 (FNR) 、ドイツにおける難燃性有機化合物の製造と使用。スタンドです。März 2019 (2019年) 。
- [12] Fraunhofer-Zentrum für Internationales Management und Wissensökonomie IMW, Nachhaltige Kombination von bifacialen Solarmodulen, Windenergie und Biomasse bei gleichzeitiger landwirtschaftlicher Flächennutzung und Steigerung der Artenvielfalt (o. J). <https://www.imw.fraunhofer.de/de/forschung/projekteinheit-center-for-economics-of-materials/forschungsprojekte/BiWiBi.html>.
- [13] M.Trommsdorff, S. Schindele, M. Vorast, N. Durga, S. M. Patwardhan, K. Baltins, A. Söthe-Garnier, and G. Grifi.の各氏が参加。
インド・マハラシュトラ州パラスにおける園芸用太陽光発電の実現可能性と経済性 (2019年) 。
- [14] K.Schneider:Agrophotovoltaik: hohe Ernteerträge im Hitzesommer (Freiburg, 2019)。
- [15] K.Schneider:Agrophotovoltaik goes global: von Chile bis Vietnam (Freiburg, 2018).
- [16] G. P. Brasseur, D. Jacob, and S. Schuck-Zöller, Klimawandel in Deutschland (Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2017)。
- [17] J.Ballester, X. Rodó, and F. Giorgi, Clim Dyn 35, 7-8 (2010).

- [18] G・A・パロン＝ガッフオード、M・A・パバオ＝ズッカーマン、R・L・マイナー、L・F・サッター、I・バーネット＝モレノ、D・T・ブラケット、M・トンプソン。
K.Dimond, A. K. Gerlak, G. P. Nabhan, and J. E. Macknick, Nat Sustain 2, 9 (2019).
- [19] H.Marrou, J. Wery, L. Dufour, and C. Dupraz, European Journal of Agronomy 44 (2013).
- [20] S.K. Abeyasinghe, D. H. Greer, and S. Y. Rogiers, VITIS - Journal of Grapevine Research 58/1 (2019).
- [21] M.Büchle, Lucas' Anleitung zum Obstbau (Libreka GmbH; Verlag Eugen Ulmer, 2018)を参照。
- [22] 国際再生可能エネルギー機関（IRENA）、The Power to Change:2025年までの太陽光と風力のコスト削減ポテンシャル（2016年）。
- [23] E.ON Energie Deutschland GmbH, Solaranlage Kosten " Was kostet Photovoltaik 2020?(o.J.)
。 <https://www.eon.de/de/pk/solar/photovoltaik-kosten.html>。2020年8月7日アクセス。
- [24] <https://www.solaranlage-ratgeber.de/photo-voltaik/photovoltaik-wirtschaftlichkeit/photovoltaik-anschaffungskosten>.Solaranlage Ratgeber, Anschaffungskosten für Photovoltaik-Anlagen(o. J.).All Rights Reserved.2020年8月7日アクセス。
- [25] K.グラウヴェ、M・ハザート、S・ブーヴェ、F・フォン・ブリュシャー、C・ブルゴー、N・バーダー、B・ブライトショップ、N・フリードリヒセン、M・アレンツ。
A.Aydemir, M. Pudlik, V. Duscha, and J. Ordonez, Stromkosten der energieintensiven Industrie: Ein internationaler Vergleich (2015).
- [26] A.ティッツ、Wertermittlungsforum 36(2) (2018).
- [27] B.Valle, T. Simonneau, F. Sourd, P. Pechier, P. Hamard, T. Frisson, M. Ryckewaert, and A. Christophe, Applied Energy 206 (2017).
- [28] Y.Elamri, B. Cheviron, A. Mange, C. Dejean, F. Liron, and G. Belaud, Hydrol.Earth Syst.Sci. 22, 2 (2018)に掲載されています。
- [29] C.Rösch, S. Gölz, J. Hildebrand, S. Venghaus, and K. Witte, Energy Research for Future - Forschung für die Herausforderungen der Energiewende (2019).
- [30] D.Ketzer, N. Weinberger, C. Rösch, and S. B. Seitz, Journal of Responsible Innovation 7, 2 (2020).
- [31] D.Ketzer, P. Schlyter, N. Weinberger, and C. Rösch, Journal of environmental management 270 (2020).

8.2 図表の一覧

図1:	アグリボルタシステムの図解。© Fraunhofer ISE	4
図2:	APV-RESOLAプロジェクトパートナー。	5
図3:	ボーデン湖にあるフラウンホーファーISEの太陽光発電研究施設。© Fraunhofer ISE	5
図4:	2010年から今日に至るまでのアグリボルタイクスの発展。© Fraunhofer ISE	6
図5:	ドイツにおける2004年以降の地上設置型太陽光発電システムの土地利用（ポートフォリオ全体と年間）。 を成長させます。 ^[5] © BMWi	7
図6:	太陽光発電の統合のためのアプリケーション。© Fraunhofer ISE	8
図7:	地上設置型太陽光発電システム。© Fraunhofer ISE	9
図8:	ドイツの土地配分© Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. according to Federal Statistical オフィス、BMEL（2017年） ^[11]	10
図9:	ヴァイエンシュテファンのアグリボルタイプ発電所の断面図。© 2020 B. Ehrmaier、M. Beck、U. Bodmer	11
図10:	キャベツ苗の被害。2020年 B. Ehrmaier、M. Beck、U. Bodmer。	11
図11:	ヘッゲルバッハにあるアグリボルタイク・リファレンス・プラントのスケッチ。© Hilber Solar	12
図12:	Hofgemeinschaft Heggelbachは、ほぼすべての電力需要を発電機による電力でまかなうことができました。 2017年夏のアグリボルタリングシステム。© BayWa r.e.	13
図13:	ヘッゲルバッハのテストサイトでは、土地の複合利用により、アグリボルタイクスによる土地利用の効率化が図ら れています。 を最大186%まで高めることができます。(ジャガイモのイラスト © HappyPictures/shutterstock.com)	14
図14:	ヘッゲルバッハにあるアグリボルタシステムのバイフェイシャルモジュールのモジュール列。© Fraunhofer ISE	14
図15:	フラウンホーファー・チリ研究所のパイロットプラント（CuracaviとLampa）。フラウンホーファー・チリが調査 しているのは 日射量の減少から恩恵を受ける植物。© Fraunhofer Chile	15
図16:	モンペリエ大学のアグリボルタ研究システムによる各種レタスの研究。 フランス© Christian Dupraz	16
図17:	ヘッゲルバッハで研究された作物（小麦、セロリ、ジャガイモ、草・クローバー混合物）。© University of Hohenheim	17
図18:	測定ステーションを備えた2017年のテストセットアップのためのフィールドレイアウト。© BayWa、ホーエンハ イム大学によって修正されました。	18
図19:	基準圃場と比較したアグリボルタイクス下での作物収量の違い。ヘッゲルバッハにおける2017年（青）と2018年 （赤）の様子 (支援による土地損失を除く)。データホーエンハイム大学	18
図20:	ヘッゲルバッハのシステムの支柱には、農機具による損傷を防ぐためのフェンダーが取り付けられています。 © Hilber Solar	19
図21:	アグリボルタイムのリンゴ園の図解。© Fraunhofer ISE	19
図22:	フランスで太陽追尾システムを搭載したアグリボルタイクス。© Sun'Agri	20
図23:	ラズベリーの天候対策としてのアグリボルタシステム。オランダのBayWa.r.e.による300kWpのテストシステム。 © BayWa r.e.	20
図24:	ベリー栽培のデモプロジェクトは、農業における高い付加価値を示しています。© BayWa r.e.	20
図25:	コンバインによる小麦の収穫。© Fraunhofer ISE	21
図26:	模式図。日向と日陰の植物における光強度の違いによる光合成速度（出典：改良版 によると、 ^[21] ）	21
図27:	ザールラント州Eppelborn-Dirmingenソーラーパークに設置された、容量2MWpの垂直配向型バイフェイシャルモ ジュールです。 Next2Sun GmbHによって構築されました。© Next2Sun GmbH	21
図28:	地上設置型太陽光発電システム、アグリバイオの投資コスト。データ提供： ^[4,22]	22
図29:	地上設置型太陽光発電システムと農業用太陽光発電システムのCAPEX / OPEXの比較。データ提供元： ^[4, 22]	23
図30:	地上設置型太陽光発電システムおよびアグリボルタイクスの平均平準化電気料金の試算。 representation by Fraunhofer ISE, data from ^[3,4, 23, 24]	24
図31:	ステークホルダーと契約モデル	26
図32:	トーマス・シュミット、フロリアン・レイヤー© AMA Film	27
図33:	空間的に分割された太陽電池と保護機能を持つPVモジュール（オランダ）。© BayWa r.e.	28

図34:	ポテトハーベスターでモジュールの下を耕することができる高設置構造のシステム。 © Hofgemeinschaft Heggelbach	28
図35:	垂直に設置されたバイフェイシャルモジュール、Donaueschingen。© Next2Sun GmbH	29
図36:	フォイルトンネルの上のPVモジュール。© BayWa r.e.	29

図37:	TubeSolar社のフレキシブルPVストリップを使用した特殊チューブモジュール。© TubeSolar AG	29
図38:	TubeSolar社によってテンションケーブルの間に設置されたチューブ型太陽電池による半日陰。 © SBP SONNE GMBH	29
図39:	高い架台と細いPVモジュールのシステム。© REM Tec	29
図40:	高い架台と連続した太陽電池モジュールの列を持つシステム。© Sun'Agri	30
図41:	フランスにおける太陽光発電システム実証実験の一軸追尾システム。© Sun'Agri	31
図42:	アンカープレートとネジ式ロッドを備えたスピナカーアンカーは、設置システムの基盤となるものです。 © Spinnanker	31
図43:	東西、南、南東の各方位に設置された太陽光発電システムのイメージ図。 © Fraunhofer ISE	32
図44:	太陽電池モジュールの下にある遮光帯は、太陽の位置によって動きます。© Universität Hohenheim	32
図45:	地下貯水槽付き雨水利用システムのコンセプト。© Fraunhofer ISE	32
図46:	ヘッゲルバッハの太陽光発電システム（容量194kWp）。© BayWa r.e.	33
図47:	Next2Sunの縦型PVモジュールを使用した2MWpのSolarpark Eppelborn-Dirmingen（エッペルボルン-ディルミンゲン）。© Next2Sun GmbH	33
図48:	土壌の圧縮を防ぐための建設用道路。© BayWa r.e.	34
図49:	ヘッゲルバッハのアグリボルタシステムのメンテナンス作業。© Fraunhofer ISE	35
図50:	APV-RESOLAプロジェクトにおける市民とのワークショップ。© ITAS	36
図51:	ヘッゲルバッハのワークショップ用アグリボルタシステムの模型。© Fraunhofer ISE	37
図52:	多段階の学際的なアグリボルタイク研究アプローチ。© ITAS	38
図53:	アグリボルタシステムで耕作できない中間ストリップは、維持または増加させるために使用することができます。 耕作地における生物多様性© Fraunhofer ISE	39
図54:	建築申請時の処理例です。	42

8.3 テーブルのリスト

表1:	アグリバイオの様々なカテゴリと応用例。	10
表2:	アグリボルタイクスとオープンランドとの植物収量の比較。© 2020 B. Ehrmaier、M. Beck、U. Bodme	11
表3:	様々な太陽光発電のビジネスモデルの構成（ ^[4] に基づく）。	25
表4:	アグリバイオの認可ステップの概要。	34

8.4 略語について

W	ワット	min.	最低限、最小限
Wh	ワット時	の最大値です	最大, 極大
ウェッブ	ワットピーク、標準状態で測定した容量	m ²	平方メートル
	試験条件	脳波計	再生可能エネルギー法 (エネルギーシュゲゼッツ)
キロワット	キロワット	リアップ	農村エネルギー高度化プログラム
キロワット時	キロワット時	ピーブイ ジーエム	地中設置型太陽光発電システム
キロワット時	キロワットピーク、標準試験で測定。 条件	ピービ ーエー	電力購入契約
メガワット	メガワット	CIS	銅-インジウム-セレン化物
エムダ	メガワットピーク、標準状態で測定	CdTE	テルル化カドミウム

ブリュ
ーピー

試験条件

GW

ギガワット

ジーダ
ブリュ
ーピー

ギガワットのピーク。容量（ギガワット）、測定値

標準試験条件下で

GWh

ギガワット時

TWh

テラワット時

a-Si

アモルファスシリコン

μ-Si

マイクロクリスタリンシリコン

オービ
ーブイ

有機薄膜太陽電池

CPV

集光型太陽光発電

8.5 詳細情報へのリンク



ウェブサイト Agrivoltaics
(Fraunhofer ISE) <https://agripv.org/en/>



ヘッゲルバッハにあるAPVの研究施設を紹介するショートフィルム（ドイツ語）。
<https://www.youtube.com/watch?v=BIXPf-e1a0U>



地上設置型太陽光発電システムに関するガイドライン：バーデン＝ヴュルテンベルク州環境・気候・エネルギー省のウェブサイトへのリンク（ドイツ語）。
https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/mum/intern/Dateien/Dokumente/2_Presse_und_Service/Publikationen/Energie/Handlungsleitfaden_Freiflaechensolaranlagen.pdf



アグリボルタイクス、Fraunhofer ISEのウェブサイトリンクしています。
<https://www.ise.fraunhofer.de/en/business-areas/photovoltaics/photovoltaic-modules-and-power-plants/integrated-photovoltaics/agrivoltaics.html>



プロジェクトサイト「APV-orcharding」、Fraunhofer ISE のウェブサイトへのリンク：
<https://www.ise.fraunhofer.de/en/research-projects/apv-obstbau-orcharding.html>

フラウンホーファー研究機構 太陽エネルギーシステム研究所 ISE

お問い合わせ先

Max Trommsdorff

max.trommsdorff@ise.fraunhofer.de 電話

: +49:+49 761 4588-2456

ディビジョンディレクター フォトボルタイクス - モジュールとパワープラント

ハリー・ワース博士

フラウンホーファー研究機構 太陽エネルギーシステム研究所 ISE

ハイデンホフ通り2番地

79110 フライブルク (ドイツ)

www.ise.fraunhofer.de/en

in <https://agri-pv.org/en/>

研究所役員

ハンス・マーティン・ヘニング博士

土 アンドレアス・ベット博士

協力：日本経済新聞社



Federal Ministry
of Education
and Research



Federal Ministry
of Food
and Agriculture



MIX
Paper from
responsible sources
FSC® C106855