

カーボンニュートラル移行の加速に向けた
総合知に基づく社会シナリオ：技術シナリオ評価G

「技術経済性分析およびライフサイクルアセスメントとシナリオ連携」
1. 技術経済性分析編 —水素製造を事例として—

東京科学大学 環境・社会理工学院 大友 順一郎

研究のビジョン: エネルギー変換・物質循環型システム (C, N, Hの循環利用)

エネルギーの入力
再生可能エネルギー

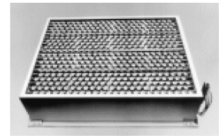


CO₂
H₂O
N₂

再生可能
エネルギー



電力
二次電池



Energy output
Electricity and heat



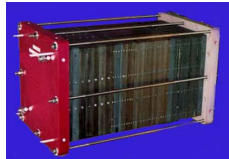
火力

CO₂回収

DAC

(Chemical
looping)

水電解



電力

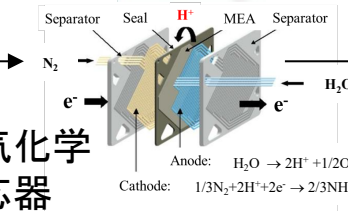
CO₂

H₂

化学合成



電気化学
反応器



C_xH_yO_z

H₂

NH₃

エネルギー
貯蔵

農業

化成品
(高付加価値)



タービン



燃料電池

移動体



産業
民生

電力市場

エネルギー変換化学

- ・イオン伝導体
- ・燃料電池
- ・電解合成
- ・化学ループ

基礎研究

(原理解明・新現象)



統合化

(全体把握・ビジョン形成)

エネルギーシステム設計

- ・エネルギー技術評価
- ・エネルギーシステム設計
- ・コストエンジニアリング

本日の講演

脱炭素に向けた技術イノベーションを社会導入に結びつけていくにはどのようなアプローチがあるでしょうか。

我々は、**技術経済性分析**や**ライフサイクルアセスメント**のモデルと社会経済シナリオのモデルの連携を模索しています。

本講演では、水素製造などを事例に、技術経済性分析とライフサイクルアセスメントのモデルを紹介し、社会経済シナリオとの連携について意見交換します。

本日（前半）の論点：

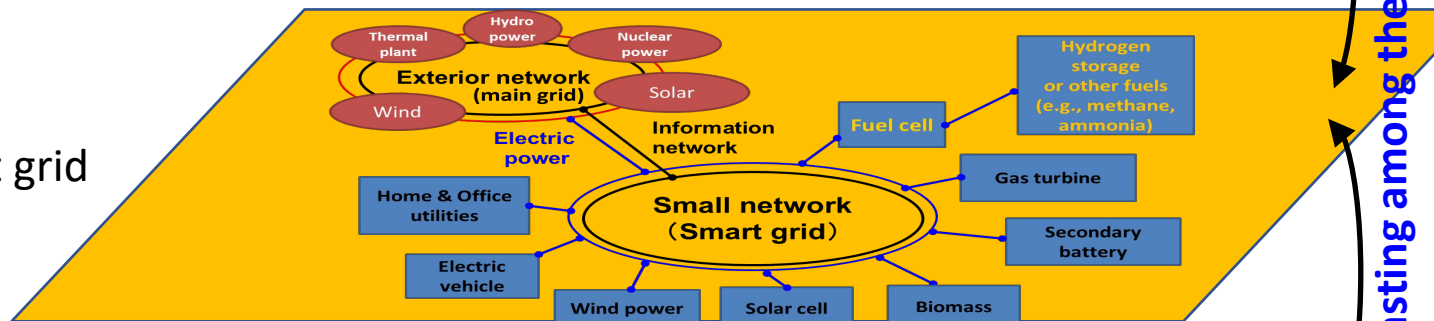
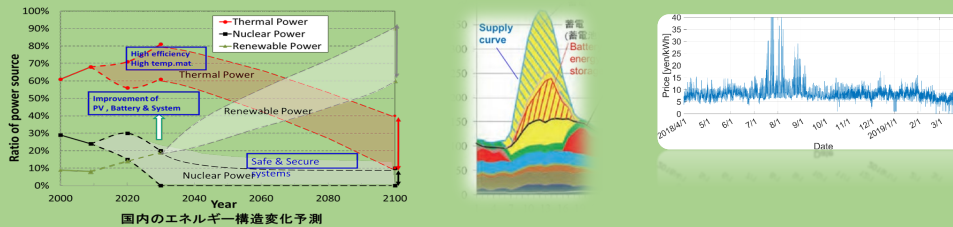
我々の技術評価・技術シナリオと社会シナリオをどのように結びつけるのか？

Society

- Energy mix
- Energy market
- Industry
- Daily life

Energy network and smart grid (ICT)

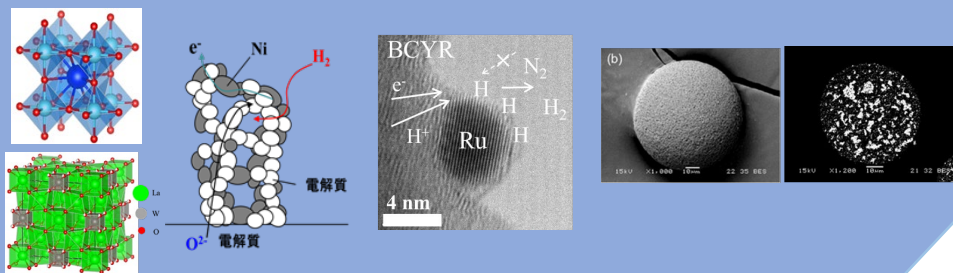
Developing evolutionary layers for energy and social transition



Device and system design



Materials and reaction design



Forecasting/backcasting among the layers

Vertical integration

Integration with the aid of informatics and data science

社会シナリオ

技術シナリオ

◆次世代エネルギー技術のTRL (Technology Readiness Level) : 技術成熟度

PV (Photovoltaic)
 結晶シリコン: 9
 ペロブスカイト型太陽電池: 4

CCUS
 アミン法: 9
 DAC・メタネーション: 6~7
 ケミカルループ法: 5

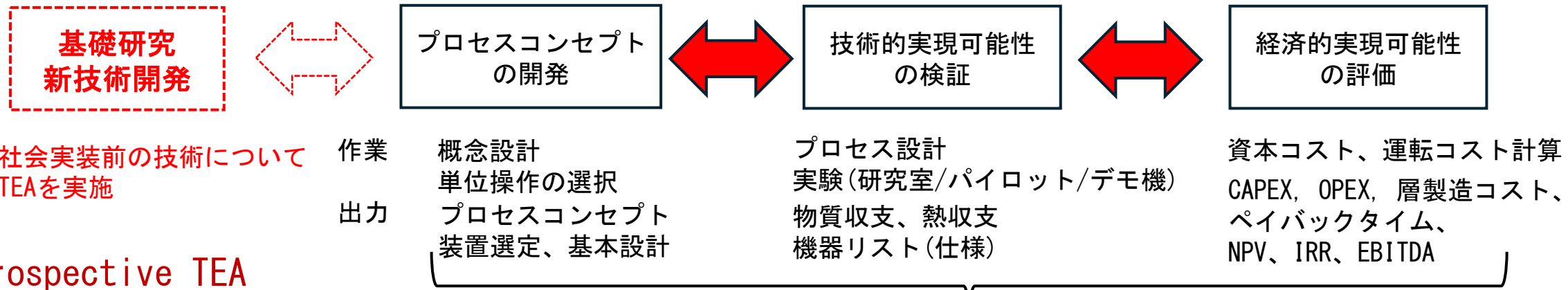
FC (Fuel cell)

FC type	AWFC	MCFC	PEMFC	SOFC	PCFC
TRL	—	9	8	9	-(3)
EC type	AWEC	—	PEMEC	SOEC	PCEC
TRL	9	—	4-8	5	-

AW: Alkaline Water MC; Molten-carbonate SO; Solid oxide
 PEM; Polymer electrolyte membrane PC; Protonic ceramic

◆技術経済性分析 (Techno-economic analysis, TEA)*

対象技術/プロセスの経済的実装性やポテンシャルを評価



Prospective TEA (予測的TEA)

新規なデバイス/システム/プロセス

従来のTEA
 新規事業やプラント設計において有効な方法

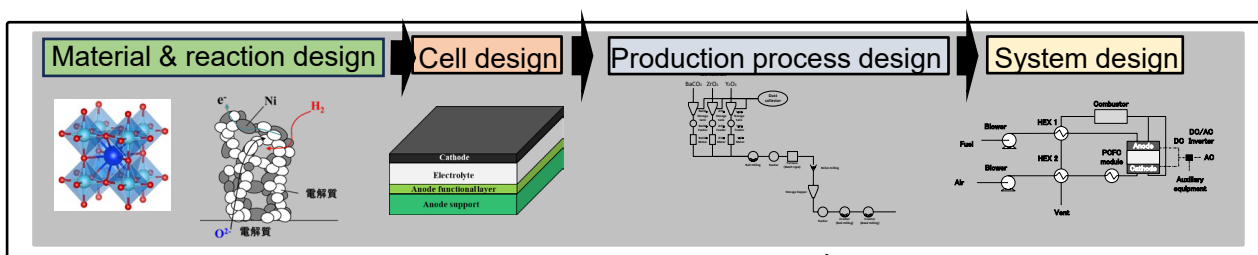
↳ コストエンジニアリング

技術評価(技術シナリオ)と社会シナリオの連携(2)

◆ TEAとシナリオ分析による分析手法

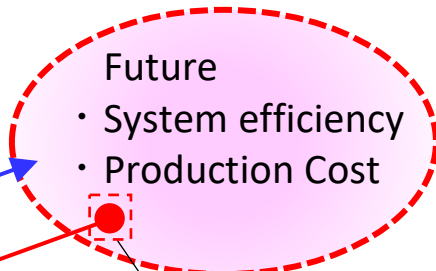
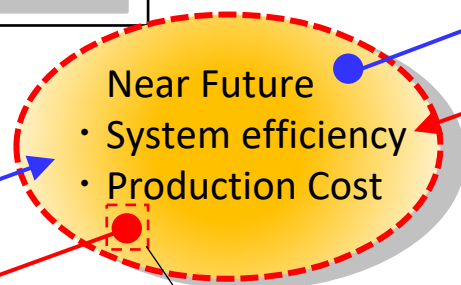
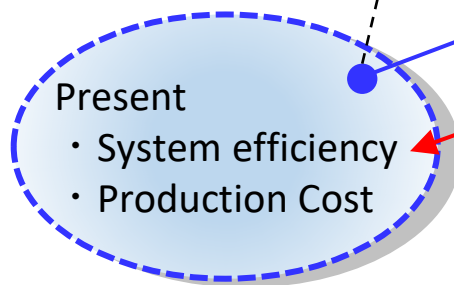
バックキャスティング手法

ある目標値設定に基づき、それを達成し得る技術提案を行う



Forecasting approach

Novel cell designs
production processes



Backcasting approach

Constrains for target values
Technological requirements

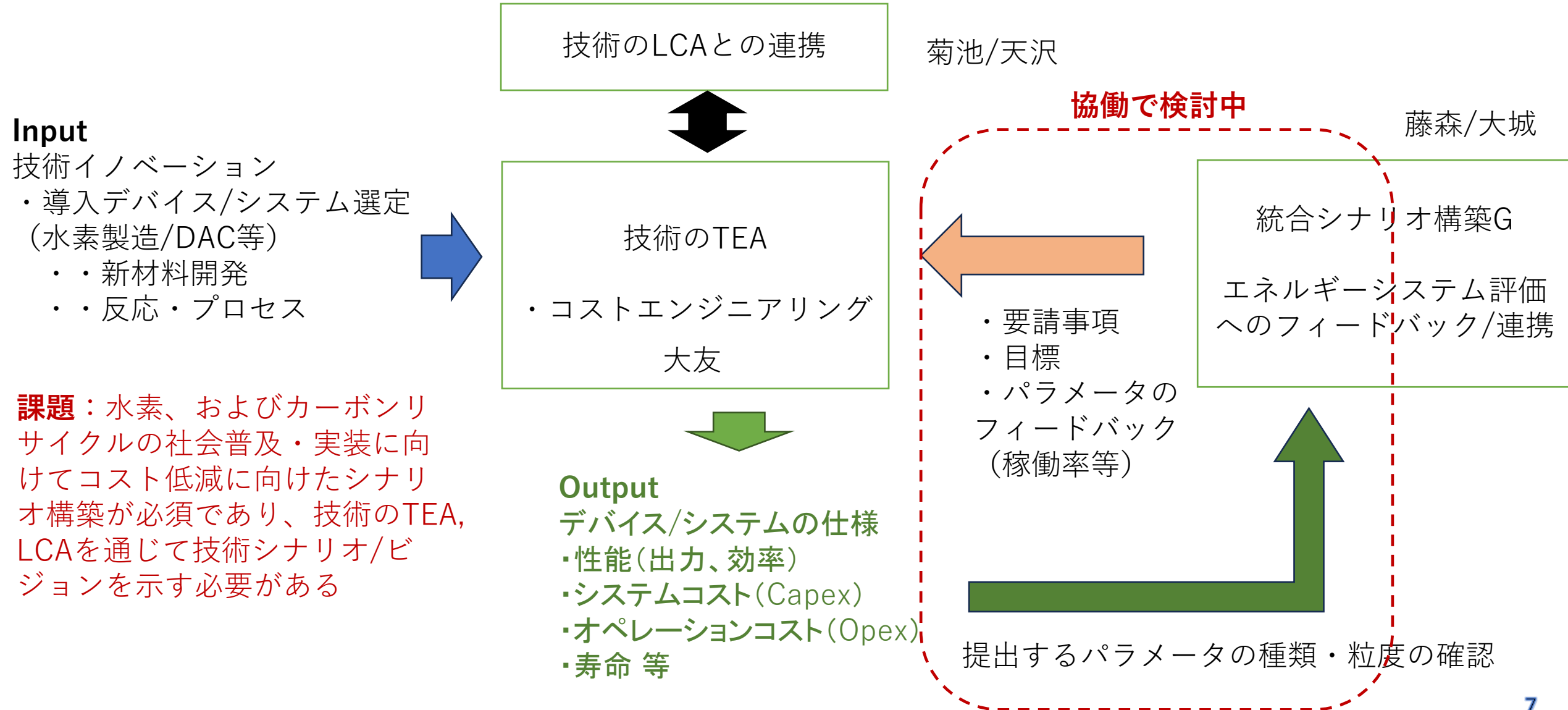
フォアキャスティング手法

現存技術を始点として、到達可能な将来性能を予測する

Time
Scale (capacity)
Impact

TEAとシナリオ分析を組み合わせた分析手法を開発

➡ デバイス・システム設計に適用

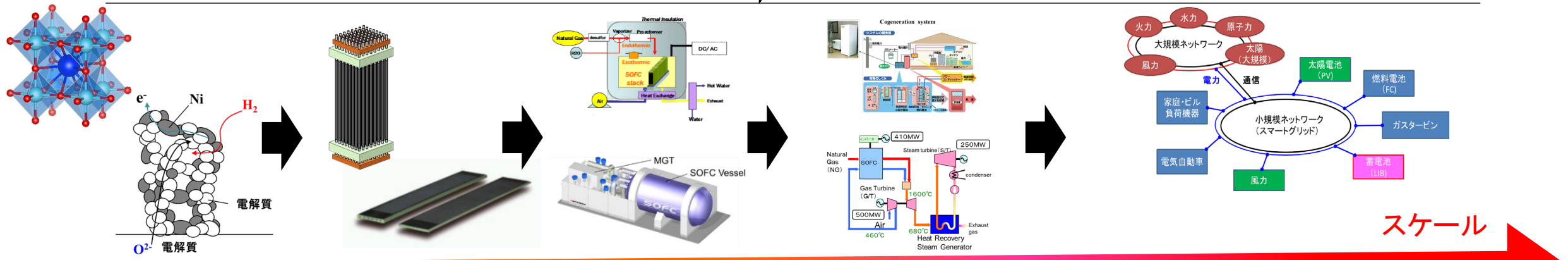


予測的・先行的TEA: コストエンジニアリング (CE)

技術導入・普及にむけた技術経済性分析(Techno-economic analysis: TEA)とシナリオ構築



材料物性 → セルデザイン → システムデザイン (モジュール) → システムデザイン (発電システム) → エネルギーシステム/電源構成



スケール (Scale)

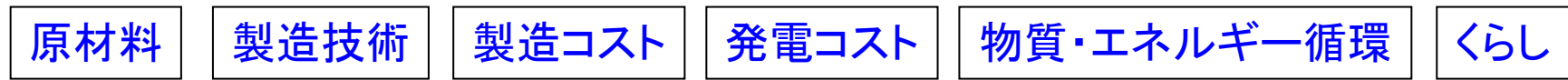


各種パラメータ(モジュール化・粗視化) (Various parameters (modularization/coarse visualization))

技術導入シナリオを各種パラメータで構築 (Constructing technology introduction scenarios with various parameters)

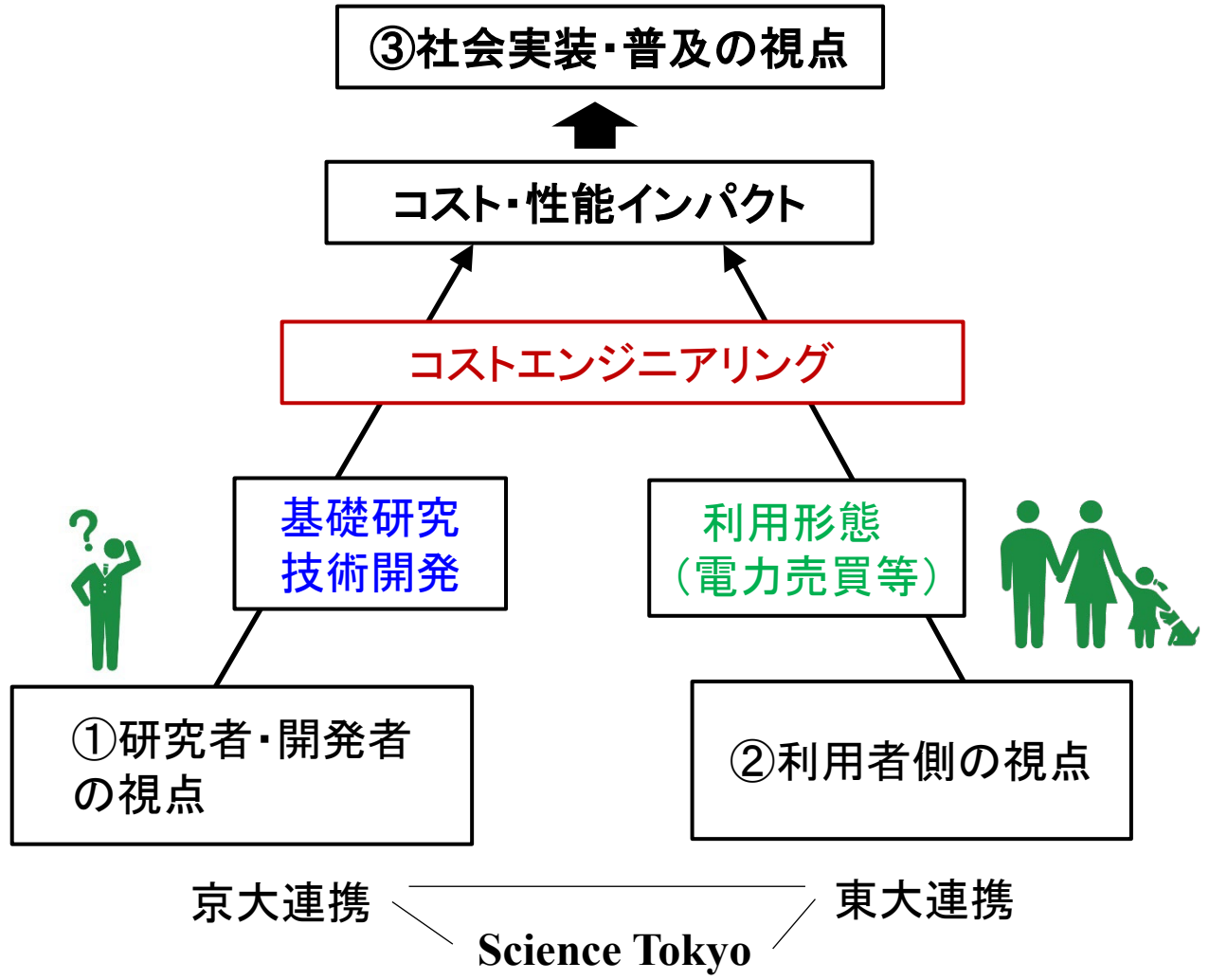
技術革新・イノベーション (Technology innovation/Innovation)

新材料 (New materials) 新原理 (New principles) 界面構造 (Interface structure) システム (System) エネルギー (Energy) 技術共生・エネルギー市場 (Technology symbiosis/Energy market)
 最適化技術 (Optimization technology) 貯蔵技術 (Storage technology) IoT・アグリゲーター (IoT/Aggregator)



システムデザインとコストエンジニアリング

コストエンジニアリングによる複数の視点



材料費
 役
 件費
 備費
 設費
 器を工場内

設費

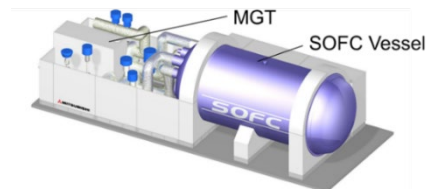
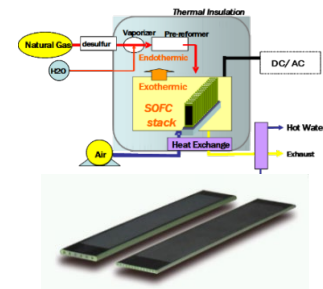
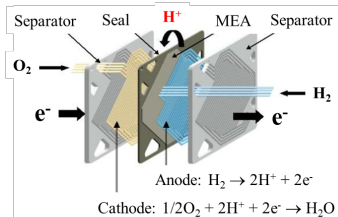
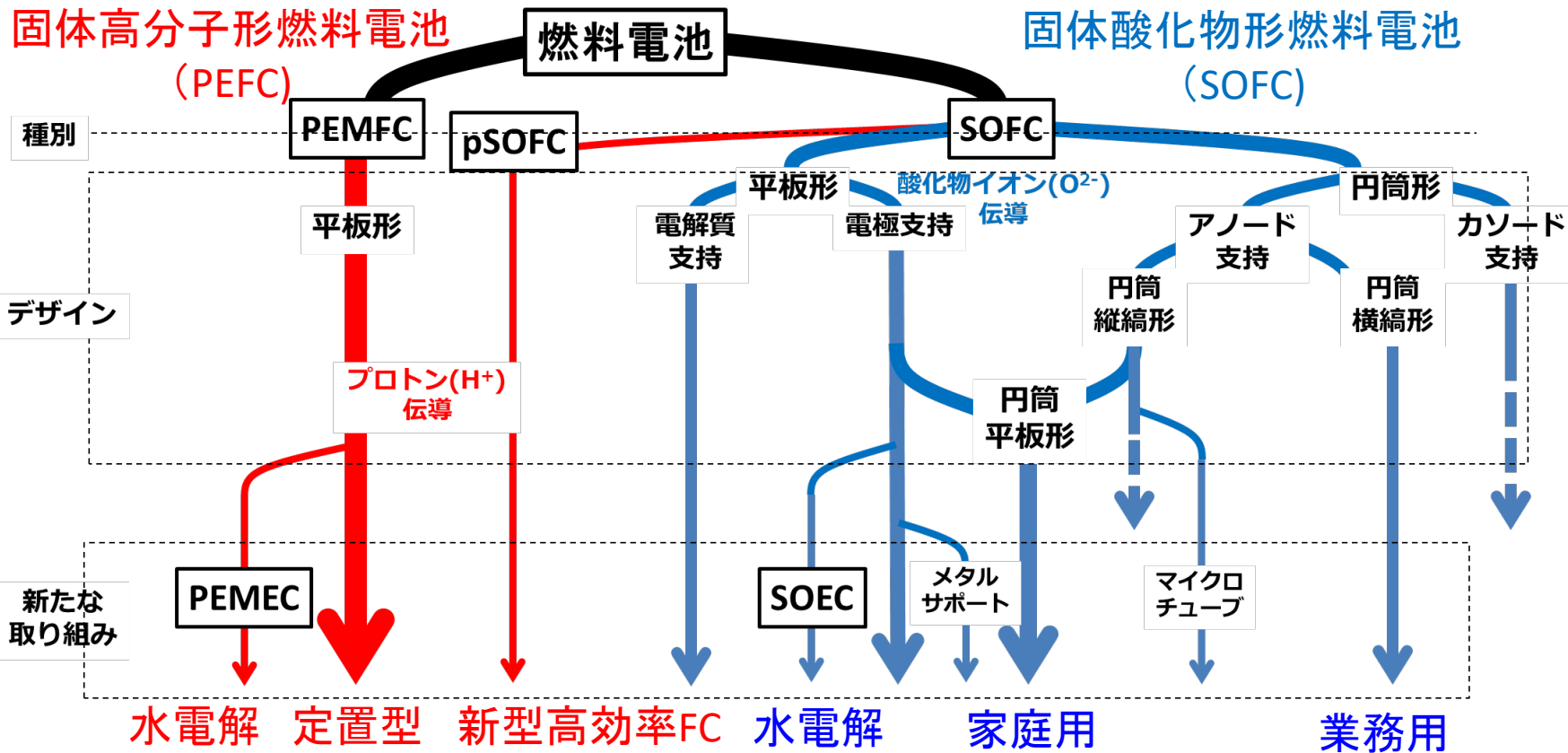
(情報・データ科学の援用)
 ボトムアップ

材料)
 デザイン

・発電シミュレーション

(現状の進捗紹介)

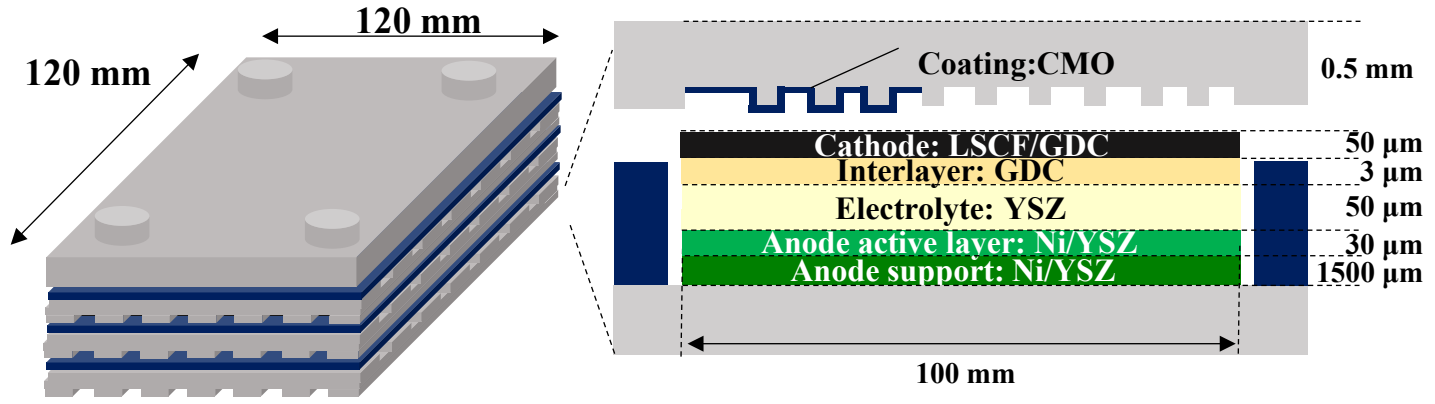
燃料電池・水素製造・利用技術のコストエンジニアリング



◆ ①SOEC単セル設計

カソード支持平板型セル

単セルの数値モデルを用いて
SOEC単セルの運転電流電圧を算出



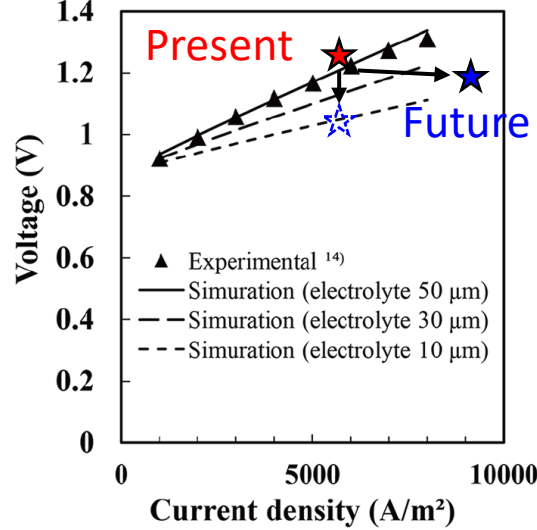
単セル構成とスタック概観

Note: $(\text{ZrO}_2)_{0.92}(\text{Y}_2\text{O}_3)_{0.08}$ (YSZ), $\text{Ce}_{0.8}\text{Gd}_{0.2}\text{O}_{1.9}$ (GDC), $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{Co}_{0.2}\text{Fe}_{0.8}\text{O}_3$ (LSCF), Co_2MnO_4 (CMO)

<p>起電力</p> $E_{\text{OCV}} = E_0 + \frac{RT}{2F} \ln \left[\frac{P_{\text{H}_2,(\text{A})}^0 (P_{\text{O}_2,(\text{C})}^0)^{\frac{1}{2}}}{P_{\text{H}_2\text{O}(\text{A})}^0} \right]$	<p>運転電圧</p> $V_{\text{Cell}} = E_{\text{OCV}} + (\eta_{\text{ohm}} + \eta_{\text{act,A}} + \eta_{\text{act,C}} + \eta_{\text{con,A}} + \eta_{\text{con,C}})$	<p>電極のパラメータ</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th></th> <th>Value</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Exponent</td> <td>a</td> <td>-0.1</td> </tr> <tr> <td>Exponent</td> <td>b</td> <td>0.33</td> </tr> <tr> <td>Exponent</td> <td>m</td> <td>0.22</td> </tr> <tr> <td>Fuel pre-exponential factor (A/m^2)</td> <td>γ_A</td> <td>$1.82527 \cdot 10^6 \cdot T$</td> </tr> <tr> <td>Air pre-exponential factor (A/m^2)</td> <td>γ_C</td> <td>$1.51556 \cdot 10^8 \cdot T$</td> </tr> <tr> <td>Fuel activation energy (kJ/mol)</td> <td>$E_{\text{act,A}}$</td> <td>105.04</td> </tr> <tr> <td>Air activation energy (kJ/mol)</td> <td>$E_{\text{act,C}}$</td> <td>139.86</td> </tr> </tbody> </table>			Value	Exponent	a	-0.1	Exponent	b	0.33	Exponent	m	0.22	Fuel pre-exponential factor (A/m^2)	γ_A	$1.82527 \cdot 10^6 \cdot T$	Air pre-exponential factor (A/m^2)	γ_C	$1.51556 \cdot 10^8 \cdot T$	Fuel activation energy (kJ/mol)	$E_{\text{act,A}}$	105.04	Air activation energy (kJ/mol)	$E_{\text{act,C}}$	139.86
		Value																								
Exponent	a	-0.1																								
Exponent	b	0.33																								
Exponent	m	0.22																								
Fuel pre-exponential factor (A/m^2)	γ_A	$1.82527 \cdot 10^6 \cdot T$																								
Air pre-exponential factor (A/m^2)	γ_C	$1.51556 \cdot 10^8 \cdot T$																								
Fuel activation energy (kJ/mol)	$E_{\text{act,A}}$	105.04																								
Air activation energy (kJ/mol)	$E_{\text{act,C}}$	139.86																								
<p>電解質</p> <ul style="list-style-type: none"> 導電率 $\eta_{\text{ohm}} = i \frac{l_e}{\sigma_{\text{O}_2^-}}$ $\sigma_{\text{O}_2^-} = 3.34 \times 10^4 \exp\left(-\frac{10300}{T}\right)$	<p>電極</p> <ul style="list-style-type: none"> 交換電流密度 $\eta_{\text{act,k}} = \frac{2RT}{zF} \sinh^{-1}\left(\frac{i}{2i_{0,k}}\right)$ $i_{0,C} = \gamma_C (P_{\text{H}_2,(\text{C})}^1)^a (P_{\text{H}_2\text{O}(\text{C})}^1)^b \exp\left(-\frac{E_{\text{act,C}}}{RT}\right)$ $i_{0,A} = \gamma_A (P_{\text{O}_2,(\text{A})}^1)^m \exp\left(-\frac{E_{\text{act,A}}}{RT}\right)$	<ul style="list-style-type: none"> 濃度過電圧 $\eta_{\text{con,C}} = \frac{RT}{2F} \ln \left[\frac{P_{\text{H}_2,(\text{A})}^1}{P_{\text{H}_2,(\text{A})}^0} \times \frac{P_{\text{H}_2\text{O}(\text{A})}^0}{P_{\text{H}_2\text{O}(\text{A})}^1} \right]$ $\eta_{\text{con,A}} = \frac{RT}{4F} \ln \left[\frac{P_{\text{O}_2,(\text{A})}^1}{P_{\text{O}_2,(\text{A})}^0} \right]$																								

電解セル性能向上

750 °C



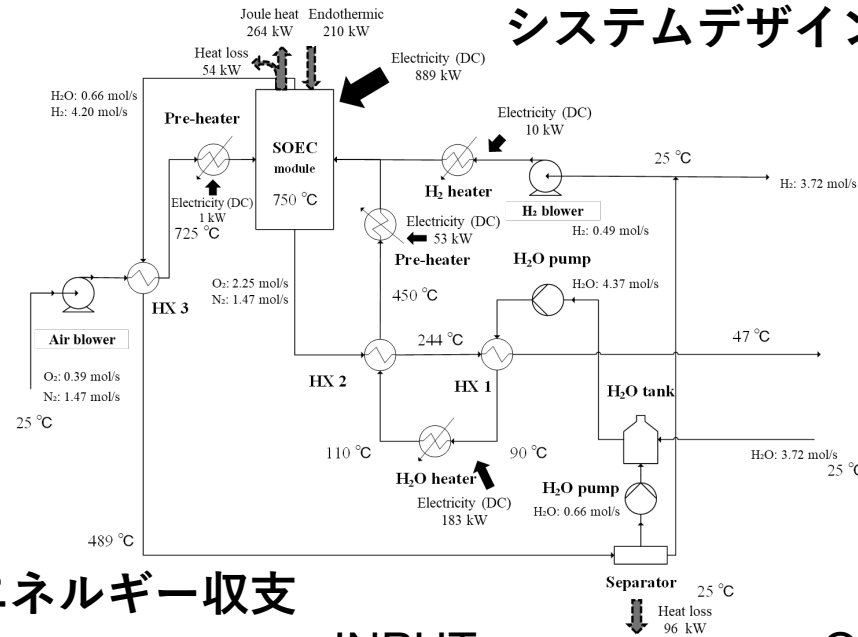
セル性能の現状予測、および電極・電解質材料と構造の改善による性能向上予測

	$l_e = 50 \mu\text{m}$
Current density	0.62
Cell voltage	1.24
Cell number (approx.)	11,500
Hydrogen Production rate	
Hydrogen production efficiency (LHV)_without compression	75.7
Hydrogen production efficiency (LHV)	69.9
Unit power of hydrogen compression	
Input (all processes) AC	1.29

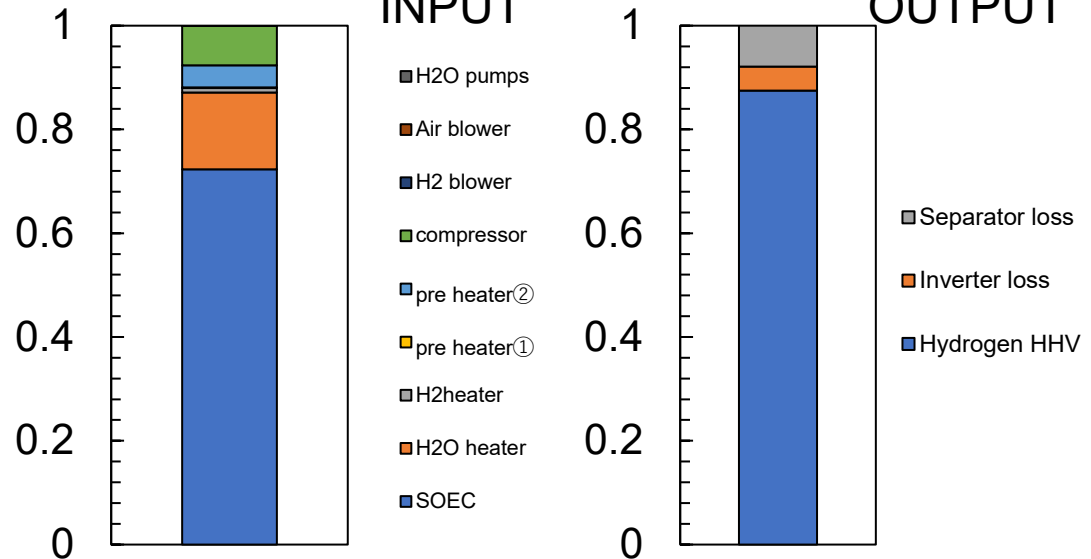
Note: Inverter efficiency (=0.96) was assumed.

- ★ 4.0 kWh/Nm³-H₂ (without compression)
- ★ 3.8 kWh/Nm³-H₂ (without compression)

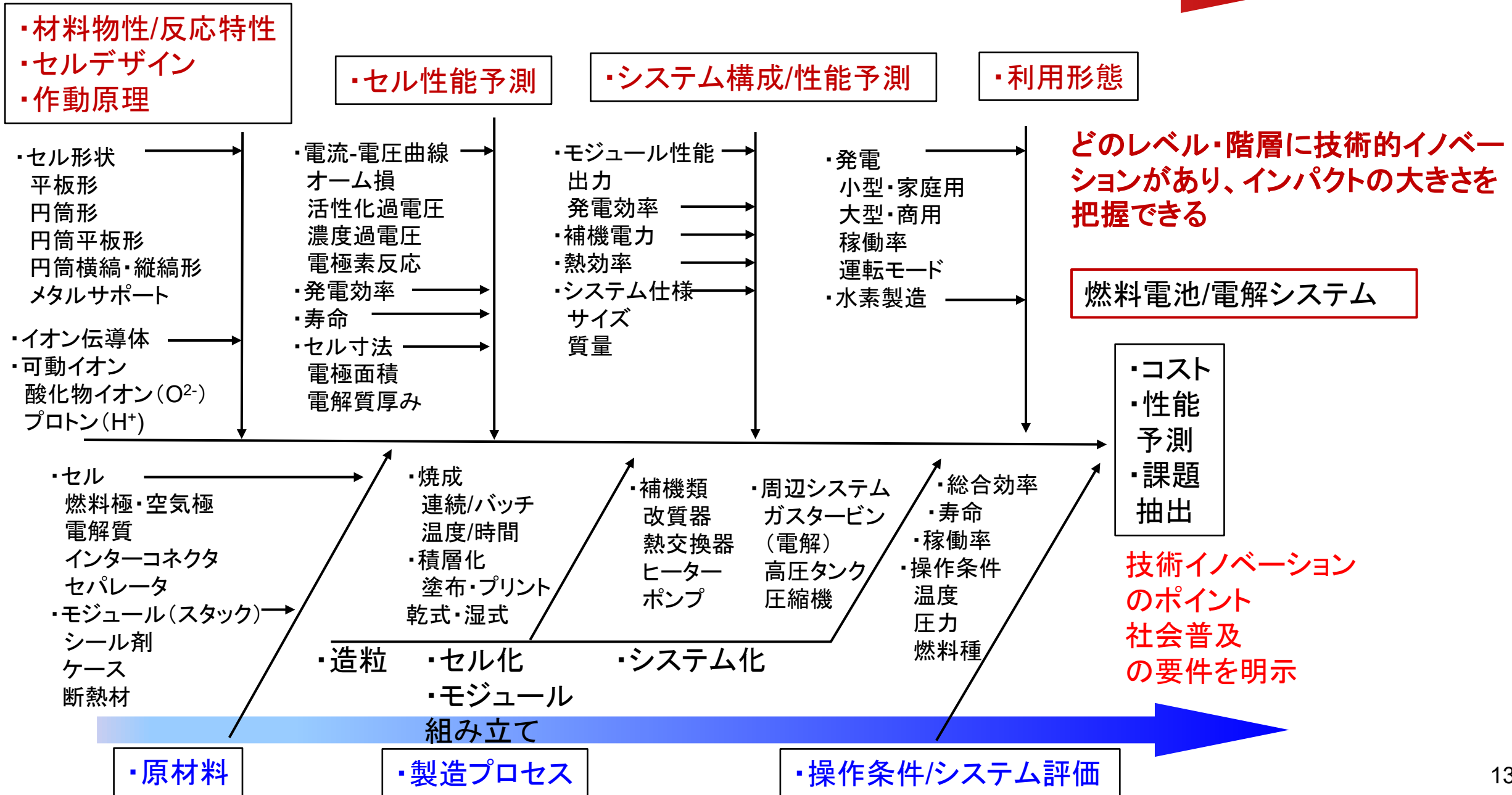
システムデザインの改善



エネルギー収支



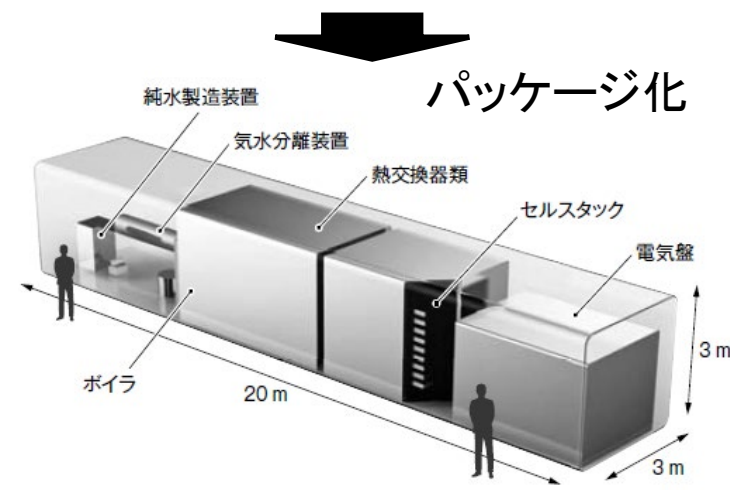
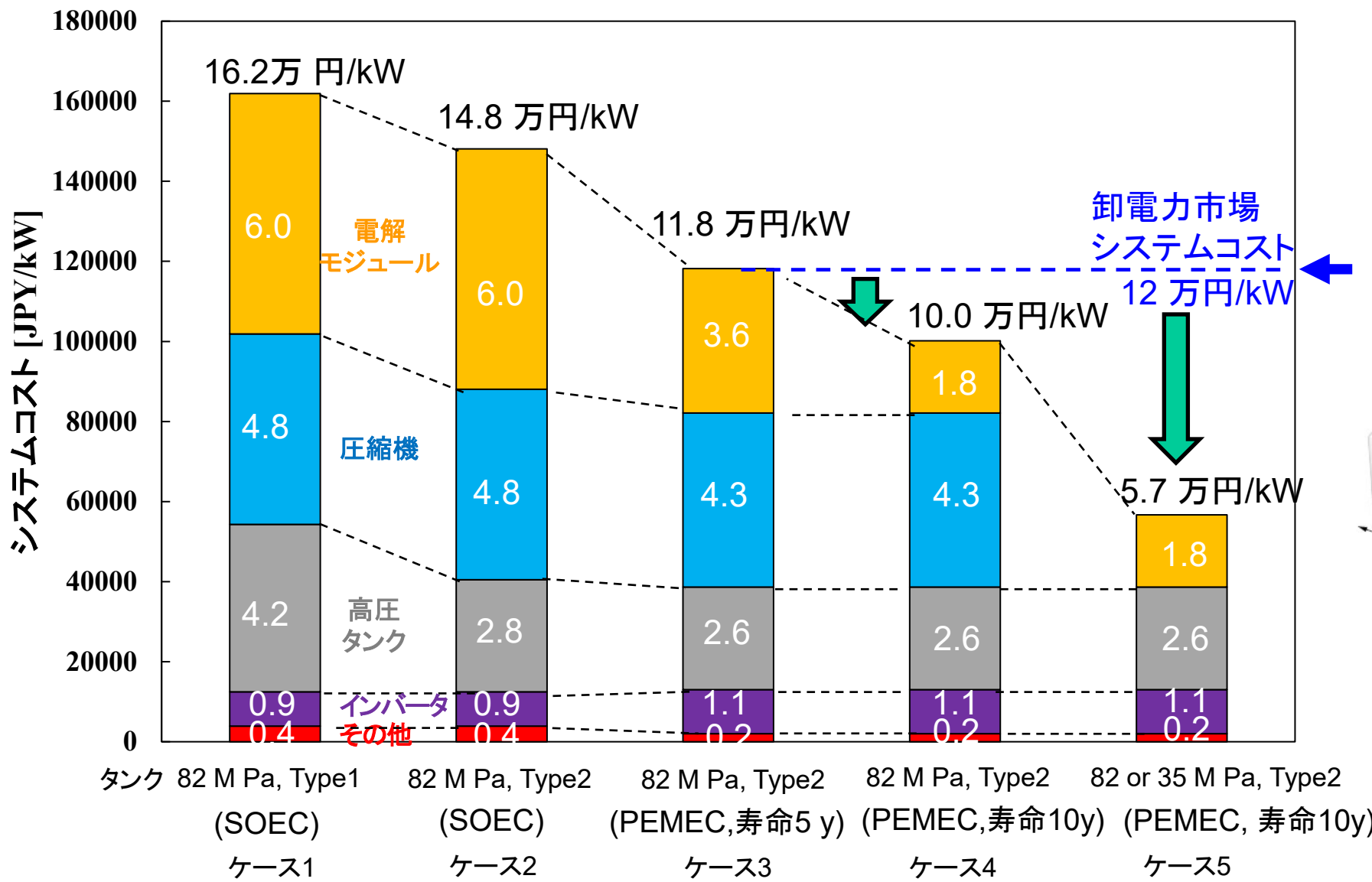
燃料電池の技術イノベーションの構造化（技術評価・予測手法の一般化・汎用化）



電解水素製造システム評価

技術革新とコスト低減の道筋:

年産100台: 300 Nm³/h
(1.2-1.3 MW級 SOEC, PEMEC)



松永 他, 東芝レビュー71(5)41-45(2016)

企業によるSOEC開発の現状：世界では発電から水電解に転換

Table Present and target performances of water electrolysis systems (1)

	Year	Alkaline	PEM	SOEC
Operating temperature (°C)		70-90	50-80	700-850
Cell pressure (bar)	2020 (Current)	< 30	< 30	< 10
	2050 (Target)	> 70	> 70	> 20
System efficiency (kWh/Nm ³ -H ₂)	2020 (Current)	4.5-7.0	4.5-7.4	4.0-4.9
	2050 (Target)	< 4.0	< 4.0	< 3.6
Lifetime (10 ³ h)	2020 (Current)	60	50-80	< 20
	2050 (Target)	100	100-120	80



Bloomenergy



Fuel Cell Energy



Ceres



TOSHIBA



DENSO



Sunfire

Table Summary of recent commercial scale SOEC systems

Year	Company	Country	Scale (Nm ³ -H ₂ /h)	Hydrogen production intensity (kWh/Nm ³ -H ₂)	Lifetime (years)	Ref.
2021	Sunfire	GER	750	3.6 (AC) / 3.3 (DC)	—	2 850 °C
2022	Bloomenergy	USA	2823	3.5	5>	3
2022	Fuel Cell Energy	USA	280	3.9	—	4
2023	DENSO	JPN	—	4.2 (target)	10 (target)	5
2023	TOSHIBA	JPN	—	4.0 (target)	>9 (target)	6
2021 -	MHI	JPN	—	3.5 (module)	—	7
2021 -	Haldor Topsoe	DNK	—	—	—	8
2023	Ceres Power	GBR	280 (target)	3.6 (target)	—	9

(1) IRENA. Green hydrogen cost reduction. Scaling up electrolyzers to meet the 1.5° C climate goal [Online]. Available from: https://www.irena.org/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Dec/IRENA_Green_hydrogen_cost_2020.pdf (Accessed: 31 August 2023).

(2) Sunfire, [https://www.sunfire.de/files/sunfire/images/content/Sunfire.de%20\(neu\)/Sunfire-Factsheet-HyLink-SOEC-20210303.pdf](https://www.sunfire.de/files/sunfire/images/content/Sunfire.de%20(neu)/Sunfire-Factsheet-HyLink-SOEC-20210303.pdf)

(3) Bloomenergy, https://www.bloomenergy.com/wp-content/uploads/Data-Sheet_Bloom-Electrolyzer-10-MW_UPDATED-6.24.22.pdf

(4) Fuel Cell Energy, <https://go.fuelcellenergy.com/hubfs/solid-oxide-electrolyzer-spec-sheet.pdf>

(5) 日経XTECH, <https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/column/18/01537/00670/>

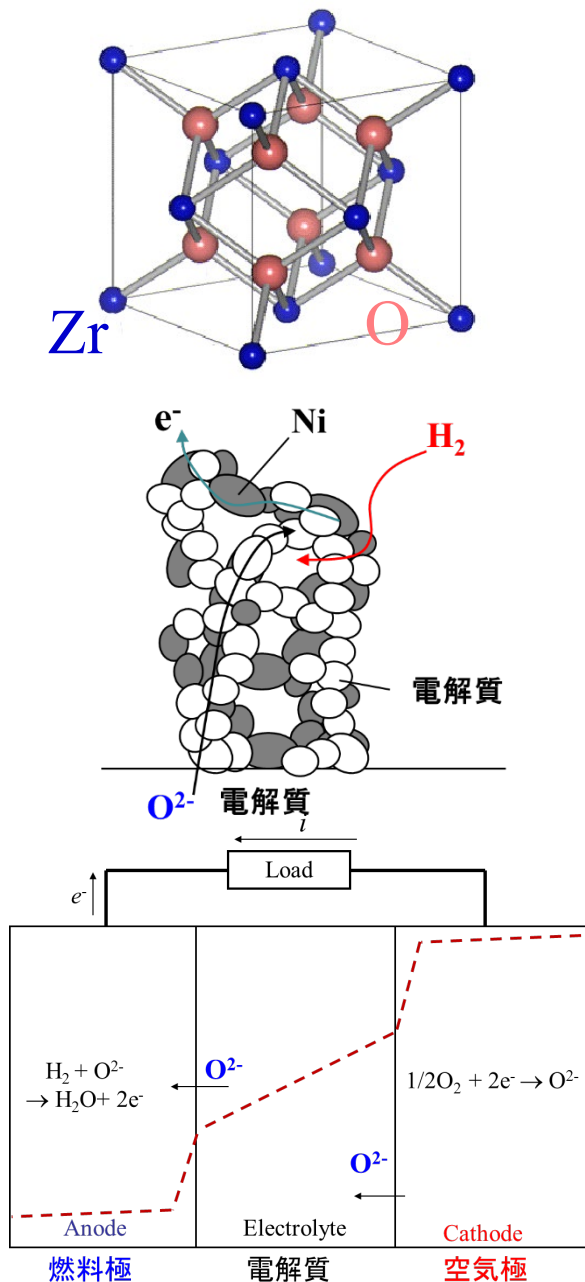
(6) (公社)低温工学・超電導学会 一般公開シンポジウム, <https://www.csj.or.jp/conference/Symposium20220622/JISato.pdf>

(7) 三菱技報2021, <https://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/583/583080.pdf>

(8) TOPSOE, <https://www.topsoe.com/our-resources/knowledge/our-products/equipment/soec>

(9) CERES, <https://www.climate-change-solutions.co.uk/wp-content/uploads/2014/09/PMGallery1400Speaker3JonHarman.pdf>

例：燃料電池のセルデザインの主要パラメータ



σ イオン伝導率 (S m^{-1})

t_i イオン・電子・正孔輸率 (S m^{-1})

➡ 輸送物性がセルの基本性能を支配

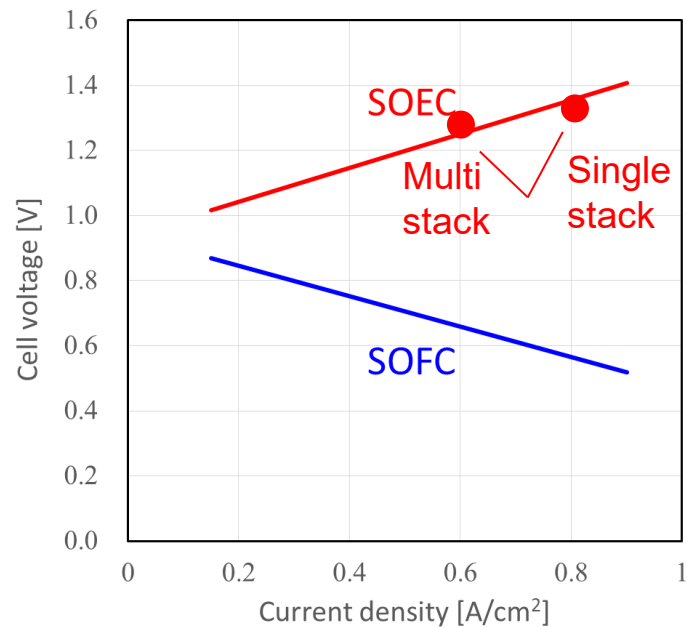
i_0 交換電流密度 (A m^{-2})

(素反応速度定数 k_i , 電極構造 (三相界面) などの複雑な情報を含む)

➡ 素反応・構造を縮約したパラメータ

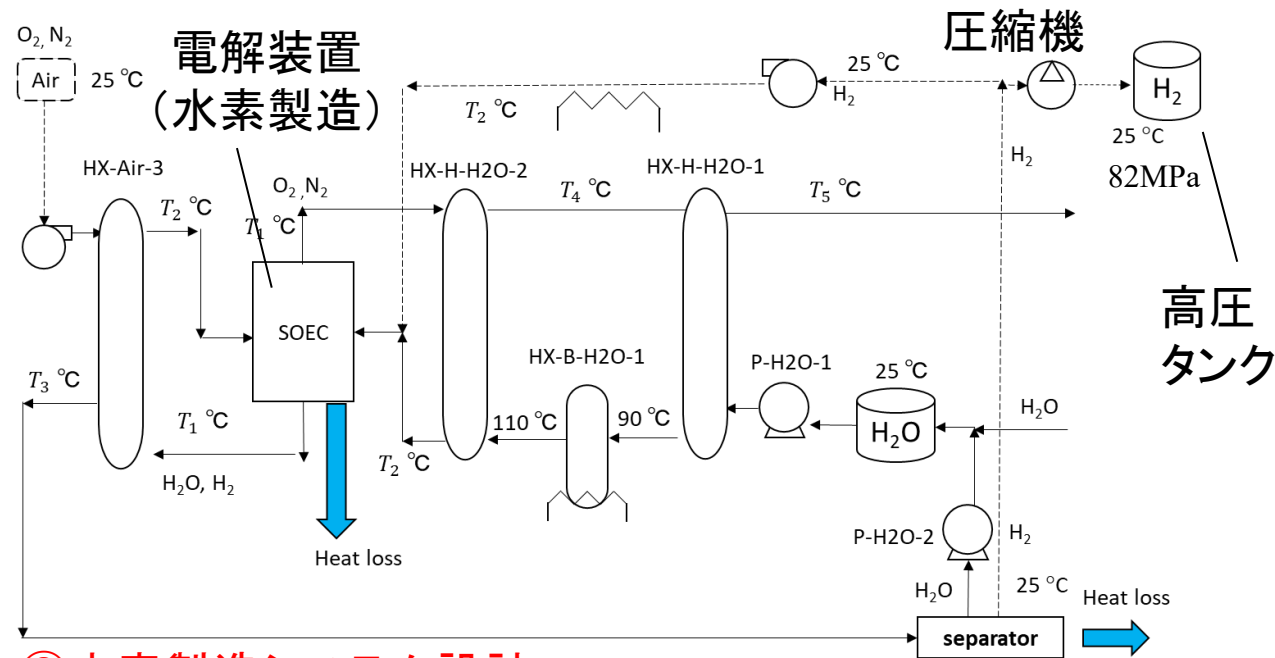
η 電気化学ポテンシャル (J/mol)

➡ η の勾配がセル全体性能・発電効率を支配



—SOFCとSOECの電流-電圧曲線 (1023 K)

①セル・モジュール設計



②水素製造システム設計

③システム性能予測・評価

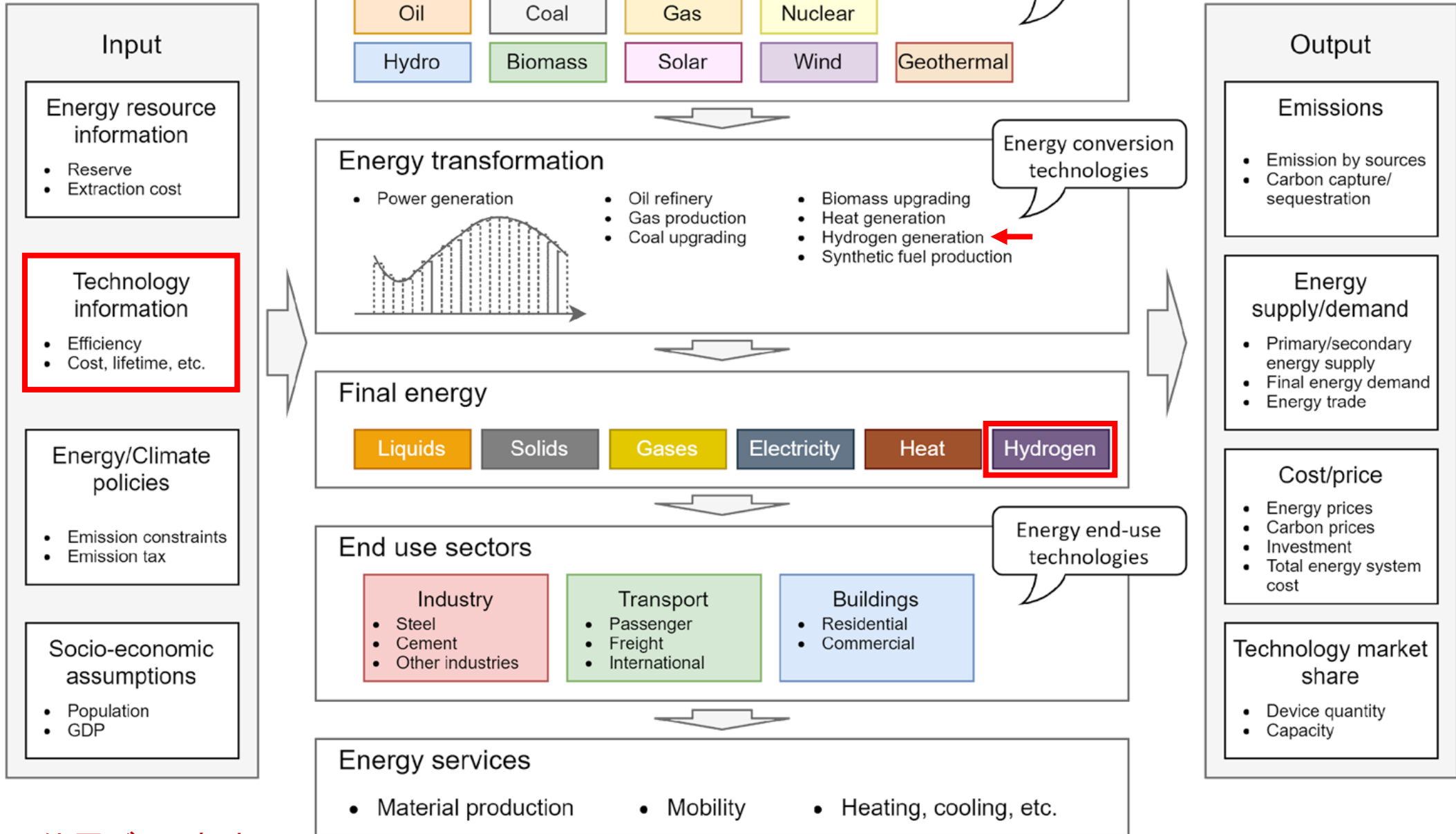
表 SOEC水素製造原単位 (750°C作動)

電流密度 (A/cm ²) ; セル電圧 (V) (水蒸気電解時, 熱中立点を考慮)		0.6; 1.2
水素圧縮電力原単位 : 82MPa (kWh/Nm ³ -H ₂)		0.31
水素製造原単位 : SOECモジュール (kWh/Nm ³ -H ₂)		3.2
水素製造原単位 : システム (kWh/Nm ³ -H ₂)	SOEC	4.0 (4.3)
電解効率 (括弧内は水素圧縮過程を含む) (% (LHV))	SOEC	81 (74)
水素製造原単位 : システム (kWh/Nm ³ -H ₂)	PEMEC	4.5 (4.8)
電解効率 (括弧内は水素圧縮過程を含む) (% (LHV))	PEMEC	73 (67)

圧縮されたパラメータ情報

- ・水素製造効率
- ・装置寿命
- ・システムコスト (固定費: CAPEX)
- ・オペレーションコスト (変動費: OPEX)

水電解による水素製造



パラメータの位置づけ・意味は、
技術評価側と社会シナリオ側で異なる

JST GteX HPより (2024年11月17日参照)

革新的GX技術創出事業

新着情報	プレス発表	お知らせ	イベント	
2024年 10月 1日	プレス発表	水素		
<u>[水素領域・水電解チーム] 触媒寿命の数理モデル～電極触媒の耐久性予測に向けて～</u>				
2024年 9月10日	プレス発表	蓄電池		
<u>革新的GX技術創出事業（GteX）新規研究開発課題の決定について</u>				
2024年 8月27日	プレス発表	蓄電池		
<u>[蓄電池領域・先進リチウムイオン電池チーム] 実用的な高エネルギー密度のコバルト・ニッケルフリー電池材料を開発。ナノ構造を高度に制御したリチウムマンガン酸化物材料の合成に成功</u>				
2024年 8月20日	プレス発表	水素		
<u>[水素領域・水電解チーム] 極性金属酸化物クラスターを構成要素とするイオン結晶による高速プロトン伝導体を開発—環境にやさしく高効率な水素エネルギーシステムへの応用に期待—</u>				
2023年 10月 3日	プレス発表	蓄電池	水素	バイオものづくり
<u>革新的GX技術創出事業（GteX）新規研究開発課題の決定について</u>				
2023年 5月11日	プレス発表	蓄電池	水素	バイオものづくり
<u>革新的GX技術創出事業（GteX）における2023年度研究開発提案の募集について</u>				

この成果のインパクトは説明できるでしょうか？

研究を実施している当事者にも難しい問いです

この点の橋渡しすることができると本プロジェクトです

▶ [プレス発表一覧](#)

まとめ

脱炭素に向けた技術イノベーションを社会導入に結びつけることを念頭に、予測的・先行的な技術経済性分析（TEA）の手法について解説した。

予測的TEAでは、各階層のパラメータに技術イノベーションが取り込まれるが、社会経済シナリオ（統合シナリオ）に引き渡す時点でパラメータに含まれる情報が圧縮される。

パラメータの解釈や意義は、技術シナリオと社会シナリオの両者で異なることが予想されるため、両者の対話と理解が求められる。

意見交換：

我々の技術評価・技術シナリオと社会シナリオをどのように結びつけ、活用するのか？

あるいは、だれにどの立場で参加してもらうか、あるいは誰に対して成果を発信するべきか？