

日本における蓄電池システムとしての揚水発電のポテンシャルとコスト (Vol.3)

概要

ゼロカーボン社会で主要な電源となる再生可能エネルギーの蓄電システムとして、LCSでは既存の多目的ダムを下池として利用し、それぞれ複数の小さな上池と発電所を新たに建設する「新揚水発電」を提案した[1]。前回の提案書[2]では個別の地形条件などを考慮せず、全国の蓄電設備可能容量を750~2,200 GWh/回/日と見積った。今回は地形条件や土地利用規制を考慮したより現実に近い条件で、建設可能な新揚水発電の蓄電設備可能容量・発電コストを再評価し、将来の有力な蓄電システムであることを確認した。

政策立案のための提案

- 開発可能な蓄電設備可能容量は585 ~ 1,392GWh/回/日を見込み、2050年に必要な蓄電池の設備容量510 GWh/回/日[3]を上回った。発電コストは18.5 ~ 20.5 円/kWh となった。
- 建設候補地が国内の各地に広く分散していることが分かった。各地域における揚水発電所の立地適合性や最適な再生可能エネルギーとの組み合わせを調べ、開発計画を進めていく必要がある。
- 規模の小さいダムは、上池の場所を一意に定めやすく建設が容易かつ建設費が安い。開発手順としては規模の小さいダムから始める方がよい。
- 多目的ダムの貯水量は多様な目的に利用されるため、ダムの利水・治水の機能を発揮できる運用のもとで、貯水量を揚水発電量に利用することが重要である。

1. 新揚水発電所の分布

新揚水発電の蓄電量は多目的ダム（下池）の大きさに依存しており、同じ仕様の上池と揚水発電所を複数設置する（図1）。下池となる全国931の多目的ダムの貯水容量から、建設候補地の分布を評価するため、多目的ダムの規模に応じて5つのクラス分けを行った。結果を図2に示す。

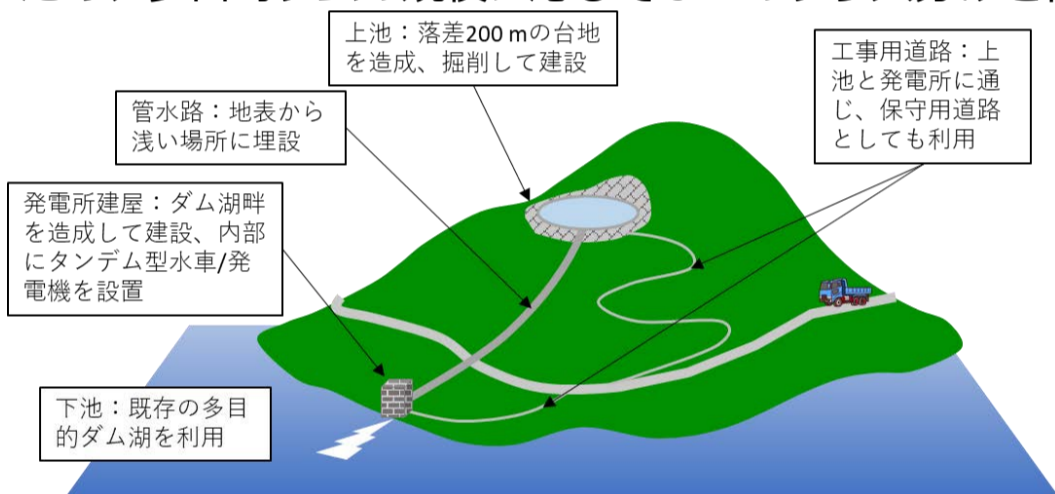


図1 新揚水発電の模式図

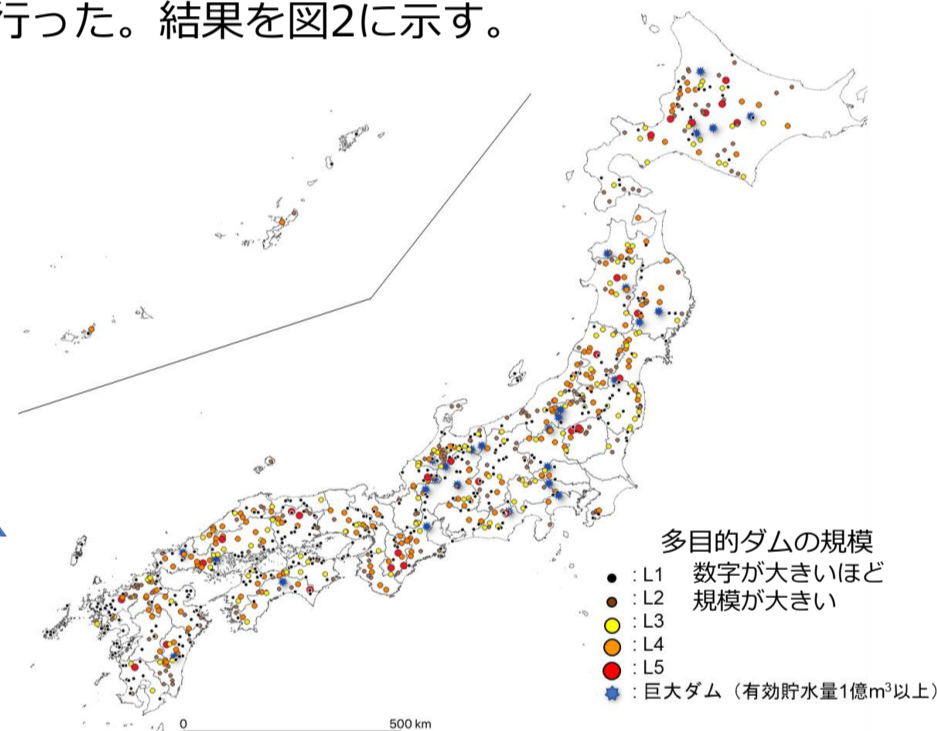


図2 全国の新揚水発電所の分布

2. 新揚水発電所の建設費

地形等を考慮し、詳細な各発電所1基あたりの総建設費を検討したところ平均が27.3 億円、8割が25~30 億円の範囲に収まった。上池設置場所の傾斜が急で管水路が長いほど建設費は高くなった。

総建設費のうち上池建設/造成費が全体の50%以上を占めた（図3）。

3. 条件を変えた計算結果

前回[2]の計算結果（表1:対策案0）に対し、地形条件を精査し（対策案1）、さらにダムの有効貯水容量の利用率や、巨大ダム利用の有無などを変えて（対策案2~5）、発電コストや蓄電設備可能容量を評価した（表1）。

表1 新揚水発電所の蓄電設備可能容量とコスト

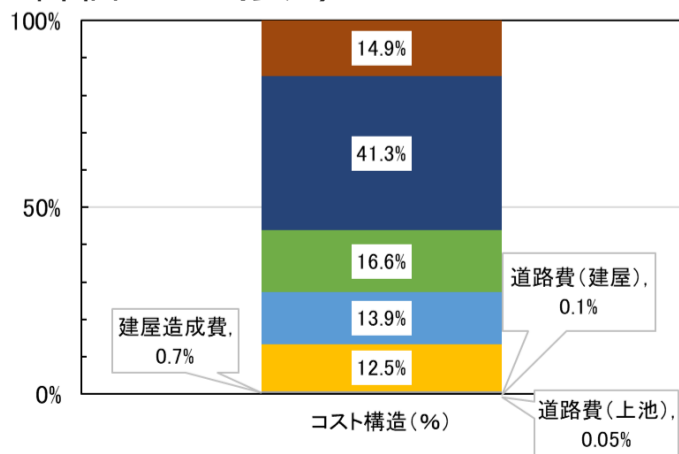


図3 新揚水発電所の建設コスト構造

対策案	地形条件の考慮の有無	A. 有効貯水容量利用率(%)	B. 巨大ダム利用(有効貯水容量1億m³以上)	C. 設備コスト(円/kWh)	D. 発電コスト(円/kWh)	E. 蓄電設備可能容量(MWh/基/回/日)	F. ダム数	G. 設置可能な上池数	H. 蓄電設備可能容量全国合計(GWh/回/日)	I. ダム平均蓄電設備可能容量(GWh/ダム/回/日)	J. 年間蓄電可能容量全国合計(TWh/年)
0	無(貯水20%をすべて揚水発電で利用可能とし、全揚水発電所を同規格で建設、2019年度提案書[2]対策案A案)	20	無	44.5	20.4	61*	1000	14900	907	0.91	272
1	有	20	無	44.9	20.5	61	931	9640	585	0.63	176
2	有	30	無	34.9	18.5	91**	931	9640	878	0.94	263
3	有	20	有	44.9	20.5	61	959	15280	928	0.97	278
4	有	30	有	34.9	18.5	91	959	15280	1392	1.45	417
5	有	20.北海道・東北のみ30	無	40.9	19.7	70	931	9640	655	0.70	196

[1] LCS, イノベーション政策立案のための提案書, “日本における蓄電池システムとしての揚水発電のポテンシャルとコスト”, 平成31年1月.

[2] 同, “日本における蓄電池システムとしての揚水発電のポテンシャルとコスト (Vol.2)”, 令和2年2月.

[3] 同, “低炭素電源システムの安定化と技術・経済性評価 (Vol.2)”, 平成30年3月

固体酸化物形燃料電池システム (Vol.8)

－水素社会構築に向けたエネルギー変換および利用技術の評価－

概要

水素製造装置において、再生可能エネルギー由来の電力によって水電解を行い、CO₂フリーな水素を提供する「再エネ水素ステーション」が注目されている。本提案では、燃料電池を用いた再生可能エネルギーからの水素製造システム（SOECシステム）を用いた水素ステーションの設計とコスト評価を行った。具体的には、SOECシステムの運転条件の最適化を行うとともに、SOECシステムによる水素製造コストに、SOECモジュールの年間生産台数や寿命、稼働率、電力コストがどのように影響するかを評価した。これらに基づき、燃料電池車（FCV）用再エネ水素ステーションの建設コスト、次いで建設コストを加えた水素製造コストを評価した。その結果、水素製造コストは（1）電力コスト15～2.5 円/kWhの条件で稼働率の変化により120～37 円/Nm³-H₂ となること、（2）ガソリン販売価格と等価なコスト（40 円/Nm³-H₂）を達成するには、装置の小型化、昇圧・貯蔵の工程見直し等の検討が必要であることが明らかとなった。

政策立案のための提案

- 設備の小型化・低コスト化：今後の水素ステーション普及に向け、ステーション設置コストに大きな影響を与える水素製造モジュール・圧縮機・蓄圧器の小型化と低コスト化を進めることが必須である。
- 昇圧・貯蔵工程の検討：蓄圧器（高圧タンク）の低圧化により蓄圧器と圧縮機のコスト削減が可能である。将来的には（1）プロトン伝導性電解質膜による燃料電池を電解セルに用い、電気化学的昇圧により圧縮機のコストを削減する方法[1]や、（2）水素をアンモニアなどのエネルギーキャリアに化学変換して輸送・貯蔵し、発電に利用する方法[2]を検討することで、現状ガソリン価格に相当する40 円/Nm³-H₂ を目指す取り組みが必要である。

1.水蒸気電解（SOEC）システムの設計と最適化

SOECシステムを設計し、熱中立点を考慮した運転条件の最適化の結果、水素製造効率は83%、80 MPaへの昇圧プロセスを考慮しても76%となった。水素製造速度は300.8 Nm³/h となり、商用水素ステーションの標準的な製造能力（300 Nm³/h）とほぼ一致した。

2. SOECシステムコストと水素製造コスト

SOECモジュールの寿命が3年程度に改善するとし、BOS（Balance of system）の寿命15年を程度としてSOECシステムコストを評価した。SOECジュールコストは年産100台から1,000台とすると大凡半減すること、SOECモジュールに加え、圧縮機、蓄圧器がシステムコストに占める割合が大きいことが明らかになった。

これに基づき水素製造コストを評価すると、燃焼熱基準でのガソリン販売価格と等価な製造コスト（40 円/Nm³-H₂）を達成するには、電力コスト5 円/kWh、稼働率30%以上、SOECモジュール寿命3年以上の条件が必要であることが分かった（図1）。

3.燃料電池車（FCV）用水素ステーションの評価

SOECシステムによるオンサイト方式（敷地内に水素製造装置を備える）再エネ水素ステーション（図2）の建設コストは、SOECモジュール寿命を3年以上とすることで4億円以下に低減できる可能性が示唆された。（図3）

水素ステーションの建設コストを加えた場合、電力コスト15～2.5 円/kWhでの水素製造コストは稼働率33%（8h/dayに相当）の条件で120～70 円/Nm³-H₂、稼働率が90%の条件では86～37 円/Nm³-H₂ となることが示された。

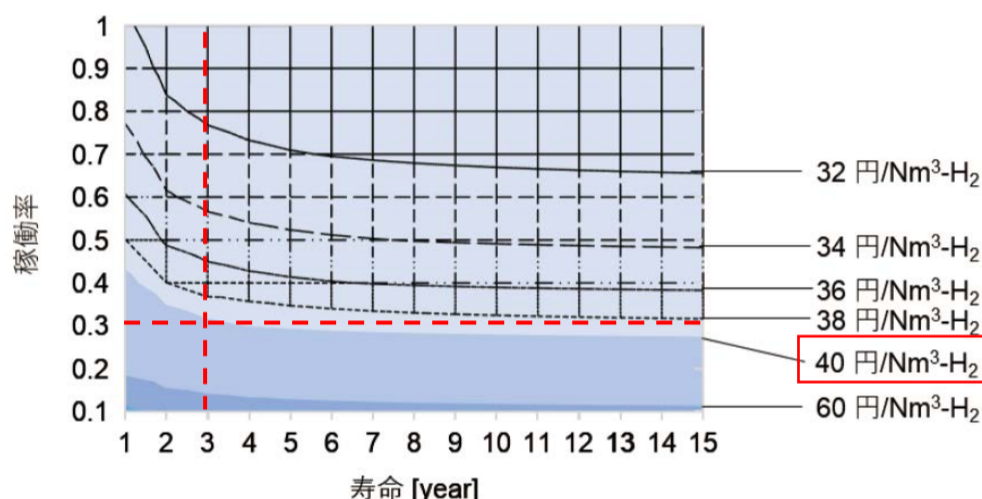


図1 水素製造コストの稼働率とSOECモジュール寿命に対する依存性（電力コスト：5 円/kWh）

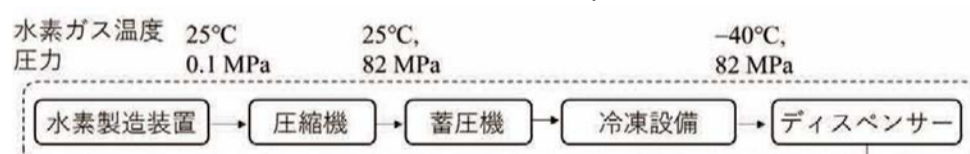


図2 オンサイト方式による水素ステーション 70 MPa の水素供給のプロセスフロー図

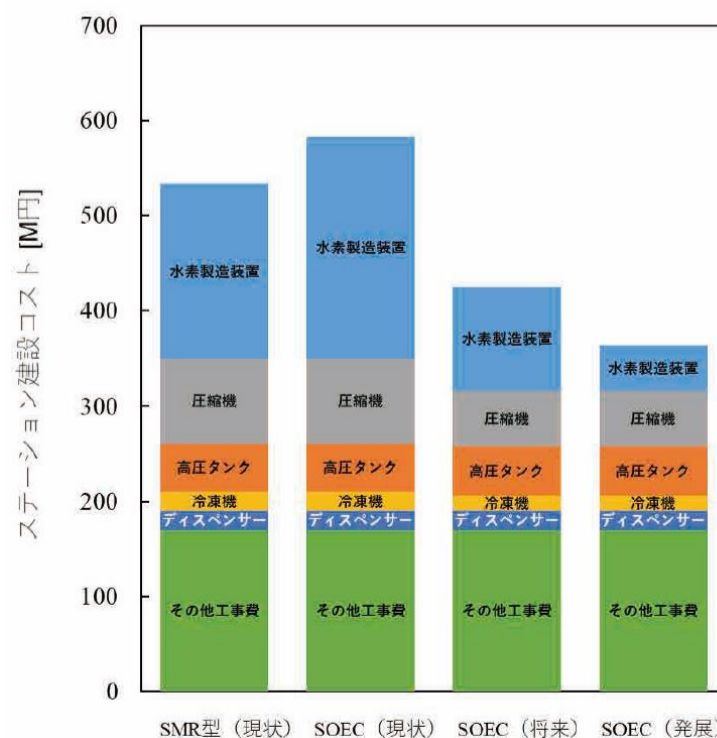


図3 水素ステーション（300 Nm³/h）の建設コスト構造（SMR（現状）、SOEC（現状）：モジュール寿命1年、年産100台、SOEC（将来）：モジュール寿命1年、年産1000台）およびSOEC（発展）：モジュール寿命3年、年産1000台）

[1] スマート水素ステーション（SHS），本田技研工業 <https://www.honda.co.jp/tech-story/engineer/engineer-talk/SmartHydrogenStation/>.

[2] 小島由継 監修，“アンモニアを用いた水素エネルギーシステム”，シーエムシー出版，239 ページ，2015 年6 月。

情報化社会の進展がエネルギー消費に与える影響 (Vol.2)

— データセンター消費エネルギーの現状と将来予測および技術的課題 —

概要

情報化社会の進展に伴う消費電力増加の可能性が指摘されている。このため主要なICTインフラストラクチャのうちデータセンターに着目し、各構成機器の寄与を検討するとともに、現在の技術に固定した前提で将来のデータセンター総消費電力を推定した。その結果、構成機器中サーバが大きな割合を占めること、サーバの業務中ディープラーニングなどAIを扱う部分の伸びが今後大きくなること、さらに、総消費電力は国内・海外ともに2030年、2050年に向けて著しく増大する見通しとなることが分かった。消費電力低減のための課題を、構成機器の消費電力性能や消費電力低減の目標としてまとめた。

政策立案のための提案

- データセンターの計算負荷は今後も膨大に発生すると予測されるが、世界中で低炭素エネルギーに向けてエネルギーポートフォリオの見直しが進められていて、供給電力の大幅な増大は期待しがたい。低炭素社会に必要なサービスを提供するためには、データセンターの省エネルギーを進める必要がある。
- 2030、2050年の電力需要を、現状技術で固定された仮定のもとで計算した。電力需要低減に最も効果が高い機器はCPU、GPUであり、2030年に現在の3~10倍程度、2050年に1,000倍程度の消費電力性能 (Gflops/W) の達成を目標とすべきである。メモリ、電源、ストレージは2030年に1/10、2050年に1/1,000程度への消費電力低減が目標となる。

1. 消費電力の内訳

データセンターの主要IT機器は、サーバ、ストレージ、ネットワークスイッチ。加えてシステムから電力を供給するための電源系（トランス、コンバーター、インバーター、無停電電源装置（UPS）等）、空調装置がある（図1）。これらの機器ごとに消費電力を計算し、合計してデータセンターの消費電力を求めた。

サーバの消費電力を計算する際、Webサービス、検索、メールなど電力消費が通常のIPトラフィックに比例する部分を「ベース業務」、ディープラーニングなどのように、与えられたデータに対して大きなオーダーで演算が生じる部分を「AI業務」として検討した。空調、電源系については、PUE（Power Usage Effectiveness：データセンター全体の消費電力とIT機器による消費電力の比）に含めた。

2. データセンター消費電力の将来予測

データセンターの総消費電力を2018年、2030年、2050年の国内と世界について計算した（表1）。

- ・ 2018年の消費電力は国内で14TWh、世界で190TWhと推定された。
- ・ 現在入手可能な最新機器を用いたと仮定した（将来の技術進歩は織り込まない）ときに推定される消費電力は、
日本国内：90TWh（2030年）→12,000TWh（2050年）
世界：3,000TWh（2030年）→500,000TWh（2050年）

3. 電力低減のための課題

データセンターの消費電力内訳は、現時点でサーバ：50%、電源・冷却系：25~30%、ストレージ10%だが、将来は60~80%をサーバが占めると推定され、その消費電力低減が最も重要になる。機器としてはCPU、ストレージ、メモリと電源(インバータ、コンバータ)の省エネルギーが、中でもAI業務の増大で著しい計算量の増大が予想されるCPU、GPUの省電力化が重要である。

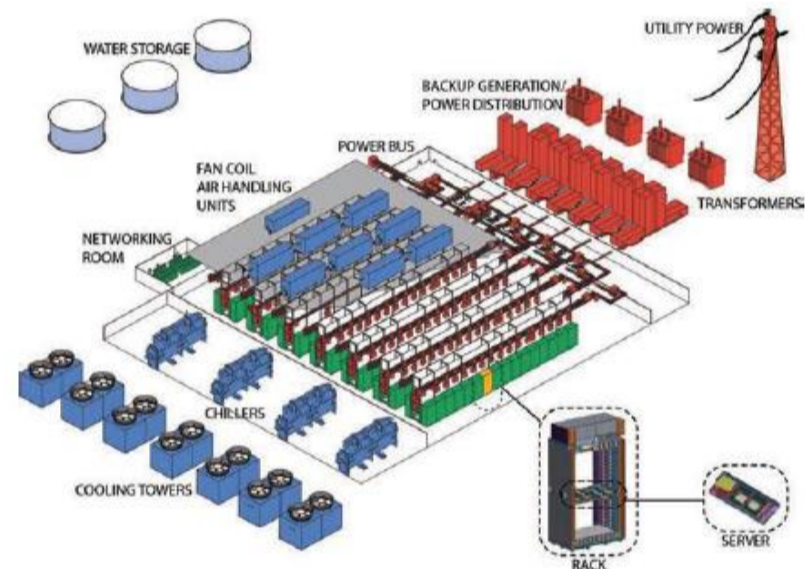


図1 データセンター構成図[1]

表1 データセンター消費電力の現状と将来

		domestic			global				
		2018	2030	2050	2018	2030	2050		
IP traffic	ZB	0.7	11	1,400	11	170	20,200		
power consumptions of data centers	TWh	14	90	12,000	190	3,000	504,000		
power consumptions of server	basic task	TWh	6	30	3,500	90	450	53,000	
	AI task	TWh	0.7	16	3,000	23	1,740	331,000	
	total	TWh	7	46	6,500	113	2,190	384,000	
	CPUs	basic task	TWh	4	20	2,200	60	280	33,000
		AI task	TWh	0.5	12	2,300	17	1,320	251,000
		total	TWh	4	32	4,500	77	1,600	284,000
	memories	basic task	TWh	1	7	890	16	110	13,000
		AI task	TWh	0.1	2	340	3	190	37,000
		total	TWh	1	9	1,230	19	300	50,000
	power supply etc	basic task	TWh	1	3	410	14	60	7,000
AI task		TWh	0.1	2	400	3	230	44,000	
total		TWh	1	5	810	17	290	51,000	
power consumptions of storages	TWh	2	29	3,700	27	430	51,000		
power consumptions of switches	TWh	0.1	1	70	2	20	3,400		
power supply, cooling, etc	TWh	5	11	1,500	43	400	66,000		

[1] L. A. Barroso, et al., "The Datacenter as a Computer: Designing Warehouse-Scale Machines, 3rd ed.", Morgan & Claypool Publishers (2018).

情報化社会の進展がエネルギー消費に与える影響 (Vol.3)

ネットワーク関連消費エネルギーの現状と将来予測および技術的課題

概要

情報化社会の進展がエネルギー消費に与える影響に関連して、コア、メトロ、アクセス系ネットワーク構造等一定の前提を置いて消費電力の推定を行い、課題を検討した。年率27%のトラフィック増大と最新技術レベル固定を前提とすると、消費電力の80%を占めるアクセス系、特に無線アクセス系の消費電力増大が問題で、改善の検討が必要である。またネットワークの消費電力増大の将来予測を、同じく主要なICTインフラストラクチャを構成するデータセンターと比較し、ほぼ同じレベルであることが分かった。

政策立案のための提案

- 今後、通信ネットワーク分野で消費電力の増大が著しい分野はアクセス系、特に無線アクセス系であり、装置・設備としては無線基地局とルータ。これらの消費電力を低減する研究が重要であり、2030年で現状の1/2~1/3、2050年には1/100以下程度を目標とする必要がある。
- 通信ネットワークにおいてはトラフィック量の小さい設備での電力低減と同時に、ピークトラフィックへ対応するため、ハードウェアのみならず通信システム、アーキテクチャの検討も重要である。
- ハードウェアでは基地局の送信アンプ、ルーティング関連のプロセッサとスイッチが消費電力の大きい機器として挙げられ、これらデバイスの省エネルギー化が重要である。

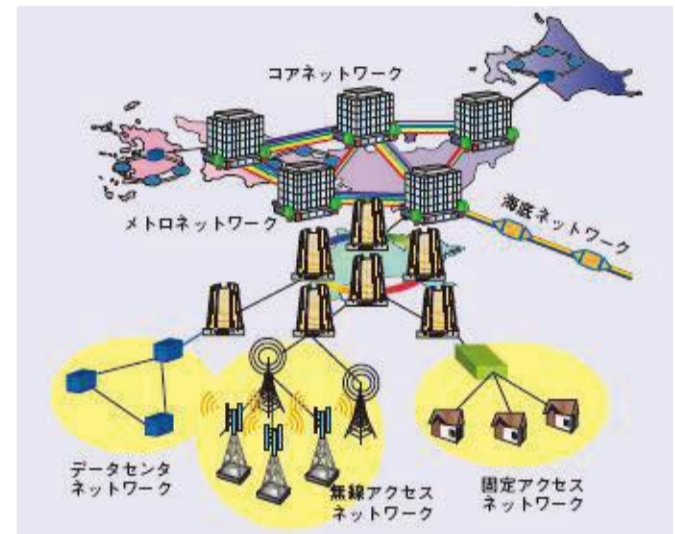


図1 ネットワークの構造 [2]

1. ネットワークの構造

ネットワークをコアネットワーク、メトロネットワーク、アクセスネットワーク(有線、無線)に分類した(図1)。主要な装置・設備は、コア及びメトロネットワークではルータ、アクセスネットワークでは基地局である。

2. ネットワーク消費電力の計算

ネットワーク全体の消費電力は2018年時点で国内で23TWh、世界で490TWhと推定された。年率27%のトラフィックの増大と現状最新技術レベルの固定を前提として、2030年、2050年のトラフィック量を推定。それぞれについて、各ネットワークの主要な設備・機器の消費電力を積算し、現在・将来の国内(表1下段)、海外(表2下段)の総消費電力量を推定した。

日本国内：93TWh(2030年)→9,000TWh(2050年)
 世界：2,400TWh(2030年)→260,000TWh(2050年)

全体の80%をアクセス系ネットワークが占めており、今後用途の拡大によりさらなる増加も考えられる。

3. 消費電力低減のための課題

消費エネルギー最大の設備は無線基地局、ついでルータ。これらの省電力を図るうえで、無線基地局についてはパワーアンプ、ルータについてはプロセッサの高効率化等が課題となる。

4. データセンターとネットワークの消費電力の比較

主要なICTインフラストラクチャである、データセンター[1]とネットワークの消費電力を比較したところ、両者はほぼ同レベルと推定された(表1, 表2)。

表1 国内ICTインフラストラクチャの消費電力の現状と将来予測

Domestic		2018	2030	2050
Datacenter		TWh/Y	TWh/Y	TWh/Y
	server	7	62	9,600
	storage	2	29	3,700
	switch	0.1	1	70
	power supply	5	13	2,000
	Total	14	90	12,000
Network				
	Core	1	2	231
	Metro	4	13	1,510
	Access	18	78	7,000
	Total	23	93	9,000

表2 海外ICTインフラストラクチャの消費電力の現状と将来予測

Global		2018	2030	2050
Datacenter		TWh/Y	TWh/Y	TWh/Y
	server	113	2,190	384,000
	storage	27	430	51,000
	switch	2	20	3,400
	power supply	43	400	66,000
	Total	190	3,000	500,000
Network				
	Core	25	42	4,900
	Metro	90	260	31,400
	Access	370	2,100	220,000
	Total	490	2,400	260,000

[1]LCS, イノベーション政策立案のための提案書, “情報化社会の進展がエネルギー消費に与える影響 (Vol.2)”, 令和3年2月。

[2]宮本 裕, 他, “将来の大容量通信インフラを支える超高速通信技術”, NTT 技術ジャーナル, vol.31 No.3 (2019)。

バイオマス廃棄物のメタン発酵 (Vol.5)

- 発酵メタン化反応 (液相) -

概要

廃棄バイオマスからメタン発酵法で生成するメタン・二酸化炭素・水素を利用し、不足する水素は水の電気分解等からの水素を利用してメタンを製造する、発酵メタン化法 (Biological hydrogen methanation) の課題を検討した。メタン製造コストは6.9 円/MJとなり、現状のガス料金3.5円/MJおよびDAC費用を加算した5.7円/MJより若干高価になるが、廃棄物処理の有益性を考慮すると発酵メタン化法の意義はある。今後発酵槽組成とシステムの最適化の検討が必要である。

政策立案のための提案

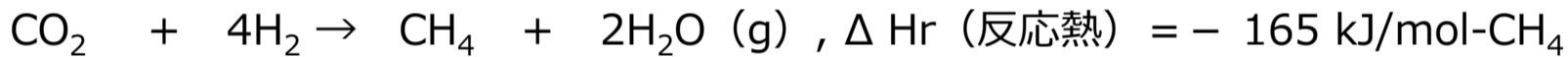
- 発酵メタン化法については、国内での開発が不十分である。発酵菌などの発酵機構の解明と水素の溶解を速める反応工学的な開発をすすめ、廃棄物バイオマスの有効利用を高める必要がある。
- メタン発酵法については、今回用いた発酵モデルでの解析はプロセスの合理化などの検討に有益であり、発酵システムの予測などが可能となる。発酵モデルの検討を進め、広く使われるように普及させていくことが重要である。

1.メタン発酵モデル

従来ベースとしてきたADM1モデル [1] に、水素発酵で重要なエタノール経路 [2] および乳酸経路 [3] の発酵経路を追加した。プロセスの合理化、発酵システムの予測などを行ったところ、NH₄初期濃度、温度等の条件を変えた時の、メタンと水素の生成量を求めることができた。これらの結果をバイオマス発酵によるメタンと水素生成の条件の検討に用いることができる。

2.発酵メタン化法([4],[5]) の検討

バイオマス廃棄物の、メタン発酵で生成する CO₂、H₂、CH₄ を利用して、発酵メタン化法で得られるメタンのコスト、生成量等を検討した。反応式は、以下の通り。



検討したシステムは (ケース1) 水素発酵槽、メタン発酵槽の2段システムとしたもの、(ケース2) 簡略化のため水素発酵槽を取りやめ、生ごみと下水汚泥ともにメタン発酵層に供給したものの2種類である。

3.検討モデルとメタンガスのコスト

人口10万人の都市の廃棄物バイオマス (下水汚泥、食品廃棄物) から、メタン発酵法と発酵メタン化法によりメタンガスを生産するモデルを検討した。ケース1のプロセスフローは図1。メタン生成量を計算すると97 m³/h (95%メタン) で、同規模都市の消費ガスエネルギーの9%を代替可能。メタンガスは民生に使用する場合、安全面も含め水素より使いやすい。

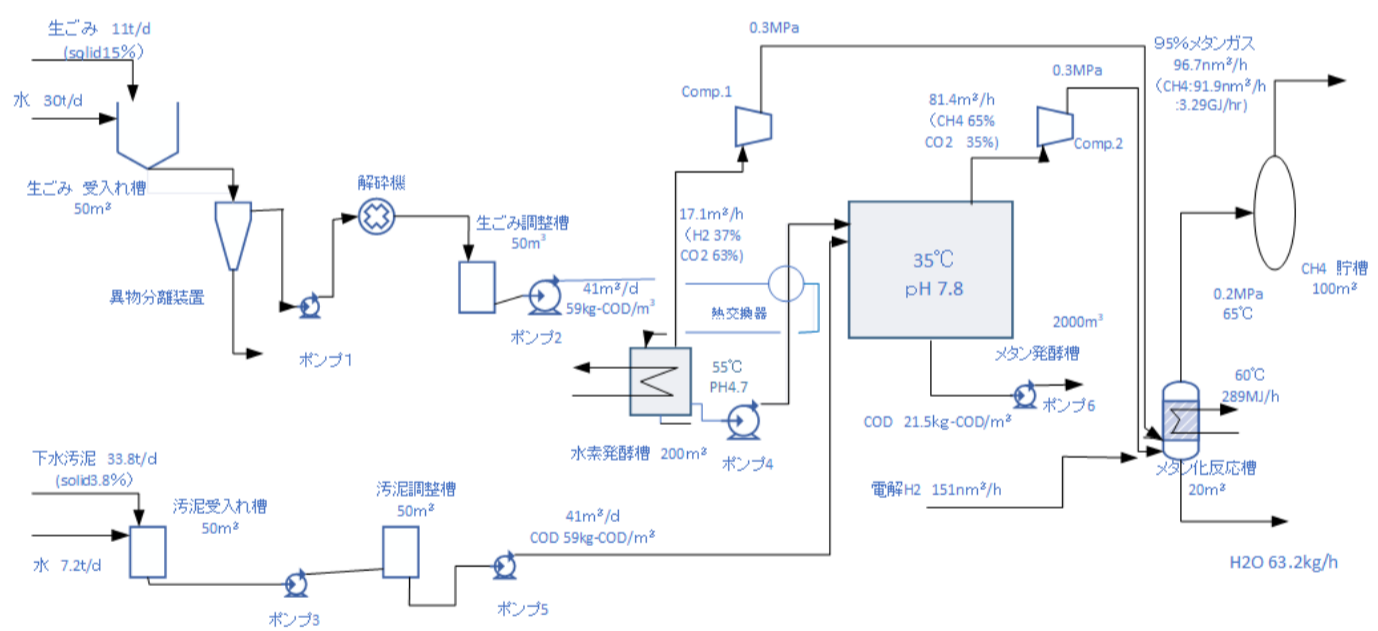


図1 バイオ法 メタン化プロセスフロー図

表1 メタン製造コスト

CH ₄ 製造コスト	メタン生産量 91Nm ³ /h, 3.26GJ/h (26.1 TJ/y)				備考
	ケース1		ケース2		
固定費		固定費負担額		固定費負担額	
建設費	453百万円	68百万円/y	396百万円	59百万円/y	年経費率15%
運転費	運転人員 9人	45百万円/y	9人	45百万円/y	5百万円/人・年
固定費計		4.3円/MJ		4.0円/MJ	
変動費	原単位	コスト (円/MJ)	原単位	コスト (円/MJ)	単価 など
電力	40.5 kWh/GJ	0.481	34.7 kWh/GJ	0.416	12円/kWh
下水汚泥	0.305 t/GJ	0	同左	0	
生ごみ	0.100 t/GJ	0	同左	0	
水素	46.3Nm ³ /GJ	2.29	50.0Nm ³ /GJ	2.5	50円/Nm ³
発生熱量(60°C)	88.6MJ/GJ	Δ 0.104	同左	Δ 0.104	1.17円/MJ (=1.5円/MJ × 333/423)
栄養素	リン安 0.129kg/GJ KC I 0.073 g/GJ	0.021	同左	0.021	生成水19.2kg/GJ, リン安140円/kg, KCI45円/kg
変動費計		2.7円/MJ		2.9円/MJ	
CH₄製造コスト		7.0円/MJ		6.9円/MJ	

[1] D.J. Batstone, et.al, 'Anaerobic Digestion Model No.1', Scientific and Technical Report No.13, IWA publishing, 2002.
 [2] E.Shi, J.Li, and M.Zhang, Water Res., 161 (2019) 242-250.
 [3] G.Antonopoulou, et. al, Int. J. Hydrogen Energy, 37 (2012) 191-208.
 [4] B. Lecker et al. Bioresource Tech., 245 (2017) 1220-1228.
 [5] D. Rusmanis et al, Bioengineered, 10 (2019) 604-634.

二酸化炭素のDirect Air Capture (DAC) 法のコストと評価 (Vol.2)

– 吸着分離プロセス –

概要

アミン/ナノファイバー系およびMOFs-74 (Metal-Organic Frameworks) 系を用いたDAC プロセスについてコストや課題を検討した。アミン/ナノファイバー系は、吸着性能が低くかつ吸着材[1]での通気抵抗が大きい。エネルギーコストが高くなり、想定ケースのDACコストは117円/kg-CO₂であった。MOFs系は八二カム構造を想定したため通気抵抗はアミン/ナノファイバー系より低く、エネルギーコストは低い。しかし吸着材のMOFsの価格が高く、吸着剤の寿命を想定の倍(4年)以上にする必要がある。DACコストは71円/kg-CO₂で、今後実証が必要である。これまで検討したKOH-CaCO₃ アルカリ吸収法でのDACコストは35円/kg-CO₂であり[2]、この数値以下か否かを実証する課題はあるが現状では有望なプロセスである。

政策立案のための提案

- DACのコストを35円/kg以下、できれば20円/kg-CO₂程度以下とする技術開発が必要である。
- アルカリ吸収法、NFC-アミン吸着法、MOFs吸着法ともに実証すべき課題、開発すべき課題が多く目標を明確にした開発が必要である。
- 最適吸着材の開発には、計算化学などを駆使し得られた結果を具体的な開発に適用し、効率的な検討を行う必要がある。

1. アミン/ナノファイバー系の評価とコスト

アミン (H₂N(CH₂)₂NH(CH₂)₃SiCH₃(OCH₃)₂:AEAPDMS) を、ナノファイバー (NFC) に含浸させ成形した繊維フィルターを吸着材とした。

(1) AEAPDMSのCO₂吸着性能の評価

AEAPDMSがCO₂を吸着する機構を理解し吸着熱を評価するために量子化学計算を実施し、水分の有無で電子状態が変化し吸着特性が変わることや、吸着の容易さや吸着熱を推測した。

量子化学は開発の効率化の有力なツールとなる(図1:分子構造例)。

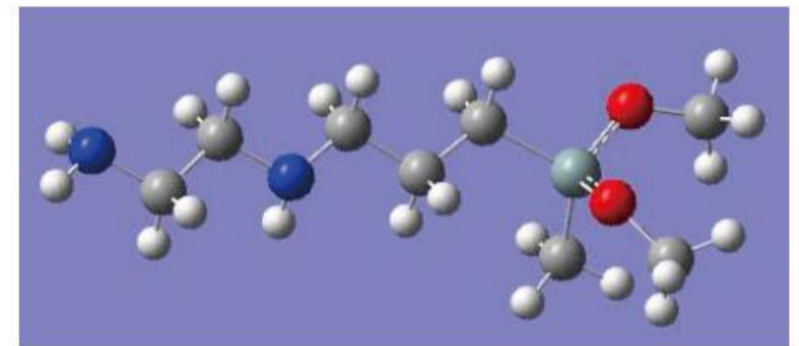


図1 AEAPDMSの分子構造の例

(2) 想定プロセスによる検討

性能やコストを検討する想定プロセスでは、空気中のCO₂濃度を400 ppm、捕集量を112t/h、吸着層出口CO₂濃度を0 ppmとした。吸着速度を0.5 mol/kg/hと想定した時の脱吸着サイクルは各々60分であり、DACコストは117円/kg-CO₂となった(表1)。

2. MOFs-74(Metal-Organic Frameworks)系の評価とDACコスト

MOFs (MOFs-Metal Organic Frameworks- 金属有機構造体) は、金属と有機配位子による自己組織化で合成されるハイブリッド材料である。CO₂の吸着にも検討され、Mg-MOF-74は大きな吸着能があることが確認されているが、現在開発はラボ段階である。吸着層として八二カム構造体を想定し、1.(2)と同様にコストを計算したところ、71.1円/kg-CO₂となった(表1)。

3. 考察と課題

NFC-アミン法、MOFs法その他、KOH-CaCO₃アルカリ法、石炭ボイラー排ガスのアミン吸収法のコストを比較した(表1)。前者3法はDACであり入口CO₂濃度は400 ppm。最後のアミン吸収法は、入口CO₂濃度は14.3%である。

CO₂を分離するのに必要な理論エネルギーは、DACケースはボイラー排ガスケースの4倍であり、吸着法(NFC-アミン法、MOFs法)によるDACコストは高い結果になった。各プロセスの特徴は以下の通り。

(1) ボイラー排ガスからのCO₂捕集の場合、捕集効率は90%であり、コストは10円/kg以下であるが吸収法のため出口をzero carbonにできない。(2) DACの場合入口濃度が400 ppmと薄く、捕集コストはアルカリ法(出口CO₂濃度110 ppm)では35円/kg程度である[2]。米国などLNGが安価な(0.35円/MJ)ところでは25円/kg-CO₂程度となる。課題はあるが有力なプロセスである。(3) NFC-アミン法は、吸着材での通気抵抗が大きいため設備・電力コストが高く、現状コストは100円/kg以上となる。(4) MOFs法は通気抵抗が低く、電力コストは小さいため、100円/kg以下となる可能性があるが実験による実証が必要である。DACのコストを35円/kg以下、できれば半額以下にするには課題が多く、吸着材の性能向上、寿命の延長、通気抵抗減少などの実証実験を進める必要がある。

表1 CO₂捕集コストの比較 (CO₂捕集量 112t/h)

プロセス	DAC		DAC	石炭ボイラー排ガス	備考	
	NFC-アミン法	MOFs法	アルカリ法(昨年のLCS報告)	アミン吸収		
	CO ₂ 400ppm→0ppm		CO ₂ 400ppm→110ppm	CO ₂ 14.3%→1.56%		
固定費(円/kg-CO ₂)	51.9	26.7	20.7	3.6*	*能力を112t/hに補正	
変動費(円/kg-CO ₂)	65.0	44.4	14.7	5.9		
電力	4.14 kWh/kg	1.6kWh/kg	19.2	0.14kWh/kg	1.7	12円/kWh
熱量			8.84MJ/kg	2.5MJ/kg	3.8	1.5円/MJ
吸収材	15.3	25.2	1.4		0.2	
その他					0.2	
計(円/kg-CO ₂)	116.9	71.1	35.4	9.5		

[1] Jan Wurzbacher, "Capturing CO₂ from Air", Herbstworkshop Energiespeichersysteme, TU Dresden, 9 November 2017.

[2] LCS, イノベーション政策立案のための提案書, "二酸化炭素のDirect Air Capture (DAC) 法のコストと評価", 平成31年2月.

大規模エネルギー貯蔵システムの安全性評価に関する技術的課題と社会実装への展望

概要

大規模エネルギー貯蔵システムの安全性評価の動向を調査し、将来重要となる考え方や取り組みを示すことを目的とした。まずシステムの安全性に関する技術動向を調査し、次に調査結果を整理するためのフレームとしてリスクシナリオ特定、リスク分析、リスク評価の手法を示した。例として、大規模蓄電池システムの安全性について、リスク分析により重要なリスク項目を抽出し、リスクの定量化に向けたモデル化を試行した。大規模エネルギー貯蔵システムの安全性評価に関し必要となる要素を提案としてまとめた。

政策立案のための提案

- 大規模エネルギー貯蔵システムの社会実装において、対処すべきリスクを経済性や安全性等の総合的観点から特定し、関係者で共有する必要がある。政策担当者はシステムの関係者が重要と考えるリスクの議論の場をコーディネートすることが社会実装に向け重要となる。
- 大規模エネルギー貯蔵システムの安全規格の確立が重要となる。安全技術に加えて安全性を定量的に評価する規格に関するイニシアティブを取ることができれば、国際的に優位性を有することが可能となる。
- リスクアセスメントにおいては、様々な運転統計データが必要となるが、これらは現状機密情報である。データベース化によりアセスメント実施者が必要なデータを共有できる環境構築が必要である。

1. 安全技術動向

大規模エネルギー貯蔵に使用されるリチウムイオンバッテリー（以下、LiB）の安全性に係る研究動向を論文データベースにより調査し、LiBの事故要因と安全対策分類をまとめた。その結果これまでの安全性研究は電池の危険性とその安全対策に関する研究が主であることが分かった。大規模蓄電池システム全体の検討は海外で2020年に技術文書が公開されており[2]、今後研究推進が進展すると考えられる。

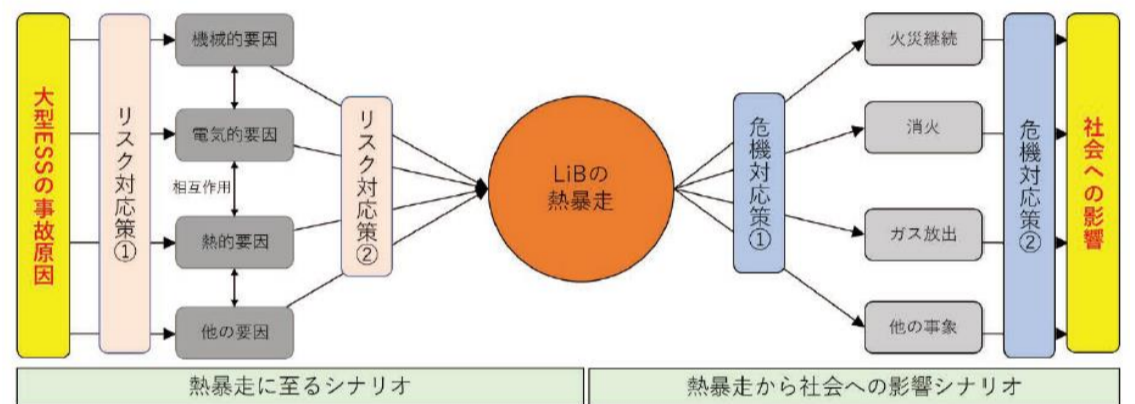


図1 大規模蓄電池システムにおける熱暴走事故シナリオに関するBow-tieモデル案

2. リスクシナリオ特定

大規模蓄電池システム事故の事象進展と、これを阻止する安全対策を整理した“Bow-tie”モデルによって、事故シナリオやシステムの脆弱性について把握した（図1）。左側に記載された事故要因に由来するリスクシナリオや、右側に記載された、熱暴走発生後にシステム全体や社会へ影響を与えるシナリオの特定が重要である。続いてシナリオ特定手法として、温度などのパラメータとガイドワードの組合せより、事故シナリオを抽出する手法であるHAZOPを適用し、包括的にリスクを抽出した。「単一セルの内部短絡が原因で熱暴走し、隣接セルが連鎖的に熱暴走する」等のシナリオが特定された（表1）。

表1 HAZOPにより得られたリスクシナリオ例

ESSモデル	パラメータ	ガイドワード	意味	原因	単一セルでの影響	隣接セルへの影響	モジュールへの影響	システム全体への影響
蓄電池盤	温度	MORE	セル温度上昇	・高気温 ・外部火災 ・冷却不良 ・電解液の反応	① セルの温度上昇により電極・電解液・セパレータが分解 ② セパレータが破壊され内部短絡が発生、発熱 ③ さらに温度上昇、電極・電解液の分解 ④ セルの熱暴走	① セルの熱暴走により隣接セルの温度上昇 ② 温度上昇により電極・電解液・セパレータが分解 ③ 隣接セルのセパレータが破壊、内部短絡により発熱 ④ さらに温度上昇、電極・電解液の分解 ⑤ 隣接セルの熱暴走	① 隣接セルの熱暴走によりその他のセル・モジュール全体の温度上昇 ② モジュール内セルの電極・電解液・セパレータが分解、セパレータの破壊 ③ モジュール内セルで内部短絡の発生、発熱によりモジュール内で発火・火災	① モジュール内で発生した火災が蓄電池盤全体へ延焼 ② システム全体に延焼・大規模火災

3. リスク分析、評価

2.で特定されたリスクシナリオの物理現象をモデル化し、定量的リスク分析に向けた初期検討を実施した。セル温度に着目して、各セルの温度が閾値を越えたとき、熱暴走に至ると設定した解析を物理モデリングおよびモンテカルロシミュレーションにより実施した。これにより蓄電池モジュールにおける各セルの熱暴走確率の算出が可能となったが、結果の精緻化には入力パラメータの実測値が必要である。パラメータのデータベースを構築することにより、より正確な予測が可能になる。

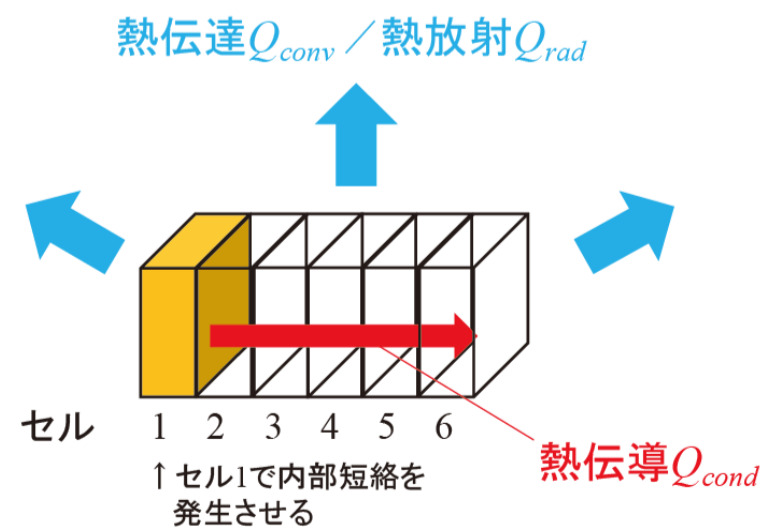


図1 既往研究[1]で実施された実験装置概念図

[1] Feng X, Lu L, Ouyang M, Li J, He X, "A 3D thermal runaway propagation model for a large format lithium ion battery module", Energy 2016;115:194-208.
 [2] International Electrotechnical Commission (IEC), IEC 62933-5-2, "Electrical energy storage (EES) systems - Part 5-2: Safety requirements for grid-integrated EES systems - Electrochemical-based systems", 2020.

蓄電池システム (Vol.9)

－次世代電極活物質を用いたリチウムイオン電池の製造コスト試算－

概要

近年の技術水準を考慮したリチウムイオン電池の製造コストを試算し、リチウムイオン電池の高エネルギー密度化と低コスト化の将来推移を予測することを試みた。次世代電極活物質を適用したリチウムイオン電池を設計して製造コストを試算したところ、現状モデル（2020年）の製造コストは11.9～23.2円/Wh、将来モデルでは最も低い値で5.1円/Whまで低減する可能性があることを示した。一方、EV用など2030年までの短期的目標であるエネルギー密度（500Wh/kg以上）と製造コスト（電池パックで1万円/kWh）を達成するためには、10年程度の開発期間であることから研究の加速が必要である。

政策立案のための提案

- 高性能低コスト蓄電池技術の具体的施策として、現状の正負電極を次世代正極活物質とSi負極に置き換えること、又は、S正極活物質と金属Li負極に置き換えることを提案し、技術的に可能であることを定量的に示した。
- 実現時期として、現行の開発投資による技術開発および実装化では2040年以降の達成であることを予測している。今後新たな目標実現のためには、産官学一体となった人物金の緊急の集中した資源投資が必要不可欠である。

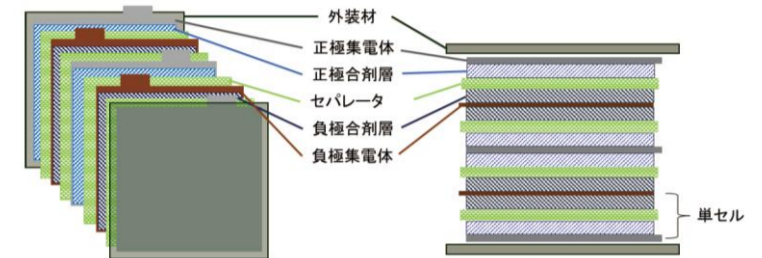


図1 評価用電池の構成概念図
(左：分解斜視図、右：断面図)

1. 評価用電池の仕様設計

評価用電池は、単セルを複数個積み重ねた積層セルをパウチ材の外装で封じた構造とした（図1）。寸法は市販のLIBを参考に設定した。表1に評価用電池の電極活物質の構成と電池電圧を示す。基準1～4は市販のLIBに用いられている電極活物質（従来品）を用い、検討1～9は正極・負極活物質の片方または両方とも従来品以外の材料を用いて構成した。（[1]～[5]）

2. 製造コスト試算結果

図2に評価用電池（表1の基準1～4、検討1～9）の製造コストと重量エネルギー密度の試算結果を、電極組合せによって設定したグループごとに分けて示した。

3. 将来展望

製造コストを低減し、かつ重量エネルギー密度を向上させるには、正負極を次世代活物質に置き換えることが必要である。

短期的目標（2030～2040年）を、正負極の片方または両方を、次世代正極活物質とSi負極に置き換えること、中期的目標

（2050年）を次世代正極活物質とSi負極に置き換えること、またはS正極活物質と金属Li負極に置換えることと設定した。図2によりエネルギー密度と製造コストを推算した。

現状グループ(G1)：277Wh/kg、11.9円/Wh。

短期目標グループ(G2、G3、G5)：

300 Wh/kg以上、11.6円/Wh以下。

中期目標グループ(G4、G6、G7)：

300 Wh/kg以上、10.0円/Wh以下。

但し中期的目標(2050年)を達成するためには正負両方の電極変更の必要があり、実用化には時間がかかると推測される。

表1 評価用電池の電極活物質の構成と電池電圧

	正極			負極			電池電圧 [V]
	活物質	容量値 [mAh/g]	容量利用率	活物質	容量値 [mAh/g]	容量利用率	
基準1	LiNi _{0.8} Co _{0.15} Al _{0.05} O ₂	196	0.72	C ₆	353	0.95	3.6
基準2	LiNi _{0.33} Mn _{0.33} Co _{0.33} O ₂	169	0.61	C ₆	353	0.95	3.6
基準3	LiFePO ₄	165	0.97	C ₆	353	0.95	3.3
基準4	LiMn ₂ O ₄	110	0.74	Li _{4/3} Ti _{5/3} O ₄	165	0.94	2.24
検討1	Li _{1.2} Ti _{0.4} Mn _{0.4} O ₂	300	0.76	C ₆	353	0.95	3.3
検討2	Li ₂ Mn _{1/2} Ti _{1/2} O ₂ F	320	0.70	C ₆	353	0.95	3.3
検討3	LiNi _{0.5} Mn _{1.5} O ₄	135	0.92	C ₆	353	0.85	4.55
検討4(a)/4(b)	LiNi _{0.8} Co _{0.15} Al _{0.05} O ₂	196	0.72	Si	1,007/ 4,197	0.24/ 1	3.3
検討5(a)/5(b)	LiNi _{0.33} Mn _{0.33} Co _{0.33} O ₂	169	0.61	Si	1,007/ 4,197	0.24/ 1	3.3
検討6(a)/6(b)	Li _{1.2} Ti _{0.4} Mn _{0.4} O ₂	300	0.76	Si	1,007/ 4,197	0.24/ 1	3.0
検討7(a)/7(b)	Li ₂ Mn _{1/2} Ti _{1/2} O ₂ F	320	0.70	Si	1,007/ 4,197	0.24/ 1	3.0
検討8(a)/8(b)	LiNi _{0.5} Mn _{1.5} O ₄	135	0.92	Si	1,007/ 4,197	0.24/ 1	4.25
検討9	S	1,508	0.9	金属Li	2,895	0.75	2.15

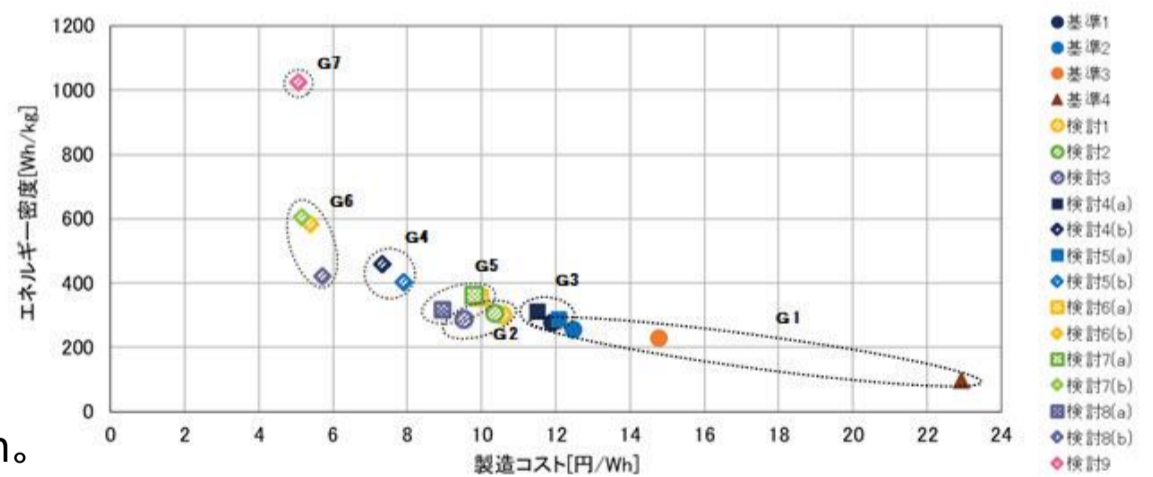


図2 評価用電池(基準1～4、検討1～9)の製造コストと重量エネルギー密度の関係(グループ分け)

- * G1～G7のグループ分け(括弧内は表1の区分)
- G1: 従来正極活物質/従来黒鉛負極 (基準1～4)
- G2: 次世代正極活物質/従来黒鉛負極 (検討1～3)
- G3 (将来2L): 従来正極活物質/ Si 負極 (検討4a、5a)
- G4 (将来2H): 従来正極活物質/ Si 負極 (検討4b、5b)
- G5 (将来3L): 次世代正極活物質/Si 負極 (検討6a、7a、8a)
- G6 (将来3H): 次世代正極活物質/Si 負極 (検討6b、7b、8b)
- G7 (将来4): S正極活物質/金属Li 負極の評価用電池 (検討9)

[1] Naoaki Yabuuchi et al, "Origin of stabilization and destabilization in solid-state redox reaction of oxide ions for lithium-ion batteries", Nature Communications, vol.7, no.13814, 2016.
 [2] Jinhyuk Lee et al., "Reversible Mn²⁺/Mn⁴⁺ double redox in lithium-excess cathode materials", Nature, vol.556, p.185-190, 2018.
 [3] "リチウムイオン電池活物質の開発と電極材料技術", サイエンス&テクノロジー, p.42-52,2014.
 [4] 電気化学会 電池技術委員会編, "電池ハンドブック", オーム社, p. 410-413, 201
 [5] LCS, イノベーション政策立案のための提案書, "蓄電池システム (Vol.6) ", 平成31年2月

通信トラヒックの推移およびCovid-19 緊急事態宣言のもとでのテレワークの影響の定量的分析

概要

脱炭素社会の実現に向けICTの役割は重要になっているが、その発展は電力消費の急激な増大につながる。ただ、今日の情報トラヒックの増加がどのような需要でもたらされたかという消費側からの接近はまだ限られていることから、本提案書では、通信トラヒック需要の増大に関する既存統計からの分析等を行った。結果として、①通信トラヒック増大は動画配信需要の拡大や通信の価格低下が大きな要因であること、②ICT導入による生産性向上は大企業で顕著であること、③Covid-19 緊急事態宣言により広まったテレワークにより通信トラヒック量が増えるが、自動車通勤短縮によりCO₂排出が減少することなどが明らかになった。

政策立案のための提案

- Covid-19 の緊急事態宣言下、ICT 導入拡大による生産性向上が進む場（企業・学校）と進まない場の間で格差が広がった。国として、ICT 未普及の場に導入のインセンティブを与え、Industry4.0に見られる、資源調達・生産現場から販売管理への一貫した体制を構築することが重要な政策課題である。
- 2020年のCovid-19 による緊急事態宣言の発令は、ICT活用によるテレワークの導入として情報トラヒックを大きく増加させた。「働き方の変化」は通勤時間の短縮によるCO₂排出削減として「明るく豊かな低炭素社会」実現への寄与が期待できる。このようなICT導入による社会変化は今後も継続すると考えられ、インフラとしての情報ネットワーク整備と、これに伴う電力需要の拡大に対応が必要である。

1. 情報トラヒックの分析と予測

公表されているデータ[1]からトラヒックの成長率を推定したところ、2004年～2018年の年成長率は30.1%であり、特に2013年～2018年は急速に拡大した。主要因は動画配信サービス拡大、通信の価格低下が挙げられる。さらにトラヒック需要を情報コンテンツの需要から推計し、将来予測を行った(図1)。2030年まで急増するが、その後2050年に向かい、人口減少のため飽和していくと推定された。

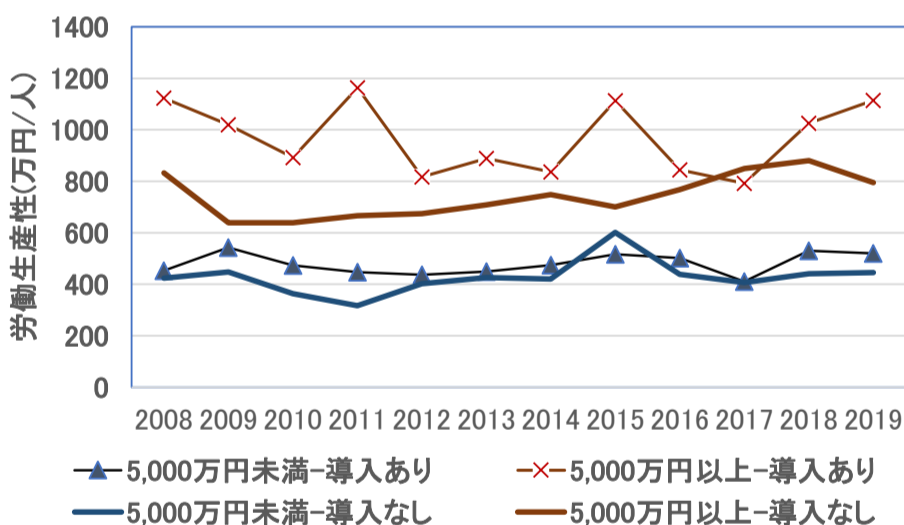


図2 IoT導入による生産性変化の推移—資本金規模別

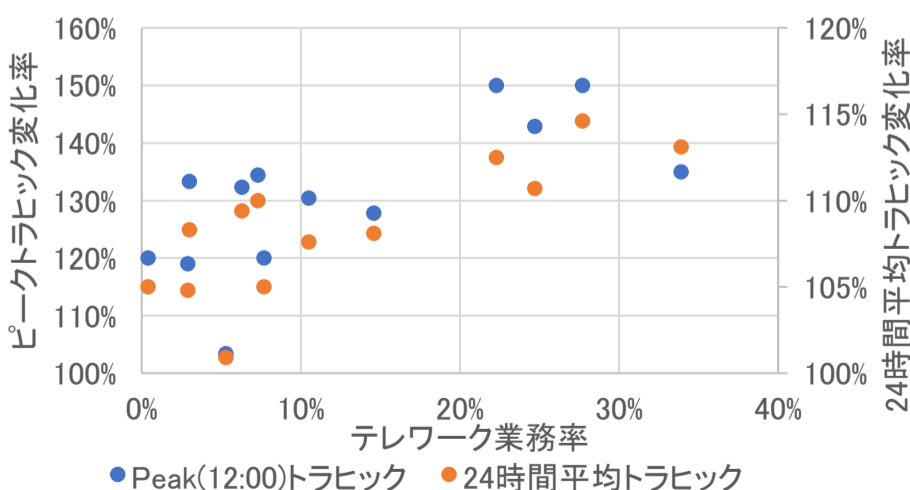
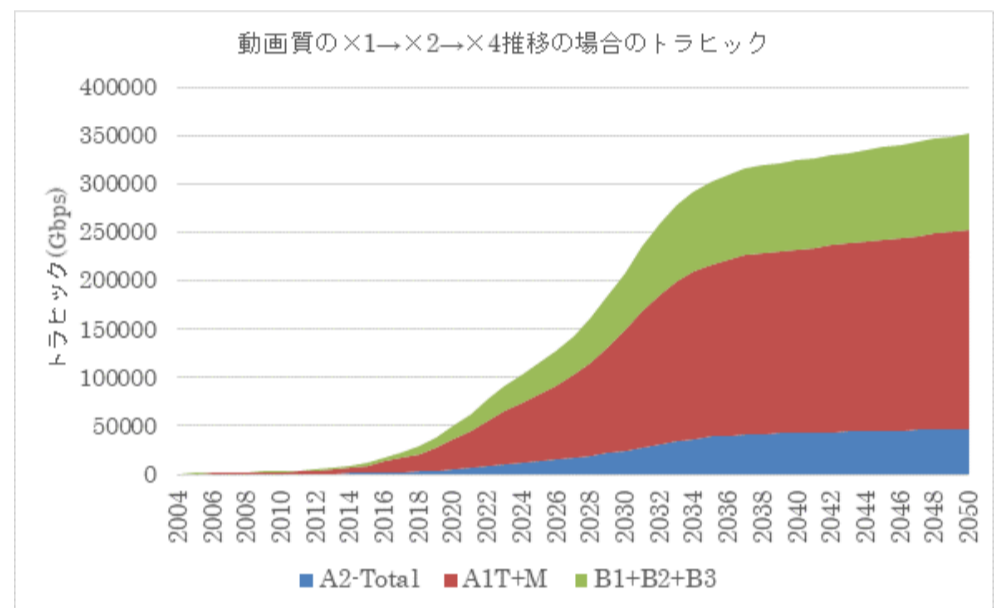


図3 テレワーク業務率とトラヒック増加率の関係



A1T+M:ISP 5 社の固定線+移動体通信のトラヒック
 A2:その他専用線等の契約者のトラヒック
 B1:国内主要IXと交換されるトラヒック
 B2:国内で交換されるトラヒック
 B3:国外で交換されるトラヒック

図1 動画質の×1→×2→×4推移の場合の将来の通信トラヒック推定値

2. ICTの生産性への影響

ICTの利用の導入実績と生産性への効果を総務省のアンケート調査[2]によりまとめた。企業規模別のIoT導入による生産性変化の推移(図2)では、ほぼ全期間でIoT導入により生産性が向上していることが分かった。特に資本金5000万円以上の大企業で、20～30%の生産性改善が実現できると解釈できた。

3. Covid-19 緊急事態下のテレワークの影響

テレワークはコロナ禍において急速に注目が高まり、都市部で多くの企業が導入した。その実態調査の一つ[3]とNTTのトラヒック変化[4]により、テレワーク業務率を10%増やすと、1日平均のトラヒックが2.8%増加、ピークトラヒックは8.2%の増加となることが分かった(図3)。一方、テレワークが削減した自動車通勤はガソリン消費は減少し、CO₂の削減効果ももつことが確認された。

[1]総務省, “我が国のインターネットにおけるトラヒックの集計・試算”,

https://www.soumu.go.jp/joho_tsusin/eidsystem/market01_05_03.html, アクセス日2020.11.26)

[2]総務省, “通信利用動向調査(企業編)”, <https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/statistics/statistics05a.html>, (アクセス日2020.7.27)

[3]パーソル総研, “新型コロナウイルス対策によるテレワークへの影響に関する緊急調査”, 2回, <https://rc.persol-group.co.jp/news/202004170001.html>, (アクセス日2020.6.19)

[4]NTT 東日本, “ネットワークのトラヒックについて(バックナンバー)”, https://www.ntt-east.co.jp/aboutus/traffic/20200414/#area_traffic, (アクセス日2020.7.8)

自家用自動車からのCO₂排出量の要因の分析評価

概要

本提案書では、自家用自動車の走行からのCO₂排出量年次変化を燃費性能、保有台数、走行距離の3つの要因に分けて分析した。その結果、2002～16年のCO₂排出の減少トレンドは、燃費性能の向上が一定のCO₂排出削減効果を示し、保有台数増加効果を相殺しながら、走行距離の変動を含めて全体として説明することができた。一方、耐用年数分析の結果からは、買い換えまでの期間が長くなっていることが分かった。このことは製造時のCO₂排出量の減少がライフサイクル全体の削減に寄与しているため、CO₂排出削減の観点からは合理的といえる。また、ユーザーの車両選択モデルからは、消費者の燃費性能に関する満足度が飽和に近づいている可能性が示された。

政策立案のための提案

- 従来の走行時のCO₂排出削減を対象としたエコカー普及策に加えて、製造時のCO₂排出削減を動機付ける政策が望ましい。年間走行距離の短いユーザーにとっては低燃費車への買換えが必ずしもライフサイクル全体のCO₂排出削減に寄与しないので、経年で重課となる自動車税制の改訂も検討の余地がある。
- 低燃費車の普及による、走行距離の増加のリバウンドに起因するCO₂排出量を削減するために、低燃費車への車両の更新だけでなく、燃料課税のような走行時の規制が必要である。
- 消費者の嗜好変化について、近年燃費性能への嗜好が経年的に低下しているトレンドが見られる。政策の効果予測するためには、消費者の嗜好の変化を視野に入れて政策をデザインすることが有効である。

1. 自動車の走行からのCO₂排出量の要因分解

2002～16年のCO₂排出量の年次変化について、燃費、走行距離、保有台数のそれぞれの寄与に分解した(図1)。CO₂排出量は概ね減少傾向で、特に2000年代で大きい。燃費改善が年50～100万トンの排出削減に寄与しているが、一方で保有台数の伸びは排出増加要因になっている。

2. 車両の耐用年数分析

近年のデータより、2,000 cc以下の排気量帯では耐用年数が伸びており、車両の更新による燃費改善のCO₂排出削減効果が相殺される。一方耐用年数が長くなることは、車両製造時のCO₂排出量を減らすことでライフサイクル全体のCO₂排出量の減少に寄与する。小型の燃費性能の優れた車両へ更新しつつ長く使用をすることが必要である。一方で低燃費車両の購入により走行距離が増加し、CO₂排出が増加するリバウンドの存在が示唆された。

3. 車両選択モデル

ユーザーの車両選択を、効用理論に基づいて開発したモデルにより分析した。燃費への嗜好が徐々に低下する一方、燃費に対してポジティブに捉える消費者が依然支配的だった。

4. 自家用自動車からのCO₂排出量のトレンド

車両製造時のCO₂排出量に走行時CO₂排出量を加え、車両全体のCO₂排出量を算出した。さらに2016年までの実績に加え、2017～30年の排出量を線形外挿により推計した(図2)。パリ協定の排出削減目標年である2030年での、自家用車排出量の2013年比削減率は38%程度と推察される。運輸全体のパリ協定削減目標は2013年比で28%なので、自家用車は目標の達成に寄与が大きいといえる。

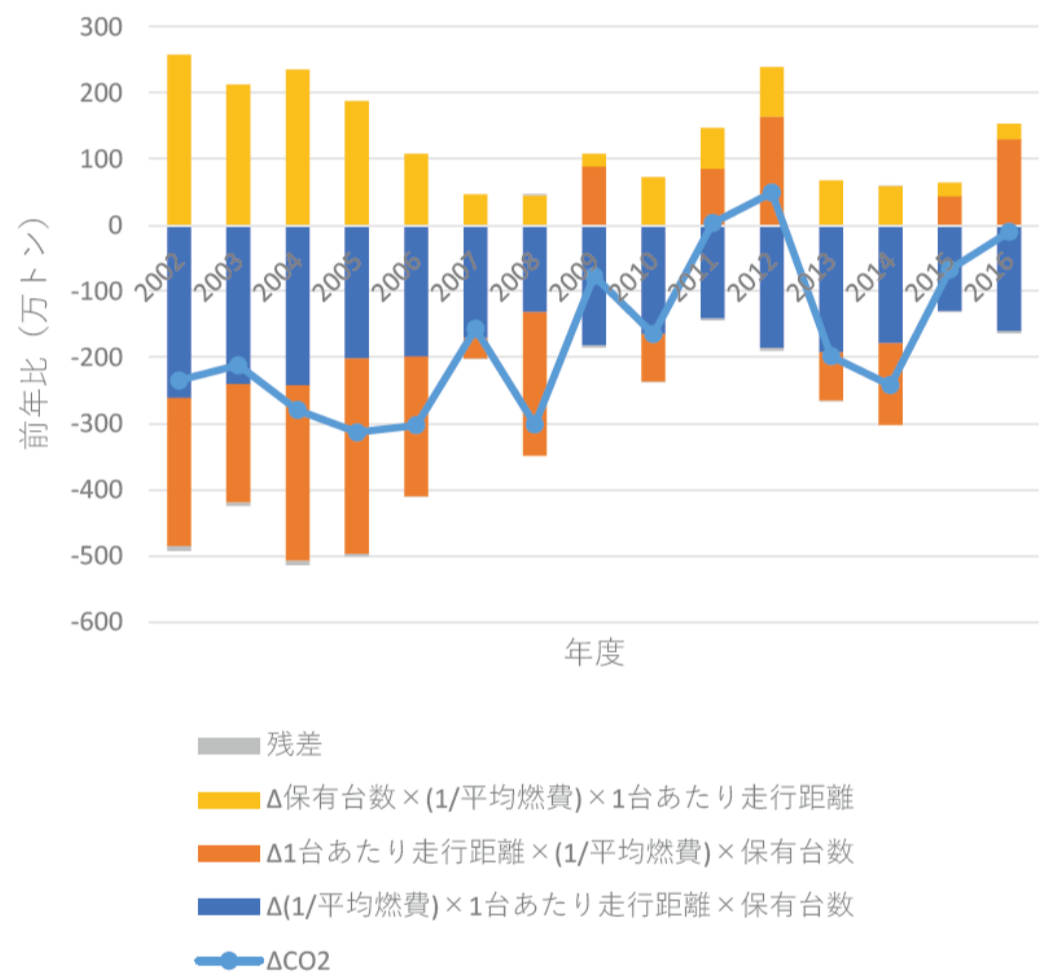


図1 自家用自動車からのCO₂排出量の要因分解

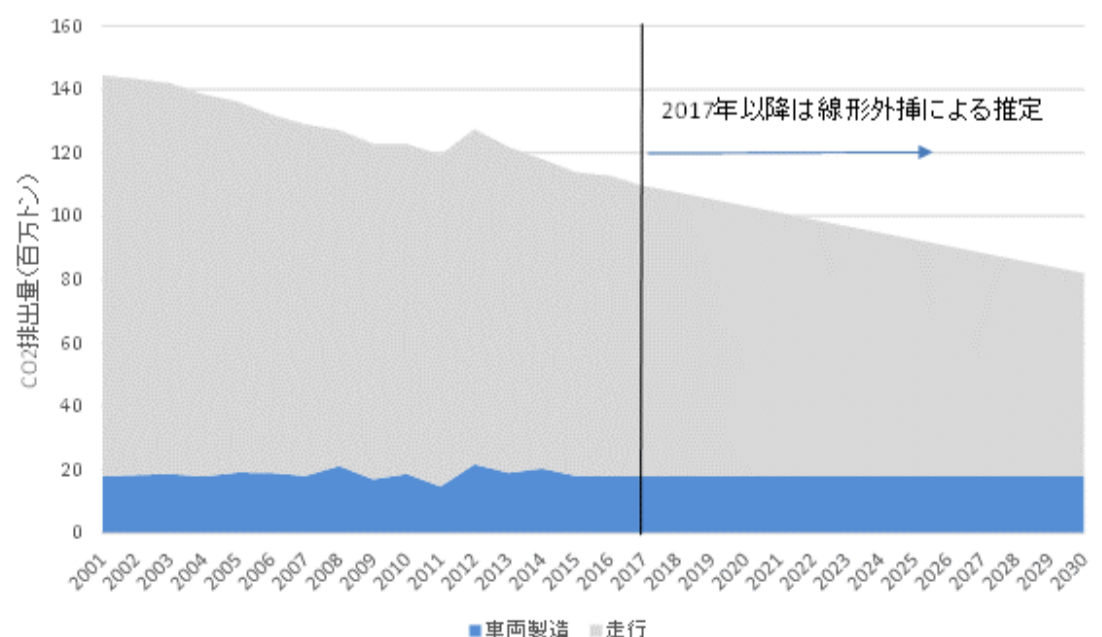


図2 自家用自動車の車両製造と走行におけるCO₂排出量の経年推移

次々世代ワイドギャップ半導体 酸化ガリウムの デバイス実用化へ向けた技術的課題の調査 (Vol.2) - 酸化ガリウム単結晶のエネルギーバンドダイアグラムの調査 -

概要

次々世代のワイドギャップ半導体デバイスとして注目される酸化ガリウム (Ga_2O_3) は、近年、高品質な結晶の入手が可能になった。この提案書では、 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 単結晶表面に紫外線光電子分光法を用い、 Ga_2O_3 MOS キャパシタのエネルギーバンドダイアグラムを明確化した。さらに実作したキャパシタの界面固定電荷密度 (N_{int}) を実験により推定、 1000°C のアニール時間1hr以上で、 N_{int} は $\sim 1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ と抑えられたことが分かった。これらによって、バンドダイアグラムを正確に把握することが、デバイス特性評価に重要な役割を持つことを示した。

政策立案のための提案

- 今回 Ga_2O_3 のエネルギーバンドダイアグラムを把握し、デバイス特性の評価を行った。得られた界面固定電荷密度 (N_{int}) などは、デバイスプロセスの検討に必要な知見となるだけでなく、デバイス動作の正しい予測やデバイス設計においても不可欠なパラメーターである。
- 次々世代半導体デバイス技術構築のためには、デバイス動作実証だけを加速するのではなく、半導体材料の性質に対する技術者・研究者間の知識基盤を整備するための、バンド構造などの基礎物性や、反応性などの化学的性質を把握するための基礎研究を充実させていくことが重要である。

1. $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ のUPSによる電子構造解明
近年の大面積ウェハ成長技術から得られた $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3(001)$ ウェハに対して紫外線光電子スペクトル (UPS) を用いた分析を行った (図1)。UPSの低運動エネルギー端 (cut-off)、高運動エネルギー端 (価電子帯上端) それぞれをスペクトルの直線近似から求めたところ、cut-offは3.5 eV、価電子帯は16.5 eV に観察され、真空準位からみた価電子帯上端のエネルギー E_V が $8.15 \pm 0.02 \text{ eV}$ と推定された。 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ のバンドギャップは4.7~4.8 eVであることから[1]、伝導帯下端のエネルギー準位 E_C は真空準位から3.4~3.5 eV の深さと推定された。

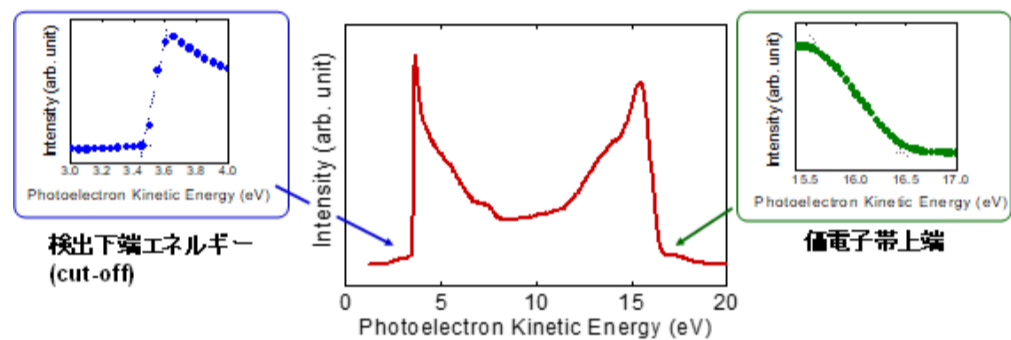


図1 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3(001)$ ウェハ表面のUPSと検出下端付近 (左) および価電子帯上端付近 (右) の拡大図

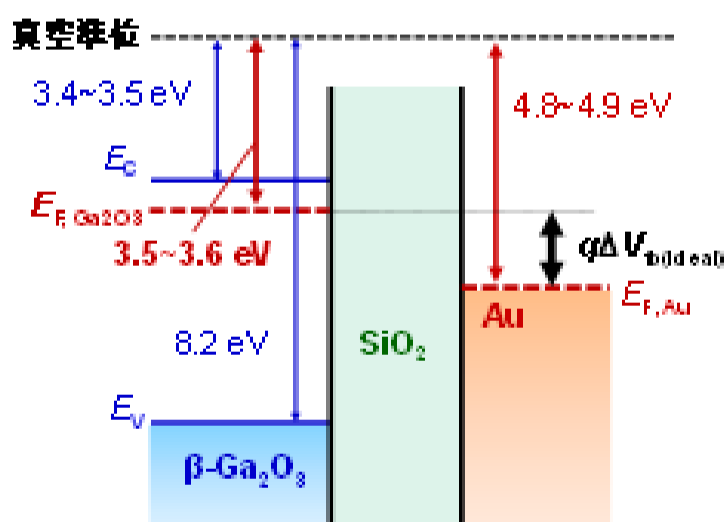


図2 真空準位を基準とした $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3(001)$ ウェハおよび作製したMOSキャパシタのバンドダイアグラム

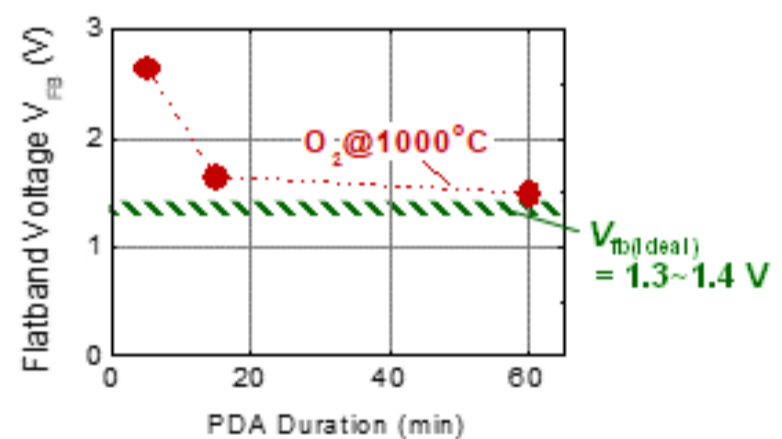


図3 Au / SiO_2 (膜厚 $\sim 30 \text{ nm}$) / $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ MOS キャパシタの V_{fb} と O_2 アニール時間の関係

2. フェルミレベル推定によるデバイス特性再検証

一方フェルミレベル $E_{F, \text{Ga}_2\text{O}_3}$ と E_C の差は計算により0.1 eVと求められ、本実験で用いた $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3(001)$ エピタキシャル膜のフェルミレベル $E_{F, \text{Ga}_2\text{O}_3}$ は、真空準位から3.5~3.6 eV の深さと推定された。これらを図示したバンドダイアグラムは図2 のようになった。

最後に試作したMOS キャパシタのC-V 特性から界面固定電荷密度 (N_{int}) を算出した。 1000°C での O_2 アニール時間を5 min から1 hr まで変えて作製したAu/ SiO_2 (膜厚 $\sim 30 \text{ nm}$) / $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ MOSキャパシタを用い、フラットバンド電圧 (V_{fb}) を計測した (図3)。 $E_{F, \text{Ga}_2\text{O}_3}$ を用いて推定した理想値 ($V_{\text{fb(ideal)}}$) からの V_{fb} のシフトに基づいて推定した N_{int} の密度は、アニール時間を1hrとすると $\sim 1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ と小さく抑えられた。試作したMOS キャパシタにおいて、 1000°C のアニールが界面固定電荷の低減に効果的なことが明確となった。

[1] S. J. Pearton, J. Yang, P. H. Cary, F. Ren, J. Kim, M. J. Tadjer, and M. A. Mastro, Appl. Phys. Rev. 5, 011301, 2018.

家庭部門の地域別消費構造と直接および間接的二氧化碳排出量の評価

概要

脱炭素社会の実現のために、家庭部門ではエネルギー消費による直接的な二氧化碳（CO₂）排出に加え、食品や住居など、消費財の製造段階での間接的なCO₂排出にも着目する必要がある。家庭のCO₂排出量について、直接的排出量を地域別に、間接的排出量を消費品目単位に把握し、さらに結果を2030年に延長して予測分析を行った。2015年に比べ直接分では減少となる一方、間接分を含めると増加となった。地域的には大都市および周辺で増加、他地域、特に東北地方で減少の傾向が見られた。消費の地域性を考慮し直接分・間接分双方のCO₂排出削減を進める、産業全体の包括的な温暖化政策を講じていくことが必要である。

政策立案のための提案

- 経済水準を維持しつつ脱炭素化を図るには、高コストでも低炭素排出となる消費への移行を容易にするために、収入の低い層への補助を厚くした制度設計とすることが望ましい。
- 家庭部門の消費額、CO₂排出量には年間収入の他に地域性が影響しており、日本全国一律ではなく地域を考慮した制度が必要である。また家庭部門の消費活動によるCO₂排出の削減であっても発電部門、家庭部門だけでなく、産業部門への波及も大きく、効率的なCO₂排出削減を図る必要がある。
- 以上から効率的な政策立案には特に需要側に空間的な分布を考慮した調査と評価を進めることを提案する。

1. 二酸化炭素排出量の推計結果

全国消費実態調査[1]の品目別データを用いて重回帰分析を行い、2030年の家計の消費額を推定した。さらにその推定額をもとに家庭部門の消費によるCO₂排出量を算出した。その結果2030年の直接分のCO₂排出量は2015年に比べて約10.2%減少したのに対し、直接分+間接分は1.3%増加となった。また直接分+間接分二酸化炭素排出量の上位品目（表1）[2]、都道府県別のエネルギー関連4品目の直接分+間接分CO₂排出量変化割合を求めた（図1）。CO₂排出量の増減を燃料種の項目で見ると、「石油製品」と「都市ガス」の世帯当たりCO₂排出量で大都市及び周辺では増加、東北地方では「石油製品」、「都市ガス」で減少しており、明確に地域性がみられた。

2. 将来推計シナリオ分析

将来のシナリオ分析を、電源CO₂削減や電化の観点から3ケースに分けて行った。CO₂排出量の47都道府県合計の値をこれら3ケースについて比較した(表2)。

表1 直接分+間接分二酸化炭素排出量の上位品目

2015年上位品目	CO ₂ 排出量 (万t-CO ₂)	2030年上位品目	CO ₂ 排出量 (万t-CO ₂)
電気代	20,121.5	電気代	19,320.6
ガソリン	7,306.8	ガソリン	5,999.8
都市ガス	3,753.5	都市ガス	3,899.1
プロパンガス	2,561.0	プロパンガス	2,033.3
食事代	1,133.5	食事代	1,356.4
灯油	999.3	自動車購入	964.9
上下水道料	723.1	修繕・維持工事費	962.3
世帯主こづかい	639.3	世帯主こづかい	779.1
贈与金	609.5	贈与金	634.4
自動車購入	570.9	上下水道料	625.1

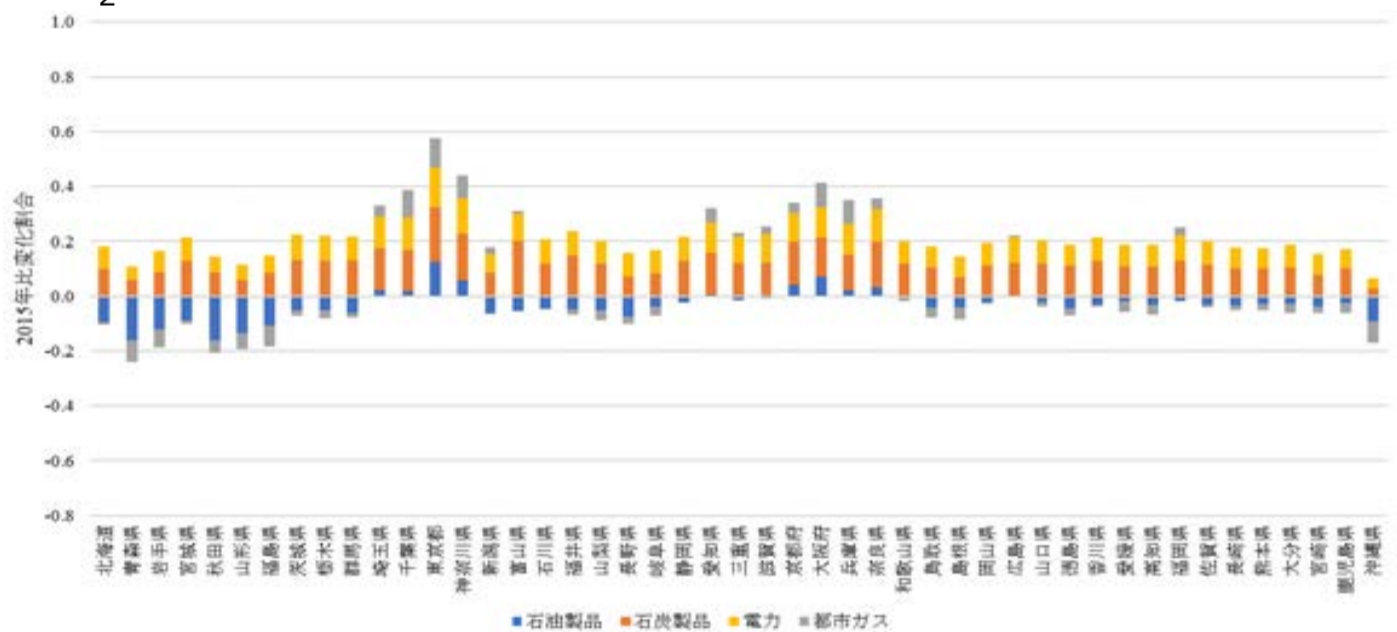


図1 2030年世帯当たり直接分+間接分二酸化炭素排出量の2015年比変化割合

表2 各シナリオ二酸化炭素排出量

	CO ₂ 排出量合計 (万t-CO ₂)	
	直接分	直接分+間接分
2015年値	20,897	35,639
2030年値	18,771	36,111
ケース1 (電源CO ₂ 70%削減)	11,922	23,071
ケース2 (電化)	16,178	35,557
ケース3 (電源CO ₂ 70%削減+電化)	5,908	18,781

- ケース1:電力消費によるCO₂排出は70%削減させることができるとの予測に基づき、電力のCO₂排出係数を70%低減させたもの
- ケース2:「都市ガス」と「灯油」の100%電化を含め、ガソリン車から電気自動車 (EV) への転換も想定し「ガソリン」の100%電化を含めたもの
- ケース3:ケース1+ケース2。

ケース2の電化のみでは、直接分は2015年値から約23%の削減となるが、間接分を含めると削減は約0.2%にとどまった。電源のCO₂排出が70%削減されたケース3では直接分は71.7%、直接分+間接分は47.3%の削減となった。さらなる電化として、自動車の電動化や電源構成における再生可能エネルギーの進展など、LCSで検討中の産業全体の構造的変化により家庭部門のCO₂排出はさらに大きく変化すると考えられる。

[1] 総務省, “全国消費実態調査”, <https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1&toukei=00200564> (アクセス日2020年9月12日)。
 [2] 総務省, “平成27年(2015年)産業連関表”, <https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1&layout=datalist&toukei=00200603&tstat=000001130583&cycle=0&year=20150&month=0> (アクセス日2020年8月24日)。
<https://www.jst.go.jp/lcs/pdf/fy2020-pp-12.pdf>

木材生産流通フローモデルに基づく木材生産・流通費用削減対策効果の検討

概要

持続性のある木質バイオマスシステムを構築するには、地域内での森林資源利用拡大が重要であり、そのための対策として、施業のICT化・機械化、流通のスマート化などが考えられる。各対策の効果を、システムダイナミクスを用いたフローモデルにより分析した。その結果、約40ha以上の森林調査においてICT技術が森林調査費用を削減すること、生産における機械化の導入が労働生産性を約1.4倍に改善すること、流通スマート化の導入が機械化導入に比べ0.5倍～1倍の経済効果があることが分かった。これら対策の導入が林家を経済的に自立させ、ひいては森林バイオマス資源の利用拡大・安定供給を促すと考えられる。

政策立案のための提案

- 日本の森林行政は山林所有の権利を守る制度設計になっているが、欧州のように権利に対して責任を問う制度[1]が必要である。所有構造を明確にし、集約化を進める対策は引き続き重要である。
- 林家の木材生産・流通費用削減対策として、施業の集約化（及び大型機械導入による生産効率向上）と、需給マッチングに基づく流通スマート化は、ともに同じくらい重要である。特にスマート化推進のために、安価で高齢者等でも使いやすい需給マッチングシステムを開発し、普及させることが必要である。

1. 木材生産流通フローモデル

林業における調査・生産（伐採）・木材流通等の工程をシステムダイナミクスソフトウェアVensimを用いて図式化した（図1）。本フロー図に内包する式とパラメータを地域の条件に応じて設定し、各要素が林家の年間利益に与える影響を分析することができる。

2. 各工程モデルの設定

1.で示した木材生産流通各工程のうち、今回取り上げた生産、流通などの工程を定量評価するにあたり、以下のフローモデルを設定した。

(1)木材生産工程：生産に必要な機械化を採用したモデル。(2)木材流通工程：木材の需給をマッチングさせ、流通の一部を木材市場を通さないで製材工場へと直送させる「スマート化」を採用したモデル。中間業者の費用・木材市場手数料などのコストを抑えることができる。

3. ケーススタディ

2.で設定した条件を用いて、三重県津市全域を管轄地域とする中勢森林組合(林野庁・優秀取組事例)を対象にケーススタディを行い各モデルの効果を検証した。機械化についての設定は表1を用い[2]、流通スマート化については現状流通（製材工場への直送無し）、6割直送、全て直送の3パターンを設定した。伐採量1m³あたりの年間収支シミュレーションを行った結果（図2）、機械化の導入は、労働生産性を約1.4倍（5→7.06（m³/人日））に改善し、スマート化は機械化の半分～同程度のコスト削減効果があることが分かった。

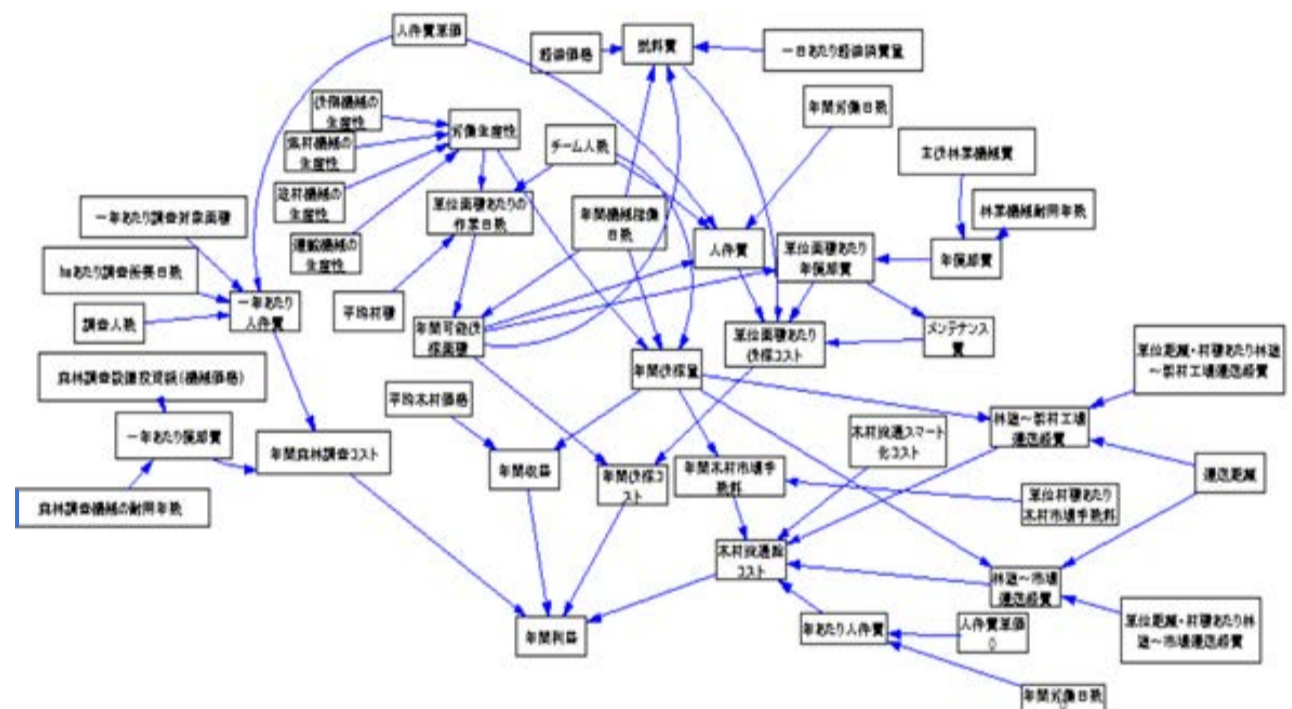


図1 木材生産流通フローモデルの全体図

表1 各林業機械化シナリオの使用機器設定

	伐倒工程	集材工程	造材工程	搬出工程
機械化前	チェーンソー		機械導入なし	
機械化1	チェーンソー	機械導入なし	プロセッサ	フォワーダ
機械化2	チェーンソー	グラブ		

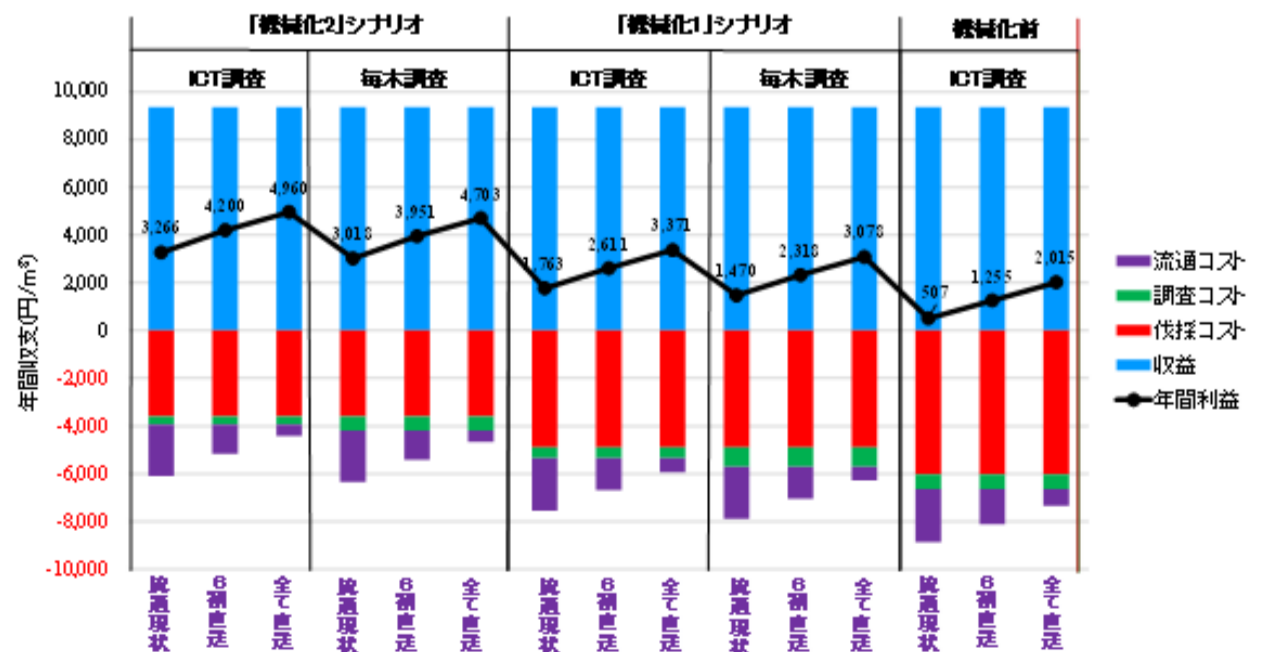


図2 シミュレーション結果（1 m³あたり）

[1]石井寛, “フランス, ドイツ, 日本の森林政策の展開とその特徴”, 林業経済研究, Vol.39, No.1, pp.3-12, 2003.

[2]林野庁ホームページ, “平成30年度林業機械化推進事例の紹介”, <https://www.rinya.maff.go.jp/j/kaihatu/kikai/attach/pdf/30jirei-1.pdf> (アクセス日2021年3月30日)。

電気自動車を活用した負荷周波数制御の 通信遅延補償のための制御方式の提案

概要

再生可能電源の出力は気象条件によって変動するため、系統への大量連系により系統電力における周波数の安定性に深刻な懸念が生じている。本提案書*)では、周波数制御の領域において有力な解決策と考えられている電気自動車 (EV) の負荷調整力の向上を目的に、EV アグリゲータ (以下EVA) が通信遅延を補償するため、リアルタイムの周波数偏差を用いてEV を直接制御する制御方式を提案する[1]。動的シミュレーションにより評価を行った結果、提案の制御方式により、EVA のパフォーマンススコアが向上し、同時に周波数変動を低減できることが分かった。日本における周波数調整市場開設予定の2024 年以降に、EVA による負荷周波数制御が採用される可能性が示唆された。

政策立案のための提案

- 周波数調整市場の制度設計については、先行する欧米諸国のPJM やCAISO をはじめとした制度の長所・欠点を分析し、わが国として、EVA の参入障壁を低くするとともに、周波数制御の安定性を維持するバランスを考慮した制度設計を行う必要がある。
- 現在想定されている日本の周波数調整市場の最低入札量は5 MWであり、米国のPJMの0.1MWに対し大きい。市場が成熟するまでは、最低入札量をPJM 並みに小さくすることは、今後のEV の調整力市場への参加のためには重要な施策であると考えられる。

1. シミュレーションモデル

EVAによる負荷周波数制御システムのシミュレーションモデルは、AGC30モデルに基づいて検討した[2]。システム負荷は比較的軽微で、かつ、太陽光発電や風力発電といった再生可能電源は系統に接続されているという設定を適用した(図1)。

2. EVAによる負荷周波数制御方式の設計

今回の提案制御方式では、受信した負荷周波数制御(LFC) 指令の履歴データおよび周波数偏差の履歴データに基づいてパラメータを調整し、系統から計測されるリアルタイムの周波数偏差に基づいてEV の周波数を制御する。制御方式全体のロジック(図2)はシンプルで、各EV の充放電制御システムに搭載することも可能であると考えられる。

3. シミュレーション結果

定周波数制御 (FFC) 方式が用いられている系統において、2.の提案制御方式を適用した場合の性能の向上余地についてシミュレーションを行って検討した。PJM では、市場における各周波数調整リソースが、どの程度素早くLFC 指令に追従できたか、過去の実績を評価してパフォーマンススコアを算出しており[4]、本提案書もパフォーマンススコアをPJM の方式に近い方法で計算した(図3)。各々の遅延時間(横軸)において、演算周期 t_p の値に関わらず、補償を行わなかった場合と比べてパフォーマンスは向上していることが分かった。

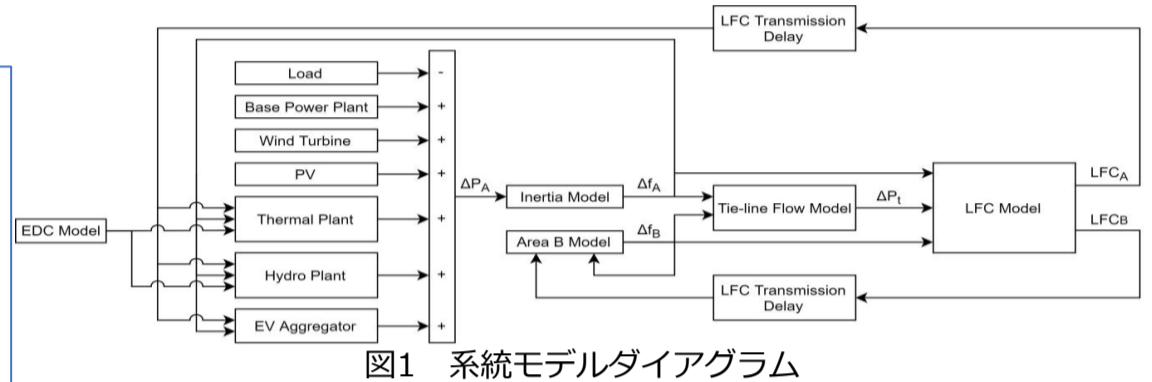


図1 システムモデルダイアグラム

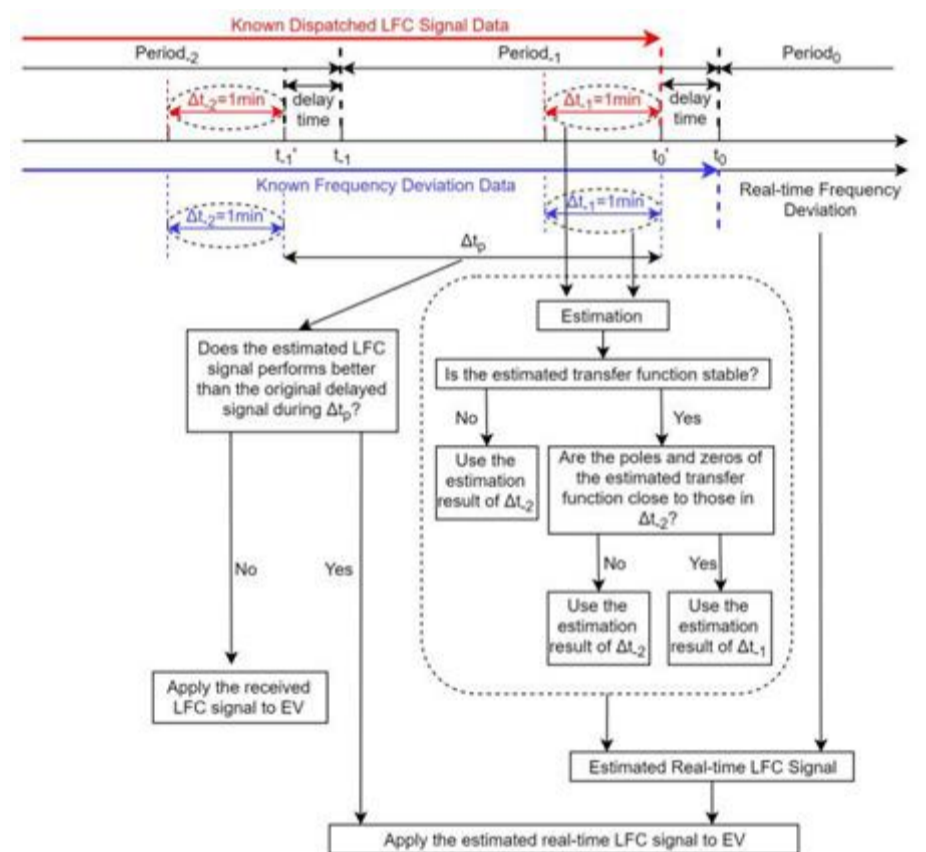


図2 提案システムにおける制御構造

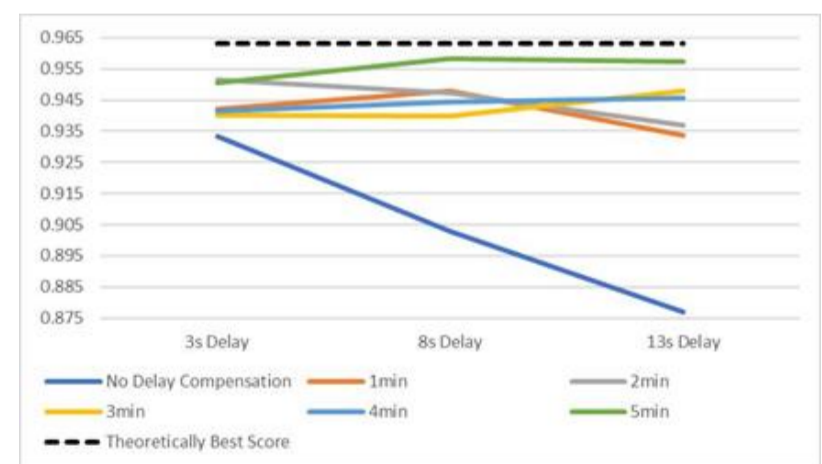


図3 パフォーマンススコア
(1分から5分までの数字は演算周期 (tp))

*) 本提案書は、著者らの英文論文[1] の内容を元にして、低炭素社会の実現につながる政策への含意、さらには政策提案につなげたものである。

[1] Sinan Cai and Ryuji Matsuhashi, "A Control Method for Compensating Communication Delays in Load Frequency Control with Electric Vehicle Aggregators", Journal of Society for Energy and Resources, Vol.41, No. 1, pp. 1-10, 2020, https://doi.org/10.24778/jjser.41.1_1.

[2] 電力需給解析モデル標準化調査専門委員会；電気学会技術報告第1386号，2016

[3] 電力系統における常時及び緊急時の負荷周波数制御調査専門委員会，“電力系統における常時及び緊急時の負荷周波数制御”，電気学会技術報告，869号(2012)，pp.1-147.

[4] PJM manual 12, "Balancing operations", Revisions:39, 2019.

石炭ガス化ならびに天然ガスリフォーミングによる 水素製造の経済性とCO₂ 排出量

—ゼロカーボン社会に向けての国内CO₂ 貯留場所確保の重要性—

概要

石炭ガス化及び天然ガスのスチームリフォーミング(SMR)による水素製造プロセスにおいて、アミン吸収プロセスを設置し、CO₂ 捕集率を90 ~ 99.5%の範囲で変えた場合のコストとCO₂ 負荷排出量について検討した。さらにDAC (Direct Air Capture) を組み合わせることでゼロカーボン (ZC) を実現した場合のZC水素コストと必要なCO₂ 貯留量を、プラントの海外立地と国内立地に分けて求めた。海外でのCO₂ 貯留条件がそのまま国内に適合可能であれば、ZC水素コストはプラント国内立地の方が海外立地に比べて低くなること分かった。即ち国内での貯留について、技術確立と場所の確保が重要である。

政策立案のための提案

■ ZC 社会の実現に向けては、最終的にはDAC プロセスの開発が必須であるが、それと共に国内立地の場合CO₂ の捕集と貯留の国内での実施が必要で、貯留技術と共に貯留場所を探索確保する研究開発の推進が求められる。

1. ZC水素製造のプロセス

水素製造の検討ケース(表1) それぞれについて、エネルギー使用量、機器仕様、製造コストならびにCO₂ 負荷などを検討した。図1 に石炭ガス化水素製造プロセスのブロック図を、図2 に天然ガスのスチームリフォーミングによる水素製造プロセスのブロック図を示す[1-3]。捕集したCO₂ の貯留場所については、製造プラントの近傍を前提とした。また、ZC達成のためにアミンユニットでの未吸収CO₂ 分並びに製造設備に起因するCO₂ 分の捕集の必要があり、DACプロセスを適用した。なお、水素製造は、25.7トン/時(年産20万トン規模)で設計した。

表1 検討ケースの設定内容

	原料	製造プラント立地条件
Aケース	石炭	海外
Bケース	天然ガス	海外
Cケース	石炭	国内
Dケース	天然ガス	国内

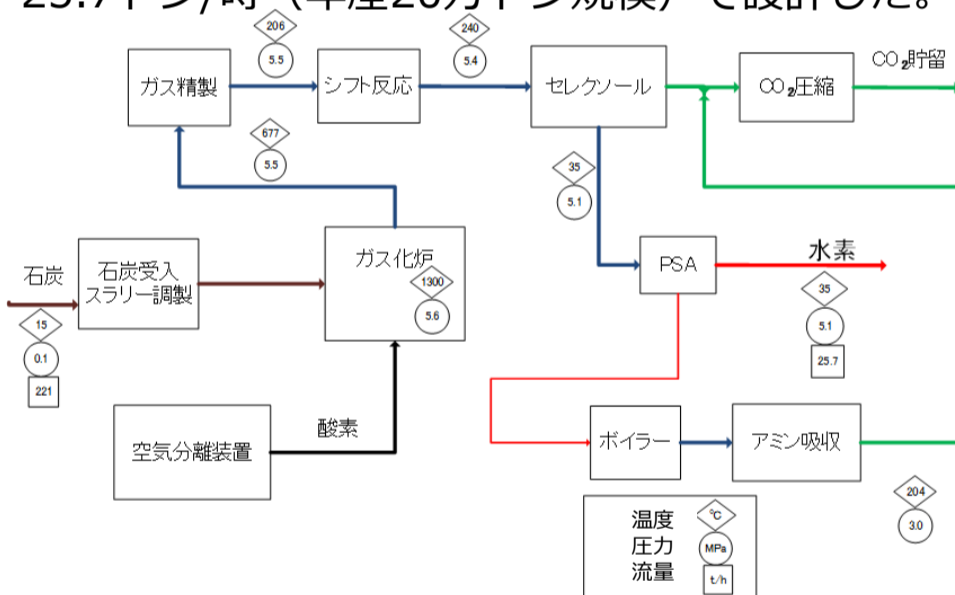


図1 石炭ガス化水素製造プロセスのブロック図

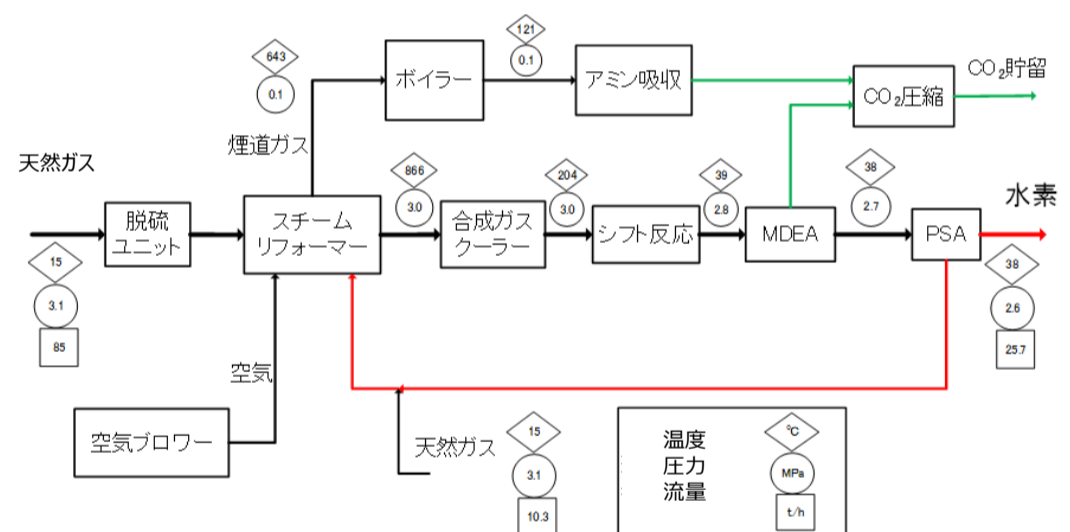


図2 天然ガスのスチームリフォーミングによる水素製造プロセスのブロック図

表2 結果まとめ

ケース	原料	立地	製造プラントでのCCS捕集率 (%)	水素製造コスト (円/MJ)	輸送コスト (円/MJ)	DACコスト (円/MJ)	国内発電所でのZC水素コスト (円/MJ)	CCS貯留量(Mt/y)	DACS貯留量(kt/y)
A	石炭	海外	90~99.5	2.2~2.4	3.7	1.0~0.4	6.9~6.4	3.6~4.0	587~218
B	天然ガス	海外		1.2~1.3	3.7	0.7~0.4	5.6~5.3	1.8~2.0	399~214
C	石炭	国内		2.1~2.2	-	0.6~0.1	2.7~2.3	Aと同じ	407~38
D	天然ガス	国内		2.8~2.9	-	0.3~0.03	3.1~2.9	Bと同じ	210~23

2. 各ケースの水素製造コストとCO₂ 貯留量

各ケースのコスト、CO₂ 貯留量を求めた結果を表2に示す。製造プラントと共に捕集したCO₂ の貯留を国内立地とし、原料を石炭と天然ガスとしたC,Dケースの国内発電所でのZC水素コストは、製造・貯留を海外立地としたAケース、Bケースより低い。但し国内に場所を確保すべきCCS貯留量はAケース、Bケースの場合は表2における「DACS貯留量」分、Cケース、Dケースの場合は「CCS貯留量」と「DACS貯留量」を合わせたものとなる。

[1] LCS, イノベーション政策立案のための提案書, “石炭ガス化による水素, アンモニアの経済性とCO₂ 排出量—石炭ガス化 (CCS を含む) による水素, アンモニア製造・物流システムの比較検討—”, 科学技術振興機構低炭素社会戦略センター, 平成31年2月。

[2] LCS, イノベーション政策立案のための提案書, “CCS (二酸化炭素回収貯留) の概要と展望—CO₂ 分離回収技術の評価と課題—”, 平成28年3月。

[3] Assessment of Hydrogen Production with CO₂ Capture Volume 1: Baseline State-of-the-Art Plants”, August 30, 2010 DOE/NETL-2010/1434.

炭素電極を用いたペロブスカイト太陽電池に関する提案 (Vol.3)

概要

炭素電極を用いたペロブスカイト太陽電池は研究が進んでいるが、まだ課題も多い。低コストで高安定性を有する電子伝導材の炭素（カーボンナノチューブ）電極のみをホール輸送層（HTM）/Au電極の代わりに用いた研究や、炭素に官能基を導入して電池の再現性・安定性を向上させた研究の調査結果をまとめた。ペロブスカイト膜に添加物を加える方法や、ペロブスカイトの組成を制御する方法は有効であり、すでに17%以上の効率が報告されている[1] ことが分かった。さらに、ペロブスカイト太陽電池の高効率・高耐久・低コスト化には、ペロブスカイト膜と電極との強固な接合界面形成が鍵であることも明らかになった。

政策立案のための提案

炭素電極を用いたペロブスカイト太陽電池の、以下の課題を解決する研究を進める必要がある。

■ペロブスカイト膜の欠陥制御

光励起されたキャリアからの光電流をより多く得るには、キャリアをトラップする欠陥の制御が不可欠。添加物による欠陥の不活性化やペロブスカイト膜の構造最適化が有力な手段となる。

■ペロブスカイト材料と炭素材料の接合の最適化

HTMフリー炭素電極については、ホール収集率の観点から、HTMに代って炭素電極への電子移動を遮断する材料や構造の検討が必要である。

■高耐久化のメカニズムの検討

HTM/金電極では金原子やHTMのドーパントの拡散による劣化、炭素電極では炭素の剥離などによる劣化が課題であり、これらの現象を定量的に検討することが重要である。さらに、通常の安定性ではなく、常に流動的なペロブスカイトの特徴に沿ったセル構成の検討が必要である。

今回の調査で以下1.~3.の内容が明らかになった。

1.ペロブスカイト層の改良技術

近年市販のカーボンペーストを太陽電池に用いた研究が数多く報告されており、ペロブスカイト膜の改良などにより、効率が14~17%と高いものが得られると報告されている([2]他)。ペロブスカイト層は多くの欠陥構造を持つと考えられるが、欠陥形成を抑えるには、添加物による欠陥のパシベーション手法がよく使われている。これらの添加物はハロゲン結合などの相互作用で、欠陥構造に由来するトラップを不活性化した結果、光励起したキャリアの寿命を伸ばすと考えられる。また、添加物を使わずに、MAPbI₃と炭素の間にペロブスカイト材料であるMAPbI_xBr_{3-x}を挿入することによっても効率の向上が見られた[1]。

2.ペロブスカイト/炭素電極の接合技術

炭素電極を用いた場合、不安定な有機HTMの代わりに無機HTM（CuSCN）を試みた研究で効率17.58%が得られた[4]。HTMなし・ありの炭素電極を用いたペロブスカイト太陽電池のエネルギー準位を図示すると（図1）、HTM導入により炭素電極への励起電子の流れがブロックされるだけでなく、HTMのHOMO準位がペロブスカイトに近いいため、ホール移動もスムーズになる可能性がある。

3.炭素の構造制御技術

炭素の改質に着目した結果、酸素官能基（-COOHなど）を付与したカーボンナノチューブを電極に用いることで、PbI₂薄膜ペロブスカイト膜と強い相互作用を持つことが可能となることが分かった。イオンが容易に拡散できるペロブスカイト結晶が再構成されることによって、初期の効率が3%程度のもので長期間放置をすることで膜も接合界面の質も自然に向上し（図2）、11%以上の効率に収束する。上記のペロブスカイト層やペロブスカイト/炭素電極の接合の改良に加え、炭素電極の構造制御も効率と耐久性を高めるために不可欠である。

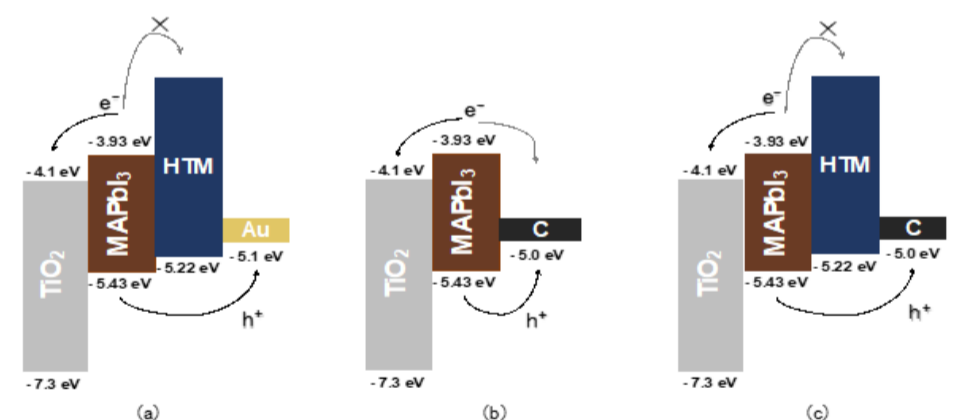


図1 セルを構成する材料のエネルギー準位

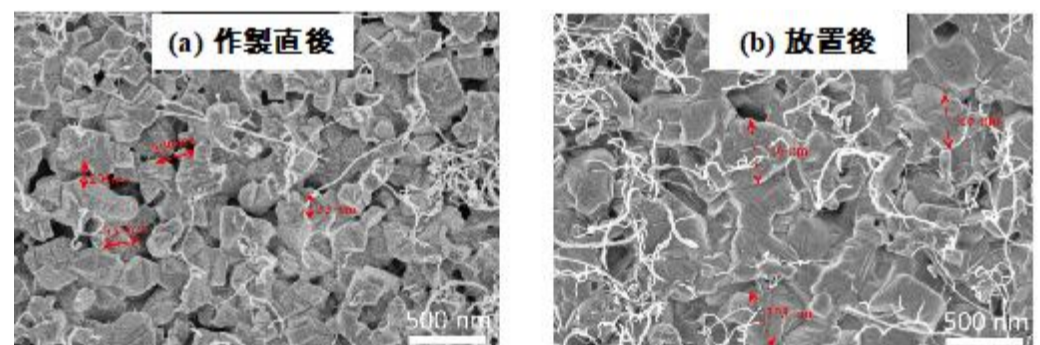


図2 酸素官能基を含む炭素電極を用いたセルにおけるペロブスカイト膜の表面の電子顕微鏡写真[3] (a)作製直後 (b) 放置後

[1] Liu, J. et al. (2019). In situ growth of perovskite stacking layers for high-efficiency carbon-based hole conductor free perovskite solar cells. *Journal of Materials Chemistry A*, 7(22), 13777-13786.

[2] Liu, C. et al. (2021). Improving the Performance of Perovskite Solar Cells via a Novel Additive of N, 1-Fluoroformamidinium Iodide with Electronwithdrawing Fluorine Group. *Advanced Functional Materials*, 2010603.

[3] Chen, J. et al. (2019). MAPbI₃ Self-Recrystallization Induced Performance Improvement for Oxygen-Containing Functional Groups Decorated Carbon Nanotube-Based Perovskite Solar Cells. *Solar RRL*, 3(12), 1900302.

[4] Wu, X. et al. (2019), Efficient and stable carbon-based perovskite solar cells enabled by the inorganic interface of CuSCN and carbon nanotubes. *Journal of Materials Chemistry A*, 7(19), 12236-12243.

ゼロカーボン電源システムの安定化と技術・経済性評価 (Vol.2)

– 2050年のゼロカーボン電源に向けたシナリオ解析 –

概要

2030年および2050年において経済的な電力を供給する、低炭素およびゼロカーボン電源（ZC電源）構成を、電源モデルを用いたシミュレーションにより検討した。その結果2030年の発電燃料由来CO₂（燃料CO₂）排出量を2013年比で50%削減する場合は電力需要1,700TWh/y程度まで、70%削減では1,400 TWh/y程度まで現在の電力コスト水準以下で供給できることが分かった。さらに2050年には電力需要が1,600 TWh/yであっても、ZC電源構成が経済的に構築できた。また、設備投資の解析により、2030年の燃料CO₂削減率を高めることで、2021～2029年の新規設備投資総額を20～40兆円程度増加できることが分かった。

表1 本提案書での電源構成モデル計算条件

ケース	A	B	C	D	E
年	2030				2050
コスト水準[年]	2025				2030
発電燃料由来CO ₂ 削減[%] (2013年比)	36		50	70	100
慣性力比率下限[%]	25	50	25		25
電力需要上限[TWh/y]*	2,125	2,055	1,705	1,385	2,770
LNG発電	有				無
原子力発電	有**		無		無
石炭火力発電	有		無		無
PVポテンシャル[GW]	693				1,386
陸上風力発電ポテンシャル[GW]	262				262
洋上風力発電(着床)ポテンシャル[GW]	0				95
洋上風力発電(浮体)ポテンシャル[GW]	0				538
バイオマス発電賦存量[TWh/y]	34				40
新揚水発電ポテンシャル[GW]	0				282
高温岩体発電ポテンシャル[GW]	0				21.7
NH ₃ タービン	無				有
地域間送電網強化	無				有

*各ケースのCO₂削減および慣性力制約にて達成できる電力需要の上限 (5 TWh/h刻みで確認)
**一部、無で計算

政策立案のための提案

- ZC電源達成のために今後太陽光発電（PV）、風力発電が主力になり市場規模も拡大していく。今後の国内市場の拡大を見据えたPV、風車の戦略的な産業育成が重要である。
- 蓄電池に関しても大きな需要が見込まれる一方で、リチウムイオン電池でLi資源枯渇による価格高騰も予測されるため、Liの安価で効率的なリサイクル技術、新たな蓄電技術の推進とともに、大規模な蓄電システムを実現するための政策の推進が求められる。

表2 代表的な電源構成の発電量とコスト

ケース	A						C			D			E			
年	2018						2030						2050			
燃料由来CO ₂ 排出量削減率 (2013年比)	36%						50%			70%			100%			
電力需要[TWh/y]	1,107	1,000	1,200	1,600	1,900	1,900**	1,000	1,200	1,600	1,000	1,200	1,385	1,000	1,600	2,000	
発電量[TWh/y]	原子力	62	0	0	0	149	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	石炭	924	237	138	0	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	既設LNG	—	110	277	376	355	356	285	292	251	238	230	199	—	—	
	新設LNG	—	273	337	559	580	580	443	440	480	204	210	240	—	—	
	水力	78	92	92	92	92	92	92	92	92	92	92	92	92	92	
	太陽光	65	299	373	536	636	656	214	393	648	401	579	671	491	1,142	1,363
	風力(陸上)	11	29	35	119	186	296	0	36	221	119	165	284	443	558	558
	風力(洋上)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	66	214	569
	地熱	2	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	111	111	111
	木質バイオマス	20	0	0	0	0	21	0	0	0	0	0	28	53	50	35
合計	1,162	1,050	1,262	1,693	2,008	2,010	1,044	1,263	1,702	1,064	1,287	1,525	1,256	2,166	2,727	
蓄電池利用量[TWh/y]	蓄電池	—	72	90	132	177	209	10	83	240	140	249	297	176	385	423
	揚水	10	0	0	0	0	2	0	0	1	0	1	8	93	247	370
	NH ₃ タービン	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	11	32	35
蓄電池設備容量[GWh]	—	265	316	463	618	822	141	313	865	500	889	1,145	521	1,211	1,357	
発電コスト[円/kWh]	13.9	10.0	10.3	10.9	11.4	11.6	10.7	10.7	11.6	11.4	12.0	13.0	13.0	15.0	16.6	
送電費用[円/kWh]	1.0	0.6	0.7	0.6	0.6	0.7	0.5	0.6	0.7	0.7	0.8	0.8	1.6	2.0	1.9	

*石油等も含む
**原子力発電稼働不可として計算

表3 2050年までの電源構成シナリオ

シナリオ	ケース		電力需要 [TWh/y]		燃料CO ₂ 排出削減 [%-2013年]	
	2030年	2050年	2030年	2050年	2030年	2050年
1	A	E	1,000	1,000	36	100
2	C				50	
3	D		70			
4	A		36			
5	C		50			
6	D		70			

表4 2021～2049年の新規設備投資額[兆円]

シナリオ	1	2	3	4	5	6	
2021～2029年	LNG	12	14	9	15	15	12
	太陽光	20	14	28	26	27	41
	風力	2	0	12	3	3	18
	蓄電池	6	3	11	7	7	19
	その他	0	0	0	0	0	0
	小計額	41	31	60	51	53	91
2030～2049年	LNG	0	0	0	0	0	0
	太陽光	24	24	24	56	56	56
	風力	40	40	40	64	64	64
	蓄電池	10	9	11	22	22	25
	その他	31	31	31	53	53	53
	小計額	104	104	105	194	194	197
合計額	145	135	166	245	247	288	

1. 電源構成と電力コスト計算

全国各地域での、季節ごとの代表日の1時間ごとの電力需要を入力値とし、発電コストが最小となる電源構成を線形計画法により求めた。電源モデル計算条件を表1に、各ケースの代表的な電力需要のもとでの電源構成の内訳とコストを表2に示す。2030年では、すべてのケースで2018年の電力コスト(13.9円/kWh [1])を下回った。2050年は送電費用を含めると、電力需要1,000TWh/yで2018年と同程度の15円/kWhとなった。

2. 設備投資、CO₂排出量の変遷

表2の電源構成に基づいた、新規設備投資額および

2050年までのCO₂排出量を、電力需要と燃料CO₂排出量削減率を組合わせて想定したシナリオごとに計算した(表3)。2049年までの設備投資総額を比較すると(表4)、2030年の燃料CO₂排出量を70%削減するシナリオ(3,6)の設備投資総額が、燃料CO₂排出量36%削減のシナリオ(1,4)の約1.1～1.2倍程度となった。CO₂排出量削減を増やすことで、関連の市場が大きく活性化されることが分かった。また想定したシナリオでは、2050年には燃料CO₂排出はゼロとしているが、設備建設に伴うCO₂(建設CO₂)排出は残留する結果となった。ZC電源の実現に向け、建設CO₂を抑制する産業面での技術開発がより重要になることが示された。

[1] LCS, イノベーション政策立案のための提案書, “ゼロカーボン電源システムの安定化と技術・経済性評価 (Vol.1)”, 科学技術振興機構 低炭素社会戦略センター, 令和2年3月.

CO₂ 化学吸収液の直接水熱処理による有機物合成

概要

CO₂ 排出削減のための省エネルギーかつ低コストな二酸化炭素回収利用技術 (CCU) の確立を目指し、直接水熱処理による有機物合成を提案し、実験により効果を検証した。このプロセスでは、炭酸アルカリ吸収液を用いたCO₂ 吸収と、高温高压条件下でCO₂ と水を還元剤と触媒存在下で反応させる直接水熱処理を組み合わせ、ギ酸などの有機化合物の合成と、吸収液の再生を同時に行う。予備的な実験として、重炭酸カリウム水溶液を用い、それを触媒と還元剤とともに水熱処理したところ、炭酸アルカリ吸収液を100%循環利用することは困難であったが、ギ酸収率32.7%、再生率77.8%を得ることができた。

政策立案のための提案

今後の検討として、以下の研究を進める必要がある。

- 吸収液が100%循環利用できないことを考慮し、CO₂ 吸収と組合わせた合成プロセスを設計する。
- 生成したギ酸の回収、酸化された還元剤の再生についても検討する。その上で、投入エネルギー、CO₂ 排出量の評価を行い、CCU プロセスとしての実現可能性を評価する。
- 本プロセスでは還元剤としてFe粉末を使用した。再エネ由来H₂を還元剤として用いた場合とのコスト比較を行う必要がある。また、Feを消費する代わりにギ酸と水素を生成することによる付加価値の向上も加味し、経済的観点からも本提案プロセスの他のCCU プロセスに対する優位性を検討・提案していく。

1. 提案プロセスの内容

一般的なCCU プロセスを図1に示す。課題としては、吸収液を再生する際のエネルギー消費や、CO₂ の分離回収場所とCO₂ から有機物に変換する場所への輸送エネルギー・コストが大きいことがあげられる。水熱処理による有機物合成技術のプロセス(図2)では吸収液再生と有機物合成を同時に行うため、プロセスとCO₂ 輸送に必要なエネルギー・コストの面で有利であると考えられる。

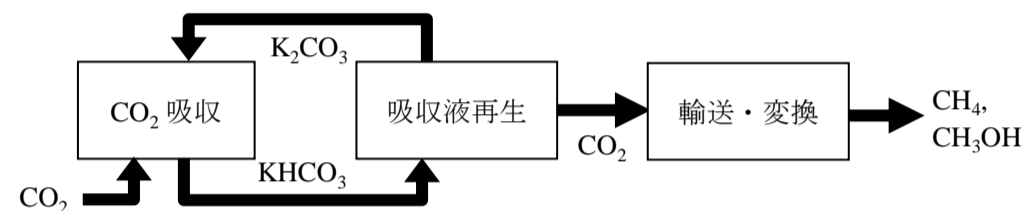


図1 化学吸収を用いた従来のCCUプロセス

2. CO₂化学吸収液の水熱処理に関する検討

化学吸収液としてK₂CO₃ 水溶液を用いた場合のCO₂ との反応は式(1)で表される。これを高温に加熱、あるいは減圧し、CO₂ を放散させ、純度の高いCO₂ を回収して吸収液を再生する(式(2))。さらにCO₂ を金属により還元すれば、ギ酸などの有機物を生成できる(式(3))。本研究では、式(1)で生成されたKHCO₃ 水溶液を250℃以上の高温高压下で水熱処理し、吸収液をK₂CO₃ に再生し、有機物を合成する、すなわち(2)と(3)の反応を一段のプロセスとして行うことを提案した(式(4))。

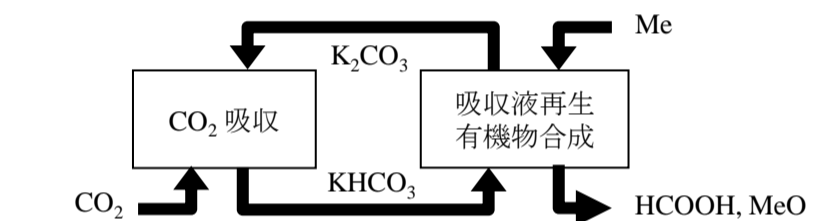
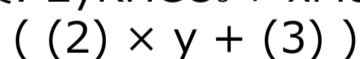
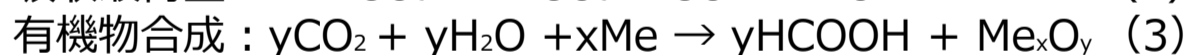
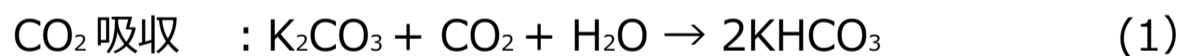


図2 化学吸収を用いた本研究の提案CCUプロセス (Me:金属)

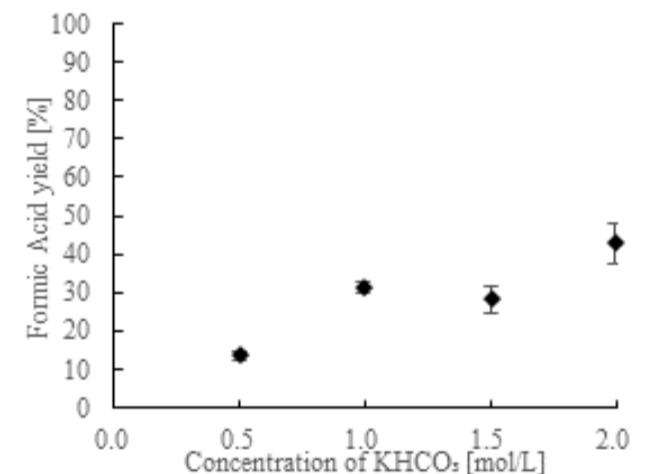


図3 KHCO₃濃度とギ酸収率の関係 (エラーバーは標準偏差を表す)

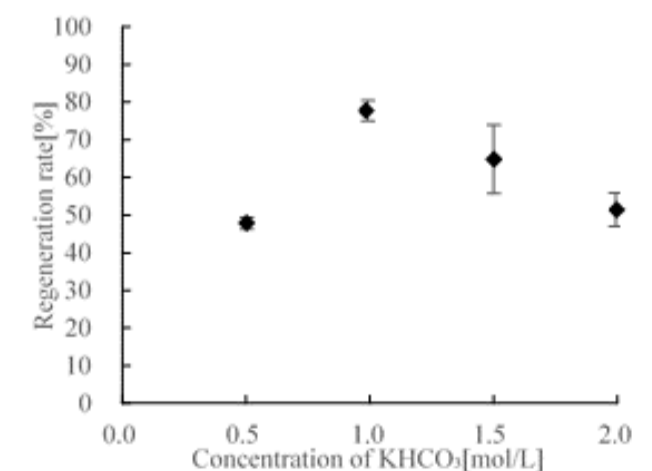


図4 KHCO₃濃度と吸収液再生率の関係 (エラーバーは標準偏差を表す)

2. 実験内容および結果と考察

実験ではCO₂源としてKHCO₃、還元剤としてFe、触媒としてNiを用いた。CO₂源濃度は化学吸収法に使用されている範囲の0.5~2.0 Mに変化させ、反応管を電氣管状炉内に挿入し、300℃で120分間反応させた。各条件で2回ずつ行い、各濃度におけるギ酸収率、吸収液再生率の平均値を求めた(図3,4)。

図3より、KHCO₃濃度の上昇に伴いギ酸の収率も上昇する傾向となり、1.0Mで収率32.7%であった。また図4より、KHCO₃濃度が0.5~1.0 Mにおいて再生率は上昇し、1.0 Mで極大値(78%)を取り、1.0~2.0 Mでは低下した。1.0Mまでの領域では、原料の重炭酸イオンの消費に対してCO₂の消費が速く、式(2)の反応が進行して再生率が上がり、一方1.0 Mより大きい領域では、CO₂の消費に比べHCO₃⁻の消費が速くなり、式(2)の平衡において炭酸イオンの量が減ることで、再生率が低下したと推測される。

*) 本提案書は著者らの学会発表[1]のデータを元に、政策立案に向けてまとめたものである。

[1] 环, 嶋田, 長田, 福長, 高橋, CO₂からのギ酸水熱合成における炭酸アルカリ吸収液の濃度の影響, 化学工学会 第52回秋季大会(岡山), 2021.

<https://www.jst.go.jp/lcs/pdf/fy2020-pp-18.pdf>

需要の構造変化に着目した産業連関モデルの拡張 (Vol.1)

－投入係数と資本係数の変化とモデル開発－

概要

低炭素社会からさらにゼロエミッション社会に至るには、既存設備の省エネルギー化や排出削減機器の付加のみならず、情報技術の活用を含む消費者側も巻き込んだ社会的な変化が必要と指摘されている。産業／家庭部門へのICT技術、EV等新型自動車導入とインフラ整備などの低炭素化への寄与に期待がある。本提案では、情報技術の導入や家庭部門の変化について、投資構造まで含めた産業連関分析モデルを構築し、2030年での産業の全体像評価の一例を計算した。この結果各産業のゼロエミッション化シナリオが導かれたが、社会経済シナリオの構築に向けて、石油製品、化学工業などプロセス系のゼロエミッション化評価をより詳細に調査し産業連関表の文脈に組み込む必要があることが示唆された。

政策立案のための提案

- ゼロエミッション化のためには様々な新技術オプションが社会に浸透する必要があることが分かったが、さらに2つの問題を指摘できる。
- 第一は既存設備のストックの変化と新設備の導入速度である。新設備導入を急ぐ必要がある場合はそのためのインセンティブを制度として与える必要がある。
- 第二は、新製品導入の波及効果の問題である。今回、原料としての石油製品投入は増加傾向にあった。これらは直ちにCO₂排出とはならないものの、最終処分の段階までに何らかの対策が必要となる。

1. 新技術オプションの産業連関分析への導入

現在LCSで進められている低炭素化を経てゼロエミッション社会に向けた社会経済の定量的シナリオ構築のプロセスに、表1に示した各技術課題導入の評価を行うための情報を付与する。ゼロエミッション化への中間段階である2030年に着目し、必要なデータを推計し、産業連関モデルに導入した。

2. 産業連関モデルの構築と試算

表1 技術オプションを産業連関モデルに接続のための必要情報

	投入係数	資本係数	最終消費	将来ストック	そのほか
① 消費者向け情報サービス			○		
② 企業向け情報サービス					(*)
③ 輸送サービス(MaaS)	○	○	○		
④ EV,PIHV等新型自動車	○	○	◎	○	
⑤ ゼロエネルギー住宅(ZEH)	△	○	◎	○	
⑥ 貨物自動車	○	○	◎	○	
⑦ 産業部門化石燃料最終消費	○				

各技術要素の2030年の投入係数、ストック予測、資本係数、最終消費等が描く全体像を定量的に評価するための産業連関モデルを構築し、図1の下方に示したScn-1～Scn-5の5つのシナリオの下で付加価値生産のシミュレーション計算を行い、情報サービス産業や新型自動車導入などの影響を見た。結果を表す図1によると、2030年まで情報技術による生産性向上のないScn-1、Scn-2では成長は資本蓄積のみによってなされるため、年率0.4%～0.5%の成長にとどまる。総務省調査に基づいたSaaS等情報技術による労働生産性改善を含めるScn-3、Scn-4、Scn-5では、15年間で約28%の増加となった。単価の高い新型自動車導入による乗用車部門の産出額上昇のほか、日本が競争力を持つ汎用機械、生産機械、産業用電気機器が成長している。電力消費では電力化により全体的には増加するが、化学工業では成長が大きく、電子機器産業ではむしろ低下がみられた。以上の予備的検討において、なおプロセス業の今後課題が残るものの、各産業のゼロエミッション化シナリオが示され、産業連関分析の特徴が活かされたといえる。

結果を表す図1によると、2030年まで情報技術による生産性向上のないScn-1、Scn-2では成長は資本蓄積のみによってなされるため、年率0.4%～0.5%の成長にとどまる。総務省調査に基づいたSaaS等情報技術による労働生産性改善を含めるScn-3、Scn-4、Scn-5では、15年間で約28%の増加となった。単価の高い新型自動車導入による乗用車部門の産出額上昇のほか、日本が競争力を持つ汎用機械、生産機械、産業用電気機器が成長している。電力消費では電力化により全体的には増加するが、化学工業では成長が大きく、電子機器産業ではむしろ低下がみられた。以上の予備的検討において、なおプロセス業の今後課題が残るものの、各産業のゼロエミッション化シナリオが示され、産業連関分析の特徴が活かされたといえる。

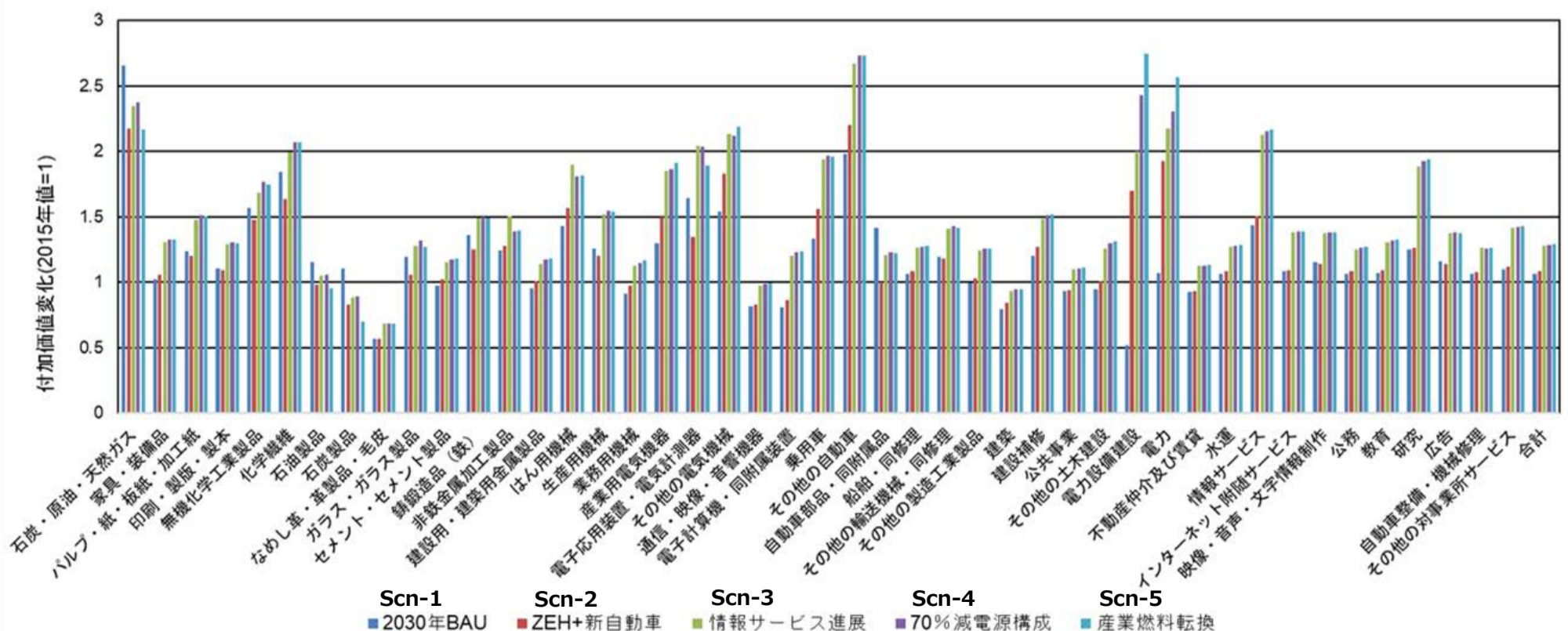


図1 部門別付加価値生産の2015年基準値からのケース別変化割合

地理情報や最新・将来技術の動向、影の影響を反映した、国内の太陽電池導入ポテンシャルの算出 —東京都内の解析—

概要

太陽光発電を、高需要で送電網が整備されている東京等都市圏へ最大限に導入促進するためには、建物に対する太陽光発電の導入ポテンシャルを算出することが重要である。壁面への導入を検討するために建物間の影の影響を定量化し、2030年の太陽電池の平均効率を25.5%、導入価格を12.8万円/kwとして推算した結果、東京都内の導入ポテンシャルは91.1 GW、年間発電量は79.5 TWhとなった。この発電量は2019年東京都の電力需要(83.6TWh) [1]をほぼ満たす。また太陽光発電効率の向上や、導入拡大の速度の変化に対する、導入ポテンシャルと累積導入量の変化を推算した結果、導入拡大が先行して発電効率向上が遅れると導入ポテンシャルが低下することが推算された。導入拡大に加え最大発電効率を向上する技術開発の重要性が示唆された。

政策立案のための提案

- 2030年に新設される太陽電池の効率を25%程度までの向上と仮定し、都内の住宅地等の壁面設置を組み合わせることで、電力需要の100%以上を確保できるポテンシャルがあることが分かった。したがって、2030,2050年に向けた太陽光発電の導入は挑戦的な目標設定が妥当である。
- 再生可能エネルギーの季節間の電力需給バランス確保が喫緊の課題となっていることから、太陽光発電の壁面への導入拡大を促進する必要があると考えられる。
- 太陽光発電では、太陽電池の変換効率の向上率、導入速度が最終的な導入ポテンシャルに影響することが分かったため、コストを維持した太陽電池の変換効率向上の研究開発を速やかに進めることが求められる。

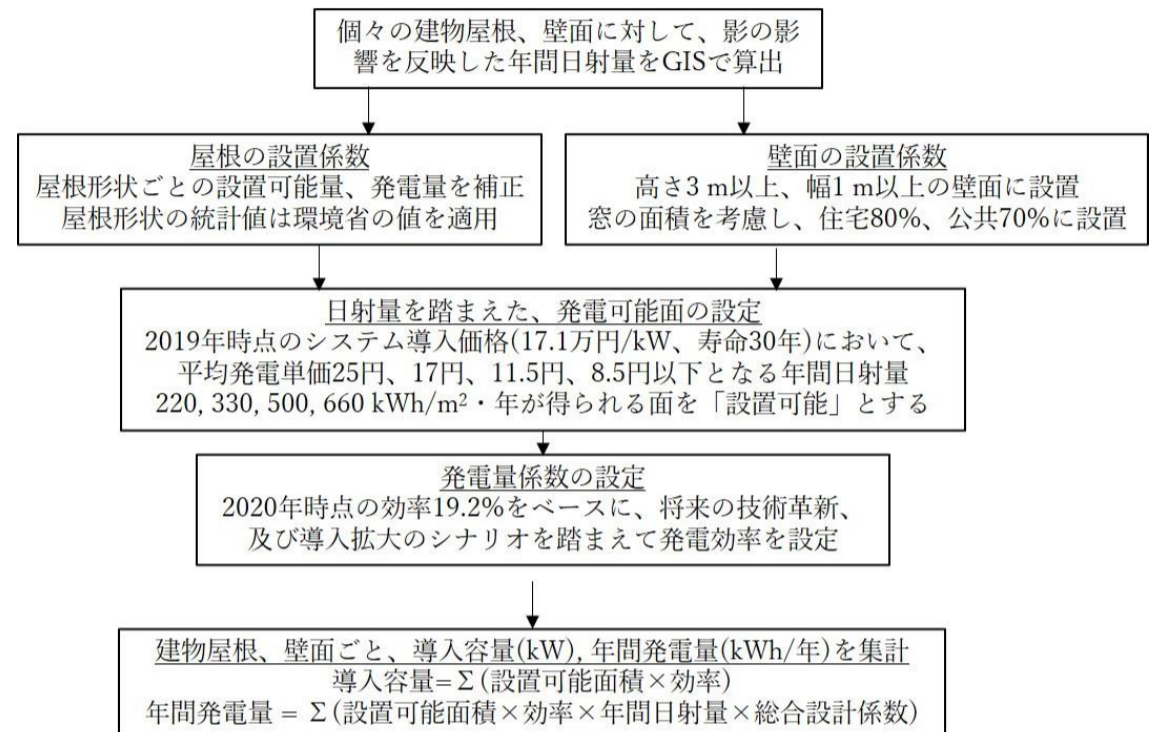


図1 導入ポテンシャル推算の概要

表1 東京都における、設置可能面積、総日射量及び導入ポテンシャル、年間発電量 (効率25.5%, (既設16.6%)に設定)

		総面積 [km ²]	設置可能面積 [km ²]	設置面総日射量 [TWh/年]	導入ポテンシャル[GW]	発電量 [TWh/年]
環境省	住宅系屋根	173.0	98.5	118.4	8.3	9.6
	住宅系壁面	-	-	-	-	-
	公共系屋根	46.6	36.0	32.2	2.6	2.36
	公共系壁面	-	6.7	7.4	0.49	0.54
本調査	住宅系屋根*	176.4+32.0	158.0	180.2	34.5	40.9
	住宅系壁面	257.7	122.7	66.1	27.5	14.8
	公共系屋根**	24.4+58.5	20.0+46.9	22.7+54.6	4.2+10.1	4.9+11.7
	公共系壁面	3.3+12	3.3+12.0	6.2+29.1	2.5+12.2	1.4+6.5

*環境省では屋根面積50 m²未満の家を除外 **公共施設(学校、工場等)+大規模建造物

1. 影の影響を考慮した太陽光発電導入ポテンシャルの算出

導入ポテンシャル推算 (図1) にあたって、東京都の各市区町村を計算範囲とし、壁面 (地上高さ3 m以上)、屋根 (屋根直上) を計算対象とした。年間15日ごとに、15分ごとの日射量を計算し、設置面の総日射量、発電効率25.5%と設定した時の総発電量等を推算した (表1)。設置可能な壁面への総日射量は、住宅系で屋根の0.35倍、公共系 (高層建築物等) で0.53倍、公共系 (学校、工場その他) で0.27倍となった。また東京都内の年間発電量は環境省推計値11.7 TWh[2]に対し79.5 TWhとなった。

2. 発電効率の向上及び導入拡大シナリオによる導入ポテンシャルの変化

技術開発 (発電量向上) シナリオと、導入拡大シナリオを複数設定し、それぞれによって導入ポテンシャルがどう変化するかを検討した (図2)。

導入拡大が加速されたケースにおいては、技術革新が遅いと効率が低いまま設置されるパネルの割合が多くなり、最終的に導入ポテンシャルが低下する。導入拡大が遅いケースではその影響は小さくなる一方、全体として導入が大きく遅れる。さらに、技術革新が低調になると、平均効率がさらに低下する、等のことが分かった。

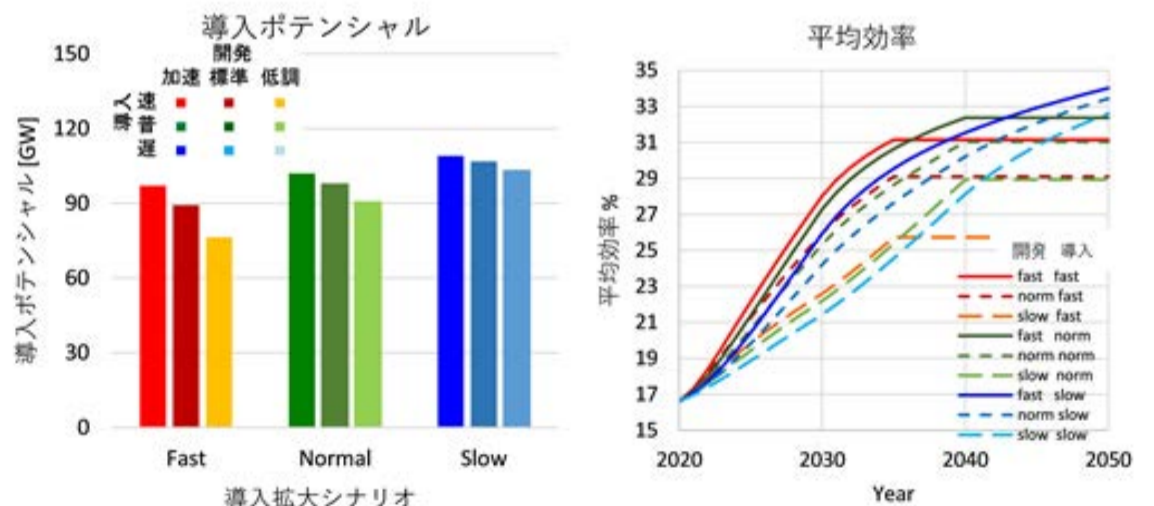


図2 (左)発電効率向上シナリオ、導入速度シナリオごとの導入ポテンシャル、(右)シナリオごとの、設置された太陽電池の平均効率

[1]資源エネルギー庁, 電力調査統計表(2019), https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/electric_power/ep002/results.html

[2]再生可能エネルギーに関するゾーニング基礎情報等の整備・公開等に関する委託業務報告書, 環境省 (令和元年度他)