



平成30年度 イノベーション政策立案のための提案書 概要集

国立研究開発法人科学技術振興機構 (JST)
低炭素社会戦略センター (LCS)

目次

技術開発編

3. 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
4. アンモニア直接燃焼によるガスタービンシステムの提言
5. 地熱発電 (Vol.5) —水圧破砕による誘発地震の低減に関する提言—
6. 固体酸化物形燃料電池システム (Vol.6) —セルデザインおよび新型燃料電池の包括的評価—
7. 蓄電池システム (Vol.6) —リチウムイオン電池のエネルギー密度向上の可能性と研究課題—
8. 酸化ガリウムの新規ワイドギャップ半導体としての電子デバイス応用へ向けた技術開発課題
9. 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
10. 造林コスト低減のためのコンテナ苗の活用
11. 「低炭素技術設計・評価プラットフォーム」による分析手法の提案 —設計型機能への展開—
12. 木質バイオマスエネルギーポテンシャルの地域分布 (Vol.2) —不均一に分布する人工林の伐採作業のコスト—
13. 小規模型カーボンフリーNH₃製造技術に向けた新規プロセスの提案
14. 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—
15. GaN系半導体デバイスの技術開発課題とその新しい応用の展望 (Vol.3) —市場規模と省エネルギー効果—
16. 太陽光発電システム (Vol.5) —定量的技術シナリオに基づく結晶系シリコン太陽電池とペロブスカイト型太陽電池のコスト低減技術評価—
17. 低炭素電源システムの安定化と技術・経済性評価 (Vol.3) —2050年の低炭素電源システムの技術開発課題—

技術普及編

18. 情報化社会の進展がエネルギー消費に与える影響 (Vol.1) —IT機器の消費電力の現状と将来予測—

社会システム編

19. 2020年東京五輪・パラリンピック「カーボンマイナスのための国民参加型プラットフォーム」の提案
20. 鉄リサイクルを利用した将来低炭素社会のための課題検討にむけて (Vol.2)
21. 東京都の消費活動に内包されるCO₂排出量の評価
22. 低炭素社会に向けた技術革新の影響評価のための動学エネルギー経済モデルの開発

国際戦略編

23. 世界の水需給評価

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

ペロブスカイト太陽電池において、低コストで高安定性を有する炭素電極のみを用いても高い効率を得られることが注目されている。本提案書では特にカーボンナノチューブの電極に着目し、研究の動向をまとめると共に、実験的に研究課題を検討した結果に基づいて提案を行った。

■炭素電極ペロブスカイト太陽電池研究動向調査

- ・最近の研究例を文献調査し、それぞれの作製法や効率などについて一覧表を作成し、炭素電極作製プロセスを模式図化した。

■多層カーボンナノチューブ (MWNT) 電極

- ・MWNTに熱処理や酸処理などで欠陥構造を導入し、エッジに官能基を形成させることで仕事関数の制御が可能であった[1]。

■酸処理MWNT (AMWNT) 電極

- ・AMWNT電極を用いた複数のセルについて抵抗の解析を行った結果と共に J_{sc} ¹⁾、 V_{oc} ²⁾、効率、FF³⁾を図1に示す。最も高効率を持つセルは、並列抵抗(シャントパスの抵抗) R_{SH} が最も大きく、直列抵抗 R_s が最も小さく、効率、あるいはFFは並列抵抗と強い相関があった。電極のキャリアを引き出す性能の優劣議論には、セル作製を工夫し、シャントパスをなくす必要がある。

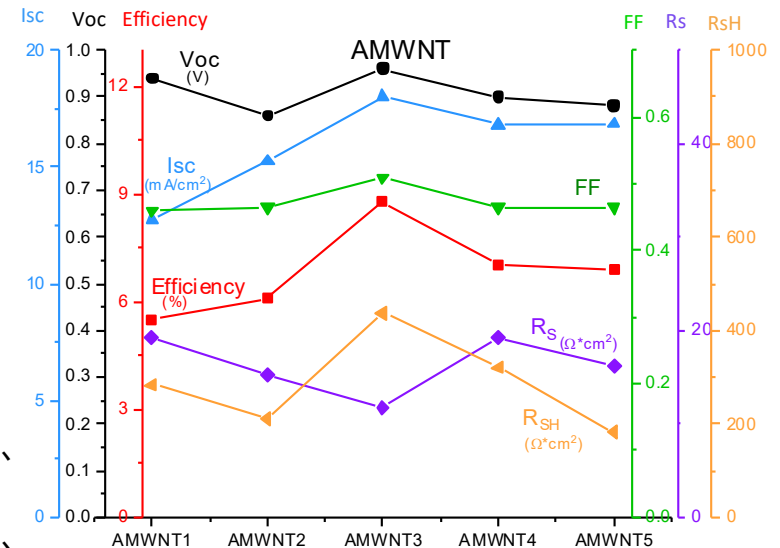


図1 酸処理したカーボンナノチューブ炭素電極の性能特性

政策立案のための提案

1) J_{sc} : 電流値(短絡電流); 2) V_{oc} : 光起電力(開放電圧); 3) FF: 形状因子(Fill Factor)

炭素電極ペロブスカイト太陽電池を次世代太陽電池の有力な技術の一つとして位置づけ、開発対象に含めることを検討すべきである。今後の開発に際しては、特に以下の3点が克服すべき課題として重要である。

- 1) ペロブスカイト材料と炭素材料の接合方法の確立
ナノ炭素との接合界面の緻密化、均一化、大面積化、作製プロセスの最適化。
- 2) ペロブスカイト太陽電池における炭素電極のホール収集効率の検討
電子構造や仕事関数を制御し、電極の仕事関数がホール収集効率に与える影響を明確化。
- 3) 安定性と耐久性の検討
水や光に対する劣化メカニズムについて、セル劣化速度と試験条件の定量的関係を検討、整理。

[1] Gong et al., Carbon 114, pp. 526-532, 2017.

アンモニア直接燃焼によるガスタービンシステムの提言

代替カーボンフリー燃料の代表例としてアンモニアを取り上げ、その特異的な燃焼特性を適用した新しい燃焼システムを提案した。さらに大規模発電用燃料利用可能性の予備的検討を行った。

■ アンモニア燃焼の詳細反応機構

・ 32化学種、213の素反応からなる詳細反応機構（UT-LCS機構[1]）を構築し、燃焼特性を検討したところ、燃料リッチ範囲で、低NO_xかつ水素を生成できる燃焼が実現可能な操作条件を見出すことが出来た。

■ アンモニア専焼タービンシステム

・ 排ガス再循環を組み合わせたコンバインドサイクル発電システム（図1）について熱力学モデルを用いて効率と出力を予測し、予備的な経済性検討も行なったところ、水素専焼タービン発電システムと同等の出力、経済性を有し、低NO_x燃焼であった（表1）。さらにその取り扱いの容易さなどから、水素発電システムに対して優位性がある。

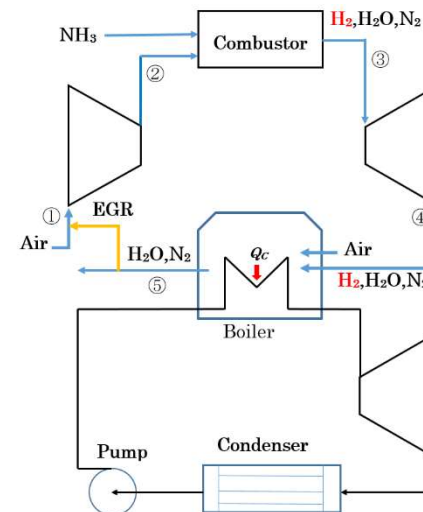


図1 NH₃専焼コンバインドタービンシステムの概念図

表1 NH₃専焼コンバインドタービンシステムの熱効率とコスト

燃料	当量比	EGR率	T ₃ (K)	燃料の重量分率	出力 (MW) (注1)	熱効率 (注2)	コスト (円/MJ) (注3)	NO (ppm)
NH ₃	0.5	0	1888	0.076	175.4	0.601	8.2	3435
NH ₃	0.6	0.2	1859	0.076	169.5	0.599	8.5	2743
NH ₃	0.7	0.4	1833	0.075	164.0	0.597	8.7	2123
NH ₃	1.4	0.4	1904	0.135	231.4	0.602	11.1	19
NH ₃	1.1	0.6	1918	0.098	195.4	0.603	9.5	<1
NH ₃	1.2	0.6	1873	0.105	198.7	0.600	10.0	1.04
H ₂	0.4	0	1907	0.012	179.3	0.602	11.2	4149
H ₂	0.5	0.2	1905	0.012	178.8	0.602	11.5	3367
H ₂	0.6	0.4	1891	0.012	176.0	0.601	11.8	2606
H ₂	0.7	0.6	1872	0.012	172.0	0.600	12.1	1930

注1) 空気流量300kg/s; 注2) 式(6) (本文参照)による計算値;
注3) H₂:580.8円/kg NH₃: 63.24円/kg

政策立案のための提案

アンモニア過剰コンバインドタービンシステムはカーボンフリーかつNOフリーのシステムであり、大規模発電システムに適用されればCO₂削減の大きなブレークスルーになり得る。一方で、アンモニア専焼タービン開発高度なインターディシプリナリーな課題であり、多分野の専門家の協働が必要である。以下の2点を提案する。

- 1) 燃焼工学、数値流体力学、タービン工学、化学工学の専門家からなるチームによりアンモニア過剰燃焼コンバインドサイクルの実現可能性検証を1年程度の時間をかけて実施すべきである。特にタービン用燃焼器のシミュレーションによる設計・検証が必要。
- 2) 1)の結果を受けて、実現可能性検討に加わった専門家に加え、タービン発電システム開発に実績のある複数の企業の参画を得て、国家プロジェクトとしてアンモニア専焼発電システムの開発を実施すべきである。

[1] Otomo et al., Int. J. Hydrogen Energy 43, pp. 3004-3014, 2018.

地熱発電(Vol.5) – 水圧破碎による誘発地震の低減に関する提言

地熱発電の割合をさらに高めるうえで有望な高温岩体発電において、人工貯留層を造成するために実施される水圧破碎による誘発地震の抑制が課題のひとつである。本提案書では、水圧破碎が実施された際の結果から、天然亀裂の間隔分布が誘発地震に影響することを示し、地下構造との関係を明らかにすることにより誘発地震の抑制ができることを明らかにした。

■ 誘発地震と天然亀裂

- 水圧破碎が実施された6サイト（肘折、雄勝、Soultz、Newberry、Basel、Cooper Basin）について、天然亀裂密度と地震エネルギーの関係を調べた（表1）。その結果、誘発地震の最大マグニチュード M_{max} は天然亀裂の逆数 $1/D$ の対数に比例すること（図1）、誘発地震エネルギー総和 E_{st} は注水エネルギー E_i と天然亀裂密度の逆数 $1/D$ を用いた簡単な実験式で表せること、最大誘発地震エネルギー E_{max} と誘発地震エネルギー総和 E_{st} を比較することにより天然亀裂の間隔分布が誘発地震の規模に影響することを示した。

表1 6サイトの注水エネルギー、地震エネルギー、天然亀裂密度

	肘折	雄勝	Soultz	Newberry	Basel	Cooper Basin
注水エネルギー E_i (GJ)	47	189	300	347	288	879
最大マグニチュード M_{max}	0.3	2.0	2.6	2.6	3.4	3.7
最大誘発地震エネルギー E_{max} (GJ)	0.0002	0.06	0.5	0.5	7.9	22.4
誘発地震エネルギー総和 E_{st} (GJ)	0.0002	0.06	6.8	4.1	12.5	56
天然亀裂密度 D (/m)	24	3.7	0.6	0.5	0.3	0.15
Log(1/D) 計算値	-1.38	-0.57	0.22	0.30	0.52	0.82

政策立案のための提案

- 水圧破碎による誘発地震を抑制するために、地質コア試料の採取あるいは坑井のBore Hole Tele-Viewer観測により、天然亀裂密度と天然亀裂の間隔分布を調査する必要がある。
- 効率よく水圧破碎を実施するために、誘発地震と地下構造の関係を明らかにし、地下構造に適した水圧破碎条件（流量、圧力、時間）を明確にする必要がある。
- 日本で高温岩体発電を実現するために、国内の数箇所で深度2,000～3,000mでの水圧破碎の実施、誘発地震の測定、および測定結果の解析が必要である。

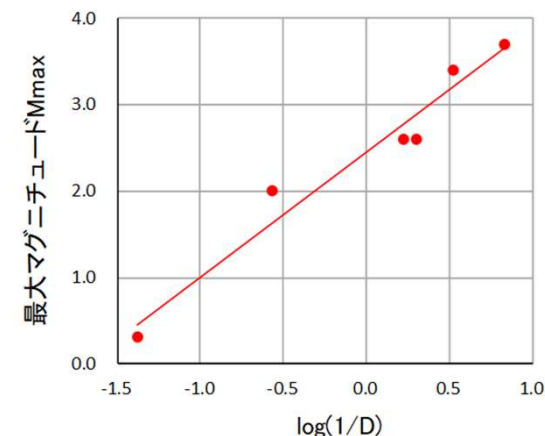


図1 最大マグニチュードと天然亀裂密度D

固体酸化物形燃料電池システム (Vol.6)

－セルデザインおよび新型燃料電池の包括的評価－

固体酸化物形燃料電池 (SOFC) は高い発電効率が特徴であり、水素や天然ガスによる高効率発電システムの実現が期待されている。本提案書では、新型デザインである金属支持平板形を含む幅広いセルデザインのコスト評価を進め、材料や製造方法の製造コストに対する影響を検討した。

■セルデザインについて

- ・平板形、円筒縦縞形、円筒平板形、円筒横縞形等を経て発展してきた燃料電池の技術革新の変遷を系統図としてまとめた。また各セルデザインの原材料コストは、金属支持平板形が最も低かった。

■SOFCモジュールの製造プロセスについて

- ・JST-LCSで開発したコスト評価統合プラットフォーム (Modeling Tool) を用いて、SOFC製造プロセスの設備コストや設置面積を算出し、最終的に原材料費、用役費、人件費、建設費の合計として製造コストを算出した。原材料費については、ドライプロセスの寄与により金属支持平板形の利点大きい。一方生産台数が上昇するに従い、いずれのセルデザインにおいても、100円/W以下となった。さらに発電コストを検討したところ、200kW級の中・大型機では、システムコストの低減 (<100円/W) と長寿命化 (>15年) により、系統電力コストの目標値 (14円/kWh) に十分に到達できた (図1)。

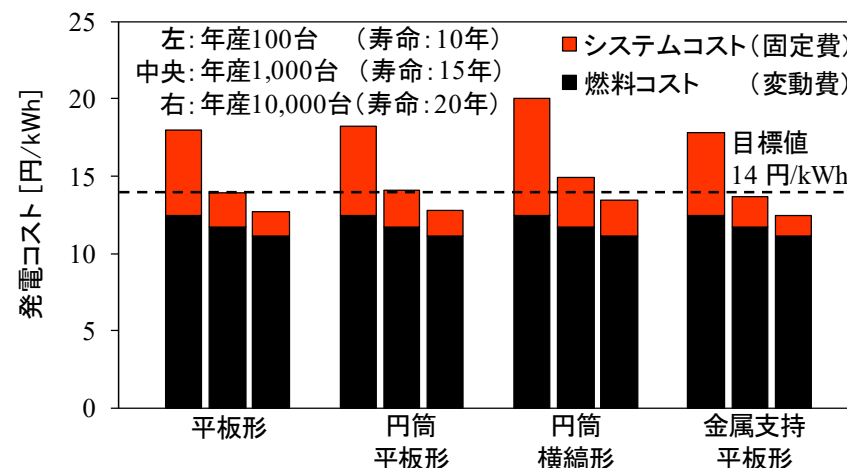


図1 SOFCシステム(220 kW)の発電コスト比較
(燃料価格(都市ガス):90円/Nm³;稼働率:80%を想定)

政策立案のための技術開発課題の提案

いずれのセルデザインにおいても製造コスト削減ポテンシャルは大きく、特に製造コストの中で高い割合を占める焼成工程および印刷工程の生産技術の開発が重要になる。金属支持形SOFC技術の進展に向けては、安定な異相接合界面、すなわち、金属-セラミックス界面の形成技術の進展が必要不可欠であり、成膜速度の向上など、生産速度改善に向けた取り組みが期待される。また、低温作動およびDSS (Daily Start and Stop)運転が課題となる。

蓄電池システム (Vol.6)

ーリチウムイオン電池のエネルギー密度向上の可能性と研究課題ー

2030年までに電気自動車用蓄電池のエネルギー密度を500Wh/kg以上[1]とするには飛躍的な技術革新が必要である。本稿では、リチウムイオン電池の正極活物質にリチウム過剰系材料を使用した場合の高エネルギー密度化と原材料コスト低減の可能性、および研究課題を検討した。

- LCSで設計した18650型円筒形電池仕様に基づき、各条件(表1)でエネルギー密度を推定。
- C₆負極を用いた場合、正極をリチウム過剰系材料(検討1,2)とすることでエネルギー密度は大幅に増大するが、

表1 評価用電池の電極活性物質の構成と電池電圧

No.	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	LiCoO ₂	148	0.54	C ₆	316	0.85	3.6
基準2	LiNi _{0.8} Co _{0.15} Al _{0.05} O ₂	198	0.71	C ₆	316	0.85	3.6
検討1	Li _{1.2} Ti _{0.4} Mn _{0.4} O ₂	300	0.76	C ₆	316	0.85	3.3
検討2	Li _{1.2} Mn _{1/2} Ti _{1/2} O ₂ F	321	0.70	C ₆	316	0.85	3.3
検討3	LiCoO ₂	148	0.54	Si	1,007	0.24	3.3
検討4	LiNi _{0.8} Co _{0.15} Al _{0.05} O ₂	198	0.71	Si	1,007	0.24	3.3
検討5	Li _{1.2} Ti _{0.4} Mn _{0.4} O ₂	300	0.76	Si	1,007	0.24	3.0
検討6	Li _{1.2} Mn _{1/2} Ti _{1/2} O ₂ F	321	0.70	Si	1,007	0.24	3.0

正極・負極ともに容量利用率を1とした理想モデルの電池構成でも最大で422Wh/kg_{-battery}程度であった。

- 一方、Si負極を用いた場合、正極をリチウム過剰系材料(検討5,6)、かつ負極容量利用率を1とした将来モデル2で500Wh/kg_{-battery}近傍を実現し得ることを示した(図1)。また、このようなCoフリーの高容量材料を用いることで、原材料コストを基準1の電池の1/3~

政策立案のための提案

1/2まで低減する可能性を示した。

正極・負極の容量利用率=1は困難だが、より高い容量を安定して利用できる電池構成の検討が必要。具体的には、①充放電を繰り返しても容量・電圧がほとんど低下しない高容量正極活物質(又は低下させないようにする方策)の探索、②Si負極の電子伝導性の向上や充電時の膨張抑制などの早急な進展、及び、③バインダーや導電助剤を含めた電極材の構成や電解質の最適化、等。

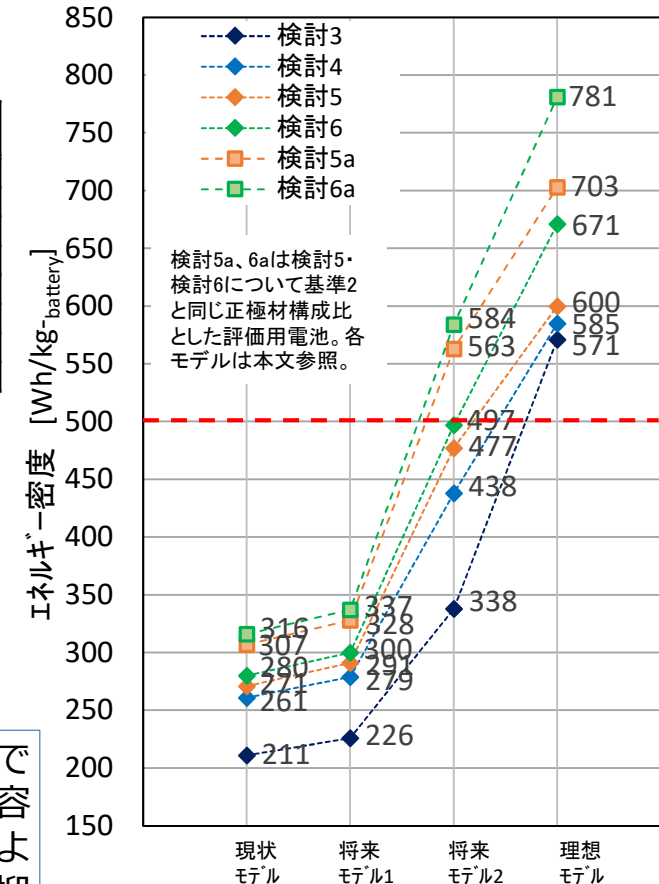


図1 各モデルケースでの各種評価用電池のエネルギー密度の比較

[1] NEDO, "二次電池技術開発ロードマップ2013 (Battery RM2013)", 平成25年8月。

酸化ガリウムの新規ワイドギャップ半導体としての電子デバイス応用へ向けた技術開発課題

酸化ガリウム (Ga_2O_3) は、超高耐压のパワーデバイスを始めとする新しい分野への応用が期待でき大規模な製造の可能性も有する。本稿では、電子デバイス用の結晶供給技術やデバイス動作実証の現状に基づいて Ga_2O_3 の本格的な産業利用のために残されている技術課題を明確化した。

■ 新規ワイドギャップ半導体 Ga_2O_3 と物性

- Ga_2O_3 の低温・常圧における安定相の β 相と準安定相の α 相の成長技術が確立された(表1)。

■ Ga_2O_3 結晶の成長技術と開発課題

- $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ は欠陥密度低減のためのバルク結晶成長技術が進展すると思われる。エピタキシャル成長ではハライド気相蒸着が成長速度、ドーピング制御両面で期待される。 $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ は安価なミストCVD法でサファイヤ基板上エピタキシャル成長が実証された。結晶欠陥密度低減が課題。

■ Ga_2O_3 パワーデバイス開発状況と課題

- $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ ウェーハ上のショットキーバリアダイオード(SBD)では、既に1kVを超える耐压の実証が行われている。 $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 製SBDは量産開始間近と期待される。
- $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ の金属-酸化物-半導体電界効果トランジスタ(MOSFET)動作の多くは横型構造で実証開始。縦型の動作実証はまだ始まったばかりだが、高耐压応用に適した縦型構造の研究の本格化が予想される。 $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ はサファイヤ基板上薄膜で、縦型MOSFET構造形成が容易でなく、現在まで横型MOSFETの試作が実施。 Ga_2O_3 はn型伝導しか示さずミストCVD法で成長が可能な他のp型伝導ワイドギャップ半導体探索が進められている。

表1 デバイス開発に用いられている主な $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$, $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 結晶成長技術

結晶の種類	$\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$		$\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$		
	バルク/エピ	バルク結晶成長	エピタキシャル成長	バルク結晶成長	エピタキシャル成長
主な成長法		EFG法 (他にCZ, FZ等)	HVPE法 (他にMOCVD, MBE等)	—	ミストCVD法
特徴		<ul style="list-style-type: none"> ・融点$\sim 1800^\circ\text{C}$ ・15mm/hr (EFG) ・転位密度$10^3\sim 10^4\text{ cm}^{-2}$ ・2インチウェーハ市販 	<ul style="list-style-type: none"> ・(001)ウェーハ上のホモエピ ・1000°C付近で平滑な成長 ・5$\mu\text{m/hr}$ (HVPE) ・2インチウェーハ上で実証 ・$>1\text{ kV}$耐压 SBD実証 	<ul style="list-style-type: none"> ・バルク結晶の成長は困難 	<ul style="list-style-type: none"> ・大気圧で低コスト ・$\sim 500^\circ\text{C}$のサファイヤ基板上ヘテロエピ ・4インチ基板で実証 ・成膜技術が事業化 SBD製造
手法概要					

政策立案のための提案

Ga_2O_3 の今後の本格的な産業化と普及を促進するための課題として、(1) $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 結晶, $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 結晶の基礎物性の把握、(2) Ga_2O_3 高品質結晶成長技術、および(3) デバイス形成技術、があげられる。

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

再生可能電力の需給調整のための蓄電システムの一つとして多目的ダムを活用した揚水発電所を提案した。今後開発可能な日本のポテンシャルを計算したところ、将来低炭素電源システムに必要と試算された蓄電池容量を超える蓄電容量が期待できることがわかった。またその寿命を40年とすると、設備・発電コストともに寿命10年と仮定した蓄電池の約1.5倍であった。

■揚水発電所の規模・仕様と国内ポテンシャル推計

- ・多目的ダムを活用した揚水発電所は、貯水量の一部を揚水して上池へ溜め、必要時に下池（ダム）近くの発電所に水圧管路を通して発電する（図1）。
- ・落差ごとの上池貯水量と蓄電容量の関係、貯水量ごとの落差と設備コストの関係に基づき、最適な揚水発電所の規模を試算し蓄電容量を計算した。その結果、サンプリングした7県については1県あたり平均22GWh/日（1日5時間発電）となり、47都道府県に適用できると仮定すると、将来低炭素電源システムに必要と試算された蓄電池容量（360～510GWh/日）を超える、1,000GWh/日となった。さらに年間300日稼働（設備利用率17%）とすると、全国で300TWh/年の蓄電が可能と推算された。

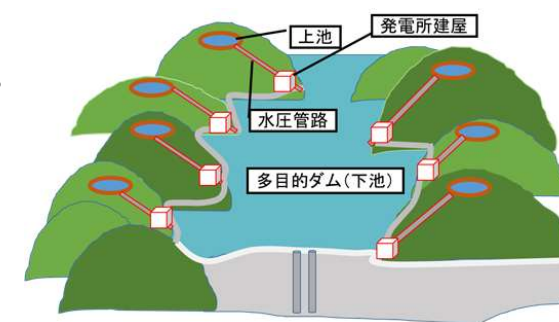


図1 既存の多目的ダムを活用した揚水発電所の模式図

■揚水発電所のコスト試算と評価

- ・50MWh/一か所と仮定した場合のコストを試算したところ、設備コストは48.2円/Wh、発電コストは22.6円/kWhと推算され、設備寿命を40年とすると、蓄電池（寿命10年）[1]と比較して約1.5倍であった。運用面で、揚水回数を増すことや上池の貯水量を増すことなどでさらにコストダウンが可能である。

政策立案のための提案

他の再生可能エネルギーによる発電システムとあわせた実証試験、必要な蓄電容量・充放電速度・発電所と送電設備との距離・建設現場までの道路状況などの調査、設備利用率を高めるための検討、決壊防止策や万一決壊しても重大な被害につながらない設計・施工法の確立が必要となる。また、共通の土木工事や道路建設などを伴う他の再生可能エネルギーと連携し、全体の建設費を抑えるような計画立案が有効である。

[1]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.2）」, 平成27年3月.

造林コスト低減のためのコンテナ苗の活用

コンテナ苗の利用は、苗の生産、植え付け、下刈などの造林作業に有効なコスト削減効果がある。本稿は、コンテナ苗の効率的な生産性技術の開発と、植栽後の速やかな成長を促す苗質を明らかにし、造林コストの削減への道筋を提示した。

■ コンテナ苗育苗：一粒播種のための充実種子選別技術

・発芽率の高い種子（充実種子）充実種子の赤外光吸収特性を利用し、1,730nm付近の3波長の反射率の割合を表す指標(SQI)を開発して、95%という非常に高い確率で充実種子を選別する技術が開発できた[1] (図)。さらに種子を一粒ずつドラムトレーに吸着させ、安価な赤外域分光器を用いて瞬時に分析し、高速に充実種子を選別できる一連のシステムの開発に成功した。

■ 植栽後のコンテナ苗成績

- ・スギコンテナ苗は日本各地で普通苗に比べて高い活着率を示してきた（例えば[2]）が、極端にコンテナ苗の活着率が落ちる場合も散見される[3]。コンテナ苗は普通苗に比べて植栽可能な時期が延びるが、立地や寒風害、食害なども考慮に入れながら植栽時期や植栽場所を検討する必要がある。
- ・コンテナ苗は形状比（苗高/苗地際直径）が普通苗に比べて高くなる傾向にあり、樹高成長が劣る。可能な限り形状比を低くしたコンテナ苗を植栽し、植栽現場での活着や初期成長の優位性を発揮させるべきである。そのためには育苗時にキャビティー間の間隔を広げ、十分な下枝の発達を促すことが必要である。

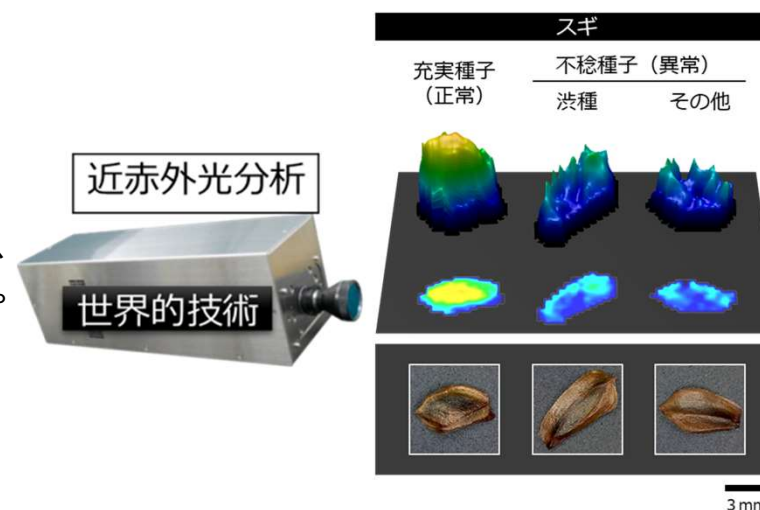


図 近赤外線分光による充実種子と不稔種子の分離[1]

政策目標達成に向けた技術開発の提案

- ・開発した全自動充実種子選別システムを利用し、歩留まりの高い効率的なコンテナ苗育苗技術を広める。
- ・マルチキャビティー育苗での徒長傾向（作物や茎・葉や植木の枝がむだに伸びること）を避けるため、新しいキャビティー等を用いて十分に個体間隔を広める。
- ・地域による立地条件によってコンテナ苗のサイズに自由度を持つことができるシステムの開発が必要である。

[1] Matsuda et al., PLOS ONE, DOI: 10.1371/journal.pone.0128358, 2015.

[2] 山川他, 日本森林学会誌 95(4), 214-219, 2013.

[3] 壁谷他, 日本森林学会誌 98(5), 214-222, 2016.

「低炭素技術設計・評価プラットフォーム」による分析手法の提案 －設計型機能への展開－

LCSの「低炭素技術設計・評価プラットフォーム」は、種々の低炭素技術関連プロセスのコスト及び環境負荷の定量的評価に利用されてきた。解析用に作成した対象プロセスの数学モデルを利用し、製造コストや環境負荷を評価関数として、生産規模や機器サイズ等の決定を支援する設計型機能を追加した。ExcelのアドインSolverを利用しておりプログラミング作業は不要である。

■設計型機能の構成

- プロセスを構築する機能(反応・溶解・組立てなど)に関する数学モデルをモジュールとしてデータベース化し、組み合わせて種々の対象プロセスを定義でき、製造コストや環境負荷を計算できる(解析型利用)。設計型は、Solverに対応するExcelシートを自動生成する(図1)。

■設計型機能の検証

- 解析型モデルとして開発済である水素製造プラント(水素製造・水素液化プラント・液化水素輸送・貯蔵工程)を対象に、評価関数として製品水素コストを、制約条件としてCO₂排出量許容値を与え、生産規模を求めた。Solver能力は、モデルの規模(変数、制約条件の数)及び計算時間に関して全く問題ないことを検証した。
- モデルは連続プロセス・組立加工型など、数学的には非線形や整数型など広範囲で今後の検証が必要。

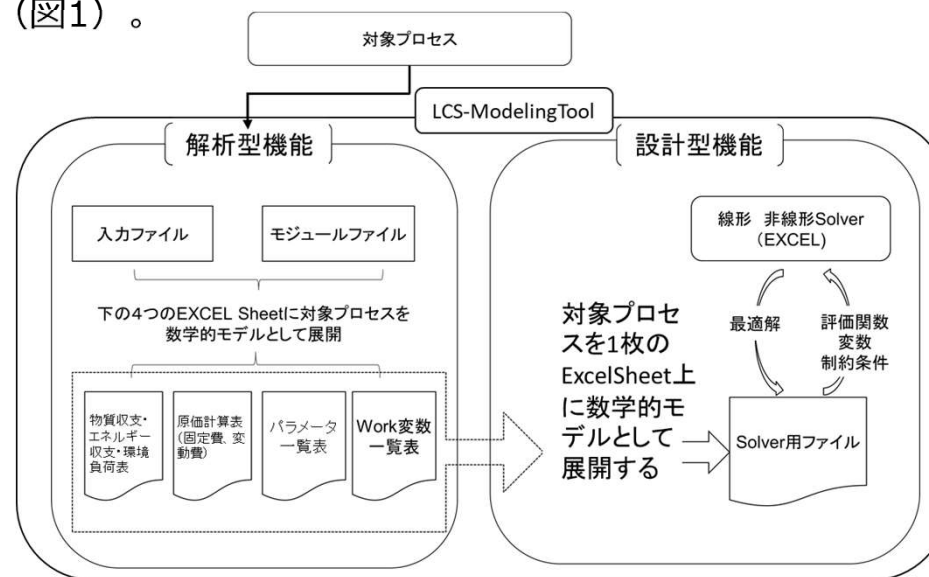


図1 設計型機能の構成

本報告の低炭素社会実現等における意義

プラットフォームは低炭素技術関連のプロセス構成を数学モデルとしてExcel形式でデータベース化できる。さらに定量的評価のための機器コストや環境負荷評価に関するデータベースも備えており拡張も容易である。低炭素技術関連プロセスを俯瞰的に把握するためのプラットフォームとなりえる。

木質バイオマスエネルギーポテンシャルの地域分布 (Vol.2)

– 不均一に分布する人工林の伐採作業のコスト –

木質バイオマス生産の低コスト化には高性能林業機械による生産性の高い作業が必要である。不均一分布する人工林では主伐作業で林業機械移動コストが生じる。本稿では人工林の分布パターンが異なる2地区を対象とし、GISデータを用いて移動コストを計算した。その結果、移動コストが生産総コストに与える影響は小さく、低コストでの木質バイオマス生産の可能性があった。

■ 移動コストの計算

- 静岡県天竜地区森林計画区内の2地区の人工林データ ([1]) に基づいて主伐対象林分で作業した林業機械 (ハーベスタとフォアワダ) が次の作業対象林分に移動することをGIS上で表現し (図1)、移動コストを計算した。防災と環境保全の観点から皆伐面積の上限を定めた。51~60年生と61~70年生人工林の面積当たり材積差 (16%) を考慮し、移動コストの目標を生産総コストの10%以内とした。
- 移動時間は主伐本作業延べ時間の2~4% (春野)、10~11% (御前崎) であった。移動コストの木材生産総コストに対する割合は、1% (春野) 及び4% (御前崎) であり、いずれもコスト目標を達成した (表1)。皆伐面積が小さいほうが移動距離、移動回数、移動のための時間が増す傾向があったが、その差は顕著なものではなかった。防災と環境保全の観点から皆伐上限面積は1haが望ましい。

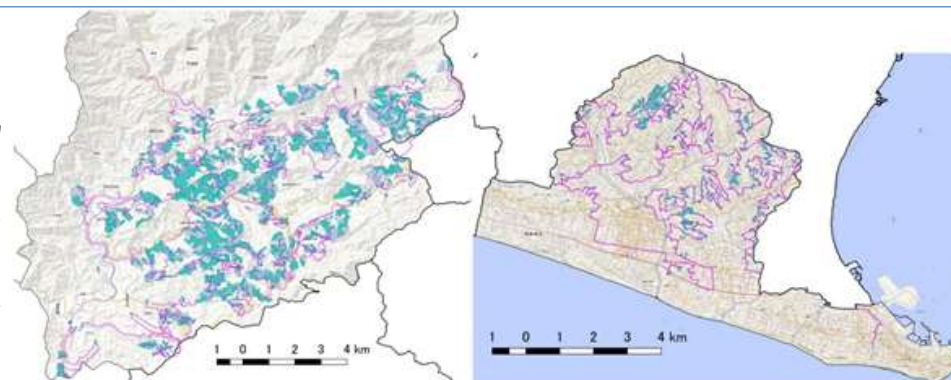


図1 主伐作業のシミュレーション(左:人工林が集中分布する春野地区、右:人工林が分散分布する御前崎市)(■:主伐区、■:緩斜面人工林、-:移動経路)

■ 政策立案のための提案

- 人工林の分布パターンを把握し、適切な施業計画を作成してコストの予測を行うため、GISデータと森林簿等の林分ごとの樹種や作業履歴の属性データの公開が望ましい。
- 皆伐区と皆伐区の距離はどの程度が適切なのか基準がない。今後、なんらかの基準が必要である。

表 移動コストとその木質バイオマス生産総コストに対する割合

	林齢	皆伐面積	伐採体積当たり	生産総コスト
			の移動コスト	に対する移動コスト
			円/m ³	%
春野地区	51~60年	1ha	51	1.3%
		2ha	50	1.3%
	61~70年	1ha	30	0.8%
		2ha	25	0.7%
御前崎市	51~70年	1ha	143	3.8%
		2ha	133	3.5%

[1] 静岡県森林情報共有システム, 静岡県H29年度天竜森林計画図および森林簿 (<https://fgis.pref.shizuoka.jp/>) (2017年12月1日アクセス)

小規模型カーボンフリーNH₃製造技術に向けた新規プロセスの提案

低炭素社会では、カーボンフリー水素を原料としたカーボンフリーNH₃を生産する必要がある。本稿では、国産のバイオマス原料からカーボンフリー水素を生産し、次にNH₃を小規模の製造規模で製造することを想定した小規模のプラントを設計し、コストや課題の検討を行った。

■ 想定したプロセス

- 国内NH₃需要 (1,125kt/年) を国内10か所程度で生産する小規模型 (240t/d、図1) と、プラントへのバイオマス搬入上限 (2,000t/d) を加味した大規模型 (800t/d、Haber法と開発中の低圧プロセス) (表1) を想定した。

■ 設備費用と製造コスト

- 大規模 (800t/d) での従来法、及び低圧プロセスのNH₃製造コストはそれぞれ約57円/kg-NH₃、及び約51円/kg-NH₃であるが、低圧法の触媒Ru価格 (270円/g) が4倍程度に高騰すると低圧法の優位性は約3円/kg程度となる。
- 小規模型 (240t/d) の製造コストは約53円/kg-NH₃であり、大規模型とほぼ同等のコストで生産できる。小規模型を12t/dにスケールダウンすると約77円/kg-NH₃となる。現在の本船積み価格 (50~70円/kg) に近いコストで生産可能であった。

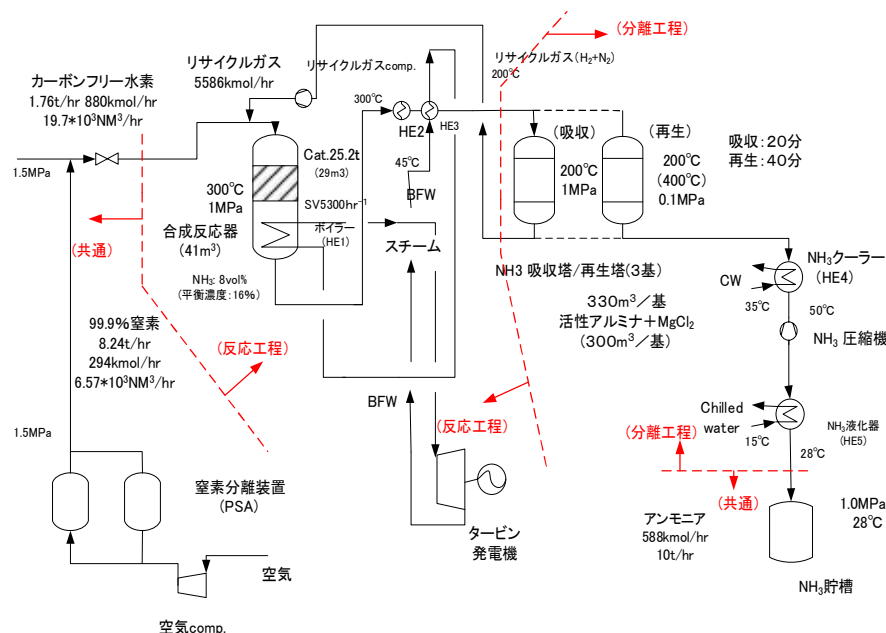


図1 小規模型 新規NH₃プラント
(N₂:PSA-N₂、反応工程/低圧法 触媒 Ru系、分離工程/MgCl₂による吸収法)

政策立案のための提案

提案プロセス実証に向け、以下の技術開発・検証が必要。

- 低圧低温NH₃合成のための、低価格で効率良い触媒
- PSA操作でNH₃の吸収・脱離が可能な吸収材
- バイオマスガス化技術の開発・検証とバイオマス原料の低価格化のための、システムづくり

表1 プロセス条件の比較

プラント規模	800t/d(大規模型)		240t/d(小規模型)
プロセス	Haber法	低圧プロセス	新規プロセス
H ₂ 原料	バイオマスガス化 1.9円/MJ-H ₂ (229円/kg-H ₂)	バイオマス価格 10円/kg-dry	バイオマス価格 10円/kg-dry
N ₂ 原料	深冷分離-N ₂	PSA-N ₂	PSA-N ₂
合成反応条件	20MPa、450°C	1MPa、340°C	1MPa、300°C
合成触媒	鉄触媒	Ru(10wt%)/Ba(3at%)-Ca(NH ₂) ₂	触媒
NH ₃ 分離法	冷却分離法	吸収(吸着)分離法	吸収(吸着)分離法
NH ₃ 貯槽	0.15MPa、-23°C	1MPa、28°C	1MPa、28°C

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 –

製造のみならず、運搬、利用に至るまでトータルでのカーボンフリー燃料実現に向け、本稿では海外産炭地でのCCSを伴う石炭ガス化プロセスにより製造された水素を、湾岸部にて液体燃料（液体水素あるいはアンモニア）に変換した後、タンカーにて海上輸送し、国内の受入基地に隣接する発電所で利用する場合を想定し、発電所入口でのコストとCO₂排出量について検討した。

■ 石炭ガス化による水素製造の原料炭種（褐炭と瀝青炭）の比較

- ・ 供給量毎時220トンの褐炭（1,215円/トン）あるいは瀝青炭（10,000円/トン）から、水素をそれぞれ年間85,000トン及び200,000トン製造するプロセスを想定した。CCSのCO₂捕集率は88%とした。
- ・ 褐炭、瀝青炭それぞれ、コストは2.0円/MJ、1.8円/MJ、CO₂排出量は25g/MJ、21g/MJとなり、原料炭種の違いによる、水素製造コストとCO₂排出量への影響は少ないことが分かった。

■ 褐炭原料の場合のトータルコストとCO₂排出量

- ・ 豪州内陸で製造された褐炭原料水素をパイプライン輸送して、湾岸部にて液体水素あるいはアンモニアに変換した後海上輸送し、受入基地を経た最終利用までを想定し、技術進展も考慮して、現状技術ベースと将来技術ベースの2通りで計算した（表1）。
- ・ CO₂排出量は、液体水素あるいはアンモニアともに、将来技術ベースで約40g/MJとなり、天然ガス燃焼の約57g/MJの70%相当の高い値であることが分かった。
- ・ 液化水素方式と比較した場合のアンモニア方式の、価格とCO₂負荷の点での優位性が確認でき、発電用燃料としてのアンモニアの可能性が示された。

表1 2つの方式の最終利用時点でのトータルコストとCO₂排出量の比較

両方式の比較	現状技術ベース		将来技術ベース	
	アンモニア方式	液化水素方式	アンモニア方式	液化水素方式
コスト【円/MJ】	変動費： 2.7 固定費： 0.7 合計： 3.4	変動費： 2.9 固定費： 3.5 合計： 6.4	変動費： 2.5 固定費： 0.7 合計： 3.2	変動費： 2.9 固定費： 1.9 合計： 4.8
CO ₂ 排出量【g/MJ】	原料用役起源： 38 設備起源： 2 合計： 40	原料用役起源： 48 設備起源： 6 合計： 54	原料用役起源： 31 設備起源： 2 合計： 33	原料用役起源： 37 設備起源： 3 合計： 40

今後の検討課題

今回はCCSプロセスのCO₂捕集率を88%にて検討したが、カーボンフリー燃料の実現には99%以上の高い捕集性能を有する低コストCCSプロセスの開発が必要である。コストとCO₂排出量およびCCSの捕集性能の詳細に関して、今後検討を進める予定である。

GaN系半導体デバイスの技術開発課題とその新しい応用の展望 (Vol.3) – 市場規模と省エネルギー効果 –

窒化ガリウム (GaN) は直接遷移型半導体で広いバンドギャップを持つため、高効率発光デバイス材料として期待されているが、基板の製造困難などの技術的課題からまだ開発初期段階である。本稿では光学デバイスおよび電子デバイスの将来市場について考察するとともに、これらの中のGaN市場について調査し、その市場規模と用途別省エネルギー効果について検討した。

■ 光学デバイス分野

- ・ GaN素子は高効率光源としてすでに社会に広く浸透し、高輝度LEDとの境界はあいまいにならざるを得ない。
- ・ 液晶バックライトはすでにLEDが採用され、次世代半導体の効果はあまり大きくない。ヘッドマウントディスプレイ等は新しいディスプレイを提供するので社会的影響は大きい。省エネルギーに対する効果は比較対象がないため評価は難しい。自動車用ヘッドライトや照明分野においてGaN LEDの省エネルギー効果は大きい。ほとんどの用途では価格からも既存LEDの使用が見込まれ、次世代LEDのシェアは小さいと考えられる。
- ・ 結局、現在の素子がGaNの特性を生かして達成すべき高効率をほぼ達成しており、次世代半導体素子の省エネルギーに寄与できる余地は少ないと考える。

■ 電子デバイス分野

- ・ 電気自動車や自然エネルギーの普及に伴い直交変換、電圧変換のための高耐圧高効率素子が必要となりSiC、GaN等が導入され始めている。インバータの10%をGaN素子とすると120TWh程度の省エネルギー効果が見込める。
- ・ GaNパワーデバイス市場は2030年には1,700億円と考えられる(表1)。
- ・ GaN素子は日本が世界をリードしてきた。パワー半導体は先行するSiC素子にも注目して一定の注力が必要であり、さらに日本の先行性を守る省エネルギー技術という観点からもGaNは注力してよい材料と考える。

表 GaNパワーデバイス市場

(文献[1]をもとに、2020～2030年についてはLCSが推計)

GaNパワーデバイス市場 (百万円)	2016年	2020年	2025年	2030年
民生機器分野	180	2,000	7,000	24,500
情報通信機器分野	950	5,000	10,000	20,000
自動車	0	2,000	11,000	60,500
電鉄車両	0	0	0	0
新エネルギー	300	5,000	13,000	33,800
産業機器	0	500	4,000	32,000
合計	1,430	14,500	45,000	170,800

政策立案のための提案

- ・ 現在開発中のGaN素子はSi基板、SiC基板、GaN基板などの上に作成され、それぞれ性能、価格で一長一短があるが、いずれも高コストであり、性能的にも改良の余地が大きい。
- ・ 基板の問題の解決と低コストかつ結晶ひずみを抑えたヘテロエピタキシャル技術の開発が必要と考えられる。

[1] 富士経済, “2017年版次世代パワーデバイス&パワエレ関連機器市場の現状と将来展望”, 2017.

太陽光発電システム (Vol.5)

－ 定量的技術シナリオに基づく結晶系シリコン太陽電池とペロブスカイト型太陽電池のコスト低減技術評価 －

LCSではこれまで種々の太陽光発電システムのコスト構造を分析してきた。本稿では、近年の市場拡大に伴うコスト低下と技術進展を考慮して種々の太陽光発電システムの導入原価を再評価し、2018年版コスト展望として改訂し、技術開発課題を示した。また、結晶系シリコン太陽電池とペロブスカイト型太陽電池について、現状および将来のコスト構造を分析した。

■ 太陽光発電システムと将来展望

- ・近年の原材料費および製造機器価格低下、最先端技術開発状況などを考慮し、2010年から2030年に向けた各種太陽光発電システムのコスト展望再評価を行った。結晶系シリコン太陽電池ではシリコンウェハの薄型化、高効率化やタンデム構造技術開発、ペロブスカイト型太陽電池では変換効率向上や大面積化が進んでいる。

■ 太陽電池のコスト

- ・結晶系シリコン太陽電池では、大規模化、ウェハ薄型化、高効率化により、2030年に向けてさらにコスト半減が見込まれた。
- ・ペロブスカイト型太陽電池では高効率化、大面積化により、2030年に向けて現状のシリコン太陽電池と同等の製造コスト（22円/W）に低減する（図1）が、耐久性が低く、発電コストは1.5倍と高くなるため、耐久性向上が重要である。

政策立案のための提案

- ・単結晶シリコン太陽電池コスト低減には高効率化、生産性向上、ウェハ薄型化、原材料費低減等が寄与する。
- ・ペロブスカイト太陽電池は、高効率化、大面積化とともに、耐久性の課題解決が重要となる。
- ・太陽電池設置可能箇所拡大とモジュール変換効率向上が必要であり、具体的には変換効率30%以上のタンデム型の技術開発が重要となる。

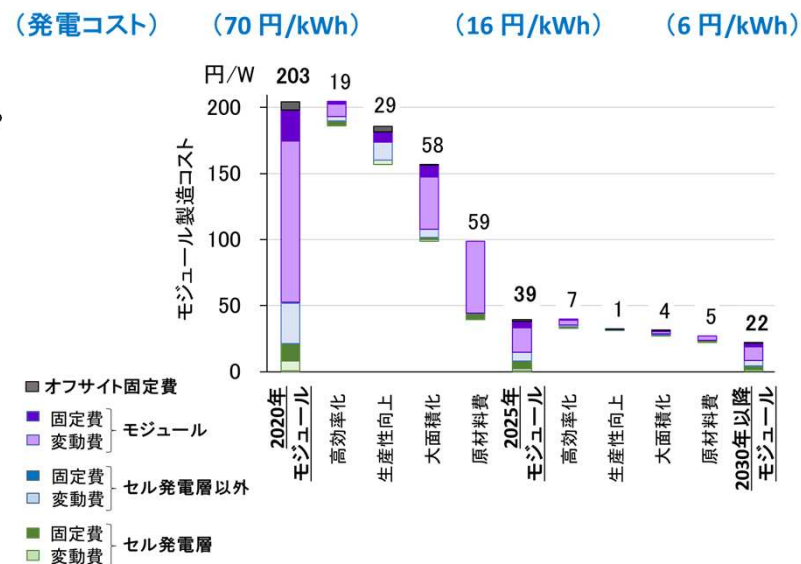


図1 ペロブスカイト太陽電池の発電コストとコスト低減要素技術

低炭素電源システムの安定化と技術・経済性評価 (Vol.3)

—2050年の低炭素電源システムの技術開発課題—

LCSでは多様な再生可能エネルギー技術開発評価に基づく定量的技術シナリオを構築し、電源構成への影響を評価している。本稿では再生可能エネルギー技術開発の前提で、送電網強化、同期発電機割合低減、高温岩体地熱導入可能量を比較し、電力需要と系統技術の相互影響を示した。

■ 系統安定化技術の経済性評価

- 電力需要を現状より15%削減した場合の、系統安定化対策を考慮した低炭素電源システムの経済性を評価した(表1)。
- 再生可能エネルギーの技術開発により、2050年のCO₂排出量削減80%は現状と同等のコストで構築可能である(ケースA)。慣性力を持つ高温岩体地熱発電システムを導入したケースBも現状と同程度のコストで実現可能である。CO₂排出量100%削減は実現可能ではあるが発電コストは2倍程度高くなる(ケースC)。さらに系統安定化対策を実施し慣性力を持つ同期発電機の割合を低減すると発電コストが大きく低下する(ケースCとDの差は年間約5兆円)。

■ 電力需要とCO₂排出量削減率の評価

- 図1に電力需要と技術的に可能なCO₂排出量の削減ポテンシャルの関係を示す。電力需要1,000TWhまでは、慣性力割合低減により、電源システムからのCO₂排出量ゼロエミッション化も実現可能である。

政策立案のための提案

- 重要技術(太陽光発電、風力発電と蓄電池システム)の大規模普及に向けた政策支援や高温岩体地熱発電等、資源制約が少なく、かつ系統安定性に寄与する低炭素電源の技術開発が必要となる。
- 送電網の強化に加え、系統安定化のための技術開発が必要となる。
- 将来の産業構造変革も含めた電力需要の総合的評価を進める必要がある。

表1 ゼロエミッションに向けた電源システムの技術シナリオと経済性評価(2050年の電力需要800TWh/yのケース)

ケース	2013年	A	B	C	D
CO ₂ 排出量削減率(2013年比)	—	80%	90%	100%	100%
高温岩体地熱(HDR)	—	なし	あり	あり	あり
地域間送電網の強化	—	現状	現状	強化	強化
同期発電機(慣性力)の比率	—	50%	50%	50%	25%
年間電力需要 [TWh/y]	990	800	800	800	800
発電量 [TWh/y]					
石炭	357	16	0	0	0
LNG	443	277	159	0	0
石油、他	179	0	0	0	0
太陽光	9	327	412	692	467
風力	5	77	141	460	306
地熱	0	12	112	112	112
バイオマス	3	31	31	31	31
水力	85	130	130	130	130
原子力	9	0	0	0	0
総発電量	1,090	870	985	1,425	1,046
発電コスト [円/kWh]	12.9	11.5	12.5	20.7	14.0
水素 利用量 [TWh/y]	—	0	43	186	62
蓄電池 利用量 [TWh/y]	—	135	173	322	199
蓄電池 設備容量 [GWh]	—	451	591	1,061	656

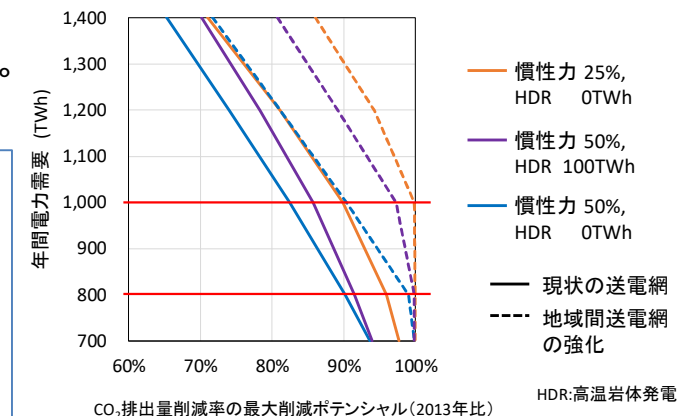


図1 CO₂排出削減ポテンシャルと電力需要

情報化社会の進展がエネルギー消費に与える影響 (Vol.1)

－IT機器の消費電力の現状と将来予測－

情報化社会の進展に伴って、従来の予想を超える膨大なデータが取り扱われるようになり、この傾向は今後も拡大すると考えられる。これに伴い、エネルギー消費がどのような影響を受けるかを2050年までを視野に入れ、調査、ヒアリングなどにより検討した。

■ データ処理量（トラフィック）の増大

- ・わが国では、特に2014年以降急速に伸びた。今後もオンラインサービスは増加しつづけると考えられる[1]。世界での今後5年間年平均成長率は24%と見積もられ、特にモバイルデータの急増が推定されている[2]。

■ 主要IT機器の消費電力予測

- ・IT関連消費電力について、文献[1]から情報関連機器のみを抜き出して、LCS推計値と比較した（表1）。これらのうち、TV/モニタおよび複合プリンタを除く全ての機器はデータ処理量と消費電力は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（表2）。世界のIPトラフィックは2030年には現在の30倍以上、2050年には4,000倍に達すると予想され、まったく省エネルギー対策がなされないと、情報関連だけで2030年には現在の世界の消費電力の約24PWhを大きく上回ると予測された。

政策立案のための提案

- ・IT機器の省エネルギー対策が全くなされないと、極端な消費電力となり、その対策が必要なことは明らかである。
- ・回路の微細化に伴って消費電力も低減されるという経験則もあるが、今後の微細加工がこの経験則に従うかは定かではなく、また3次元化する場合に除熱の問題もある。
- ・冷却方法の工夫やスマート化など、様々な工夫による節電は進められると思うが、このような技術だけで対応できるのか、種々の面から慎重な検討が必要である。

表1 IT関連の消費電力予測 (TWh/年)
(PUE: データセンター全体の消費電力/IT機器の消費電力)

	日本		世界	
	グリーンIT 推進協議会 [3] (2005) PUE=1.9	LCS推計値 (2016) PUE=1.5	グリーンIT 推進協議会 [3] (2005) PUE=1.9	LCS推計値 (2016) PUE=1.5
データセンター	15	16	111	238
サーバ	6.3	7.4	43.3	111
ストレージ	0.9	3	9.3	37
ネットワーク	0.5	0.5	5.7	10
空調その他	6.9	5.5	52.5	79
エンドユーザー	18	21	326	570
PC	2.2	6.8	32.2	150
TV・モニタ	15.5	8	293.3	300
複合プリンタ	—	6	—	120
ネットワーク	10	18	164	783
ルータ・スイッチ	10.2	10.7	163.8	263
無線送信・端末	—	7.4	—	520
合計	43	55	601	1,590

表2 IT関連の消費電力予測

IT関連消費電力予測	2016年	2030年	2050年
IPトラフィック (ZB/年)	4.7	170	20,200
消費電力 (国内: TWh/年)	41	1,480	176,200
消費電力 (世界: TWh/年)	1,170	42,300	5,030,000

[1] 総務省, “平成29年度版情報通信白書 特集 データ主導経済と社会変革”, 2017.
 [2] Cisco, “Cisco Global Cloud Index: 予測と方法論、2015~2020年”, 2016.
 [3] グリーンIT推進協議会調査分析委員会, “総合報告書 (2008年度~2012年度)”, 2013.
<https://www.jst.go.jp/lcs/pdf/fy2018-pp-15.pdf>

2020年東京五輪・パラリンピック 「カーボンマイナスのための国民参加型プラットフォーム」の提案

現在までにさまざまな企業、団体から2020大会へ向けた環境取組の提案が集まっている。特に、「史上初のカーボンマイナス」に向けては、多数の提案が集まっている。ただし、提案の内容は玉石混淆の感が否めない。そこで、関係者間で議論し、優良な取組を選別して効果を最大化するための産官学民連携のプラットフォーム形成の可能性について検討・整理を行った。

■カーボンマイナスのための国民参加型プラットフォームの提案

- 環境に関する団体や学識経験者、事業家、NGO、NPO等のネットワークによる活動が功を奏し、現在までにさまざまな環境取組の提案が集まっている。特に「史上初のカーボンマイナス」に向けては、確実に実現しそうな提案だけを慎重に選んでも6件にのぼる。
- これらの提案を実現する仕組みとして「東京2020カーボンマイナス応援プラットフォーム（仮称）」（図1）を立ち上げ、2020大会組織委員会の公認のもとで団体や個人を集めることを提案する。その役割は、産官学民多方面から集まる優良な協働提案を集約、スクリーニングし、実現に向けて必要なマッチングを図り、事業化を助けることであり、2020大会以降の「明るく豊かな低炭素社会」に向けた持続的な国民行動の礎とする。

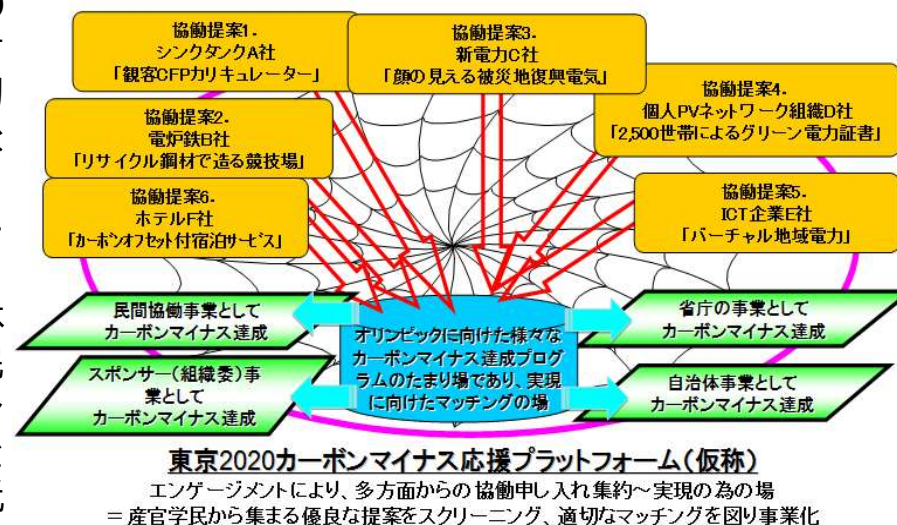


図1 2020年東京五輪・パラリンピック「カーボンマイナスのための国民参加型プラットフォーム」

今後の課題と展望

現状、組織委員会の公認プログラムでは、オフィシャルスポンサー以外の営利企業が社名を挙げる仕組みが無い。組織委員会と切り離し、例えば公益的な団体が社会実験として2020年以降を見据えた上述のプラットフォームを創設し、そこに資金や労力・クレジット等の現物の寄付の事実を公表可能な形で企業や個人から集め、組織委員会との協働事業等2020の持続可能性配慮施策に投じることは、現実的な選択肢と考えられる。

鉄リサイクルを利用した将来低炭素社会のための 課題検討にむけて (Vol.2)

LCSでは、将来の低炭素社会における鉄鋼生産、スクラップ鉄発生量と利用量などを考慮したシナリオを策定し、産業構造などを含めた社会シナリオ研究に活かすことを目的とした研究を進めている。本稿ではマクロ的試算による将来社会の鉄循環を整理し、日本と各国の鉄鋼蓄積量と純内需から発展レベルとの関係を検討しつつ、スクラップの需給や利用の流れ等に影響する世界のスクラップ市場をまとめた。

■ マクロ的試算による将来の鉄の循環量

- ・現在の日本における鉄の循環量[1] をもとに、いくつかの前提（詳細は本文参照）のもとでの将来の鉄循環量を試算した（図1）。このバランスではCO₂排出量は56%減にしかない。80%削減には、例えば追加削減のためCCS利用、鋼材製品輸出ゼロ化などの追加方策が必要である。

■ 世界の鉄鋼需要

- ・各国の一人当たり鉄鋼純内需、鉄鋼蓄積量とGDPの関係を図2にまとめた。先進国では蓄積量が十分あり、純内需が安定化している国が多いのに比べ（Aグループ）、途上国では蓄積量は低いが高純内需が高い傾向がある（Bグループ）。このBグループで特記すべきは2016年の日本からの鋼材輸出先の上位3カ国である韓国、中国、タイで、発展に伴う需要増に応えるため、今後も日本からの鋼材輸出が続く可能性が高いことを示唆している。今後、これらのBグループの国の純内需と社会蓄積量が2050年、2100年までにどのように変化するかを検討する必要がある。

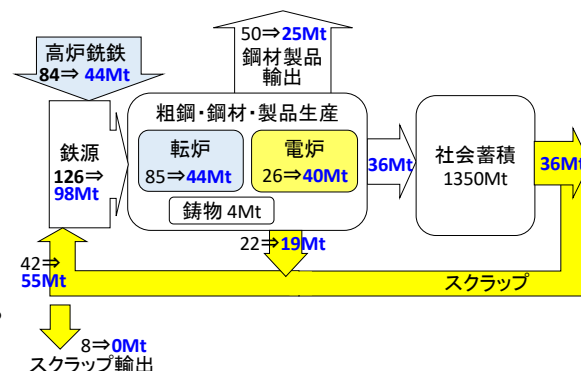


図1 低炭素社会における日本の鉄の流れ

政策立案のための提案

スクラップの利用率向上に向け政策的取組が必要な事項は以下のとおり。

- ・市中スクラップ、特に老廃スクラップについて中間処理の高度化改革
- ・スクラップ未回収分を定量的に把握するシステムと効率的な改善方策
- ・環境規制のために鉄スクラップ利用が進まないケースの把握と対策
- ・解体物のガス切り工の要員の確保対策につながる制度

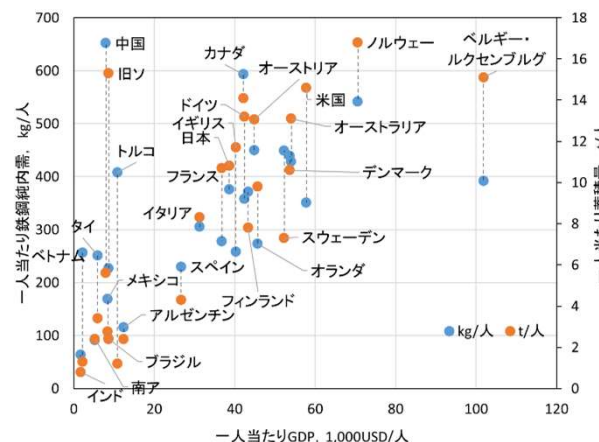


図2 一人当たり鉄鋼純内需、鉄鋼蓄積量とGDPの関係

[1]日本鉄鋼連盟, 鉄鋼循環図(2014年度)

東京都の消費活動に内包されるCO₂排出量の評価

製品製造や消費段階でのCO₂排出にも配慮するScope3排出管理が広まりつつある。カーボンフットプリントによるライフサイクルCO₂排出量推計は数多くあるが、地域を対象とした直接・間接のCO₂排出量の評価例は少ない。本稿では、2011年の東京都産業連関表を用いて東京都の最終需要（主に家庭の消費活動）に内包されるCO₂排出量を導き出し、直接の排出量との比較、部門別の排出の傾向を示した。

CO₂排出量の評価手法

- ・ 現在利用可能な最新版である2011年東京都産業連関表を利用し、吉田ら[1]の方法によりCO₂排出量を分解した。これにより需要起源別、産業・地域別の国内生産の構造を知ることができる（図1）。
- ・ 地域ごとの需要と生産の各項目について、それぞれ各産業部門への化石燃料の投入係数を乗じて、消費財jの最終需要によって誘発される産業部門iでのCO₂排出量C_{ij}を求め、i, jについての加算の方向によって、最終需要である消費財に内包させる排出量と、各産業部門の直接排出として求める排出量の2通りに分類した。

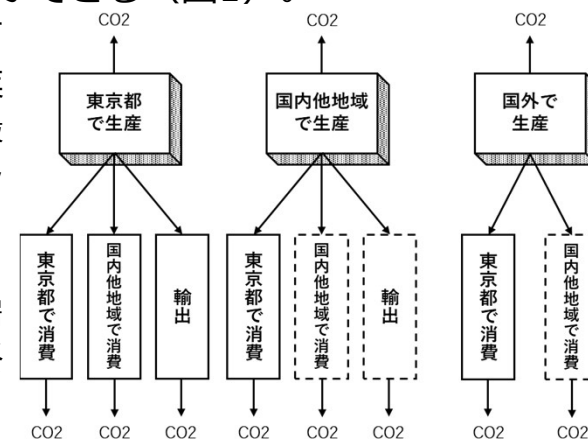


図1 東京都のCO₂排出量の分類

CO₂の排出構造

- ・ 東京全体の直接排出量は18.91MtC（全国の6%）である一方、最終需要に内包される排出量は27.24MtC（同9%）と推計された。表1に最終需要に内包されたCO₂排出量ならびに直接排出量の地域別内訳を示す。東京都消費活動のCO₂排出の他地域へのリーケージ割合が際立っている。
- ・ 東京都の消費活動内包排出では、電力、サービス、建設によって誘発された排出量が多く、省エネルギーや建設物長寿命化などが効果的な対策となる。家計調査分析では、エネルギー消費が多い高齢世帯の省エネが課題であることが示された。

表1 最終需要に内包されたCO₂排出量ならびに直接排出量の地域別内訳

	最終需要に内包される排出量							
	東京都				その他地域			
	家庭消費	その他消費	投資	輸出	家庭消費	その他消費	投資	輸出
東京都での直接排出量	8.3	5.1	3.5	1.1	1.1	0.1	1.0	0.2
他地域での直接排出量	6.3	1.2	1.6	0.2	152.9	30.7	49.7	69.9
排出計	14.5	6.3	5.2	1.3	153.9	30.8	50.7	70.2

政策立案のための提案

- ・ 東京都における直接排出量の最大の排出産業は運輸となり、物流部門の燃料消費効率の向上等が重点課題といえる。
- ・ 産業連関表を利用して地域ごとのCO₂排出量構造を把握することが、温室効果ガスの排出削減に向けた政策立案に有益である。

[1]吉田他, 日本エネルギー学会誌 77(11), 1054-1061, 1998.

低炭素社会に向けた技術革新の影響評価のための 動学エネルギー経済モデルの開発

温暖化対策が社会に持続可能な形で受け入れられるためには、対策の社会経済影響の事前評価が重要である。本稿では、過去のエネルギー需要の部門別推移を統計的に解析した計量経済モデル（短期エネルギーシステムシミュレーションモデル）と、中長期多部門動学的エネルギー経済モデルの開発を行った。

■ 短期エネルギーシステムシミュレーションモデル

- モデルは、基本的に産業の生産額あるいはGDPとエネルギー価格によりエネルギー需要が与えられる第一段階と、エネルギー種間の相対価格により投入シェアが決まる第二段階からなる。経済活動を資源エネルギー庁の総合エネルギー統計簡易表に従い、化学製品、食品、紙・パルプ、鉄鋼業、非鉄金属業、窯業・土石、繊維・革製品、機械産業、他製造業、他産業の10産業部門、家庭、業務の2民生部門、貨物、旅客の2運輸部門計14部門に分割した。その結果、単純な構成ながら過去の推移をよく追従するモデル式を推定でき、過去の延長からは短期的にどのような姿が得られるかを信頼性のある方法で示し得た。

■ 動学的多部門エネルギー経済モデル

- Moriらが開発したTHERESIAモデル[1]の日本地域モジュールに対して予備的シミュレーションを行った。対象は、非エネルギー産業12部門、一次エネルギー6部門、二次エネルギー3部門、最終需要3部門とした。その結果、12期シミュレーションを1時間以内に計算可能なことを確認できた。図1は結果の一例である。鉄鋼業、輸送機械製造業においては、炭素排出制約の導入により製品輸出額が低下し、一般機械製造業では増加した。現段階ではデータが最新のものではなく試算の段階を出るものではないが、投資など中長期視点から部門別の貿易への影響を評価できる点を特徴に持つ。

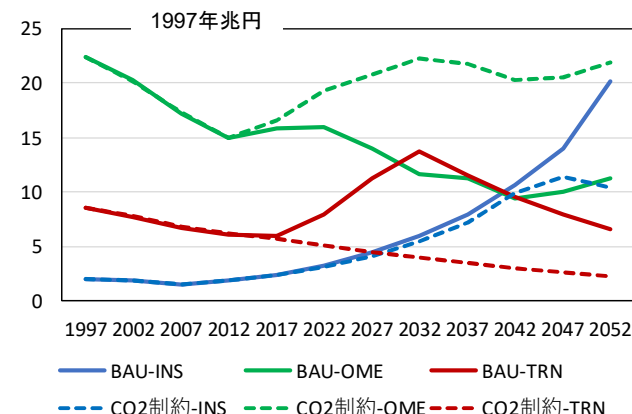


図1 炭素排出緩和政策なし（BAU）ケースとCO₂排出制約ケースにおける鉄鋼業（INS）、輸送機械製造業（TRN）および一般機械製造業（OME）の輸出額の変化

政策立案のための提案

本提案は、新技術開発の産業部門別影響の動学的経路やボトルネック課題の抽出のために、これまで例のほとんどないエネルギーフローモデルと多部門経済モデルを統合したモデルの構築を目指すものである。今後、特に低炭素社会の実現のうえでボトルネックとなる技術開発課題の探索は政策立案に資すると考えられる。

[1] S. Mori et al., Journal of Applied Input-Output Analysis 16, 21-40, 2011.

世界の水需給評価

水需給の持続可能性について、地球環境統合評価モデルとリンクした水資源需給のマクロバランスの予備的評価を行った。また、水・エネルギーネクサス問題に関して、文献調査により論点を整理し、水需給とエネルギーの関係を含めた持続可能性について課題を整理した。さらに水・エネルギーネクサス問題解決への支援、および各種のストレスに強靱な水システムの基盤整備についての政策提言を行った。

■ マクロバランスからみた世界水需給

- 水資源評価簡易モジュールを地球環境統合評価モデルGRAPE[1]に組み込み、社会経済軸（SSP; Shared Socioeconomic Pathways）と気候変動軸（RCP; Representative Concentration Pathways）の2次元での水需給の感度分析を行った。
- 合計取水量（図1）は、SSP2では気候変動に制約を設けないbaselineシナリオでの生活用および産業用取水量は同一となり、農業取水需要の差が全体の差となって現れた。産業用水取水量は、SSP1では、今世紀前半はSSP2と同程度、後半には人口減少のため低下した一方、SSP3ではGDP成長が相対的に低いため、最も低位となった。
- RCP間でもCO₂肥沃化効果¹⁾の違いなどに起因して農業用水需要が異なり、結果として合計取水量についても差異が見られた。

■ 水・エネルギーネクサス

- 文献[2,3]をもととして、エネルギー供給の水利用、ならびに水利用システムのエネルギー利用における課題の例を整理した。

1) CO₂肥沃化効果: CO₂濃度上昇に伴い、植物成長が従来と比較して促進されること。

SSP1: 技術進展高、人口低位、経済高成長シナリオ
 SSP2: 最も中庸なシナリオ
 SSP3: 技術進展低、人口高位、経済低成長シナリオ

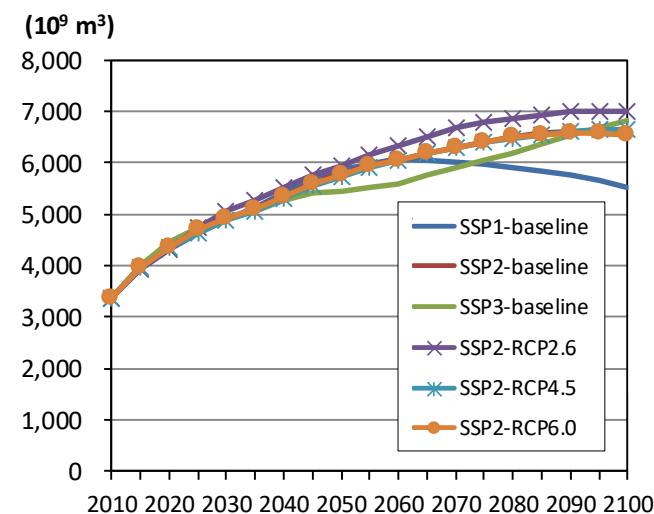


図1 世界全体での農業用・生活用・産業用の合計取水量

政策立案のための提案

質および量の両面で持続可能な水供給システムに向け、2つの国際支援に通ずる支援政策強化を提言する。

- ストレスに強靱な水供給システムの基盤整備: 気候変動、自然災害などの自然要因、水需要からの社会経済要因を考慮し、ストレスに強靱で質の高い水供給システムの確立を、特に脆弱性の高い途上地域で進める。
- エネルギー・水ネクサス問題解決への支援: 水節約型のエネルギー需給システム、およびエネルギー節約型の水需給システムの両者の確立のため、国際協力を含めた政策支援強化が必須である。

[1] Kato et al., Energy Procedia 114, pp. 6115–6123, 2017.; [2] International Energy Agency, World Energy Outlook 2016.; [3] 花崎, エネルギー・資源, Vol.39, No.4, pp. 238-241, 2018.