

提言書

Proposal

「2050年カーボンニュートラルへのレーザー技術の貢献」

“Contribution of laser technology to carbon neutrality by 2050”

2022年1月

January 2022

一般社団法人レーザー学会

The Laser Society of Japan



概要

レーザー学会では産学の専門家によるタスクフォースを立ち上げ、レーザー技術が「2050年カーボンニュートラル」の実現に向けてどのように貢献できるかを検討しました。

本提言書では、「2050年カーボンニュートラル」実現に向けて、8種類のレーザー技術（1. 半導体レーザーの低消費電力化、2. レーザー核融合およびH₂製造、3. 太陽光励起レーザー、4. スマート農食産業、5. レーザー加工の産業応用、6. 光無線給電、7. LDスマート照明、8. 自動車へのレーザー応用）を活用したイノベーションを引き起こすための提言をまとめました。

レーザー技術を活用することにより温室効果ガス（GHG）の削減に対して高いポテンシャルがあることがわかりました。

- ・国内のGHG排出量（@2018年、CO₂換算）の10～20%削減
- ・世界のGHG排出量（@2015年、CO₂換算）の5～10%削減

Abstract

The Laser Society of Japan has established a task force of industry and academic experts to consider how laser technology can contribute to achieving “carbon neutrality by 2050.” This proposal summarizes recommendations for sparking innovation using laser technology to achieve “carbon neutrality by 2050.”

In this proposal, we have compiled recommendations for sparking innovation by utilizing 8 types of laser technologies (1. low power consumption of semiconductor lasers, 2. laser fusion and H₂ manufacturing, 3. solar-pumped lasers, 4. smart agriculture and food industries, 5. industrial applications of laser processing, 6. optical wireless power supply, 7. LD smart lighting, 8. laser applications in automobiles) to achieve “carbon neutrality by 2050”.

It was found that the use of laser technologies has high potential for reducing greenhouse gas (GHG) emissions.

- ・10–20% reduction in domestic GHG emissions (@2018, CO₂ equivalent)
- ・5–10% reduction in global GHG emissions (@2015, CO₂ equivalent)

目次

1. 序

- (1)カーボンニュートラルに対する認識 (1)
- (2)レーザー技術とカーボンニュートラル (1)

2. 個別技術における提言

<レーザーの高効率化>

- 2-1. 半導体レーザーの低消費電力化 (5)

<レーザーを用いたクリーンエネルギー>

- 2-2. レーザー核融合, H₂ 製造 (10)
- 2-3. 太陽光励起レーザー (15)

<レーザー適用によるシステム革新>

- 2-4. スマート農食産業 (20)
- 2-5. レーザー加工の産業応用 (24)
- 2-6. 光無線給電 (29)
- 2-7. LD スマート照明 (35)
- 2-8. 自動車へのレーザー応用 (40)

1. 序

(1)カーボンニュートラルに対する認識

気候変動は、その予想される影響の大きさや深刻さから見て、人類の生存基盤に関わる極めて重大な問題と認識されている。国連をはじめ、国際社会においても温室効果ガス削減に向けて積極的な取り組みが実施されており、既に 125 カ国と 1 地域が 2050 年までのカーボンニュートラル実現を表明している(2021 年 4 月時点)¹。

このように気候変動問題への対応は社会的に極めて重要であると認識される一方、経済成長に対する制約やコストになると従来は考えられてきた。しかし、気候変動問題への対応は新たな市場や産業を創出するチャンスであり、国際的にも、このような環境と成長の好循環により飛躍的な成長が実現できる機会と捉える時代に突入している。例えば、経済産業省の試算では、2030 年に年額 90 兆円、2050 年には年額 190 兆円の経済効果を見込んでいる²。日本においても 2020 年 10 月に「2050 年カーボンニュートラル」が宣言され、環境と成長の好循環によりカーボンニュートラルを実現すべく、グリーンイノベーション基金事業など多大のリソースが投入されつつある²。

言うまでもなく、カーボンニュートラルの実現は並大抵の努力でできるものではなく、あらゆる分野におけるチャレンジとイノベーションの創出が求められる。その中で技術が果たす役割は極めて大きく、その一翼を担うのが我々レーザー学会の責務である。そこで、レーザー学会では産学の専門家によるタスクフォースを立ち上げ、レーザー技術がカーボンニュートラルの実現に向けてどのように貢献できるかを検討した。本提言書では、2050 年カーボンニュートラル実現に向けて、いかにイノベーションを引き起こすかについて提言を行う。

(2)レーザー技術とカーボンニュートラル

レーザー光源の高出力化、高効率化、発振波長域の拡大、超短パルス発生によりレーザーの応用市場が拡大するとともに新たな応用が創出されている。その理由として他の光源にはないレーザーの際立った数多くの特徴がある。以下レーザーの特徴を説明する。

レーザーの高い空間コヒーレンスは非常に小さな面積にエネルギーを集光できる。また、指向性があるため、必要なところにだけ必要な光を届けることができる。さらに超短パルス発生、高速変調なども可能である。単色性、偏光性も有しており、また光ファイバとの相性も良く、損失なく遠方に光エネルギーを届けることもできる。中でも半導体レーザーは小型・軽量性、直接変調可能で、量産性も有している。以上のようなレーザーならではの特徴を活かし、光メモリ、光通信、光計測、レーザー照明、レーザー加工、医療用など様々な応用に展開されている。上述したレーザーの特徴はカーボンニュートラルに大きく活かすことができる。

レーザー学会ではカーボンニュートラルに対する提言を、Ⅰレーザーの高効率化、Ⅱレーザーを用いたクリーンエネルギー、Ⅲレーザー適用によるシステム革新、の 3 つに分類した。各分類に

¹ <https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2021/html/1-2-2.html>

² 成長戦略会議(第6回)配付資料 資料2:2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略 p2, p6, <https://www.meti.go.jp/press/2020/12/20201225012/20201225012.html>

対しレーザーの特徴を、カーボンニュートラルにどのように活かすかを中心に説明する。

分類Ⅰ：レーザーの高効率化

光通信用、レーザー照明、計測用など小型で量産容易な半導体レーザーの直接利用として様々な用途がある。一方、パワーレーザー装置用としても、固体レーザー（ファイバレーザー含む）励起用に半導体レーザーは用いられている。ここでは各応用の根幹となる半導体レーザーの低消費電力化について検討した。図 1-2-1 に示すように変換効率向上は、光源冷却のためにエネルギーを減少させる効果も伴い、大幅な消費電力低減をもたらす。具体的には、2022 年で効率 50% に対して、2050 年に効率 95% の半導体レーザーを開発することで、レーザーの消費電力を約 1/2 に、また冷却装置分を 1/10 にできると見込まれ、トータルで消費電力 1/4 が可能になる。

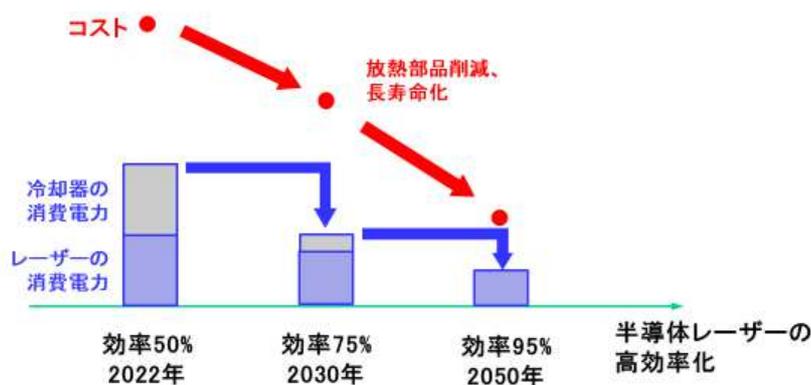


図 1-2-1 半導体レーザーの効率とコストの推移

分類Ⅱ：レーザーを用いたクリーンエネルギー

ここでは CO₂ を排出しないエネルギー創出として、レーザー核融合による H₂ 製造および太陽光励起レーザーを取り上げる。レーザーのコヒーレンスの良さ、高輝度性を利用している。パワー

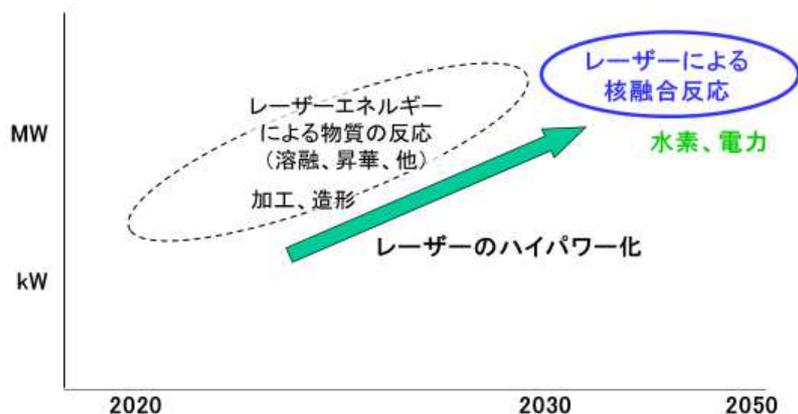


図 1-2-2 パワーレーザーのクリーンエネルギー展開

レーザーが用いられるが、その応用展開を図 1-2-2 に示す。パワーレーザーの技術向上開発を行うことにより高出力・高効率化の進展を図り、図 1-2-2 に示す加工、造形応用に始まり物質の様々な反応の工業応用化の実現を目指す。その結果、2040 年にはレーザー核融合で発生した高熱を利用し水素製造が可能となる。一方で、太陽光から直接レーザー光を取り出す技術の開発、社会実装を図ることで、CO₂を発生しない新たなエネルギー源の実現が可能となる。

分類Ⅲ：レーザー適用によるシステム革新

レーザー適用によるシステム革新として、スマート農食産業、レーザー加工の産業応用、光無線給電、LD スマート照明、自動車へのレーザー応用を取り上げる。主としてレーザーの高輝度性と指向性を利用しており、離れたところに高輝度なレーザー光を効率良く投射するという特徴を利用している。レーザー応用開発を進めることで、システムの高効率化を目指し、システムからのCO₂排出量の削減が可能となる。

以上Ⅰ～Ⅲの各種応用を説明したが、国内、海外でのCO₂削減量を表 1-2-1 に示す。2018 年国内の温室効果ガス排出量(CO₂換算)12.4 億 t からすると³、レーザーによりその 1～2 割となる 1.5～2.7 億 t 削減のポテンシャルを有している。グローバルでは、2015 年の温室効果ガス排出量(CO₂換算)約 429 億 t に対し³、レーザーによりその 0.5～1 割となる 27.8～37.8 億 t 削減のポテンシャルを有している。つまりカーボンニュートラル実現にはレーザーの活用が必須であると言える。なお、生活の利便性向上などは既存の仕組みの利用を広めたり、新たな仕組みを導入するためにCO₂増大を生じる側面もあるが、レーザー技術による仕組みの根底からのイノベーションにより、これを減少させるという効果も入っている。

表 1-2-1 レーザー各種応用における国内、海外でのCO₂削減量

(単位: 万t)

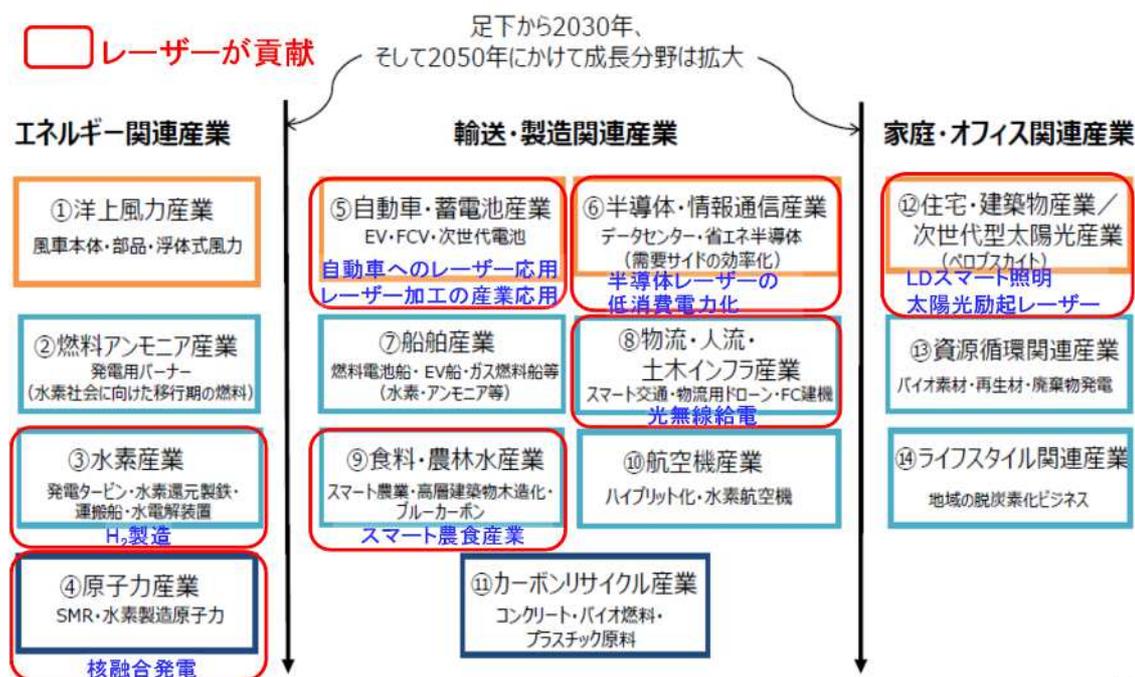
エリア	国内		グローバル	
	2030年	2050年	2030年	2050年
＜レーザーを用いたクリーンエネルギー＞				
レーザー核融合、H ₂ 製造	0	5,000-17,000	0	70,000-170,000
太陽光励起レーザー	500	2,650	8,000	25,000
＜レーザー適用によるシステム革新＞				
スマート農食産業	47	317	3,370	25,395
レーザー加工の産業応用	60	480	1,200	9,600
光無線給電	833	2,720	15,200	52,300
LDスマート照明	1,240	3,370	33,000	91,000
自動車へのレーザー応用	54	188	1,470	5,090
総計	2,734	14,725-26,725	62,240	278,385-378,385

※半導体レーザーの低消費電力化は他の項目に含まれるので、ここには記載しない

³ 総合資源エネルギー調査会 基本政策分科会(第 33 回会合)資料「2050 年カーボンニュートラルの実現に向けた検討」, https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/033/033_004.pdf

また、本提言書では取り上げなかったが、建築へのレーザー技術導入、光通信など他にも追加検討すべき項目がある。特に今後の通信量増大による電力需要は大きく、高速かつ低消費電力光通信のための高速変調技術、テラヘルツ波利用などを取り上げる予定である。

図 1-2-3 に示すように、経済産業省では重点産業を①～⑭に分類し、2050年までのロードマップを作成している。この中でレーザーは③水素産業、④原子力産業、⑤自動車・蓄電池、⑥半導体・情報通信、⑧物流・土木インフラ、⑨食料・農林水産業、⑫住宅・建築物産業/次世代太陽電光産業に深くかかわる。このように国の政策と整合しており、国の支援を受けながら技術開発を行うことで社会実装が加速する。



※経済産業省が作成した重要分野の整理図に、対応するレーザー技術を追記

図 1-2-3 カarbonニュートラル重点産業とレーザー貢献⁴

以下では、これらの個別技術の開発、社会実装について、提言を行う。その前に、基盤的な項目として、知的財産権、国際標準化、規制改革の必要について触れる。

全ての個別技術において、その開発・社会実装に際して、技術の競争力を確保するための知的財産権の確保、その上で技術をグローバルに普及させていくための国際標準化が極めて重要である。特に、知的財産権と国際標準化を連携させ、戦略的に活動することが極めて有効である。そのためには、プレーヤーである産学官が有機的に連携し、活動を進める必要が有る。個々の提言の中でも触れられているが、冒頭でその重要性を強調しておく。

⁴ 成長戦略会議(第6回)配付資料 資料2:2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略 p15,
<https://www.meti.go.jp/press/2020/12/20201225012/20201225012.html>

また、開発・社会実装を進めるに当たり、規制改革を進めることで大幅なスピードアップを実現することができる。例えば、レーザーの使用に際しては安全規格が定められており、そのパワーにより使用条件が厳しく制限されている。個別技術の中では、エネルギー伝送へのレーザー利用やビーム照射を伴う技術が含まれているが、現行の安全規格とは異なる方法での安全確保手段を認めることで、これらの技術の社会実装が可能となり、社会に大きく貢献することができる。具体的には、クラス3R のビームの使用条件として、例えば「LiDAR などの光センシングと AI により人間などを検知・判断し検出した場合は、出力をクラス2まで落とすか発光を停止する」という条件の追加を提案する。

2. 個別技術における提言

<レーザーの高効率化>

2-1. 半導体レーザーの低消費電力化

(1)カーボンニュートラルへの貢献

レーザー技術は社会のあらゆるところで使用されている。特に微小サイズで高効率な半導体レーザーは、図 2-1-1 のようにセンサ、通信、表示、照明、また、加工などの多様な応用の光源に利用され、様々な機器、社会のシステムを支えている。その応用範囲はすでに膨大だが、現在も新たな機器、システムが創出されており、半導体レーザーの活用範囲は今後もさらに広がる。このためカーボンニュートラルの実現には、半導体レーザー技術の進展が極めて重要である。

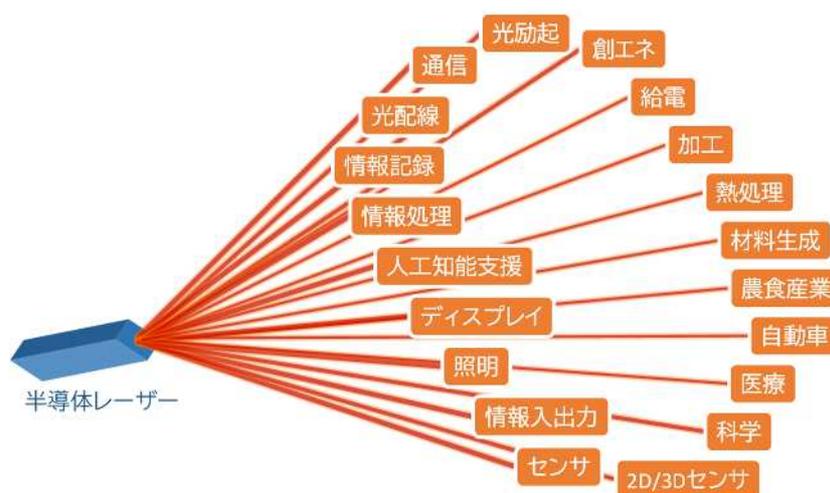


図 2-1-1 半導体レーザーの応用範囲

半導体レーザーは、電力エネルギーを光エネルギーに変換する 1mm 角に満たない微小サイズの半導体デバイスであり、カーボンニュートラルへの貢献は、直接的にはその消費電力の低減が重要となる。さらに半導体レーザーの適用により、既存システムに比べて低消費電力化するシステムの開拓など、社会の様々なシステムを革新することで間接的にカーボンニュートラルに貢献することも大きなインパクトがある。実例として、短距離通信を銅線のまま低電力化するのではなく、光配線化することで高速通信と低消費電力化が同時に可能になっている。

以上のように、半導体レーザーの利用の広がりやそれに基づく新しいシステムの構築で直接的、間接的なカーボンニュートラルへの貢献が期待されるため、半導体レーザーの性能の継続した改善と新たな応用などに向けた機能性の創出が継続して強く求められる。

(2)カーボンニュートラルへの貢献量

半導体レーザーのカーボンニュートラルへの貢献は、低消費電力化という直接的な貢献とシステム革新に伴う間接的な貢献がある。後者は応用やシステムに大きく依存するため、ここでは半導体レーザー自身の直接的なカーボンニュートラルへの貢献について推定する。

半導体レーザーは応用に応じて必要な光出力が求められる。このため光出力を低減するのではなく、電力から光への変換効率を改善することが重要である。そこで半導体レーザーの応用が広がりながら、その効率が現状から改善されない場合に比べて、効率が改善されることによる貢献を見積もる。この効率改善による CO₂ 排出量は国内では 2030 年に年間 13 万 t、2050 年に年間 65 万 t の削減が見込まれ、世界では 2030 年に年間 255 万 t、2050 年に年間 1,296 万 t の削減が見込まれる。なお、半導体レーザーに利用する冷却器の消費電力も考慮している。

(3)現状

半導体レーザーは既存応用分野の性能改善や新応用分野の創出に向けて、その特徴、特性の進化と深化が進められてきた。既存の半導体レーザー(端面出射型)の特性改善のほか、極低消費電力や面状の高出力が可能な面発光レーザー(VCSEL:Vertical Cavity Surface Emitting Laser)、高出力かつ高品質ビームのフォトニック結晶レーザー、超低消費電力のフォトニック結晶レーザー、材料に依存しない波長が可能な量子カスケードレーザー、機能集積型半導体レーザーなどが開発され、特性改善が進められてきた。これらの多様な半導体レーザーにおいて、カーボンニュートラルに関わる主要特性は、効率、光出力、ビーム品質、波長であり、これらについて応用の要求特性に依存して消費電力が決まる。このため応用に応じた低消費電力化が必要である。

図 2-1-2 は半導体レーザー効率の波長依存性の報告事例の概要である。各波長は異なる半導体材料で実現するため、研究開発の歴史が長く需要が多い半導体材料の性能改善が先行する。このため波長と効率は密接な関係を持つ。近赤外帯の波長 0.8-1.1 μ m では 75%を超える非常に高い効率に到達している。一方、光通信などに用いられる長波長帯の波長 1.3-1.6 μ m や、表示などに用いられる可視光帯の波長 0.4-0.6 μ m の効率は 10-50%ほどである。効率の改善は低消費電力化に直接有効であるため、全波長帯で効率改善が進められている。

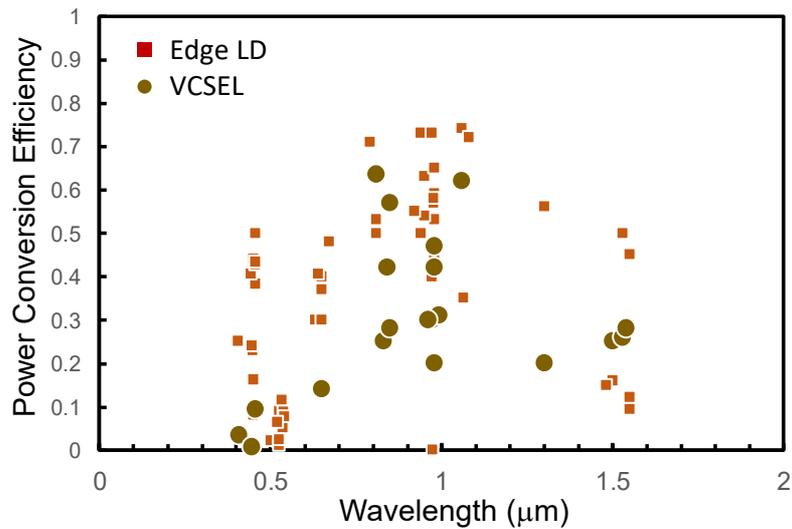


図 2-1-2 半導体レーザーの効率の波長依存性

光出力とビーム品質も密接な関係を持つ。光出力の増加は半導体レーザーデバイスのサイズの増加により可能である。しかし、微小集光や長距離伝搬のために必要な高いビーム品質は半導体レーザーのサイズを小さくする必要があり、光出力が制約される。一方、応用により高いビーム品質が不要であれば大きなサイズにより高い光出力が得られる。現在、単一の半導体チップとして、1mm 角程度で数 W、数 mm 角で数 10W の光出力が達成されている。さらにレーザーチップの積層や 1 本の光ファイバに多数のレーザー光を入力するファイバ結合型レーザーは kW クラス以上の光出力が実用されている。必要な光出力を最適なビーム品質により達成し低消費電力化することが重要となる。

(4)課題

低消費電力化によるカーボンニュートラルへの直接的貢献には、効率改善に伴う投入電力の削減や必要な光出力の最適なビーム品質による達成、またこれらを応用に最適な波長で実現する必要がある。これらは各応用特有の特性の追求と並行してこれまでも改善が進められてきた。

課題として、1962 年の極低温動作の半導体レーザーの最初の実現や 1970 年の室温連続動作の達成などからすでに 50 年以上の半導体レーザーの歴史の中で、特性改善が十分に組み込まれてきており、その特性改善傾向は飽和しつつあることである。材料の高品質形成手法の知見蓄積、微細加工技術の進展、設計技術の進展などを活用して特性の改善を着実かつ活発に進めることが必要である。より具体的な解決すべき技術開発としては、半導体ドーピング技術の立体的微細制御、従来以上に結晶歪を含む材料形成の高品質形成条件確立、ナノメートル・原子レベルの構造形成が想定される。

また、半導体レーザーは温度上昇により性能が大きく低下する。効率が低いと自己発熱が大きくなり、性能を低下させるため、特に高い光出力を必要とする半導体レーザーシステムでは冷却

器の利用が必要であり、その冷却の消費電力が大きいことが課題となる。半導体レーザーの効率改善とともに放熱制御、冷却技術が必要である。

なお、面発光レーザーなどのように、従来の半導体レーザーと異なる特徴を活用して新たな応用の創出や新たなシステムの適用が可能となることも多い。このため新しい機能性の創出や他の機能デバイスとの集積化・融合化によるシステム革新も求められる。

(5)2050 年に向けたスケジュール

まず、2030 年に向けては、既存応用の広がりに対応して、既存の半導体レーザーの効率を中心とした特性改善を着実に進めることがカーボンニュートラルへの貢献に極めて重要である。高効率の先行する近赤外帯の継続した効率改善とともに、可視光を含む短波長帯、通信やセンサ用途の長波長帯の効率の改善が重要である。また冷却技術の改善も重要である。

これらの効率改善により、チップあたりの光出力の改善が可能であり、冷却技術の簡素化も含めたコスト低減への効果から応用範囲の拡大による間接的なカーボンニュートラルへの貢献が期待される。また、既に創出されてきた多様な特徴を持つ半導体レーザーについて、迅速な実用化や応用範囲の拡大、新たな応用の創出を進めることも、間接的なカーボンニュートラルへの貢献に有効である。

表 2-1-1 半導体レーザーの低消費電力化による CO₂ 削減ロードマップ

	2022年	~2030年	~2050年	
CO ₂ 削減、国内負の排出目標		13万t	65万t	
		255万t	1,296万t	
コスト目標		10Wモジュール当たり 1千円	100Wモジュール当たり 1千円	
開発、実証、社会実装計画(シナリオ)	近赤外レーザー効率 開発75%	近赤外レーザー効率 開発80%, 社会実装70%	近赤外レーザー効率 開発85%, 社会実装75%	近赤外レーザー効率 社会実装>80%
	可視光レーザー効率 開発50%	可視光レーザー効率 開発60%, 社会実装40%	可視光レーザー効率 開発65%, 社会実装50%	可視光レーザー効率 開発70%, 社会実装60%
	長波長レーザー効率 開発50%	長波長レーザー効率 開発60%, 社会実装40%	長波長レーザー効率 開発65%, 社会実装50%	長波長レーザー効率 開発70%, 社会実装60%
	cwチップ光出力 3W/mm ²	cwチップ光出力 10W/mm ²	cwチップ光出力 20W/mm ²	cwチップ光出力 30W/mm ²

その後、2050 年に向けては、引き続き全波長帯、また、多様な半導体レーザーの効率を中心とした極限的な特性改善がカーボンニュートラルへの貢献に必須である。新規材料・構造や新原理などの創出と活用、新規応用に向けた新しい半導体レーザーの創出を通して、カーボンニュートラルへの貢献が求められる。

(6)実現に向けた提言

半導体レーザーによるカーボンニュートラルへの貢献には、直接的な消費電力の低減とともにその応用を通して間接的にも多大な貢献が望まれる。これらの多面的な貢献に向けて、以下を本領域に関わる提言とする。

【体制構築】 高度な専門的知見を活用できる産学連携研究体制と多面的な事業体制構築

半導体レーザーは、比較的大規模かつ高度な研究開発・製造設備等のリソースが必要であり、またそれらに関する高度な専門的知見も必要である。このため先端的かつ高度な研究開発体制が必須であり、適切な事業拡大などにもつなげるために、事業面、制度面など多面的に研究開発戦略を担う産学連携体制と多面的な事業に対応できる企業間連携体制の構築が必要である。

【研究開発】 高度研究開発力の拡充と多様な展開に対応可能な研究開発の確保

半導体レーザーは国内の研究開発が世界をけん引してきた強い領域であった。ただし、事業面の厳しい競争から一時期に比べて研究開発リソースの充実が十分に進められていない。カーボンニュートラルへの大きな貢献に向けては、既存の技術の着実な進化や新たな応用分野へ迅速に対応する研究開発が必要である。既存組織の研究開発力の拡充や、複数組織連携による高度研究開発力の獲得が重要であり、多様な展開に対応できる複数研究拠点の整備も必要なことから、研究開発費配分の充実などのインセンティブによる活性化が必須である。

【人材育成】 半導体レーザーの高度技術開拓と応用に対応できる研究者の育成

半導体レーザーは、半導体技術として半導体結晶成長技術、ナノ・量子構造、高度な設計、高度な評価技術などにまたがる広い知識と経験を必要とする。また、応用分野に関わる知見も必要であり、これらの知見、経験をもとに必要な技術を創出し、進展させられる専門家の育成が必要である。そのための人材育成への投資も非常に重要である。

【CO₂削減量の見積もり方法に関する補足説明】

半導体レーザーは応用により光出力が決まるため、当該光出力に必要な消費電力低減つまり効率改善によりカーボンニュートラルへの貢献を推定する。これには半導体レーザーの総消費電力の推定が必要だが、様々な応用領域向けのデバイスの消費電力や個数の詳細情報は容易に把握できない。そこで、応用領域に必要な光出力と効率よりデバイスの消費電力を推定し、また、把握可能な市場と単価より個数を推定し、効率改善にともなう総消費電力の変化をもとに CO₂ 排出量の削減を推定する。

まず、個数を推定する。レーザーの 2020 年世界市場は約 160 億ドルと見積もられている⁵。この内、半導体レーザー以外のレーザーが 59%だが、その大半は光励起光源に半導体レーザーを利用するため、ここでは全世界市場を利用する。このレーザー市場の応用分野構成は、材料加工等が 63 億ドル、通信等が 39 億ドル、研究と軍用が 22 億ドル、センサ関係が 20 億ドル、医療関係が 9 億ドル、表示等が 6 億ドルである。ここで単価、半導体レ

⁵ <http://ex-press.jp/lfwj/lfwj-news/lfwj-pickupmag/39026/>

レーザーの光出力、年間稼働率を仮定する。材料加工等は単価 10 万ドル、光出力 10kW、年間 40%稼働、通信等は単価 10 ドル、光出力 100mW、年間 100%稼働、研究と軍用は単価 10 万ドル、光出力 10kW、年間 10%稼働、センサ関係は単価 1 ドル、光出力 10mW、年間 30%稼働、医療関係は単価 1 万ドル、光出力 10W、年間 10%稼働、表示等は単価 1000 ドル、光出力 10W、年間 20%稼働を仮定する。

以上より、個数と年間稼働率を考慮した総光出力は、材料加工等は 2210GWh、通信等は 342GWh、研究と軍用は 193GWh、センサ関係は 53GWh、医療関係は 1GWh、表示等は 11GWhと見積もられ、全ての応用を合わせた 2020 年の総光出力は 2,806GWh と見積もられる。

次に、消費電力は光出力と効率から推定する。半導体レーザーは波長により効率が異なるが、2020 年時点では平均効率 30%とすると、2020 年の半導体レーザーの消費電力量は年間 9,350GWh と見積もられる。

ここで、電力量 1kWh あたりの CO₂ 排出量は、環境省のデータ⁶ をもとに、0.5(kg-CO₂/kWh)を仮定する。

以上より、2020 年における半導体レーザーの CO₂ 排出量は 468 万 t と見積もられる。

将来的な CO₂ 排出量の削減量の推定として、半導体レーザーの効率が 2020 年から改善されない場合に比べて、改善された場合を見積もる。なお、世界市場は過去 4 年の平均成長率 5%が今後も継続しながら、応用分野構成の比率と単価は変化しないものと仮定する。効率の改善により、2030 年には平均効率が 40%に改善、2050 年には平均効率が 60%に改善を仮定すると、2030 年に CO₂ 排出量は 190 万 t 削減され、2050 年には 1,010 万 t 削減される。以上は世界全体市場を基にした世界における CO₂ 削減量である。世界全体に対する電力消費量、家電市場、自動車台数などの比率から、日本国内では世界全体の 1/20 の CO₂ 削減になると仮定して、2030 年に CO₂ 排出量は 9.5 万 t 削減され、2050 年には 51 万 t 削減される。

以上は半導体レーザーという半導体チップの効率改善に基づく CO₂ 排出量削減である。半導体レーザーには放熱制御が重要であり、特に高い光出力の半導体レーザーシステムでは冷却技術が必要である。冷却器(チラー)の成績係数(COP:Coefficient Of Performance, 消費エネルギーに対する冷却能力の比率)を 4 とすると⁷、冷却対象となる発熱量は半導体レーザーの消費電力から光出力を差し引いた量のため 2020 年で 6,547GWh である。この発熱を冷却するために COP から 1/4 の消費電力が冷却器で消費されるため 1,637GWhの電力が必要である。電力量 1kWh あたりの CO₂ 排出量 0.5(kg-CO₂/kWh)を仮定すると、2020 年における半導体レーザーに利用する冷却器消費電力に基づく CO₂ 排出量は 82 万 t と見積もられる。先の 2030 年、2050 年の半導体レーザーの市場や効率に対して、2030 年、2050 年の COP をそれぞれ 5、6 とすると、世界全体で 2030 年における CO₂ 排出量は 65 万 t 削減され、2050 年には 286 万 t 削減される。日本国内で 2030 年における CO₂ 排出量は 3.2 万 t 削減され、2050 年には 14 万 t 削減される。

半導体レーザーと冷却器を合わせると、世界全体で 2030 年に CO₂ 排出量は 255 万 t 削減され、2050 年には 1,296 万 t 削減される。以上は世界全体市場を基にした世界における CO₂ 削減量である。世界全体に対する電力消費量、家電市場、自動車台数などの比率から、日本国内では世界全体の 1/20 の CO₂ 削減になると仮定して、2030 年に CO₂ 排出量は 13 万 t 削減され、2050 年には 65 万 t 削減される。

<レーザーを用いたクリーンエネルギー>

2-2. レーザー核融合、H₂ 製造

(1)カーボンニュートラルへの貢献

IoT(Internet of Things)・AI(Artificial Intelligence)などによる生産の自律化や生活の効率化が進む第 4 次産業革命によるスマート社会への変革を実現するとともに持続可能な社会を目指したカーボンニュートラルな社会を目指すには、革新的な省エネルギー技術と共に莫大な新たなエネルギー源が不可欠である。単純にデータ処理量と消費電力が比例関係にあると仮定し、IP トラフィックに比例して消費電力が増大すると推定した場合、2050 年の情報処理関係に必要な消費電力は、現在の国内総電力の約 200 倍という予測(JST 低炭素社会戦略センター)もある。カーボンニュートラルなスマート社会を目指すには、けた違いのエネルギー源が不可欠である。これを実現するには、化学反応や原子分子過程を基盤としたエネルギーだけでは困難であり、原子核に存在する 5 桁以上大きな湯川力を開放する原子核分裂反応あるいは核融合反応を利用したエネルギー

⁶ https://ghg-santeikohyo.env.go.jp/files/calc/r03_coefficient_rev.pdf

⁷ <https://www.env.go.jp/press/files/jp/26892.pdf>

一源が不可欠である。一方で、原子核分裂は使用する核燃料の1万倍の放射性廃棄物を排出する課題がある。また核融合に関しては、そのエネルギーを社会で利用できるまでに研究開発が必要であり、核融合発電による電気を直接、社会が享受するのは2050年以降になるといわれている。

このような中で、商用系統に連系しない完全自家消費型レーザー核融合炉によるクリーン水素製造は、核融合エネルギーの商業利用を2050年までに実現するFast Trackとして、カーボンニュートラルへの現実的かつ大きな貢献が期待され始めている。レーザー核融合炉は、電気出力10万kW程度の小型炉(直径1-2m程度)として分散型スマート社会に適しているだけでなく、繰り返しのパルス運転であるため、大きく変動する電力需要に対応できるという大きな付加価値を有している。さらに、研究開発段階において実現される繰り返しパワーレーザーは、核融合のみならずレーザー小型加速器、レーザー超高压による新材料、宇宙デブリ除去など様々な技術イノベーションをもたらすとともに高エネルギー密度科学という新しい学術の開拓にも大きな貢献が期待されている。

(2)現状

レーザー核融合研究は、2021年、米国で核融合反応が自律的に起こる核融合自己燃焼の伝播ならびに核融合によるエネルギー自己増幅が達成された。これは、ライト兄弟による最初の有人飛行に例えられるものであり、レーザー核融合エネルギー開発において工学的な開発が必要な段階になってきている。従来のシングルショットベースのレーザー核融合実験システムから繰り返し動作が可能なシステムが必要になってきている。

繰り返しシステムで最も重要な課題の1つである高出力レーザーの繰り返し技術は、高出力の半導体レーザーや大口径のレーザーセラミックなどを利用した固体レーザー技術が進み、これまでにない高効率・高繰り返し高出力レーザーが実現しつつある。例えば、100J/10Hz/kWあるいは10J/100Hz/kWが欧米日本で実現できており、さらに大阪大学においては100J/100Hz/10kWが、実現できる見通しが立っている。100J/100Hzを基本モジュールとした1kJ/100Hz/100kWの基本設計、10kJ/100Hz/1MWの概念設計ができています。

(3)課題

核融合発電で核融合エネルギーの商業利用には2050年以降になるといわれている。これは、カーボンニュートラルを2050年までに実現するという社会的課題解決には間に合わない。このような中で、商用系統に連系しない完全自家消費型レーザー核融合炉によるクリーン水素製造は、核融合エネルギーの商業利用を2050年までに実現するFast Trackとして、カーボンニュートラルへの現実的かつ大きな貢献が期待できる。これを実現するには、キーとなる先端的技術開発の加速と共に関連する知的財産の確保ならびに人材育成を10年以内に行う必要がある。特に主要な技術開発に関する課題に関しては、以下に記す。

・炉心プラズマ:米国で核融合点火燃焼状態をほぼ実現できているが、エネルギー源として利用

- するには、中-高利得(入力レーザーエネルギーの数 10 倍から 100 倍以上)を実現すること。
- ・レーザーシステム: 未臨界核融合炉を実現できる多目的の 10kJ/100Hz/MW のレーザーシステムの概念設計と要素技術は確立している。一方、レーザー核融合エネルギー利用に必要な $>0.5\text{kJ}/2\text{Hz}/\text{MW}$ のようなレーザーに関しては、レーザーの室温動作・広帯域増幅によるシステムの単純化・コストの低減のための新たな結晶もしくはセラミック(Nd: CaF₂)の開発や、分散型小型核融合炉を実用化する上で必要な全システムの小型化、建設コスト低減が課題である。
 - ・炉システム: 高繰り返しの燃料ペレットインジェクションとビームステアリング(集光)、核融合炉における最終光学系の中性子損傷に対する対策、パルス運転による核融合エネルギー抽出(LiPb 液体ブランケット技術)などがある。
 - ・水素製造システム: レーザー核融合炉に適した製造方法の選定と核融合エネルギーによる原理実証が課題である。水素製造法はいくつかの方法が考えられるが、現時点で CO₂ 排出から化石燃料水蒸気改質、エネルギー効率の点から電気分解法は除外する。他に将来技術として光触媒、放射線分解などが研究されているものの、未だ技術的成熟度は低くこれらも候補から除外する。結果として、最も有効な製造法は、レーザー核融合エネルギーを熱源とした熱化学分解(ヨウ素化水素生成法)やバイオマスガス化法である。バイオマスガス化においては、発生する CO₂ は原料となる植物の生育過程において大気中から回収された炭素であることから、本プロセスはカーボンニュートラルとみなすことが可能である。
 - ・発電システム: レーザー核融合発電のメリットは、パルス運転のため電力需給バランスに比較的容易に対応でき、10 万 kW 以下の小型発電システムの可能性があることである。一方で、パルス運転や核融合燃焼による不確定さがグリッド接続におけるリスクとなる可能性がある。核融合エネルギーを熱エネルギーに変換後、発電タービンで電気を発生しグリッドに直接接続するため、核融合発電システムの成熟に幾つかの開発ステップを必要とし長くコストがかかる開発計画となっている。これに対して、核融合エネルギーを水素のエネルギーとして貯蔵しこれを利用した発電システムが新たに考えられている。レーザー核融合と水素製造が結合した発電システムは、電力需給バランスにより対応できるシステムとなるため、高価電力需要に対応した電力を供給できるメリットになる。またグリッドに直接接続しないため、核融合エネルギーの実用化がより早くできる可能性があり、さらなる検討が必要である。

(4)2050 年に向けたスケジュール

2030 年: J-EPoCH(Japan Establishment for Power-laser Community Harvest)

多目的大型繰り返しレーザー装置: J-EPoCH (10kJ/10-100Hz/0.1-1MW/電気効率 10%)で未臨界核融合炉を構築し、世界に先駆けて核融合エネルギーによる水素製造原理実証と発電原理実証を行い、レーザー核融合試験炉(水素製造と電気発生試験装置)の最終詳細設計を確定する。また同時に、高繰り返し燃料ペレットインジェクション技術や核融合発電燃料サイクルに必要なトリチウム燃料増殖技術を確立するとともに、さらなる核融合炉材料開発を行う。またレーザー、核融合炉に関するほぼ全ての要素技術開発ならびに関係する知的財産を確保する。水素による

発電システムは、別途他の水素利用技術開発事業により開発されるものとして、ここでは核融合エネルギーに直接接続される技術開発に特化する。さらに高エネルギー密度科学(学術の開拓と技術イノベーション創出)の開拓と共に 2050 年の商用炉実現を目指した人材育成を行う。

2040 年: HYPERION (Hydrogen-production Plant and Energy Reactor of Inertial-fusion)

レーザー核融合エネルギー開発に特化したレーザーシステム(0.5MJ/2Hz/1MW/電気効率 20%)による水素製造装置と電気発生試験装置のための 2 種類の小型核融合試験炉(HYPERION)を実現する。レーザー核融合反応の高利得化・効率化とクリーン水素製造商業試験(水素製造目標: >1.7t/時間)を行うとともに、水素を利用した高価電力需要に対応した電力供給に関する仮想実験を行う。

2050 年: HYPERION-C (HYPERION for Commercial purpose)

1 つのレーザーシステム(0.5MJ/16Hz/8MW)で 4 核融合炉(4Hz/炉)を駆動する水素製造を目的にした商用炉を実現する。0.5-1ha の敷地内にレーザーによる小型核融合炉と共に水素製造装置や水素液化設備などを有した商用プラントを構築する。

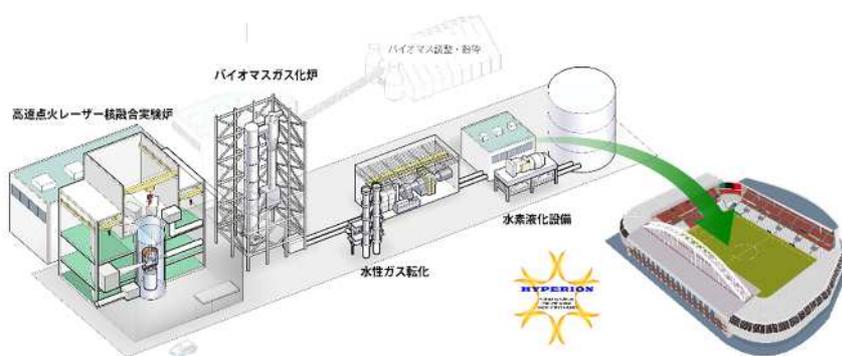


図 2-2-1 レーザー小型化核融合炉を利用した水素製造商用プラント予想図*

* 図の一部として、京都フュージョニアリング株式会社による図を使用

第 1 ステップとして、1 プラントあたりクリーン水素製造量:>27t/時間、13 万 t/年(稼働率 55%)を実現することで、クリーン水素製造コスト<270 円(2.3 ドル)/kg(現在のクリーン水素製造コスト:3~8 ドル/kg)を目指す。第 1 ステップでは運転自動化、燃料である 3 重水素の自己製造率向上、安定運転化などの技術を開発することにより、1 プラントあたりクリーン水素製造量:19 万 t/年(稼働率 80%)、クリーン水素製造コスト 105 円(1 ドル)/kg を目指す。また 47 都道府県あたり 1 プラント以上を建設することで、クリーン水素製造量>611-893 万 t/年(国内総水素需要予測 2,000 万 t/年)を目指し 5,000 万-1 億 7,000 万 t 以上の CO₂ 削減に貢献することを目標とする。レーザーによる小型核融合炉を利用した水素製造プラントは、2050 年に予測される国内水素需要(2000 万 t)⁸の全てを、競争力ある価格かつ安定でクリーンな水素の形で供給できる唯一の手段である。

⁸ 成長戦略会議(第6回)配付資料 資料2:2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略, <https://www.meti.go.jp/press/2020/12/20201225012/20201225012.html>

表 2-2-1 HYPERION による水素製造コスト評価

■ 第1ステップでのコスト評価		■ 第2ステップでのコスト評価	
● 建設コスト/30年	100億円/年	100億円/年	100億円/年
● 人件費・運転費	150億円/年	70億円/年	70億円/年
● リスク経費	100億円/年	30億円/年	30億円/年
● 合計	350億円/年	200億円/年	200億円/年
● クリーン水素製造コスト	270円(2.3ドル)/kg	105円(1ドル)/kg	105円(1ドル)/kg

● 建設コスト/30年: 100億円/年
 ・ 1プラントあたり3000億円、都市は自治体から提供(サッカー競技場程度)
 ・ 半導体レーザーのコスト低減、高出力化を見込んでいる
 ● 人件費・運転費: 150億円/年
 ・ 燃料の3重水素の自己製造率は70%程度
 ● リスク経費: 100億円/年
 ・ 環境や運転の安定性などのリスクに対する保険料などを含め、現在の原子炉程度を想定
 ● 合計: 350億円/年
 ● **クリーン水素製造コスト**: **270円(2.3ドル)/kg**
 ・ 1基あたり水素製造: 27t/時間・13万t/年(稼働率55%)
 ● 第2ステップでのコスト評価: 100億円/年
 ・ 第1ステップで整備したインフラを使用することを考慮し、初期建設コストは据え置き
 70億円/年
 ・ 運転自動化、燃料の3重水素の自己製造率は100%以上
 30億円/年
 ・ 安定運転の実績を考慮した保険料低下
 200億円/年
 ● **105円(1ドル)/kg**
 ・ 1基あたり水素製造稼働率を原子炉並みの80%とすることで19万t/年

表 2-2-2 レーザー核融合エネルギーによる CO₂ 削減ロードマップ

	2022年	~2030年	~2040年	~2050年
CO ₂ 削減、負の排出目標	国内	0万t	8 - 16万t [#]	0.5 - 1.7億t [#]
	世界	海外では、レーザー核融合エネルギーの水素利用は未だ検討されていないため、期待値 ☆		7 - 17億t
コスト目標 (建設コスト)	10億円	400億円 (多目的利用装置)	3,000億円 (試験炉)	3,000億円/基 (商業炉)
開発、実証、社会実装計画(シナリオ)	繰り返しパワーレーザーシステム開発 小型核融合炉による水素製造装置概念設計	未臨界核融合炉による水素製造と発電原理実証 ■ キーとなる先端的技術開発の加速 ・ 水素製造・発電の原理実証 ・ 核融合炉材料開発 ・ 燃料増殖実証 ・ ペレット供給とインジェクション技術確立 ・ データサイエンスによる炉心プラズマ最適化 ■ 知的財産の確保 ■ 人材育成 ・ 高エネルギー密度科学の開拓(学術の開拓と技術イノベーション創出)	小型核融合炉による水素製造・供給試験ならびに発電試験 2炉(1Hz) 水素製造・供給試験(1炉)と発電試験(1炉) ・ 1基あたり水素製造: 1.7t/時間、0.8万t/年(設備利用率55%) ・ 中利得ターゲットデザインで安定な水素製造試験と発電試験を行う。 ・ 複数炉を同時に動かす試験を行う。 (国内水素需要予測: 300万t/年) [*]	小型核融合炉による水素製造・供給(商用) 47基(4Hzx4炉/基) 47都道府県に各1基 ・ 1基あたり水素製造: 27t/時間・19万t/年(設備利用率80%) ・ 全国: 611万t/年 105円(1米ドル)/kg 建設コスト: 100億円/年×30年 人件費、諸費: 70億円/年 リスク経費: 30億円/年 (国内水素需要予測: 2000万t/年) [*]

参考) クリーン水素1キロ当たり価格 (IEA) 3 - 8米ドル/kg@2019年
 * 廃棄バイオマス利用で検討。廃棄物処理のネガティブコストは計上していない。 1 - 3米ドル/kg@2050年

IEA が目標としている 2050 年に 1~3 ドル/kg を満たす安定なクリーン水素製造方法は、現時点ではレーザー核融合以外には見当たらない

* 日本の水素需要: 2,000万t(日本の成長戦略)
 世界の水素需要: 2億9,000万t
 (Energy Technology Perspectives 2020 IEA)

CO₂削減に関連した水素利用に関しては、さまざまな方法(発電、輸送、産業利用、建物電力・熱利用、新たな用途など)が検討され、技術開発が政府主導で行われている。そのためクリーン水素利用とCO₂削減効果に関する明確な指標はなく様々な評価が見受けられる。ここでは、いくつかの評価事例を参考に水素質量の8-20倍のCO₂削減効果が期待できるかもしれないという期待値を記している。

☆ 各国の水素技術の普及と水素使用方法が日本と同程度であり、日本と同じ割合で核融合によるクリーン水素製造を行うという仮定すると、680プラントが世界に建設される可能性があり、7億t-17億tの削減効果が期待できるかもしれない。

(5)実現に向けた提言

カーボンニュートラルなスマート社会を目指すには、けた違いに効率の高いエネルギー源が不可欠である。そのために、レーザー核融合エネルギーの早期実用化のための Fast Track 戦略の実現が必要となる。さらにこれを現実的に推進するためには、キーとなる技術開発の加速と知的財産の確保ならびに人材育成が喫緊の課題である。

■ レーザー核融合エネルギー実用化への Fast Track 戦略

2050 年カーボンニュートラル実現へ向け、レーザー核融合エネルギー開発の Fast Track 戦略を推進する必要がある。そのために、核融合発電で直接グリッド接続する従来の発電戦略から、**商用系統に連系しない完全自家消費型レーザー核融合炉によるクリーン水素製造による核融合エネルギーの早期商業利用戦略への変革と推進**を行うべきである。これによりグリッド接続で必要とされる核融合炉への要求が下がり、他の方式に比べ圧倒的に開発期間を短縮化できるだけでなく開発ステップをショートカットでき開発コストの低減にもつながる。さらにレーザー核融合炉だから期待できる小型で出力調整が容易な分散型スマート社会に適した付加価値の高い運転モードの活用など経済的競争力を考慮したエネルギー開発にも貢献できる。

■ レーザー核融合実現に不可欠な基盤となる技術、人材、知的財産の確保

多様な学術と技術の集積・収斂により実現できるレーザー核融合エネルギーの開発には、多様なステークホルダーとの共創による技術開発と人材育成ができる中核拠点が不可欠である。そのために産官学が連携し速やかに我が国のコア・コンピタンスを活かした**世界最高レベルの多目的で繰り返し・高出力の大型パワーレーザー施設を世界に先駆けて整備し、多様な共創が実現できる施設を整備すべきである**。特にカーボンニュートラルへ向けた国際競争の中で、核融合エネルギー実用化のカギとなる先端的技術開発の加速、関連する知的財産の確保ならびに人材育成は、喫緊の課題である。水素エネルギー需要が急増すると考えられる 2040 年ごろ、水素製造と供給を可能とするレーザー核融合炉の実現は一層重要になる。また、国際標準化を先導することで、世界でレーザー核融合炉を利用した水素製造技術の普及を推進することが可能となる。そのためには、**基盤となる技術開発と人材育成ができる中核拠点により 2030 年までに世界をリードする成果を出す必要がある**。その結果として、世界に先駆けて核融合エネルギーの実用化が期待できるだけでなく、大型の繰り返しパワーレーザーによる様々な技術イノベーション創出とともに高エネルギー密度科学という新しい学術の開拓で世界を先導できる。

2-3. 太陽光励起レーザー

(1)カーボンニュートラルへの貢献

太陽光励起レーザー(SPL: Solar-pumped Laser)は、無尽蔵な太陽光をレーザー光に変換する仕組みである。太陽光から直接レーザー光を取り出す技術が開発・社会実装され、CO₂を発生し

ないエネルギーとなる。従来からの太陽光発電とは異なり、レーザーの特徴を活かしたクリーンエネルギーとして、SPL の応用技術によるカーボンニュートラルへの貢献を目指す。SPL 単体の効率向上、光電変換デバイス単体の効率向上は重要であるが、エネルギー応用としての使い方を含めたシステム全体での効率的な運用法を提案する。

エネルギー利用分野での応用技術という観点(図 2-2-1)では、通常の Si 太陽電池に代わる発電システム(半径 2-3km 程度の地域における局地 SPL 発電)への応用が考えられる。電力需要のある地域ごとに設置した SPL でレーザー光(赤外波長)を発生させて、そのレーザー光を低損失伝送可能な光ファイバを用いて、事業所や家庭に光のままエネルギー伝送する。そして、そのレーザー光を、各々の軒先で、単色光に特化した光電変換デバイスで電力に変換する。現状の発電と電力の送電の様を高電圧への変換をともなう方式とは異なり、発生させた光をエネルギーとして伝送できるという特徴を有する。エネルギーの発生から消費地(給電点)までの距離を短くすることで、数 kW のエネルギー供給を、髪の毛ほどの太さの光ファイバ1本あたりで実現できる。

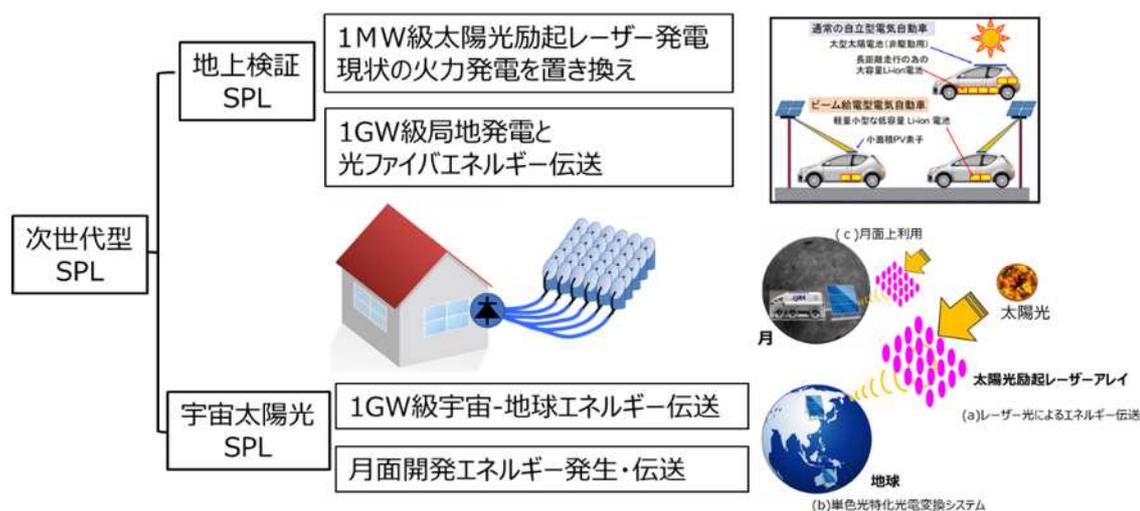


図 2-2-1 太陽光励起レーザー(SPL)の用途分類

SPL 発電では、火力発電所(日本国内の発電量 7,000 億 kWh)より排出される CO₂(火力発電の平均値 0.5kg-CO₂/kWh)を大きく減らすことができる。日本の電力需要の 5%を SPL 発電に置き換える場合、前出の数値をもとに試算すると、年間 2,500 万 t の削減効果となる。システム製造時の負荷として Si 太陽電池パネルでは 50g-CO₂/kWh と言われているが、SPL 発電は、集光型太陽電池と同様に Si 材料の消費を桁違いに小さくできることも特徴である。

発電量 1GWh/年のシステムを耐用年数 40 年間で運用する想定の場合、システムの建設コストを 1 億円、ランニング・メンテナンスコストを 500 万円/年×40 年、発電量による利益(価格 20 円/kWh)を 9 億円と推定する(SPL 発電は、概ね集光型太陽電池と同程度のコストと仮定)。実際にはレーザー機構のコストが発生するが、Si の使用量を集光型太陽電池の場合よりも減らすことが

できると予測する。現状の日本の火力発電所の 5%を置き換えるためには、SPL 発電システムが 5,000 台規模必要になる。稼働する必要のあった火力発電所の置き換えとなるので毎年 2,500 万 t の削減と位置付けた(いずれかの時期に火力発電所が不要になる場合は、それ以降の削減量を試算するのは適切でないとする)。

本技術の応用として、レーザー光を空間伝送し、電気自動車などへエネルギー供給することができる。そのような応用においてもカーボンニュートラルに貢献できる。また、レーザー技術による短波長発生を用いる化学物質(運搬可能な液体燃料)の生成も低炭素社会への貢献となりうる。

SPL 発電の実用可能性を、地球上の局地発電で検証した後、将来、『宇宙太陽光発電』という技術に発展させることが期待される(宇宙太陽光発電には、エネルギー伝送方式の違いにより、レーザー方式とマイクロ波方式が検討されている。どちらも太陽電池で発生させた電力を用いることを想定している)。SPL 宇宙太陽光発電は、太陽光から電力を発生することなく、直接、レーザー光を発生させるところが前出 2 方式とは異なる。地球の静止衛星軌道に配置する SPL で、広いスペクトルを有する太陽光を単色のレーザー光に変換する。そのレーザー光を、地上の「単色光電変換システム」に伝送し、電力に変換することで発電を行う。宇宙は、24 時間・365 日間晴れであるため、地上よりも高い稼働率が期待される。天候に左右される不安定な電力源ではない、安定供給可能な電力源となりうる。また、宇宙太陽光発電となる SPL 発電は、空間伝送(無線)で光エネルギーを供給できることから、災害時の救助用発電システムとしての活用も期待される。

「SPL」と、単色光に対する変換効率を最適化した「単色光電変換デバイス」の検討も進んでいる(図 2-2-2)。その一つに、Si による一般的な材料構成であり、垂直方向からの入射光のみを透過する光フィルタ(バンドパスフィルタ)と拡散反射をする鏡を組み合わせることで、変換効率(61%)を目指すデバイスの検討が進められている。

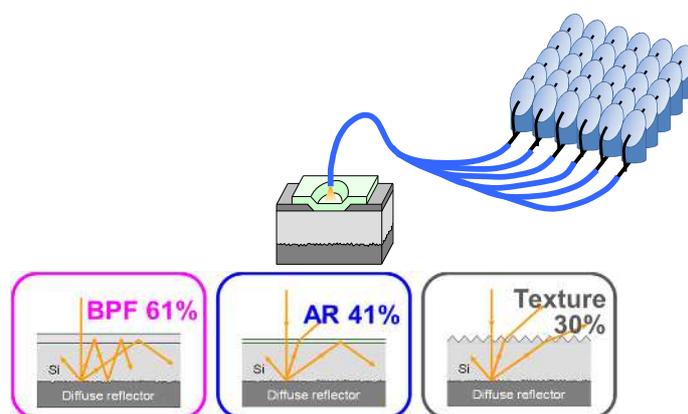


図 2-2-2 単色光電変換デバイスの一例

(2)現状

SPL の理論効率は 30%を超えるが、これまでの SPL のスロープ効率は $\eta < 10\%$ であり、高効率化が必須である。SPL 高効率化のために、太陽光スペクトルの吸収効率を高めるべく、 Nd^{3+} と Cr^{3+} などを共添加する組み合わせが検討されてきたが、理論効率で期待される様な成果が得られて

いない。SPL の高効率化を目指しつつ、長時間安定に発振させるために、太陽光の追尾方式や、集光方式が検討された。例えば、JST/ALCA (Advanced Low Carbon Technology Research and Development Program)「太陽光励起レーザー・単色型太陽電池結合発電」では「コンポジット型ロッド」構造が提案され、太陽の追尾精度の緩和や、安定に発振する SPL 構造が実現されて、6.5 時間の連続発振が実証された。SPL の出力を光ファイバで伝送する技術、単色光特化光電変換技術も成果を出し、目標に向かって進展している。

一方、SPL 発振技術においては、太陽を追尾・集光する方式以外に、非集光型で SPL を発振させるというアプローチもあり、エネルギー利用の用途とシステム設計で特長を活かす検討が進められている。

SPL 単体に求められるレベルは、同等機能を構成する太陽電池とレーザーの組み合わせを考えて、少なくとも地球上の太陽光スペクトル(AM1.5)下で、現状の Si 太陽電池の変換効率($\eta \sim 20\text{--}25\%$) \times レーザー発振効率(半導体レーザー $\eta \sim 50\%$,ファイバレーザー $\eta \sim 35\%$)の組み合わせを前提とした $\eta = 10\%$ 程度を越えることである。これが SPL のエネルギー応用が緒に就くための第一歩となる。

(3)課題

ガラス・結晶・透明セラミックス媒質における共添加(希土類元素 Nd^{3+} と、広帯域な太陽光スペクトルを吸収する増感剤 Cr^{3+} が典型)での検討には手詰まり感があり、多くの先行研究もこの問題を解決できていない。これまでの経緯を踏まえた共添加媒質の進化を進めつつ、半導体バンドギャップ構造による面発光型半導体レーザー(VCSEL)タイプの利得媒質を用いることで、従来媒質の変換効率を、大きく凌ぐ SPL ができるのではないかという学問上の問がある。この点を検証するのが新たな挑戦と考えられる。直近の性能向上は共添加材料の最適化で実現し、SPL 発電のシステム技術確立を目指す。その先のフェーズでは、太陽光の波長をすべて吸収する半導体利得媒質を採用する SPL の技術開発が必要で、太陽光波長を無駄なく利用することで効率 30%を実現する。単色光電変換は、デバイス構造の最適化で効率向上を図る。また、Si に変えて、化合物半導体材料の採用でも効率向上に寄与し、光電変換効率 60%を達成する。SPL と光電変換の課題解決で SPL 発電の効率向上(20%)を達成する。一方、宇宙でエネルギー利用する場合は、費用対効果の点で化合物半導体導入による高効率化の利点を得やすい。

従来型の太陽光発電と同様の議論となるが、システム製造時のエネルギーを削減することが重要である。SPL 発電方式では、従来型の非集光 Si 太陽光発電や集光型 Si 太陽光発電よりも製造コスト・製造時の CO_2 排出を下げられるという目論見がある。一方、システムの運用・維持のコスト・総エネルギー(CO_2 排出抑制)を見極めることも課題である。

(4)2050 年に向けたスケジュール

2030 年頃に、小規模 SPL 発電システムを地上で稼働させる。半径 2-3km の局地に送電し、供給先で光電変換することで、大規模な昇圧(6,600V 等)を行うことなく、直流の光エネルギー伝送で

発電システムを実現する。

将来の宇宙での展開を視野に入れて、軽量の集光方式や、低価格で実現可能な集光方式の検討は、地上での SPL 発電システムを広く展開する上でも有用である。システムの効率化の検討と並行して研究が進められる検討である(図 2-2-2)。

集光方式、レーザー媒質の検討、単色光に対する光電変換の高効率化、レーザー光の長距離伝送方式の検討は、独立に検討・開発することが可能な技術課題である。2030 年の第一のゴールに向けては、短期間でイノベーションを促進するために、DARPA 方式の様に革新的なアイデアの競争と技術の統合を短いサイクルで判断し、試行錯誤を繰り返す競争的な進め方が技術統合型の目標達成にマッチする。「地上の局地ごとの SPL 発電システム」、「小型バッテリーを搭載して走行する電気自動車への給電システム」、「低炭素社会への貢献となりうる化学物質(運搬可能な液体燃料)の生成」などの成果物を創出し続けることがスケジュールを加速すると考える。2050 年に向けて、宇宙太陽光発電システム(SSPS)レーザーにより、365 日・24 時間晴天の宇宙で作ったクリーンなエネルギーを、地上に送電するエネルギーシステムを目指すことで、将来のカーボンニュートラル時代のエネルギーインフラにも貢献する。また、月面開発では、太陽光が全く届かない永久影の領域や、資源探査用ローバーへの無線によるエネルギー供給が必要であり、宇宙を視野に入れた計画も視野に入れる。

表 2-3-1 太陽光励起レーザー(SPL)のエネルギー応用による CO₂ 削減ロードマップ

	2022年	~2030年	~2050年
CO ₂ 削減、国内負の排出、世界目標		局地SPL発電:500万t/年 (火力発電所の1%をSPL発電で置き換え)	局地SPL発電:2,500万t/年(5%を置き換え) 宇宙太陽光発電(1GWシステムあたり)50万t/年 (非集光型太陽電池比で)運搬・建設 100万t
システムコスト目標 ランニングコスト目標		1,000億円 (1億円×1,000台) 50億円 (500万円×1,000台) (×40年間運用)	1兆円/台(1GWシステム) 5,000億円
SPL発電の初期 地上応用 局地SPL発電 (半径2-3km程度の範囲)	SPL効率10%、単色PV効率30%	1MW×5,000台でCO ₂ 2,500万t削減 太陽光励起レーザー発電η~3% 太陽光励起レーザー光ファイバ送電 1MW×1000台でCO ₂ 50t発生(設備)	局地SPL発電システム レーザーによる有用化学物質生成
SPL発電の将来 宇宙応用 宇宙太陽光発電 宇宙から地上へ 月面開発のエネルギー源	40年間で、 1,000億円(システム)+20,00億円(ランニング)で 総発電量40TWh 最大2億t-CO ₂ 削減 (1GW×1,000台×40年) (500万t×40年)	太陽光励起レーザー効率化 η 3%→10% 集光系軽量化・低コスト化 単色特化光電変換 高効率化(60%)	地上で培った基本技術が宇宙用途に展開 災害時の緊急用SPL発電システム SPL効率30% 単色PV効率60% 1GWシステムでCO ₂ 50t削減(設備) 太陽光励起レーザー発電η~20% 24時間・365日間稼働する安定SPL発電システム 月面衛星軌道上SPL発電 月面上SPL発電、光ファイバ伝送 SPL+光ファイバ送電

(5)実現に向けた提言

通常の太陽光発電と異なる方式で、太陽光をもとにした再生可能エネルギーの開発は重要である。SPL 発電、無線給電、化学物質の生成など地球上で実現させる SPL 技術から着手して、技術課題の大きな宇宙規模での利用に向けた準備をする。エネルギー製造の効率のみでなく、エネルギー利用技術も考慮した高効率化で、カーボンニュートラルに貢献する。

米国の宇宙機関・企業を中心に、各国の月面開発・月面基地の構想・計画が発表されている。国際宇宙会議(IAC)ではアルテミス計画の合意を発表し、トヨタ自動車・JAXA が月面車の開発計画を公表するなど活気づいている。月面開発に必要なのは、太陽光が全く届かない永久影の領域や、資源探査用ローバーへの無線によるエネルギー供給である。高い目標設定が技術開発を牽引する。技術、安全性、経済性と同時に、エネルギー安全保障や産業戦略、研究開発から派生する研究成果にも貢献する。

「知財・国際標準化、規制改革」という観点では、SPL という概念は、レーザー黎明期から存在するので特に新しいものはないが、エネルギー利用する考えは近年の成果である。SPL の進展を支えた透明セラミックス技術は、日本が世界に誇る技術であり、秘匿すべきノウハウも多く含まれる。今後、半導体利得媒質も併用する中で新たな知財の獲得を進める。

また、インフラにかかわるテーマであるので、認知度向上・技術開示方法を考慮しながら国際的な標準化を進めないと、広く普及することが出来ない。宇宙太陽光発電ともなると、地上の MW 級発電では問題にならないような標準化が重要となると考える。さらに、未踏の領域である宇宙では、レーザーによるエネルギー伝送が認められるような普及活動・規制改革が必要となる。

<レーザー適用によるシステム革新>

2-4. スマート農食産業

(1)カーボンニュートラルへの貢献

世界の GHG(Greenhouse Gas)排出量は CO₂ 換算で 490 億 t であり、このうち農業・林業・その他土地利用の排出は世界排出全体の 1/4 と非常に大きく、革新的技術開発による排出量削減が急務である。一方、世界の人口は 2050 年には 2010 年比で 1.3 倍、食料需要は 1.7 倍まで増えると予測されており、さらなる排出量削減を実現するためには食料生産性の向上とロス低減が不可欠となっている。また、農地・森林や藻類の増養殖技術により放出量以上の GHG 削減が期待されるネガティブエミッションに向けた技術開発も非常に重要である。さらに人工光合成を活用した水素生成も将来的な有望技術として期待される。

農業・食品分野における光技術の応用に関して、LED の進化により光センシング技術が広く普及し、IoT・AI 技術と各種センシング技術を組み合わせたスマート化が加速している。レーザーは LiDAR などのセンシング技術に活用されているが、単色性・指向性が高く、小型化可能なレーザーを今後広く応用することで、光センシング技術の高度化が期待される。さらに、レーザーならではの特徴を活かし、新たな領域におけるカーボンニュートラルへの貢献を目指す。

(2)現状

2020年5月、EUが「Farm to Fork 戦略」として2030年までに化学農薬の使用量及びリスクの50%減、有機農業25%拡大を宣言、米国も2020年2月に「農業イノベーションアジェンダ」として2050年までに農業生産量40%増加と環境フットプリント半減を宣言した。農林水産省も、2021年5月に食料・農林水産業の生産性向上と持続性の両立をイノベーションで実現する「みどりの食料システム戦略」として2050年までに目指す姿と取り組み方向を策定した。

また、成長戦略として2020年12月に策定した「農林水産物・食品輸出拡大実行戦略」にて輸出重点品目と輸出目標を設定し、2025年2兆円、2030年5兆円への拡大を目標に掲げ活動を推進している。

こうした状況の中、レーザーや光技術を農業・食品分野のカーボンニュートラルに応用する研究はまだ少ないため、貢献余地が非常に大きく、さまざまな分野でのイノベーション創出が大いに期待される。

(3)課題

温暖化による気候変動・大規模自然災害の増加、生物多様性の急速かつ大規模な損失が深刻化している。また、生産される農産物の4割以上が、病害虫・雑草などの有害動植物により損失しており、その対策として化学農薬に依存した害虫駆除が行われている。さらに生産者の減少・高齢化による生産基盤の脆弱化、地域コミュニティの衰退は大きな社会課題となっている。

こうした状況の中、SDGsが世界に広く浸透しているにも関わらず、必要以上に外観のきれいさや日付の新しさにこだわる消費者志向により、農薬や包材が過剰に使用され、先進諸国を中心に食料の1/3以上が廃棄される食品ロスが発生しており大きな問題である。土壌、家畜の消化管、家畜排せつ物に棲息する微生物の反応に起因するCH₄、N₂O排出は農業分野特有の課題となっている。

(4)2050年に向けたスケジュール

上記課題を受けて、①環境負荷低減、最適化・最大化・安定化を実現するAIを活用したデータ駆動型精密農業、②ムリ・ムダのない生産、加工・流通、消費の実現、③農地や森林、藻類によるCO₂吸収、ネガティブエミッションへの貢献について提案する。

2030年に向けては、衛星・ドローンなどを活用したレーザー計測によるリモートセンシング技術を適用することで農業の精密化を推進する。具体的には、害虫被害や生育状況を診断し、ピンポイントで農薬散布・施肥を実施、特定種類の害虫をレーザーで検知・追尾する防除技術、光追撃による鳥獣被害を低減する技術、農作物と雑草を判別し雑草のみをレーザー照射除去する技術、さらにはGPSベースの精緻な土壌センシングで環境負荷低減と最適化・最大化・安定化を実現する。

また、衛生的かつ気候変動の影響を受けないことで今後拡大が見込まれる植物工場にレーザー光源を適用することで、植物工場における高効率化、高収益化を実現し、食料の安定供給に貢

献する。

さらに、収穫時の食味や収量の光センシング技術や、流通・加工時での青果物の非破壊の光センシング技術を高度化することで、青果物の品質を早期に精度よく検出することができ、事業系食品ロス 2000 年度比半減に貢献する。

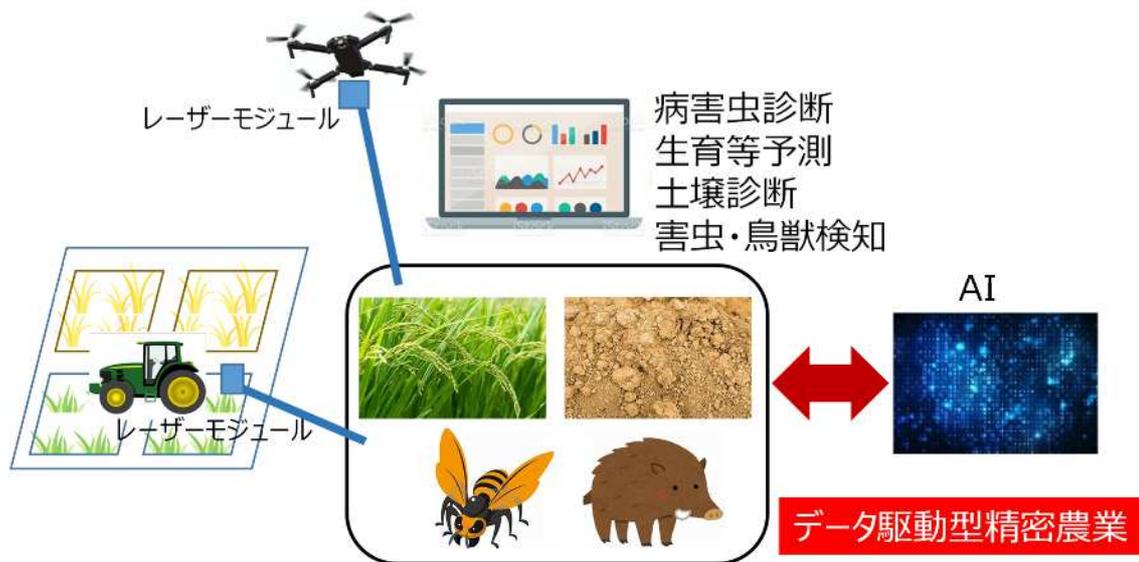


図 2-4-1 スマート農食産業分野におけるレーザー応用

2050 年に向けては、精密農業の進化と、あらゆる害虫をレーザーで検知・追尾する防除技術の確立で、化学農薬 50%削減・有機農業の拡大に貢献する。本防除技術によるカーボンニュートラル貢献量としては、化学農薬削減施策における貢献率を 10%とした場合、CO₂ 排出量を国内で 2 万 t、世界で 395 万 t 削減可能となる見込みである。

また、レーザーのさらなる高効率化、低コスト化によりレーザーを主光源とした完全人工光型植物工場にて究極のスマート人工農場の実現が可能となる。LED 光源よりも効率よく植物に光を照射できるレーザーを適用することで、CO₂ 排出量を LED 光源型植物工場に対して 2030 年には国内 47 万 t、世界で 3,370 万 t 削減でき、さらに 2050 年には国内 315 万 t、世界で 2.5 億 t の削減が期待できる。

さらに、流通・加工、消費における、食品栄養素や鮮度などを予測する技術を確認し、鮮度・味・機能性を向上する技術を開発することで、食と健康に貢献し、健康寿命の延伸と、国産食品の価値を向上することで食品輸出の拡大に寄与する。また、AI による需要予測や新たな包装資材の開発等の技術の進化と連携し、事業系食品ロスの最小化を図る。バイオ技術による要素技術の高度化と衛星やドローンを活用したリモートセンシング技術を活用し、農地・土壌微生物、森林、藻類で効率的に CO₂ 吸収、隔離・貯蔵するネガティブエミッションへの貢献も目指す。

表 2-4-1 スマート農食産業分野における CO₂ 削減ロードマップ

	2022年 農業 植物工場	～2030年	～2050年
CO ₂ 削減、 負の排出 目標	国内 79万t 187万t	植物工場市場占有20% 47万t	農業市場効果10% 2万t 植物工場市場占有80% 315万t
	世界 1,800万t 17億t	植物工場市場占有3% 3,370万t	農業市場効果10% 395万t 植物工場市場占有13% 2.5億t
コスト目標	参考 44万円/千m ² LED植物工場 プラント	46.2万円/千m ² LD植物工場プラント(設備費)	43.6万円/千m ² 高付加価値LD 植物工場プラント(設備費)
開発、実証、 社会実装 計画(シナリオ) ●精密農業 ●植物工場 ●食品ロス 健康寿命延伸	衛星・ドローンを活用したリモートセンシング		農業生産量40%増加※2
	GPSベースの精緻な土壌センシング		化学農薬50%低減、 化学肥料30%低減※1
	雑草のみ判別し、レーザー雑草照射除去		データ駆動型精密農業の高度化
	ピンポイント農薬散布・施肥		あらゆる害虫をレーザー防除
	特定種類の害虫のレーザー検知・追尾		化学農薬50%減※3
	レーザー補光型植物工場		完全人工光型植物工場
	青果物非破壊センシング、品質の早期検出		食品ロス最小化※1 センシングの高度化、AI、包材技術連携

出典：※1 農水省「みどりの食料システム戦略」、※2 米「農業イノベーションアジェンダ」、※3 EU「Farm to Fork戦略」

(5)実現に向けた提言

スマート農食産業におけるカーボンニュートラルの貢献には、大きな市場形成によるレーザーの低コスト化、生産現場など厳しい環境下でも活用できるシステムの構築、AI・IoT、ロボティクス技術等と連携したシステム開発の推進が望まれる。これらの貢献に向けた、以下を本領域にかかわる提言とする。

(体制構築)

レーザーの農食産業分野におけるカーボンニュートラルの応用事例はまだ少なく、新たな市場を形成しさらにその市場を大きくするためには、レーザーは化学薬品を使わない点で極めて安全であることや光源としてのメリットを積極的に発信していく必要がある。また、精密農業やスマート化においては、農業従事者や自治体、機器メーカー、さらにはシステムベンダーなど広範囲の組織を巻き込んだ取り組みの実現、国家プロジェクトなどを活用した大規模開発への参画、さらには国際的な活動を後押しする産官学が連携した体制の構築が重要である。

こうした活動を推進する中で、知財・標準化活動も重要であり、機器メーカーなど関連組織における知財・標準化活動を強化するとともに農研機構(国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構)との連携をさらに強化する。また、規制改革が必要になる場合は農林水産省など関連省庁への提案も検討する。

(研究開発と実証の推進)

農食産業の対象は、品種ごとに性質が異なる農作物であり、気候変動や大規模自然災害といった外的要因の影響も大きく、生産効率が予測困難なものが多い。この分野での生産性向上とロス低減を AI を活用して精度よく予測するためには、開発した関連技術をできるだけ多く実証する機会を設け、ビッグデータを蓄積していくことが鍵となる。特に、食品輸出拡大に貢献するためには、海外に向けた実証も必要となるため、国・自治体の支援が必須である。

さらに広く受益者が成果を活用できるように農業データ連携基盤「WAGRI」によるデータ連携を意識した取り組みの推進を提案する。

【CO₂削減量見積もりに関する補足説明】

国内農業使用量は近年減少傾向にあり、農業工業会が公表している過去の統計データをもとに今後の推移を推定した⁹。

化学農薬の CO₂ 排出係数は、農水省が公表している参考値 4.44kg-CO₂/kg を採用し、農水省「みどりの食料システム戦略」にて 2050 年に化学農薬 50% 減の目標実現に向けて、提言する手法がその市場の 10% に貢献するとしてその効果を算出した¹⁰。

一方、海外の化学農薬市場は年平均成長率 3.7% で増加し、2020 年 614 億ドルから 2027 年は 789 億ドルになると予測されている。化学農薬の排出係数は国内と同じ値とし CO₂ 排出量を算出した。

国内の完全人工光型植物工場の運営市場規模は、2020 年 129 億円から 2024 年 360 億円に増加する見込みで、業務用市場における需要拡大などで市場規模はさらに拡大すると予測。これに伴い、植物工場への設備投資も同様に拡大する見込みである。植物工場用光源をレーザー化することで効率的に植物に光を照射できるため、LED と光合成光量子束密度が等しくなるように設計した時の CO₂ 排出量の削減効果を算出した。

世界においても植物工場の運営市場規模は 2021 年の 1,218 億ドルから 2026 年までに 1,725 億ドルに拡大すると予測されており、今後も世界人口の増加に伴い食料需給量も増加するため、植物工場市場も拡大すると予測。植物工場用光源をレーザー化することによる低消費電力化の効果は、国内と同等だが、世界市場予測には全タイプの植物工場(①完全人工光型、②太陽光併用型、③太陽光利用型)が含まれているため、レーザーは①②のみ適用可能であり、市場占有率は 2030 年 3%、2050 年 13% で計算した。

2-5. レーザー加工の産業応用

(1)カーボンニュートラルへの貢献

近年、地球温暖化に歯止めがかからず、世界各地で生物の生存を脅かすような異常高温の発生や、街を壊滅させるような大雨などの異常気象、港町が水没する海面上昇など、地球の未来が危ぶまれている状況にある。これらは人類が利便性を追求したことで排出された多くの CO₂ によって地球温暖化が進行してきた結果と考えられている。我が国の 2019 年度 CO₂ の排出量は国交省の発表によると 11 億 800 万 t、そのうち運輸部門からの排出量は 2 億 600 万 t で 18.6% を占めている¹¹。なかでも自家用乗用車が 9,458 万 t で運輸の 45.9% を占める。

我が国においても、温室効果ガスの排出を実質ゼロ¹²、すなわちカーボンニュートラル(脱炭素

⁹ <https://www.jcpa.or.jp/labo/data.html>

¹⁰

https://www.maff.go.jp/j/budget/yosan_kansi/sikkou/tokutei_keihi/seika_h22/kanbou_kankyuu_ippan/pdf/601000_07_02.pdf

¹¹ https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/sosei_environment_tk_000007.html

¹² https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/sosei_environment_tk_000007.html

社会)を目指す取り組みが始まっており、菅前総理の施政方針演説においても「2050年カーボンニュートラル宣言」を発し、以来日本においてその重要性はたびたび取り上げられてきている¹³。それを受けて自動車産業においてもカーボンニュートラルへの取り組みが推し進められ、CO₂排出を抑え環境に配慮した自動車の開発・普及があげられる。その中で注目されているのがCO₂を排出しない電気自動車である。

「レーザー加工の産業応用」ということで、「電気自動車の省エネルギー」、「シェアリングによる省エネルギー」および「再生可能エネルギー」について以下に記述した。

【電気自動車の省エネルギー】

CO₂を排出しない電気自動車ではあるが、さらなるカーボンニュートラルのために、省エネルギー、つまり電気使用の高効率化が必須となることから、主要構成部品となるモーターやバッテリーは、小型高性能化が求められている。また、制御系の部品となるパワーデバイスについても高機能化、高性能化が求められる。いずれも銅材料が使用されるので、銅の接合加工技術、特にレーザーを用いた溶接技術が必要となる。レーザーについては、従来の近赤外線レーザーよりも銅に対して吸収率の高い青色半導体レーザーの導入が期待されている。

【シェアリングによる省エネルギー】

電気使用量を抑える、つまり、電気を効率的に活用するシステムも求められる。電気自動車については、個人が電気自動車「マイカー」を持つのではなく、自動走行システム下で電気自動車を共有する、「シェアカー」が電気を効率的に活用する有効な方法の一つと考えられる。本稿では、自動走行システム下での「シェアカー」を次世代モビリティと呼ぶ。次世代モビリティは、不特定多数のユーザーが利用することになる。ここで、次世代モビリティに求められる機能として、抗菌性がある。新型コロナウイルス感染症問題が生じる以前は、走行についての安全・安心のみを求められたが、これからは、感染症に対しても安全・安心が求められるからである。レーザークラディング法による銅コーティングは、以下に示したような理由からカーボンニュートラルな超抗菌性部材製造技術であると考えている。

- ① 銅のコーティングは、銅の使用量を最小限に抑えることができる。
- ② コーティングされた銅皮膜は、超抗菌作用が実行される際、光や電気等のエネルギーを必要としない。アルコールや消毒液は、部材に定期的あるいは必要に応じて塗布するので、常に当該薬品を製造するエネルギーを必要とする。また、それらを運搬するエネルギーも要する。これに対し、銅皮膜は、当該エネルギーを必要としない。
- ③ 銅コーティング技術の中でも我々が開発してきた新方式のレーザーコーティング技術は、溶接技術であるため、母材と銅皮膜の接合強度および銅皮膜自体の強度が他のコーティング法と比べて最も高い。よって、本方法によって製造された超抗菌性部材は、堅牢性、耐久性が最も高い。そのため、銅の再コーティング(メンテナンス)するためのエネルギーを必要としない。

¹³ https://www.jama.or.jp/carbon_neutral_data/

【再生可能エネルギー】

カーボンニュートラルを進めていくためには、使用する電気もカーボンニュートラルな方法で得られなければならない。その方法として再生可能エネルギーがある。これらは、自然環境の中で電気をつくる技術であるので、耐環境技術が必要となる。これについては、溶接技術をベースとしたレーザークラッディング法による耐腐食皮膜形成技術が有効な方法の一つと考える。本方法も前述した理由から銅コーティング同様、カーボンニュートラルな部材製造技術であると言える。

(2)現状

銅に対し、高い吸収率を有する可視光域の波長は 400nm～550nm である。近赤外線レーザーの波長域では吸収率が 10%以下と低いため、当レーザーによる銅の加工は困難である。しかしながら、緑色の波長である 500 nm 帯以下になると急激に光の吸収率は増加し、波長 400 nm 帯では吸収率が 60%に達する¹⁴。波長 400 nm 帯のレーザーを使用することで、銅の加工が容易に行えることになる。そこで、NEDO プロジェクト「高輝度・高効率次世代レーザー技術開発(2016 年度～2020 年度)」(以下 NEDO レーザーPJ と略す)では、青色半導体レーザーの高輝度化・高出力化および加工技術開発を行ってきた。

(2)-1. 青色半導体レーザー素子

従来ピックアップ用などの小出力光源として用いられてきた青色半導体レーザー素子の性能向上は目覚しく、最近では 1 素子あたり 5 W 以上の出力が市販品で得られるようになってきた。1 素子あたりから得られる光出力および電気光変換効率は、2006 年には発振波長が 455 nm で連続発振時の光出力は 0.5 W、電気光変換効率が 20 %であった青色半導体レーザー素子が、2017 年には、光出力が 4.7 W、電気光変換効率が 39 %となった。さらに 2020 年には光出力および効率がそれぞれ 5.67 W および 48.1 %に達し、飛躍的に向上した。

(2)-2. 高輝度・高出力青色半導体レーザーの開発

複数の青色半導体レーザー素子からの出力を独自のビームコンバイニング技術で光ファイバに結合し、高輝度と高出力を両立させた青色半導体レーザーが開発された。2016 年度には空間多重および偏光多重方式を用いた独自のコンバイニング技術を用いて、ファイバコア径 100 μm、出力 100W の青色半導体レーザーを開発した。一般に、金属表面を十分に溶融させるには $1.0 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ 以上の輝度が必要とされる。多数の青色半導体レーザー素子からの発熱は専用水冷システムを用いて放熱し、さらに光ファイバ入射側に QBH コネクタを採用し、最も光耐性が要求される光ファイバ入射端面の輝度を緩和することで、コア径 100 μm の光ファイバにおいて、これまでの青色半導体レーザーでは実現できていなかった世界最高クラスの高出力(100 W)かつ高輝度($1.3 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$)を達成した。100 W 高輝度青色半導体レーザーを用いることで従来の青色半導体レーザーでは実現できなかった銅の熱伝導溶接が可能となった。しかしながら、純銅粉末を

¹⁴ レーザー学会, “レーザーハンドブック” 第 2 版 オーム社 pp.830

用いた 3D プリンターにおける純銅の溶融・積層を実現するためにはさらなる高出力化、高輝度化が必要であった。そこで、さらに高出力化・高輝度化を実現するために、2018 年度には出力、輝度ともに従来機の 2 倍となる光ファイバコア径 100 μm の 200W 級青色半導体レーザー光源を開発した。2019 年度は、前年度までの結果を光学設計にフィードバックし、さらに高密度コンバイニング技術を発展させ、光ファイバコア径 200 μm の 500W 級青色半導体レーザー光源を開発した。そして高密度コンバイニング技術によって 3 台の 500W 級青色半導体レーザー光源の光ファイバ出力を一本の光ファイバに再結合するコンバイナーの設計を行い、光ファイバー本当当たりの出力 1.5kW の高輝度青色半導体レーザー光源の開発に成功した。

(2)-3. 500W 青色半導体レーザー 3 台搭載したマルチビーム溶接装置の開発

電気自動車用部品など銅の厚板溶接を実現するために出力 500W の青色半導体レーザーを 3 台用いたマルチビーム加工ヘッドを開発し、500W 青色半導体レーザーを加工点で 3 ビーム重畳し、重畳位置で計測した最高出力は 1.5kW となるマルチビーム溶接装置の開発を行った。3 台の青色半導体レーザーそれぞれを 1 点に集光したビーム径は 300 μm となった。本加工ヘッドを用いてビードオン溶接を行ったところ、出力 1,000W において 1mm 厚の銅板を貫通溶接させることができた。銅板溶接が可能になることで自動車の部品や IC 部品、モーター、コイル等の材料など様々な分野での利用が可能になると考えられる。

(2)-4. 1.5 kW 青色半導体レーザーを用いた銅板の貫通溶接

電気自動車で用いられるリチウムイオン電池の銅電極やモーターの巻線溶接に要求される厚さ 1mm 級の銅板に対し、1.5kW 青色半導体レーザーの集光実験を行ったところ、貫通溶接可能であることが分かった

(3)課題

NEDO レーザーPJ では、光ファイバから出力される青色半導体レーザーを開発してきた。出力 100W、コア径 100 μm 、NA0.2 の青色半導体レーザー開発からスタートし、最終的には、出力 1.5kW の青色半導体レーザーを完成させた。しかしながら、1.5kW の青色半導体レーザーの光ファイバのコア径は 400 μm で NA は 0.2 である。クラッディング、焼き入れ、薄板の溶接等には、十分な性能であるが、電気自動車のモーターコイルの溶接に必要なガルバノミラー使ったリモート溶接等には、不十分な性能である。また、ガルバノミラーを使用する Selective Laser Melting 式の 3D プリンター用レーザーとしても不十分な性能である。青色半導体レーザーについて、ビーム品質等の性能向上のための技術開発が必要である。

上述したように、クラッディング、焼き入れ、薄板の溶接等に対して上述した青色半導体レーザーは、十分な性能を示している。しかしながら、クラッディング、焼き入れ、薄板の溶接等の加工の高効率化を実現するために必要なレーザービームプロファイル制御による入熱制御技術については、今後、研究開発を進めるべき課題である。

(4)2050 年に向けたスケジュール

(4)-1. 2030 年に向けたシナリオ

電気自動車の普及加速が予想され、それに伴ってカーボンニュートラル、省エネルギーのためのモーター、バッテリーの小型高性能化、パワーデバイスの高機能化・高性能化のための研究開発も急務となっている。

モーターについては、コイルを構成する銅角線のレーザー溶接技術の高度化が必須である。上述したように、現在の青色半導体レーザーのビーム品質は、不十分であるので、青色半導体レーザーと近赤外線ファイバレーザーを組み合わせたハイブリッドレーザーシステムを構築し、銅角線のレーザー溶接技術開発を進める。

NEDO レーザーPJ では、出力 1.5kW の近赤外線レーザーと 200W 青色半導体レーザーを組み合わせたもの 2 組を使用し、ダイクロイックミラーを用いて同軸に重畳させた。また平凸球面レンズを用いて加工点に集光した(集光スポット径は、1.5kW 近赤外線レーザー:60 μ m, 200W 青色半導体レーザー:200 μ m)。本システムを適用することで、2mm \times 3.5mm \times 20mm の平角銅線のヘアピン溶接が照射時間 0.15 s でできた。本システムを適用することで、電気自動車用モーターコイル製造に必要な純銅角線の高速溶接が可能であることを示した。

本ハイブリッドレーザーシステムによるモーターコイルの銅角線溶接技術開発を進めていくべきであるが、同時に青色半導体レーザーのビーム品質向上のための研究開発も進めるべきである。

(4)-2. 2050 年に向けたシナリオ

電気自動車の省エネルギー技術開発を推進する。このために必要な高品質青色半導体レーザー開発を先行して進める。電気使用量を抑える方法として次世代モビリティ(自動走行システム下で動く電気自動車で、マイカーではなくシェアカー)を示した。次世代モビリティ内では、感染リスクがあるので、殺菌・ウイルス不活化機能を有する公衆衛生環境の構築を進める。青色半導体レーザーコーティングにより銅コーティングを施された部材は、当公衆衛生環境構築に有用な部材と言える。カーボンニュートラルを実現するためには、電気も CO₂ を出さない発電システムによって得ることが求められるので、再生エネルギーによる発電を推進する。これは、洋上風力発電等の自然環境下での発電システムになるので、耐環境技術が必要となる。これについては、レーザークラディング法による耐腐食皮膜形成技術開発を進める。この際、微生物腐食についても耐性のある皮膜形成が望まれる。

(5)実現に向けた提言

本領域において、上述した「電気自動車の省エネルギー」、「シェアリングによる省エネルギー」および「再生可能エネルギー」の研究開発を提言する。これらの研究開発を推進する体制や人材育成も必要である。そのために以下に示した産学共創コンソーシアムとレーザー学会技術専門委員会を活用することを提言する。「電気自動車の省エネルギー」については、産学共創コンソーシアム「青色半導体レーザー接合加工研究会」で取り上げ、「シェアリングによる省エネルギー」および

表 2-5-1 レーザー加工の産業応用におけるカーボンニュートラル実現への工程表

	2021年	2022年	2023年	2024年	2025年	～2030年	～2040年	～2050年
CO ₂ 削減 負の排出 目標						60万t 1,200万t		480万t 9,600万t
コスト 目標						導入コスト: 1億円/台 1,000億円(国内) 20,000億円(世界)		導入コスト: 0.5円/台 4,000億円(国内) 80,000億円(世界)
電気自動車用モーター純銅コイル溶接 <small>溶接時の消費電力を30%以上削減し、低炭素社会に貢献</small>								
プロセス	青色半導体レーザー アシストファイバー レーザー溶接の開発		実証		導入・拡大		自立商用	
主要 パーツ	新設計純銅コイルによる軽量化により消費 電力を30%以上削減、低炭素社会に貢献		高品質青色半導体レーザーの開発		青色半導体レーザーアシスト ファイバーレーザー溶接開発		実証 導入・拡大 自立商用	
細菌・ウイルスリスク低減のための公衆衛生環境実現のための銅コーティング <small>コーティングにより銅の使用量を98%以上削減し、低炭素社会に貢献</small>								
プロセス	青色半導体レーザーによる 純銅・銅合金コーティングの実証		導入・拡大		自立商用			
銅コーテ ィング 部材	青色半導体レーザーの空間強度プロファイル制御技術の開発		実証		導入・拡大		自立商用	
<small>抗菌・ウイルス不活化機能性銅コーティング部材により、アルコールや消毒液の使用量を90%以上削減し、低炭素社会に貢献</small>								
洋上風力発電のための耐環境コーティング(耐腐食皮膜形成) <small>コーティング施工時の消費電力を50%以上削減し、低炭素社会に貢献</small>								
プロセス	高出力レーザーによる 耐環境コーティングの実証		実証		導入・拡大		自立商用	
主要 部材	高出力レーザーの空間強度プロファイル制御 技術の開発		耐環境皮膜形成用の粉末開発		実証		導入・拡大 自立商用	
<small>耐環境コーティング時の消費電力を90%以上削減し、低炭素社会に貢献</small>								

「再生可能エネルギー」については、レーザー学会「社会実装に向けた次世代レーザー表層加工技術」技術専門委員会の分科会「公衆衛生に着目した、安心・安全なまちづくり」で進めていきたい。

1. 産学共創コンソーシアム「青色半導体レーザー接合加工研究会」
幹事会員:大阪大学, 島津製作所, 古河電気工業, 日亜化学工業
一般会員: 21社(2021年10月24日現在)
2. レーザー学会「社会実装に向けた次世代レーザー表層加工技術」技術専門委員会
分科会:公衆衛生に着目した、安心・安全なまちづくり

2-6. 光無線給電

(1)カーボンニュートラルへの貢献

光無線給電は、図 2-6-1 のようにレーザー光源から出射した光ビームを受光デバイス(太陽電池)に照射して電力を供給する新しい無線給電方式である。既存の無線給電方式に比べて小型で長距離無線給電が可能、また、電磁ノイズも発生しないため広範囲の応用が期待される。



図 2-6-1 光無線給電

この光無線給電は各機器とコンセントの間の配線を無線化する。配線の給電効率は実質 100% であるが、現状の光無線給電の給電効率は低いため、配線から光無線給電への単純な転換では、電力利用量に基づく直接的なカーボンニュートラルへの貢献は期待できない。しかし、光無線給電の導入は、図 2-6-2 のように多様な形でカーボンニュートラルへの貢献が期待できる。



CNL: Carbon Neutral

図 2-6-2 光無線給電のカーボンニュートラルへの貢献

光無線給電はその高い利便性から、給電効率が低くても配線から光無線給電に転換する機器は増加すると想定される。この状況において、光無線給電を現状の給電効率のまま利用する場合に比べて、給電効率の改善によりカーボンニュートラルへの直接的な貢献が期待できる。

また準直接的には、無線給電は給電に関わるモノの削減による省エネ、脱炭素、省資源に有効となる。配線の削減のほか配線カバー、OA フロアなどの配線敷設設備が不要になる。さらに、無線給電は充電の手間を抑制することで充電機会が増加するため、結果的にバッテリー搭載量の削減が可能となる。バッテリーのライフサイクルのエネルギー消費を考えると、バッテリーの削減は大きな効果がある。さらにバッテリー搭載量の削減による機器の軽量化からエネルギー効率改善も期待できる。また、無線給電の活用はコネクタ劣化に伴う機器寿命も改善する。光無線給電の他の無線給電との比較では、電磁ノイズ用のシールド実装負荷が抑制されるほかに、光の遠隔性によりインフラとして必要な給電装置数を大きく削減できることも有効となる。

間接的には、無線給電は充電作業や充電時間を削減するため、社会活動を効率化する。機器の充電に伴う不稼働時間の削減も効率化に有効である。また、膨大なセンサ情報でシステムを効率化する IoT のコンセプトでは端末の給電が課題だが、光無線給電を適用した高度な IoT を利用して効率的社会の構築に貢献できる。このほか、光無線給電により今まで給電が困難なモノや場所への給電が可能になり、新しい機器や新しいサービスなど社会の仕組みを根底から更新することでカーボンニュートラルに貢献することも期待できる。これには各種移動体への移動中給電という転換を含む。

なお、安定な再生可能エネルギーの発電が期待される宇宙太陽光発電において、地上への光無線送電が検討されている。この実現により CO₂ 排出量の大きな発電方式を抑制することが可能となる。

(2)カーボンニュートラルへの貢献量

高い利便性から光無線給電の導入や利用機器の増加が進む。この状況では、直接的な貢献として、現状で想定される光無線給電の給電効率 16%を維持しながら利用の拡大が進む場合に比べて、給電効率が 2030 年に 25%、2050 年に 36%に改善されることで、国内の CO₂ 排出量は 2030 年に年間 135 万 t、2050 年に年間 625 万 t の削減が見込まれる。世界の CO₂ 排出量は 2030 年に年間 4,050 万 t、2050 年に年間 1 億 8,750 万 t の削減が見込まれる。

準直接的なモノの削減としては、配線とバッテリーの削減の効果を推定する。

配線削減は、家電用と IoT 用を中心に現状の有線利用が継続される場合に比べて、光無線給電に転換されることで、国内の CO₂ 排出量は 2030 年に年間 5.4 万 t、2050 年に年間 14.4 万 t の削減が見込まれる。世界の CO₂ 排出量は 2030 年に年間 107 万 t、2050 年に年間 287 万 t の削減が見込まれる。

バッテリー削減は、自動車等の移動体において多量のバッテリーを搭載する現状の方式が継続される場合に比べて、光無線給電による走行中給電に転換されることでバッテリーが削減され、国内の CO₂ 排出量は 2030 年に年間 693 万 t、2050 年に年間 2,080 万 t の削減が見込まれる。世界の CO₂ 排出量は 2030 年に年間 1 億 1,100 万 t、2050 年に 3 億 3,300 万 t の削減が見込まれる。

以上の光無線給電の効率改善、配線削減、バッテリー削減を合わせると、国内の CO₂ 排出量は 2030 年に年間 2,050 万 t、2050 年に年間 8,340 万 t の削減が見込まれる。世界の CO₂ 排出量は 2030 年に年間 5 億 1,700 万 t、2050 年に年間 22 億 1,000 万 t の削減が見込まれる。

(3)現状

光無線給電はレーザーや太陽電池が発明されて間もなく 1970 年前後には提案されている。ただしこれまで研究開発は活発といえず、年ごとの発行文献数はカーボンニュートラルや無線給電の 1%程度しかない。また、海外に数社のベンチャー企業はあるが、実用化・製品化は実質まだない。しかし、通信に続く給電の無線化要望に応じて、小型端末や小型移動体への給電の検討、また数 100m の長距離給電の実証などの報告で注目が集まり、最近では文献数も増加し始めている。

光無線給電の想定特性として、給電可能電力は光源出力にほぼ依存する。半導体レーザーは単チップで数W程度、多数チップで数10W～数kW以上が加工用レーザーなどで実用されており、その転用で数100W以上の給電まで期待できる。給電距離はビーム品質に依存するが、1kmで10cm径ほどのビームサイズも可能で、この距離程度までは伝搬損失なく給電可能である。これらの給電量と給電距離から、ほとんどの機器への給電が見込まれ、応用は非常に広い。

一方、省エネに重要な給電効率、レーザー効率と太陽電池効率の積が上限となる。半導体レーザー効率は75%を超えるものが報告され、太陽電池は単色光で効率増加し最大69%ほどが報告されている。他の損失を無視してこれらの積による上限の給電効率は最大50%程度が見込まれる。しかし、現状の一般的な市販デバイスでは両者40%程度のため給電効率は16%程度である。

(4)課題

光無線給電の低い給電効率は重要な課題である。給電効率の改善に伴う光無線給電自身のカーボンニュートラルへの貢献には、半導体レーザーなどの光源の効率改善、受光側の太陽電池の効率改善、またレンズ系や制御系の効率改善も必要である。研究レベルのデバイスで両者70%になれば50%程度、両者80%になれば64%程度までの給電効率が見込まれる。実用向けとして市販デバイスで両者50%になれば25%程度、両者60%になれば36%程度までの給電効率が見込まれる。このような継続的な効率改善が強く求められる。

一方、光無線給電は、光源や太陽電池のほか、ビーム形状制御、ビーム方向走査、給電対象の検知・追跡、給電に関わる通信など多様な技術の統合による給電機構の開発が必要である。これら要素技術は既存といえるため実現性は高いが、給電量や給電距離、また移動条件など多様な光無線給電に適した機能性や特性の実現に向けた研究開発が必要である。

さらに、安全面も課題である。必要電力に応じた高強度光ビームを利用するため、光ビームが人や機器に不要に照射されると障害発生や機器破壊などにつながる。センシングや適切な制御によりビームの不要照射等を確実に避ける高度な安全技術の開拓が必要なことが課題である。

以上のように、要素デバイスの効率改善、各種要素技術の開拓、安全技術の確立が必要である。これらの多くは今ある技術の延長により実現可能であるが、社会実装に向けて、市場要望に応じた経済性の実現と、安全面に関する社会受容および規則の適正化が必須である。

(5)2050年に向けたスケジュール

まず、2030年ごろに向けては光無線給電の基本構成の実用化のために、ある程度限定された領域向けや特性向上の技術開発が進む。これにより2030年ごろには光無線給電が必須となる応用や、比較的低電力量や比較的短距離の応用から実用化が始まる。なお、安全面からも利用環境や応用はある程度制約され、無人環境や人を限定・制限した環境への応用から始まる。

その後、2050年に向けては光無線給電に関わる様々な技術や利用可能特性の進展とともに多様なインフラの整備が進み、さらに適切な規制の整備により無人環境だけでなく一般環境など多様な応用が進む。このころには多くの機器は無線給電を利用しており、その多くが光無線給電を利用してると期待する。結果として、カーボンニュートラルに対して直接的、準直接的、間接的に

大きく貢献することが期待される。

表 2-6-1 光無線給電による CO₂ 削減ロードマップ

	2022年	~2030年	~2050年	
CO ₂ 削減、国内負の排出目標		833万t	2,720万t	
	世界	15,200万t	52,300万t	
コスト目標		送電側10W当たり10千円 受電側10W当たり1千円	送電側100W当たり10千円 受電側100W当たり1千円	
開発、実証、社会実装計画(シナリオ)	給電効率 20%達成	給電効率 50%研究レベル実証 25%実用レベル開発	給電効率 64%研究レベル実証 36%実用レベル開発	給電効率 >70%研究レベル実証 >40%実用レベル開発
	10W-10mの給電機構開発	100W-100mクラスの給電機構開発	1kW-100mクラスの給電機構開発	>10kW->1kmクラスの給電機構開発
	安全技術基礎構成開発	100W-100mクラスの安全技術確立	1kW-100mクラスの安全技術確立	>10kW->1kmクラスの安全技術確立
		100W-100mクラスの無人環境社会実装	1kW-100mクラスの無人環境社会実装	>10kW->1kmクラスの無人環境社会実装
		100W-100mクラスの一般環境社会実装	1kW-100mクラスの一般環境社会実装	>10kW->1kmクラスの一般環境社会実装

(6) 実現に向けた提言

光無線給電の社会実装とそれによるカーボンニュートラルへの大きな貢献には、単に配線の代替の役割だけでなく、社会の仕組みの根底に近い基盤からの再構築も必要である。その実現と発展に向けて、以下を本領域に関わる提言とする。

【体制構築】 光無線給電の技術面、事業面、制度面のビジョン策定の産学官連携体制構築

多様な機能要素からシステム構築、また広域インフラ、多様な応用範囲に関わる技術領域であり、個別の技術論に留まることなく技術面、事業面、制度面などから産学官が連携して中期・長期ビジョンを策定する必要がある。なお、安全面も社会実装に必須な視点となる。従来と異なるレーザーの利用方法、利用範囲のため、既存の安全の枠組みでは十分な安全が担保されない可能性がある。一方で、先進技術に基づく安全技術の確立を考慮して、規制などは適宜更新することも必要であり、これらは産学官連携の取り組みに基づく適時適切な対応が重要である。

【研究開発】 光無線給電関連の短・中期的基盤技術立上げと長期的高度化の研究開発

光無線給電の技術領域、関連領域は多岐にわたる一方で、世界的な研究開発も広がり始めたばかりである。このため 2030 年ごろまでの短・中期的展開を優位にするため、広域また多面的な

基盤的技術に関する研究開発の迅速な活性化が重要であり、インセンティブとなる本分野への研究費配分の充実が必要である。また、独創的アイデアなどに基づく機動的な研究開発の事業化にはスタートアップの創出支援も重要である。

以上のような短・中期的な取り組みの上で、2050年ごろまでの長期的にはより広範囲の応用が期待されるため、多面的に充実した研究開発投資が求められる。また、この長期的な視点の研究開発に対しても短・中期的時期から加速することも極めて重要である。

【人材育成】 光無線給電の全体デザインと機能要素の専門家育成

光無線給電は関連・影響領域が広いため、要素技術からインフラ構築などまでを把握しつつ、社会の要望や動向を適切に想定して全体をデザイン可能な人材が必要である。一方で、各機能要素などを着実に進展させる各領域の専門家としての研究者の育成も必要である。これらの人材を育成するための投資も非常に重要である。

【CO₂削減量の見積もり方法に関する補足説明】

1. 光無線給電の給電効率改善

現在の市販デバイスを利用した光無線給電に対して、各デバイス効率を改善した光無線給電による電力削減に伴うCO₂排出量削減を見積もる。

光無線給電の効率は、光源の電力効率、太陽電池の電力効率のほか、レンズや無線伝搬中の損失、また、光ビームの受光比率などが影響するが、その上限として光源と太陽電池の電力効率の積を考える。現在の市販の光源(半導体レーザー)と太陽電池(単色光照射)の電力効率を各40%と仮定すると、上限給電効率は16%となる。

ここで国内の家庭部門の年間エネルギー消費量450兆kcalの46%が電力消費と見積もられるため、240PWh¹⁵。必要な電力消費量はこの後も変化がないと考える。このうち比較的低電力機器から光無線給電化するとして、その電力の比率を2030年に1%、2050年に3%と想定する。この電力すべてを配線(効率100%)から光無線給電化(効率16%)すると、光無線給電の導入に関わり必要となる電力は100%/16%=6倍必要になる。ただし、光無線給電の利用による電力利用状況の効率化などを前提にその半分の増加(3倍)を想定する。この条件で光無線給電の効率が2030年に25%、2050年に36%に改善すると仮定する。電力量1kWhあたりのCO₂排出量は、環境省のデータ¹⁶をもとに、0.5(kg-CO₂/kWh)を仮定する。また、世界の電力消費量は、日本の30倍と見積もる¹⁷。

以上より、光無線給電の給電効率改善に伴うCO₂排出量は、国内では、2030年に年間135万t、2050年に年間625万tの削減、世界では、2030年に年間4,050万t、2050年に年間18,750万tの削減となる。

2. 配線削減:家電用、IoT用の配線

2020年の日本国内の家電小売市場規模は7兆2800億円と見積もられている¹⁸。家電はこの市場規模が今後も継続すると考える。機器の平均単価を3万円、1台に3mの給電用配線を利用していると仮定する。販売機器数のうち、2030年に10%、2050年に30%が光無線給電を利用すると想定する。

一方、2020年の日本国内のIoT市場は6兆3125億円と見積もられている¹⁹。IoT市場は年率10%程度の成長が見込まれるため、2030年では16兆円となる。その後、2050年までは成長が鈍化し年率5%の成長と仮定する。機器の平均単価を1万円、バッテリー駆動が大半だが機器数のうち1/10が有線方式と仮定し、1台に5mの給電用配線を利用すると仮定する。

家電用とIoT用のメタル配線として太さ1mm角銅線を仮定し、メタル配線のCO₂排出量を0.7t-CO₂/tとする²⁰。これらの家電用、IoT用の給電用配線が光無線給電に置き換わると、国内では、2030年で年間0.56万t、2050年で年間1.5万tのCO₂排出量削減となる。

さらに、配線被覆の削減が期待できる。配線の被覆重量を配線と同じと仮定する。ここで配線被覆のCO₂排出

¹⁵ <https://www.fepc.or.jp/smp/enterprise/jigyuu/japan/index.html>

¹⁶ https://ghg-santeikohyo.env.go.jp/files/calcr03_coefficient_rev.pdf

¹⁷ https://www.kdh.or.jp/safe/energy_saving/saving_knowledge/world.html

¹⁸ https://www.nikkei.com/article/DGXLRSP605462_Z10C21A2000000/

¹⁹ <https://dcross.impress.co.jp/docs/news/002325.html>

²⁰ https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/sangyo_gijutsu/chikyu_kankyo/kagaku_wg/pdf/2016_08_01.pdf

量は、レジ袋 10g の製造および焼却に必要な CO₂ 排出量が 61g である²¹ ことを利用して、配線被覆重量の 6 倍の CO₂ 排出を想定する。上記の家電用、IoT 用の給電用配線が光無線給電に置き換わると、配線被覆に関して、国内では、2030 年で年間 4.8 万 t、2050 年で年間 12.9 万 t の CO₂ 排出量削減となる。

国内市場に対する世界市場の比率は、国内家電小売市場規模からの台数見積もり 2.4 億台に対して、26 億台 (2018 年) の市場規模²²、また、年率 7.8% の拡大²³、を考慮して国内の 20 倍を仮定する。IoT も同 20 倍の市場および台数を仮定する。

結果として、配線とその被覆の削減に伴う CO₂ 排出量は、国内では、2030 年で年間 5.4 万 t、2050 年で年間 14.4 万 t の削減、世界では、2030 年で年間 107 万 t、2050 年で年間 287 万 t の削減となる。

3. バッテリー削減

電気自動車 1 台分のバッテリー製造に伴う CO₂ 排出量は 8t-20t が想定されている²⁴。ここではその中央となる 14t と仮定する。

2020 年の日本国内の新車販売台数は 500 万台である²⁵。なお、2020 年の世界の自動車販売台数は 8,000 万台であり、国内台数に対する比率は 16 倍である。今後の自動車販売台数の変化はないと仮定する。ここでは自動車はすべて電気自動車化され、そのうち光無線給電による走行中給電化利用はある程度限定された用途になると仮定し、その比率として、2030 年に 10%、2050 年に 30% を仮定する。走行中給電化によりバッテリー搭載量は 90% 削減 (搭載量 10%) を仮定する。

自動車以外のバッテリーについては、リチウムイオン電池の 2019 年の販売金額が自動車用の半分程度である²⁶。2019 年の電気自動車販売台数はまだ少ないことを考慮して、2030 年、2050 年の自動車以外のバッテリーの削減による CO₂ 排出量削減の効果は自動車用の 10% と仮定する。

以上より、バッテリー製造に伴う CO₂ 排出量は、国内では、2030 年に年間 693 万 t、2050 年に年間 2,079 万 t の削減、世界では、2030 年に年間 11,088 万 t、2050 年に 33,264 万 t の削減となる。

以上の光無線給電の効率改善、配線削減、バッテリー削減を合わせた CO₂ 排出量は、国内では、2030 年に年間 833 万 t、2050 年に年間 2,720 万 t の削減、世界では、2030 年に年間 15,200 万 t、2050 年に年間 52,300 万 t の削減となる。なお、配線に比べて低給電効率の光無線給電の利用拡大により、電力利用量は現時点より増加する可能性がある。これに伴う CO₂ 排出量の増加は本見積りには含まれていない。ただし、光無線給電の利便性からその利用が広がることに対しては、給電効率の改善による CO₂ 排出量の削減を考慮した。また、配線やバッテリーなどは、その活用度が低い場合は、電力利用量よりもこれらモノの製造と廃棄に伴う CO₂ 排出量が多くなるケースが見込まれる。つまり機器の使用状況により実効的な CO₂ 排出量が大きく異なることが想定され、今後精査が必要である。

2-7. LD スマート照明

(1)カーボンニュートラルへの貢献

家庭、オフィス、工場などの排出削減として、照明、ディスプレイの占める役割は大きい。その削減取り組みとして、家を対象とした ZEH (Net Zero Energy House) およびビルを対象とした ZEB (Net Zero Energy Building) がある。極力省エネをしておいて、必要な電力は太陽光などの再生可能エネルギーを用いることでエネルギー消費量を正味 (ネット) でゼロにするという取り組みである。更に、この考えを進めた LCCM (Life Cycle Carbon Minus) 住宅という構想があり、これは再生可能エネルギーの創出により、建設時の CO₂ 排出量も含めて、長い住宅寿命の中で CO₂ 収支をマイナスにするという考えである。

²¹ <https://prtimes.jp/main/html/rd/p/000000010.000078856.html>

²² <https://www.enplanet.com/Ja/Market/Data/y233.html>

²³ <https://prtimes.jp/main/html/rd/p/000000971.000067400.html>

²⁴ <https://jp.techcrunch.com/2021/09/07/2021-08-22-the-tough-calculus-of-emissions-and-the-future-of-evs/>

²⁵ <https://www.aba-j.or.jp/info/industry/14288/>

²⁶ <https://newswitch.jp/p/22924>

一方、レーザー光源の高出力化、高効率化、発振波長域の拡大、超短パルス発生によりレーザーの応用市場が拡大するとともに新たな応用が創出されている。レーザーを用いることで照明、ディスプレイの電力量を大幅に削減することが期待されている。レーザーの特徴を、特に電力低減にどのように活かすかを中心に以下説明する。表 2-7-1 にレーザーの応用時の特徴を LED と比較して示す。レーザーは基本的に点光源であり小型軽量性を有し、指向性があるため必要なところにだけ必要な光を届けることができる。レーザーは、発光面積が小さいため投写効率を高めやすく、また光源そのものが高効率・高輝度でもあることから、装置の小型化だけでなく低消費電力化も可能となる。さらに後述する光走査が可能、また液晶デバイスと組み合わせる効果を生揮する偏光性を利用できることで更なる省エネに貢献できる。

表 2-7-1 レーザーの応用時の特徴(LED と比較)

		LED	レーザー
高利用効率	指向性	△	○
	走査	×	○
	偏光	×	○
超小型化		△	○
色範囲		△	○
高輝度化		×	○
配置、デザイン性 (ファイバ利用、引回し)		△	○

(2)現状

レーザーディスプレイ、照明において多数の商品が世に出ている。特に、この 5 年で大きく市場を拡大したのがレーザープロジェクタなどのレーザーディスプレイ分野である。これにより、可視光領域における半導体レーザー(LD)がコスト低減したことで、その波及効果として様々なレーザー照明応用の提案、市場導入が始まっている。

(3)課題

LED 照明も効率は飽和傾向である。同様に、青色 LD の効率は現在約 50%まで向上したが、これを 80%にしたからといって 1.6 倍の改善に過ぎない。そのため新たな方策として研究されているのが部分投射照明であり、自動車用ヘッドランプでは ADB (Adaptive Driving Beam)として実用化が検討されている。基本は、走査方式が利用できるレーザーならではの超省エネ策としてオフィスや一般家庭への導入が期待される。LED 照明は部屋全体を照射するが、レーザーの走査方式(図 2-7-1:IoT 照明ステーション)は必要な部分を見出し、その部分のみ照射する方式を究極まで

高めたものである。これは従来提案されていたタスク・アンビエント照明の発展形であり、エリア効果で約 10 倍以上、つまり電力を 1/10 以下にすることが可能となる。

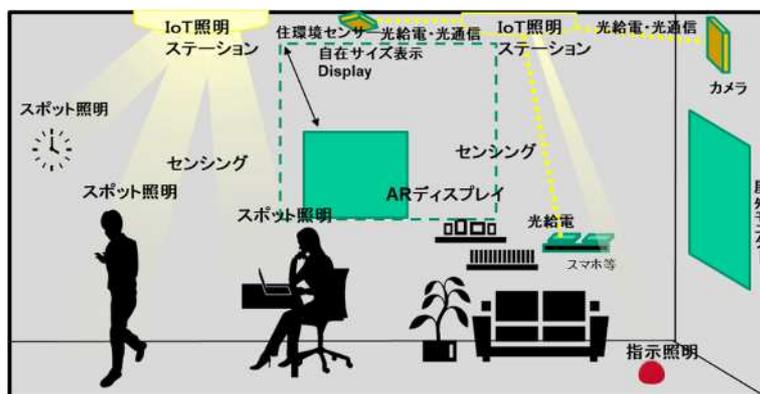


図 2-7-1 レーザー走査をベースとした IoT 照明ステーション

(4)2050 年に向けたスケジュール

レーザー応用機器の消費電力は、レーザー光源の電気-光変換効率と機器での光利用効率の積となる。青色 LD の電気-光変換効率は現在 10 年前の約 2 倍となり、48%が得られている。今後の推移予想は、可視光半導体レーザー応用コンソーシアムの半導体レーザー専門委員会によりロードマップ化されている。図 2-7-2 に可視光半導体レーザーの効率ロードマップ(端面発光型)を示す。第 1 段階として 60%、第 2 段階として 80%、そして市場の拡大での投資状況によるが 2050 年に向けて 100%に向けた改善が想定されている。効率がほぼ 100%になったとしても現在の半分の消費電力となるだけであるが、熱の発生が減少することで、機器の冷却や放熱に関する電力についても削減できる。省エネ性という観点で、NEDO において省エネルギーレーザー応用技術委員会が設置され、議論を行い、「省エネルギー効果が期待される半導体レーザー応用技術に関する

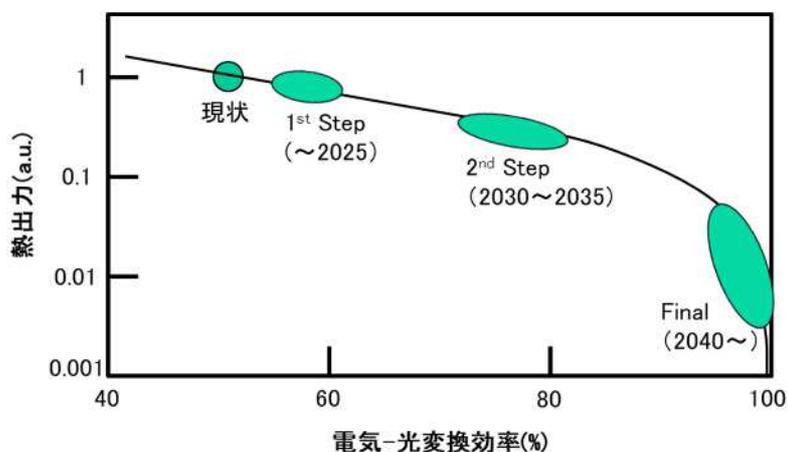


図 2-7-2 可視光半導体レーザーの効率ロードマップ

る」検討報告書に削減効果をまとめている。想定された応用に対し、レーザーの導入により削減できる原油換算削減量は2030年に5,300万kL(世界/年間)に達すると予想されている。これはCO₂換算では約8,000万tと、日本の年間一般家庭でのCO₂排出量に相当する大きな削減量となる。

2050年までの光源開発とレーザー商品ロードマップを図2-7-3に示す。情報表示照明のような、照明とディスプレイの融合は、今後センシング技術も含め大きく広がることが期待される。既に2025年大阪万博に向けて、融合を実証するアトラクションなどが検討されている。レーザー照明・ディスプレイの今後は、機能融合と省エネ化の進展などが中心であり、新たな応用展開が楽しみである。IoT照明ステーションは、その特徴を活かして付加価値が大きく出る応用からの導入が考えられる。

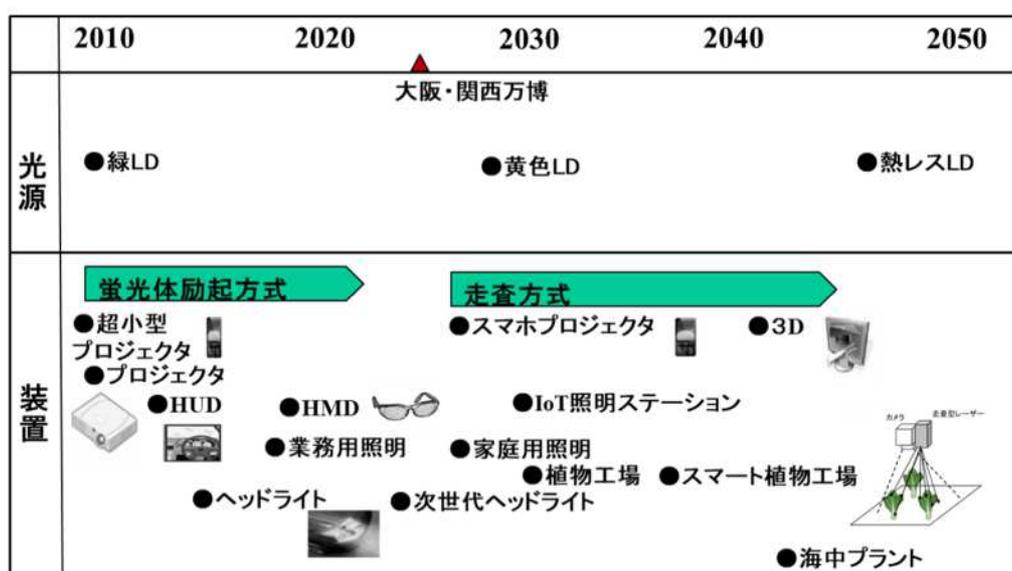


図 2-7-3 光源開発とレーザー商品ロードマップ

業務用の情報表示レーザー照明の家庭用展開として、シーリングライトへのプロジェクション機能付加などが考えられているが、IoT照明ステーション導入の手がかりとなる。エリア効果で電力を1/10以下に低減を目指すことが可能である。その先には他の大きな産業として、第1次産業応用(植物工場、海中プラント)への導入などがあり、その発展形として海中都市、宇宙基地での可視光レーザー利用も考えられる。

検討したCO₂削減量および装置のコストについて表2-7-2に示す。ここでは最も効果が大きい照明について具体的な検討を行った。2018年度の日本の総CO₂排出量の1,247億tを基準とし、照明分野に係る家庭、オフィスなどの業務、工場などの産業を含めた総CO₂排出量は4650万t/年であった。一方、装置の目標価格は、8畳用のシーリング(光束:4,000lm、電力:40W、効率:100lm/W)を用いた。可視光半導体レーザーの電気-光変換効率(ロードマップは図2-7-2を参考)、発光部の構成(青色LDによる蛍光体発光の変換型、青、緑、赤、黄の各色による混色型の2種類)によって、照明装置効率がCO₂排出量削減に寄与すると考えた。図2-7-2に示す効

率ロードマップは第1段階の電気-光変換効率が最大60%(2030年),第2段階80%(2040年),第3段階100%(2050年)と想定した。2022年の開始年ではまだ青色LEDと蛍光体の構成で,発光効率は195lm/W,照明装置の効率(η)を140lm/W,占有20%とするとCO₂削減量は国内で

表2-7-2. 照明分野(家庭,業務,産業)におけるLD照明によるCO₂削減ロードマップ

	2022年 LED	~2030年 蛍光体走査		~2050年 RGBY走査	
CO ₂ 削減、国内 負の排出 目標	266万t (0.17%)	800lm 180lm/W 市場占有 30%	1,240万t	570lm 200lm/W 市場占有 50%	400lm 290lm/W 市場占有 75%
	0.71億t	効率140lm/W 市場占有 20%	3.3億t	2,160万t 5.8億t	3,370万t (2.7%) 9.1億t
コスト目標	参考 6,400円 (LED照明)	9,500円 (PC-LD照明)		5,900円 (CM-LD照明)	5,700円 (CM-LD照明)
開発、実証、 社会実装 計画(シナリオ)	青色LED +蛍光体 (PC)方式 最適化 発光変換効率 >195lm/W	高効率青色LEDを使った 発光部高効率化実証 LD-発光変換効率>230lm/W		超小型モジュール技術開発 と実装促進	
		高効率青色LEDをエリア効果実証 AIの進化促進		商用的拡大	
		窒素系黄色領域半導体 の結晶成長技術開発			
		黄色領域LD開発と実装 波長:570~590nm、 電気-光変換効率:20%		黄色領域LDの改善 電気-光変換効率:50%	実装促進 電気-光変換効率:80%
		RGBY系CM方式原理実証		RGBY系CM方式開発、実装	RGBY系CM方式商用的拡大 LD-発光変換効率 >290lm/W
		センサーの高度化			

※ RGBY:Red-Green-Blue-Yellow, PC-LD:phosphor-converted-LD,青色LD励起の蛍光体発光の変換型、CM-LD:color-mixed-LD,RGBYの各色LDによる混色型

266万t/年となる。第1段階の2030年における青色レーザーの電気-光変換効率>60%で,緑,赤色レーザーの効率は低く,黄色レーザーは開発当初と想定した。高効率青色LDと蛍光体の構成で $\eta > 180\text{lm/W}$,局所スポット照明によるエリア省エネ比率が対LEDの1/5で,CO₂削減量を国内1240万t,市場価格9,400円となる。

2040年には黄色半導体レーザーの登場で青,緑,赤,黄の4原色となり,各色レーザーの電気-素子発光効率が60~80%となり, $\eta > 200\text{lm/W}$,エリア省エネ比率が対LEDの1/7となり,CO₂削減量が国内2160万tに達する。さらに,カーボンニュートラルの達成年の2050年では,低効率であった黄色半導体レーザーの改善がなされて効率80%となり,全体の効率も $\eta > 290\text{lm/W}$ となり,高効率高演色レーザー照明が可能となって,エリア省エネ比率が対LEDの1/10に達し,CO₂削減量は3370万tまで削減できる。

(5)実現に向けた提言

カーボンニュートラルへの貢献として,照明およびディスプレイの電力削減を中心に,産学官連携体制を構築し以下取り組むことを提言とする。

① 可視光半導体レーザーの効率向上のためには、大きな市場が存在することが研究開発のモチベーションとなる。一般照明、HMD、HUDなどの市場拡大が鍵となる。また新たな市場創出の弊害となるレーザー安全性の問題など、センサと連動での人間検知システムの開発と法整備が必要であり、早期実現を目指す。

② レーザー走査によるIoT照明ステーションは、具体的にはレーザーによる検出系と組み合わせ、必要な光と情報を必要な場所に照射するという考え方である。この方式の導入により2050年国内CO₂削減量は3370万tが可能となる。検出系としてのLiDAR(Light Detection and Ranging)は通常赤外レーザーが用いられるが、レーザー照明(ディスプレイ)との兼用を考え、可視光半導体レーザーで検出と照明を行う必要がある。この際走査に特化したレーザー技術開発、AIを用いた空間情報の分析・判断の進化が必要である。

2-8. 自動車へのレーザー応用

(1)カーボンニュートラルへの貢献

自動車における自動運転化の動きが活発化し、安全性確保を含む様々な形でレーザー応用に関する研究開発が盛んである。従来は自動車製造に使うレーザー加工だけであったが図2-8-1に示すように、車載を中心としたレーザー応用が検討されており、ヘッドライト、ヘッドアップディスプレイ、LiDARなどは実用化され、光通信関係、エンジン点火などの研究開発が盛んである。また光給電についても議論がなされている。活発化している理由としては、レーザーの優位性が認識されたこと、および高性能化、小型化、低コスト化が進み敷居が高いと言われている自動車への導入条件が整ったためである。

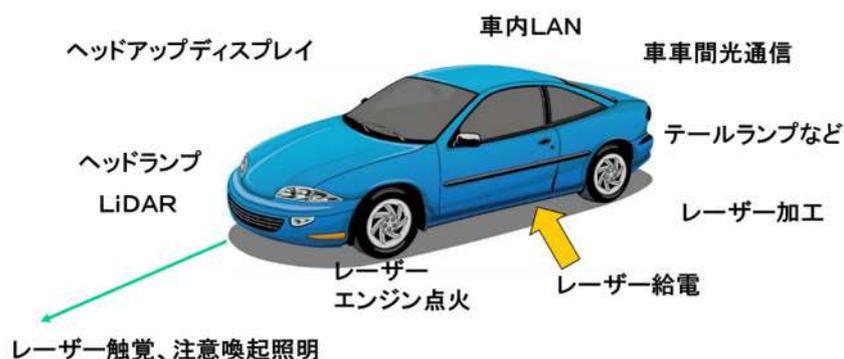


図 2-8-1 自動車へのレーザー応用

カーボンニュートラルを考えると、自動車においてCO₂削減効果が一番大きいものはエンジン部分であり、電気自動車、水素エンジンが実用化されその進化は激しい。しかし現在の火力発電を用いた電力、また石炭を用いた水素生成は本末転倒であり、CO₂を排出しないクリーンなレーザ

一核融合による電力供給、水素生成が期待されている。これについては他の節で詳しく扱われるのでここでは触れない。また、自動車製造工程、特に EV(Electric Vehicle)・蓄電池のレーザー加工についても同様に他の節で扱う。様々なレーザー自動車応用の中で、ここでは電力使用量が大きいレーザーを用いた照明、特にヘッドランプの省エネ化を中心に議論する。また新たな可能性についても提示する。

(2)現状

自動車ヘッドランプは省エネ性および寿命の点でキセノンランプから LED への置き換えが進んでいる。一部欧州メーカーでレーザーヘッドランプが実用搭載されているが、国産自動車にはまだ搭載されていない。これは欧州には速度制限がないアウトバーンなどの高速走行で必要な遠方投射に対しレーザーの優位性が明らかであるためである。自動車応用としては、レーザーは装置の小型化だけでなく低消費電力化が可能であり、ヘッドライト応用が広がりつつある。現在実用化されているものは青色レーザーで黄色蛍光体を励起し白色を出す方式であり、高輝度発光させ光を遠方に運び明るく照射することが現状での優位性である。

(3)課題

レーザーの効率が向上しても、効率がほぼ飽和傾向の LED と大差はなく、何割かの電力削減を実現するに過ぎない。大幅な省エネ化を図るのは、新たなヘッドランプの構想である ADB (Adaptive Driving Beam)の実現と導入を図る必要がある。ADB を用いたヘッドランプは部分投射や位置可変が可能となり、対向車や歩行者の顔には照射せず必要な部分のみ照明光を照射可能である。

また完全自動運転ではヘッドランプが不要になると考えられるが、歩行者や自転車などに注意喚起するための照明が必要となる。この場合の課題は、人間の顔には照射しないような検出システム開発が課題となる。

(4)2050 年に向けたスケジュール

(2030 年に向けたシナリオと 2050 年に向けたシナリオの 2 段階で記載)

表 2-8-1 にレーザーを用いたヘッドランプの進化の方向性を示す。

- ・2030 年に向けて、ヘッドランプにおいて遠方レーザー照明の次の世代では ADB (Adaptive Driving Beam)として部分投射や位置可変のため、走査型や空間変調などのレーザープロジェクト技術が導入される。また、ファイバにより発光部から遠方へ照明光を運ぶことが可能というのはレーザーの大きな特徴であり今後導入が期待されている。低電力化だけでなく超小型であるためデザイン性にも優れている。色および波長を選択的に利用できるという特徴もあり、自動運転時に必要な色強調可能な注意喚起ヘッドランプなどに展開する。
- ・2050 年においては完全自動運転化が実現しており、注意喚起照明への転換が図られていると想定される。車の前方だけでなくレーザーを周囲に照射する注意喚起システムが考えられている。

このシステムは高度センシング技術を用いて、他の自動車、通行人、自転車への注意喚起表示が同時に行うことができる。既に道路上の鉄塔からの注意喚起表示は可能であり、韓国ではレーザーを使ってスマホ見ながら歩く人への緑色レーザーでの注意喚起表示システムが実用化している。

表 2-8-1 レーザーを用いたヘッドランプの進化の方向性

	機能, 特長	技術	時期
第 1 世代	遠方照射	蛍光体励起	2014~
第 2 世代	部分・可変照射 (ADB)	走査, 空間変調 (センシング)	2022~
第 3 世代	超小型/デザイン性	ファイバ伝送	2026~
第 4 世代	省エネ/色強調	RGB (Y) レーザー (非蛍光)	2030~
第 5 世代	注意喚起	高度センシング	2040~

自動車照明において、CO₂削減、装置コストと社会実装についてロードマップを表 2-8-2 に記載する。2018 年度の日本のヘッドランプに係る総 CO₂ 排出量は 190 万 t/年と推定した。また、目標価格は、表 2-8-1 に示す第 1 世代のヘッドライトの片目相当 (光束: 4,200 lm, 電力: 84 W, 自動車 8,200 万台) とした。光源の種類はハロゲン, HID, LED の 3 種類で、効率は平均の 50lm/W とした。CO₂ 削減量は、可視光半導体レーザーの効率、発光部の構成 (青色 LD による蛍光体発光の変換型, 青, 緑, 赤, 黄の各色による混色型の 2 種類) によって、CO₂ 削減量に寄与すると考えた。可視光半導体レーザーの効率ロードマップは第 1 段階の電気-光変換効率が最大 60% (2030 年), 第 2 段階 80% (2040 年), 第 3 段階 90% (2050 年) で試算している。2022 年では青色 LED と蛍光体の構成の照明で、電気-光変換効率 (η) を 108 lm/W, 占有率 3% とすると CO₂ 削減量は 3.1 万 t/年と微小である。

2030 年における青色レーザーの電気-光変換効率 > 60% で、青色レーザーと蛍光体の構成で $\eta > 225\text{lm/W}$, 第 2 世代部分・可変照射で、全体照射の LED に比べて省エネを 1/5, 占有率 30% の条件で、CO₂ 削減量を 54 万 t, 市場価格 17,800 円となった。2040 年黄色半導体レーザーの登場で青, 緑, 赤, 黄の 4 原色となり、各色レーザーの電気-光変換効率が 60~80% となり、 $\eta > 250\text{lm/W}$, 全体照射の LED に比べて省エネ 1/10 となり、CO₂ 削減量が国内 93 万 t まで達した。さらに、カーボンニュートラルの達成年の 2050 年では、黄色半導体レーザーの効率が最大 80% に改善され、全体の効率も $\eta > 293\text{lm/W}$ となり、省エネ, 色強調から注意喚起までの照明が可能となって、全体照射の LED に比べて 1/20 にまで省エネとなり、CO₂ 削減量は 188 万 t まで削減できると予測した。

表 2-8-2. 自動車用 LD 照明による CO₂ 削減ロードマップ

置換対象ハロゲンベース 2018年 4200lm 50 lm /W 総台数 8200万台	2022年 LED	~2030年 LD, 蛍光体走査	~2050年 RGBY走査
CO ₂ 削減、国内負の排出目標	3.1万t (25ppm) 効率 110lm/W 市場占有 3%	840 lm 54万 t (対総排出量0.044%) 225 lm/W 市場占有 30%	420 lm 93万 t 250 lm/W 市場占有 50%
	83.9万t	1,470万t	210 lm 188万 t (0.15%) 293 lm/W 市場占有 100%
コスト目標	参考 11,950円 (LED照明)	17,800円 (PC-LD照明) (※LED照明 ¥11,800エリア効果無)	11,200円 (CM-LD照明)
開発、実証、社会実装計画(シナリオ)	青色LED+蛍光体(PC)方式最適化 発光変換効率 >109lm/W	高効率青色LDを使った発光部高効率化の実証 LD-発光変換効率>230l/W	演色性向上 (室内快適照明の実装)
		高効率青色LDをエリア効果実証 AIの進化促進	室内快適照明の商業的拡大
	窒素物系黄色領域半導体の結晶成長技術開発	黄色領域LD開発と実装 波長:570~590nm、電気-光変換効率:20%	商業的拡大
		RGBY系CM方式開発と実装	RGBY系CM方式商業的拡大 LD-発光変換効率 >290lm/W
			黄色領域LDの改善 電気-光変換効率:80%

※ RGBY:Red-Green-Blue-Yellow、PC-LD:phosphor-converted-LD、青色LD励起の蛍光体発光の変換型、CM-LD:color-mixed-LD、RGBYの各色LDによる混色型

(5)実現に向けた提言

カーボンニュートラルへの貢献として、自動車の照明部分の電力削減を中心に、産学官連携体制を構築し以下取り組むことを提言とする。

① ADB(Adaptive Driving Beam)としての自動車ヘッドランプ

部分投射や位置可変が可能なヘッドランプの課題は、青色半導体レーザー(LD)の高出力である。現在 LD を複数個使用しているが、光学系をシンプルにするためにも光出力を 10W 以上にする。またカーボンニュートラルを考えた場合、LD の効率向上が重要であり、これを加速させる取り組みを行う。

② 完全自動運転時の新たな照明

・注意喚起照明

運転のための照明ではなく、通行人、自転車などへの注意喚起が必要で、文字を道路上に描画するなど走査型レーザーシステム開発が重要である。レーザー安全を考慮し、センサとの連動で動作するため、AIの高度化も必要となる。要素技術からシステムまでの提案を行う。

・室内快適照明

完全自動運転では搭乗者は室内で仕事をする場合、趣味などリラックスする場合の照明を使い分けることになる。必要な部分を投射する照明、色を変える照明などはレーザーの得意な部分である。演色性向上のため黄色半導体レーザーの実現を加速する。

③ 次世代レーザー応用技術の検討

水素エンジンへのレーザー点火の可能性検討が必要である。ガソリンエンジンではその有効性（燃費大幅向上）が示されたが、水素エンジンでの課題把握、対策について提案する。

空飛ぶ車の実証実験が盛んであるが、安全飛行・着地のため様々なセンシング技術を導入する必要がある。LiDARを中心とした高度レーザー計測技術の開発が必要である。

【略語】

2D: two Dimensional

3D: three Dimensional

ADB: Adaptive Driving Beam

AI: Artificial Intelligence (人工知能)

ALCA: Advanced Low Carbon Technology Research and Development Program
(先端的低炭素化技術開発)

AM: Air Mass

CM-LD: color-mixed-LD (RGBY の各色 LD による混色型)

COP: Coefficient Of Performance (成績係数)

cw: Continuous Wave (連続波)

DARPA: Defense Advanced Research Projects Agency (米国防高等研究計画局)

EV: Electric Vehicle (電気自動車)

GHG: Greenhouse Gas (温室効果ガス)

GPS: Global Positioning System (全地球測位システム)

HMD: Head Mounted Display

HUD: Head-Up Display

IAC: International Astronautical Congress (国際宇宙会議)

IC: Integrated Circuit (半導体集積回路)

IoT: Internet of Things (モノのインターネット)

IP: Internet Protocol

JAXA: Japan Aerospace Exploration Agency (宇宙航空研究開発機構)

JST: Japan Science and Technology Agency (国立研究開発法人科学技術振興機構)

LCCM: Life Cycle Carbon minus

LD: Laser Diode

LiDAR: Light Detection and Ranging

NEDO: New Energy and Industrial Technology Development Organization
(国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構)

OA: Office Automation

PC-LD: phosphor-converted-LD (青色 LD 励起の蛍光体発光の変換型)

PV: Photovoltaic (太陽光発電)

RGBY: Red-Green-Blue-Yellow

SDGs: Sustainable Development Goals (持続可能な開発目標)

SPL: Solar-pumped Laser (太陽光励起レーザー)

SSPS: Space Solar Power Systems (宇宙太陽光発電システム)

VCSEL: Vertical Cavity Surface Emitting Laser (面発光型半導体レーザー)

ZEB: Net Zero Energy Building

ZEH: Net Zero Energy House