

エネルギー使用評価システムに関する調査研究の要約

1. 本研究の背景と目的

地球温暖化抑制のための技術や地球温暖化に密接に関連するエネルギー技術の開発・改良が国家規模で推進され、多くの予算が割り当てられている。しかし、研究開発の推進や研究開発予算の配分に関しては、専門家の意見を参考に戦略・方針が練られているものの、地球温暖化は非常に複雑かつ長期的な問題であり、必ずしも客観的・合理的な指針が確立されているわけではない。また、COP3 で取り決められた CO₂ 削減目標の達成は喫緊の課題であるが、第 1 約束期間以降も厳しい削減目標が課せられることは必至の情勢であり、これらへの対応を念頭に地球温暖化対策技術のより効果的、かつ、より効率的な開発が求められている。

本研究は、20～30 年以内に見込まれる地球温暖化対策・エネルギー関連技術を対象に、その技術開発戦略や方針の策定に有用となる客観的で定量的な情報を提供できる評価システムを開発することと、これを用いて具体的な地球温暖化対策・エネルギー関連技術について定量的な評価結果を導出することを目的とした。この評価には 2 つの側面がある。ひとつは、これら技術の地球温暖化抑制という視点を含めた重要度であり、性能・コストを含め目標とする技術が開発されたときに推定される技術導入量、温暖化削減効果、要するコスト等に関する評価である。もうひとつは、それら技術の開発に関する側面であり、技術開発の成功確率はどの程度で、その開発完了時期はいつ頃と見込まれるのかに関する評価であり、さらに、技術開発のボトルネックはどこにあり、どの要素技術開発に重点的に開発資金を投入するのがよいか等を評価することである。

2. 研究経緯の概要

本研究は平成 11 年度から実施したが、まず、上記のような技術評価を行うのに適切な手法の検討から開始した。その結果、地球温暖化対策技術・エネルギー関連技術の評価システムとして、技術間の開発優先度に関するの定量的評価（技術重要度評価）と個別技術の技術開発プロセスの分析評価との 2 つのアプローチを採用することとした。

技術の重要度評価については、我が国の将来における、ある想定条件下での種々の地球温暖化対策・エネルギー関連技術の最適導入量等を計算するための数理計画モデルを開発することとした。そのモデルにおいては、エネルギー転換部門および最終エネルギー需要部門（産業部門、民生部門および運輸部門）で利用される高効率エネルギー利用技術や CO₂ 回収・貯留技術等の主要な対策技術を網羅し、その技術間の優劣が評価できることが望まれる。そこで、まず平成 12 年度には、将来の任意の一時点を

評価対象として、CO₂排出量が特に多い部門として知られる発電部門の技術の評価対象とできるようなモデル構築を行い、平成13年度には、これに加えて火力発電所からのCO₂回収技術、運輸部門における燃料電池自動車などの各種自動車技術および大規模電力貯蔵技術の評価対象とできるようにモデルを拡張した。さらに平成14年度においては、将来の任意の一時点のみを評価対象としていた本モデルを、2030年までの期間について、設備ストックなどの経年的な変化を考慮しつつ、複数時点を評価できるように拡張した。

一方、R&Dプロセス分析の評価手法としては、GERT手法とペトリネット手法の検討を行ったが、確率的な扱いが容易なことから、GERT手法を採用し評価システムの開発を進めた。まず、評価例として、熱効率の異なる複数の石炭ガス化複合発電（IGCC）、液化天然ガス複合発電（LNGCC）技術を取り上げ、技術動向調査を基に、要素技術への分解を行うと共に、分解した要素技術の開発プロセスを、GERTに基づいて表現したネットワークチャートの作成を行った。また、このチャートに基づいてGERT演算を行う分析評価システム（計算機プログラム）の構築と検証を行った。そして、平成12年度には、実際に要素技術開発期間に関する見通し等のデータを専門家へのアンケートを通して収集し、IGCC等の技術開発に関する具体的な評価を行い、対策技術の開発時間、実現確率や技術開発の鍵を握る要素技術等を明確化するなどの評価を行った。その後、CO₂分離・回収技術、高温形燃料電池発電技術、超電導電力応用技術、固体高分子形燃料電池（PEFC）技術といった地球温暖化対策・エネルギー関連技術についても、同様の評価を行い、それぞれの技術開発戦略に関する知見を提供すると同時に、開発した評価システムの有用性についても確認することができた。

3. 開発した技術評価システムの概要

3.1 評価システムの想定利用者と利用場面

本研究で開発した技術評価システムは、20～30年以内に実現が見込まれる地球温暖化対策技術やエネルギー関連技術の比較的大規模な技術開発に関係する意思決定者による利用を想定している（政府や公的研究機関、民間企業の研究開発部門等の意思決定者が対象となるが、評価のための作業量も考慮すると、長期的な開発を担う政府や公的研究機関が適している）。

利用場面としては、大きく分けて次のような2種類が想定される。

- ある地球温暖化対策・エネルギー関連技術の技術開発を行おうとしていて、その性能・コスト・運用開始可能時期等の見込み値もしくは目標値がわかっているが、その技術が、日本全体でどの程度導入が見込まれるのか、また、そのときのCO₂削減効果、地球温暖化対策・エネルギー関連の総システムコストの低減はどの程度なのか等、地球温暖化対策・エネルギー関連技術の重要度に関する情報を得たい場合に有用である。

- 開発しようとしている、もしくは、開発している地球温暖化対策・エネルギー関連技術の技術開発成功確率はどの程度と見込まれるのか、その開発完了時期はいつ頃と見込まれるのかを、当該対象技術を構成する要素技術の成功確率や開発に要する期間に基づいて評価したいときに利用できる。更には、その技術開発におけるボトルネックはどこにあり、開発資金をどの要素技術開発に重点的に配分するのが良いのか等を評価したい場合にも有用である。

3.2 技術評価システムの構成

本調査研究で構築した「エネルギー・環境技術総合評価システム」は、上記の 2 種類の利用場面に対応して、次の 2 つによって構成される（図 1 参照）。

- 地球温暖化対策技術の重要度に関する評価： 技術重要度評価システム
- 地球温暖化対策技術の技術開発プロセスに関する評価： R&D プロセス分析評価システム

そして、これら 2 つの評価サブシステムの連携によって、多面的な地球温暖化対策技術の評価が可能である。

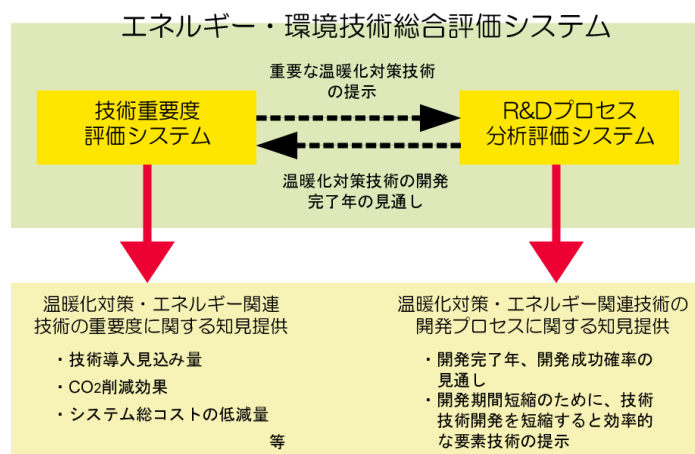


図 1 「エネルギー・環境技術総合評価システム」の概要

3.3 技術重要度評価サブシステムの概要

(1) 評価方法

- CO₂ やエネルギーの年間フロー及びストックのバランス、また、それらに必要な設備を、数多くの線形式で表現。評価指標を年間システム総コストとした線形計画モデル（静学的逐次最適化型の線形計画モデル）として評価システムを構築
- 構築した上記モデルを線形計画法に基づくコンピュータ計算によって、システム総コストを最小にする技術導入量等のポートフォリオを導出（計算には GAMS/CPLEX 等の市販ソルバーが必要）

(2) 評価対象

本調査研究で開発したモデル内における評価対象は次のとおりである。

- 評価地域： 日本
- 評価期間： 2030年まで
- 評価技術： エネルギー・CO₂関連技術（発電技術、その他エネルギー変換技術、運輸部門等のエネルギー利用技術、CO₂回収・貯留技術等）

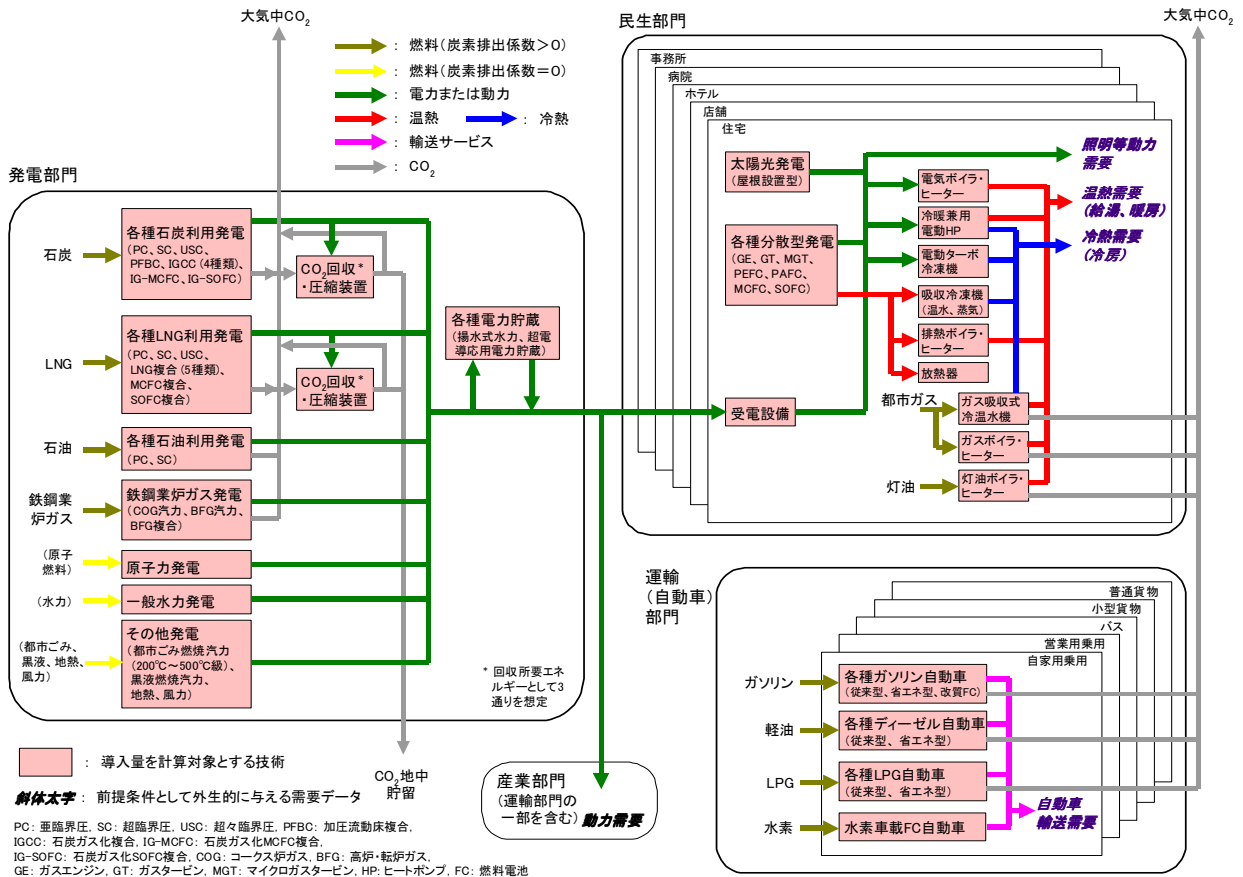


図 2 技術重要度評価サブシステムにおける評価対象技術
及びエネルギーと CO₂ の流れ

3.4 R&D プロセス分析評価サブシステム

R&D プロセス分析評価サブシステムは、地球温暖化対策・エネルギー関連技術を開発する際の開発の見通しを得るとともに、複数の開発課題のうち、どの開発課題を解決することが、評価対象の地球温暖化対策技術の開発にとって効率的なのか、また、どの開発課題に重点的に資金配分することが効率的なのか、という研究開発戦略を評価することを目的としている。

このため、ある地球温暖化対策・エネルギー関連技術の開発プロセスを、それを構成する要素技術分解を行い、GERT (Graphical Evaluation of Review Technique) ロジックに従ってモデル化するとともに、その要素技術の開発時間をモデル化する。また、要素技術の開発時間の不確実性 (アンケート調査回答の分散) を離散的な確率密度分布として表現し、GERT の計算ロジックに沿ったシミュレーション的な計算によって、評価対象技術の開発時間の確率密度分布を算出できるようにした。

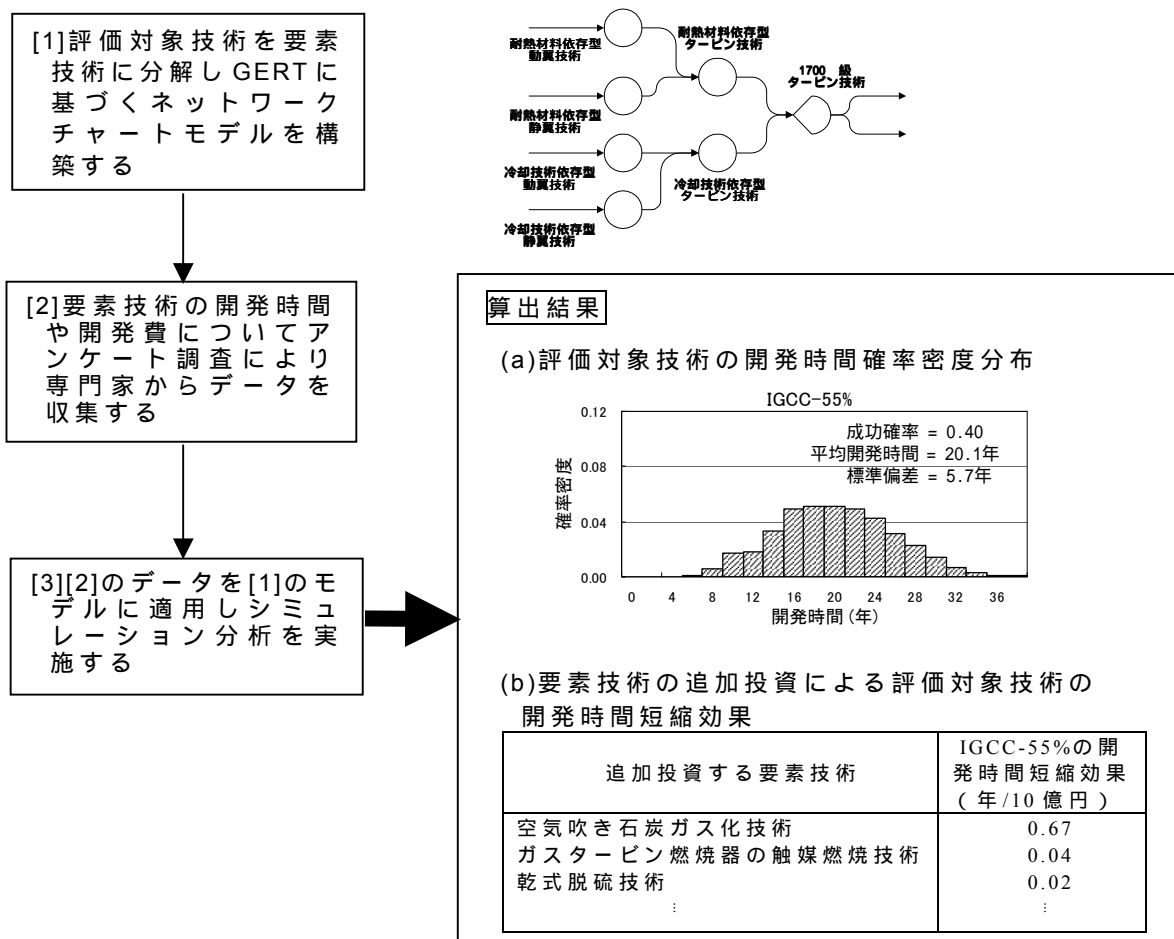


図 3 R&D プロセス分析評価サブシステムにおける適用手順と出力イメージ

4. 開発した評価システムによる地球温暖化対策・エネルギー関連技術の技術開発に関する評価

ここでは、本調査研究において構築した「技術重要度評価サブシステム」と「R&D プロセス分析評価サブシステム」からなる「エネルギー・環境技術総合評価システム」を用いた地球温暖化対策・エネルギー関連技術の評価結果を示す。

本調査研究では、「R&D プロセス分析評価サブシステム」によるケース・スタディとして、石炭ガス化複合発電（IGCC）、液化天然ガス複合発電（LNGCC）、高温形燃料電池発電技術といった先進複合発電技術、及び、CO₂分離・回収技術、超電導電力応用技術、固体高分子形燃料電池（PEFC）技術の評価を行ったが、ここでは、そのうち、「技術重要度評価サブシステム」と「R&D プロセス分析評価サブシステム」の双方の評価システムで分析・評価を行った先進複合発電技術、CO₂分離・回収技術、固体高分子形燃料電池（PEFC）応用技術の 3 種類の技術について技術開発に関する総合的な知見を簡略にまとめた。

(1) 先進複合発電技術の技術開発について（結果のまとめを表 1 に示す）

R&D プロセス分析評価サブシステムによると現状で想定されている程度の投資下で開発した場合、例えば 43%級の IGCC は 2015 年頃、55%級は 2021 年頃、天然ガスを利用した 65%級の SOFC 複合発電は 2021 年頃、石炭ガス化ガスを利用した 55%級の SOFC 複合発電は 2022 年頃に利用が可能になると見込まれる。これらを、資源エネルギー庁の「電力分野産業技術戦略」報告書（2000 年）に記された開発目標時期と比較すると、国による現状の技術開発目標時期は概ね無理のないものになっているといえる。

技術重要度評価サブシステムによると今後 30 年程度の日本において先進複合発電技術の大幅な導入は見込みにくい、その中であって 55%程度の発電効率を有する IGCC の導入余地は大きい。また、開発期間を 2 年短縮した時のコスト削減効果として 100 億円程度（5%/yr で割引いた総額）を見込むことができる。これらの結果より、高効率の IGCC の技術開発促進は有用な技術開発戦略であると考えられる。R&D プロセス分析評価サブシステムによると IGCC-55%の開発期間短縮にコスト効果的な要素技術としては、石炭ガス化技術に追加的に 10 億円投資すると 0.7 年程度の IGCC 開発期間の短縮が期待できる。また、これよりは効果が小さくなるものの、ガスタービン燃焼器の触媒技術では 0.04 年 / 10 億円、乾式脱硫技術は 0.02 年 / 10 億円などと算出され、これらの技術への追加的な投資も効果的と考えられる。

表 1 先進複合発電技術の技術開発に関する既存計画と技術評価システムによる分析
結果

発電技術と効率		国の目標 [†]	R&D 分析評価		技術の重要度評価
			期待開発 成功確率	期待実現 時期	
LNG-CC	52%	2010 年頃 (商用機)	-	-	-
	55%	2020 年頃 (実証機)	95%	2016 年頃	26 万円/kW 程度の設備費の場合には重要度は低い
	60%	-	78%	2019 年頃	27 万円/kW 程度の設備費の場合には重要度は低い
LNG-MCFC	60%	-	76%	2018 年頃	30 万円/kW 程度の設備費の場合には重要度は低い
	61%	2020 年頃 (開発機)	-	-	-
LNG-SOFC	64%	2025 年頃 (開発機)	-	-	-
	65%	-	75%	2021 年頃	31 万円/kW 程度の設備費の場合には重要度は低い
IGCC	40.5%	2010 年頃 (実証機)	-	-	-
	43%	-	85%	2015 年頃	27 万円/kW 程度の設備費の場合には重要度は低い
	46%	2020 ~ 2030 年 (商用機)	-	-	-
	48%	2020 ~ 2030 年 (商用機)	63%	2018 年頃	27 万円/kW 程度の設備費の場合には重要度は低い
	50%	-	44%	2019 年頃	28 万円/kW 程度の設備費の場合には重要度は低い
	55%	-	40%	2021 年頃	32 万円/kW 程度までの設備費で実現できる場合には重要度は高い
IG-MCFC	53%	2025 年頃 (実証機)	57-58%	2021 年頃	32 万円/kW 程度の設備費の場合には重要度は低い、開発期間短縮を 2 年程度もしくは設備費を 10%程度低く実現できれば、重要度は高くなる。
IG-SOFC	54%	2030 年頃 (実証機)	-	-	-
	55%	-	43-46%	2022 年頃	33 万円/kW 程度の設備費の場合には重要度は低い

[†] 資源エネルギー庁公益事業部電力技術課による「電力分野産業技術戦略」報告書 (2000 年) より

(2) CO₂ 分離・回収技術の技術開発について（結果のまとめを表 2 に示す）

今後、日本において、CO₂ 排出量を年率 1% のペースで削減していく場合には、CO₂ 分離・回収技術はコスト効率的な削減技術として重要である。特に、0.31kWh/kg-CO₂ を下回るような低動力で分離・回収が可能な技術の重要性は高い。そして、もし、これらの技術が現状見込まれている投資下での開発期間よりも 2 年程度短縮できれば、100 億円規模でのコスト低減効果が見込まれる。

特に CO₂ 化学吸収法は、物理吸着法や膜分離法などに比べ開発期間、開発成功確率ともに優位にあると見られている。そして、大型化学吸収塔・再生塔や、高効率な化学吸収液、高効率な定圧送風機などへの追加的な技術開発投資は、コスト効果的な技術開発戦略と言える。

しかしながら、CO₂ 化学吸収法についても 0.27kWh/kg-CO₂ といった高い効率を有する CO₂ 回収技術の実現確率は 55% 程度であり、決して高いとは言えない。そのため、物理吸着法や膜分離法など、他の回収方法についても技術開発を行うことは重要であると考えられる。

表 2 CO₂ 分離回収技術の技術開発に関する技術評価システムによる分析結果

	CO ₂ 分離回収技術			R&D 分析評価		技術の重要度評価
	CO ₂ 回収率	タイプ	回収動力 (kWh/kg-CO ₂)	期待開発成功確率	期待実現時期	
排ガスからの化学吸収	90%	最新タイプ	0.37	91%	2016 年頃	7.8 万円/(kg-CO ₂ /h)/yr 程度の設備費の場合には重要度は中程度
		省エネタイプ	0.31	81%	2017 年頃	7.8 万円/(kg-CO ₂ /h)/yr 程度の設備費の場合には重要度は高い
		超省エネタイプ	0.27	55%	2019 年頃	7.8 万円/(kg-CO ₂ /h)/yr 程度の設備費の場合には重要度は高い
排ガスからの物理吸着	90%	最新タイプ	0.40	83%	2018 年頃	-
		省エネタイプ	0.35	73%	2020 年頃	-
		超省エネタイプ	0.31	42%	2021 年頃	-
排ガスからの膜分離	60%	最新タイプ	0.39	77%	2017 年頃	-
		省エネタイプ	0.34	54%	2018 年頃	-
		超省エネタイプ	0.27	29%	2019 年頃	-
O ₂ /CO ₂ 再循環燃焼	90%	最新タイプ	0.33	88%	2017 年頃	-
		省エネタイプ	0.31	87%	2019 年頃	-
		超省エネタイプ	0.29	57%	2021 年頃	-
			発電効率 (HHV)			
水素分離型ガスタービン	95%	LNG 利用タイプ	51%	49%	2022 年頃	-
		石炭利用 (IGCC) タイプ	40%	40%	2021 年頃	-

(3) 固体高分子形燃料電池(PEFC)応用技術の技術開発について(結果のまとめを表 3 に示す)

燃料電池自動車の技術開発について、専門家は現状では技術開発の困難さを感じており、2021 年頃が開発可能であるとする慎重な見方をしている。特に、ガソリン改質型の技術開発の困難さを強く認識している。水素車載型については、ガソリン改質型よりは開発が容易と見られているが、その普及は、特に水素燃料を安価に供給できるか否かに強く依存する。そのため、水素車載型 PEFC 自動車の技術開発を促進する場合には、水素供給に関する技術的・制度的対策が極めて重要になる。水素搭載型自動車用 PEFC システムをより短期で開発するためには、PEFC の電極触媒技術、電解質膜技術等への追加的な投資がコスト効率的であると見込まれる。

表 3 固体高分子形燃料電池(PEFC)応用技術に関する分析結果

PEFC 応用技術		燃料電池実用化戦略研究会の目標値	R&D 分析評価		技術の重要度評価
			開発成功確率	期待実現時期	
燃料電池自動車	ガソリン車上改質型システム(車両効率 30%)	2020 年までに累積 500 万台	53%	2023 年頃	41 円/人・km/年程度の導入価格の場合には重要度は高い
	ガソリン車上改質型システム(車両効率 35%)		41%	2024 年頃	
	水素搭載型システム(車両効率 40%)		72%	2021 年頃	41 円/人・km/年程度の導入価格かつガソリン価格の 2.9 倍程度の水素燃料価格の場合には重要度は低い
定置用システム(都市ガス改質型)	中温域作動システム(発電効率 41%程度)	2020 年までに累積 1,000 万 kW	79%	2021 年頃	33 万円/kW 程度の設備費の場合には重要度は低い
	高温域作動システム(発電効率 42%程度)		57%	2022 年頃	

注)「車両効率」は tank to wheel 効率であるが、ここでの効率は車上搭載二次電池との組み合わせによる効率向上は含めていない。