

システム研究グループ



グループリーダー
秋元 圭吾

【コアメンバー】

主席研究員	友田 利正
主任研究員	和田 謙一
主任研究員	長島美由紀
主任研究員	本間 隆嗣
主任研究員	佐野 史典
主任研究員	小田潤一郎
研究員	林 礼美
研究員	徳重 功子
研究員	有野 洋輔
研究員	ショアイ・テラニ・ピアンカ
研究員	魏 啓為

システム研究グループの研究活動報告

システム研究グループは、システムの思考、システムの分析を通して、地球温暖化やエネルギー対応に関する有用なる情報提供を国内外に行っている。以下に、H27年に当グループが取り組んだ研究の中から3つのテーマを紹介する。1つ目は、2020年以降の排出削減目標（約束草案）の排出削減努力の評価である。2つ目は途上国での排出削減の取り組みは重要と考えられるが、インドの発電効率の評価である。3つ目は対策におけるもう一つ大きな柱である長期の革新的な技術について、水素システムを中心とした長期的な対策の評価である。このような分析、評価を通して、より良い温暖化対策・政策立案に貢献してきている。

1. 約束草案の排出削減努力の評価

特集記事でも記述したように、COP21においてパリ協定が合意された。世界における温室効果ガス（GHG）排出削減の実効性を上げていくには、今後、適切なレビューが重要となる。本節では、COP21に先立って日本政府および世界の主要国が提出した約束草案について、排出削減努力の視点を中心とした評価について紹介する。

1.1 日本の約束草案の評価

日本政府は、2015年7月に2030年のエネルギー需給の姿を描いた長期エネルギー需給見通し（エネルギーミックス）を決定し、またそれと整合的な2013年比で温室効果ガス排出量26%削減目標を含む約束草案を決定し国連気候変動枠組条約（UNFCCC）事務局に提出した。その政府決定では、省電力を基準ケース比で17%減と見込んだ。しかも電力コストを下げながら実現するとしている。更には電力の価格弾性値は小さい（電力価格が上がっても電力消費量は下がりにくい）。産業部門での省エネルギーはかなり進展しており削減余地は小さい一方、政府が見込んでいるように確かに家庭、業務部門における省エネルギーの余地は

まだかなりあると見られる。しかしながら、これらの部門の省エネルギーを考えると、「隠れた費用」とも呼ばれることのある様々な費用など、単純に推計したときの省エネポテンシャルが実現してこなかった理由を踏まえる必要がある。

この大きな省エネルギーを前提とした大きな排出削減を見込んだ排出削減目標となっているため、RITEのエネルギー・温暖化対策評価モデルDNE21+の推計では、温室効果ガス26%削減の限界削減費用は380\$/tCO₂程度、エネルギー起源CO₂排出量（26%減の内の22%削減寄与分）の限界削減費用は260\$/tCO₂と、極めて高い費用が推計された。また、政府の決定に先立って、エネルギーミックス、排出削減目標策定の参考情報を提供すべく、当グループではエネルギー需給構成、温室効果ガス排出削減レベルの違い等に伴う経済影響について費用推計等を行った。そこでは再エネ比率、原子力比率、温室効果ガス排出削減強度の違いによる経済影響等を定量的に示した。マクロ経済への波及効果も含めた推計が可能なエネルギー・経済モデルDEARSの推計では、GDP損失は2.5%、年間約18兆円に及ぶと推計された。これは、電源の構成（再エネ22~24%、原子力20~22%、石炭26%、LNG27%程度）については、現状での制約を踏まえて考えるならば比較的バランスのとれた構成と推計され、それによる経済的な損失はそれほど大きくないレベルと推計されたものの、過大な省エネルギーの想定が経済損失をもたらし得る。目標は過大と見られるが、それを目指すにあたっては良い経済環境を作りだし、経済を良くしながらそれによって民間の設備投資を促し、賢い省エネルギー対策を実施していくことが必要である。

1.2 各国約束草案の排出削減努力の評価

当グループでは、米国の未来資源研究所（RFF）、イタリアのエニ・エンリコ・マッテイ財団（FEEM）等と協力しながら、約束草案の排出削減努力を評価するのに適切と考えられる複数の指標に基づく評価を実施してきている。

評価指標としては、GDPあたりのGHG排出量の絶対水準や改善率、ベースライン比の排出削減率、CO₂限界削減費用、GDP比排出削減費用などが考えられる。

表1 各国の排出削減努力を計測するための指標例

排出削減努力の評価指標	概要、留意点等
排出量基準年比削減率	ベースラインで排出が横ばいに近い場合には、単純に削減率の大きさを比較することでBAU比削減率の代用とでき、BAU推計が不要となるメリット有り
一人あたり排出量	経済活動の大きさや国土の状況等に依拠しやすく、排出削減努力の指標とは言い難い面有り
GDP 比排出量 (CO ₂ 原単位)	経済活動の大きさに見合ったCO ₂ 排出量水準を表すもの。ただし排出削減努力と無関係な産業構造にも依拠する。
BAU 比削減率	経済成長の違いなどを考慮できる。ただし、過去の省エネ努力や再エネ等の削減ポテンシャルは無視される。
CO ₂ 限界削減費用 (炭素価格)	経済成長、過去の省エネ努力、再エネなどの削減ポテンシャル等、各国の諸々の差異を含む指標で、削減努力の計測として妥当性が高い。ただし推計の不確実性が大きい。
2次エネルギー価格（電力、ガス、ガソリン・軽油）	ベースラインに含まれる削減努力も含む。事後評価であれば、市場価格で観測ができるが、事前評価においてはモデル推計となり、推計の不確実性が大きい。
GDP 比削減費用	限界削減費用は、経済力に応じた負担能力が考慮されないが、本指標は負担能力を含めた評価が可能。推計の不確実性は大きい。

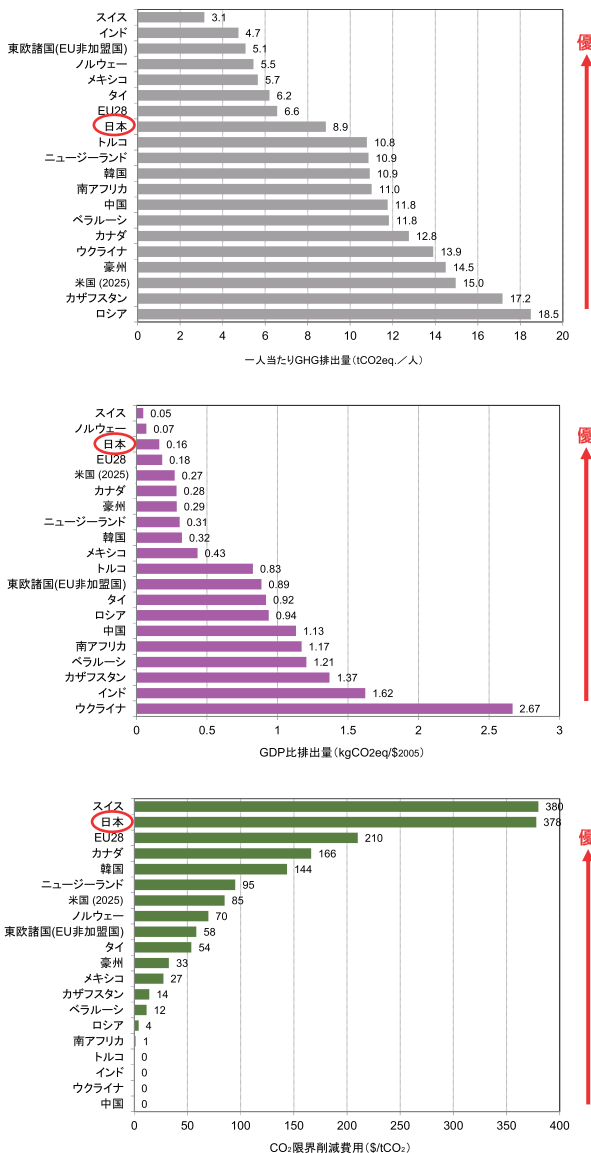


図1 約束草案の排出削減努力の評価指標例（一人当たり排出量、GDPあたり排出量、CO₂限界削減費用。いずれも2030年の目標。ただし米国のみ2025年目標）

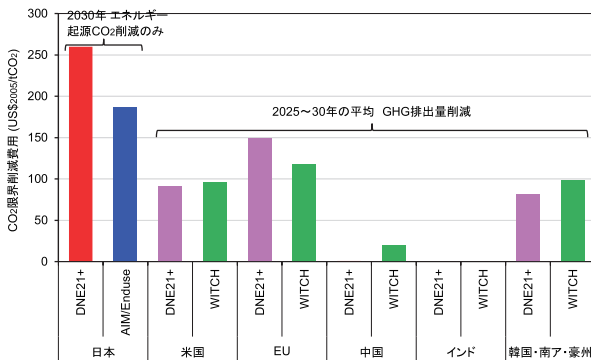


図2 約束草案のCO₂限界削減費用の推計（国環研AIM、FEEM WITCHモデルとRITE DNE21+モデルの比較）

ただし、表1で示すように、万能な指標は存在せず、それぞれの指標には長所と短所が存在するため、それぞれの指標が持っている意味、限界等を理解しながら総合的に評価することが重要と考えられる。

図1には、20カ国の約束草案について（いずれも2030年の目標。ただし米国のみ2025年の目標）、一人あたりGHG排出量、GDPあたりGHG排出量、CO₂限界削減費用を示す。例えば、中国は約束草案を達成したとしても、一人あたり排出量で見ても、2030年にはEUや日本などの排出量を大きく超えると見られる。GDPあたりGHG排出量は、水力発電の比率が高いスイスやノルウェーを除けば、日本は世界において最も優れたレベルの約束草案であると評価される。

なお、限界削減費用等の費用推計は、モデルを用いることとなり、現在の部門別のエネルギー効率の推計や、再生可能エネルギーのコスト低減の見通しなど、モデルの前提条件の想定の違いなどにより、推計に幅が生じる。そこで、RITE以外のモデルによる評価も含め図2に示す。なお、FEEMのWITCHモデルは、日本を単独で評価できない。一方、欧州委員会による約束草案評価に関する国際モデル比較プロジェクト(MILES)にも参加している。そこでは、RITEは、国立環境研究所とともに、日本の約束草案の評価を実施した。そこで、日本については、国立環境研究所のAIMモデルによる評価（エネルギー起源CO₂削減（22%削減分））である186\$/tCO₂を併せて図2に掲載した。モデルによって推計に幅があるものの、主要な国について比較可能な推計となっていると考えられる。

スイスや日本、EUの約束草案は、CO₂限界削減費用など、多くの指標において排出削減努力が大きい野心的な目標と評価される。一方、トルコ、カザフスタン、中国等は相対的に劣る目標と評価される。米国は中位的な結果となった。ただし、大多数の国は2030年目標を提出している一方、米国は2025年目標であるため、他国との完全な比較はできないため、結果には留意が必要である。経済見通しにも依るものの、中国、インドなど、限界削減費用がほぼゼロ、すなわち、成り行きで約束草案達成可能と推計される国も見られる。

このような評価を通して、すべての国が自国の排出削減目標の水準を理解し、更なる排出削減余地がないかを考える機会を生み出し、良いPDCA（Plan-Do-Check-Act）サイクルを確立していくことが重要と考えられる。

1.3 長期目標との関係性

気候変動に関する政府間パネル（IPCC）は、2013～2014年にかけて第5次評価報告書（AR5）を公表した。気候変動問題に関する科学的な知見は進展してきているが、それでも大きな不確実性が残っている。代表的なものが気候感度である。平衡気候感度（CO₂濃度が倍増し安定化したときの最終的な全球平均気温上昇幅）については、IPCC第3次評価報告書（TAR）までは1.5～4.5℃、最良推定値が2.5℃と評価されてきた。一方、2007年に発行された第4次評価報告書では上方に修正され、2.0～4.5℃、最良推定値3.0℃と評価された。ところが、最新となるAR5では、平衡気候感度は1.5～4.5℃（最良推定値は合意できず）と再び下方のレベルが広がった。0.5℃の違いしかないが、これによって許容される排出量は大きく変わる。図3は、気候感度が3.0℃の場合に加えて、2.5℃の場合についても気温上昇目標に対する排出経路を示している。気候感度が3.0℃の場合は、約束草案で期待される世界排出量と2℃目標のための経路とは大きなギャップが見られるが、気候感度が2.5℃の場合には21世紀後半の大幅な削減次第では2℃目標達成の排出経路に整合している。

なお、当然ながら温暖化影響被害の大きさについては更に大きな不確実性が存在しているし、気候変動緩和費用についても不確実性は大きい。様々な不確実性が存在する中で、様々なリスクを全体として小さくしていく賢い気候変動対策が求められる。当グループでは、このような不確実性の分析を含め、不確実性を前提とした気候変動リスクの対応戦略のあり方についての検討も行っている。

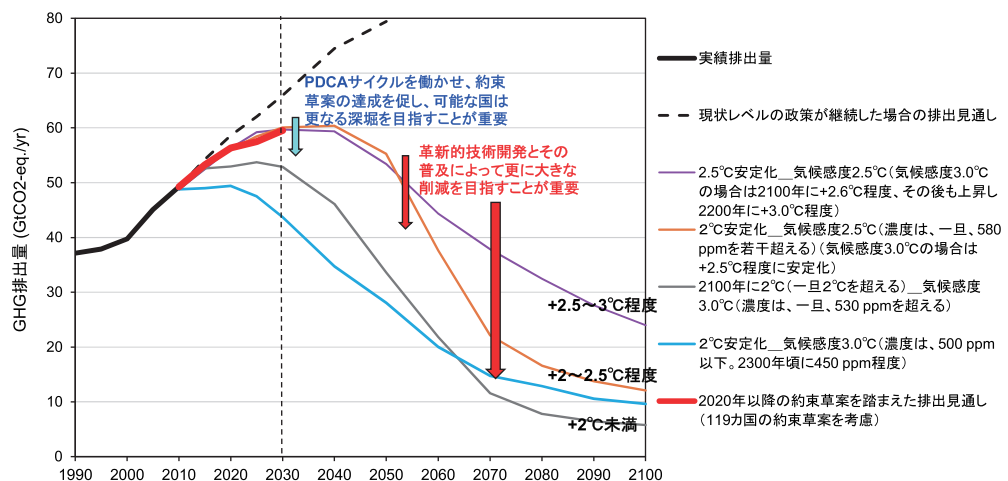


図3 2015年10月1日までに提出された約束草案によって期待される世界の温室効果ガス排出量と長期排出削減・気温上昇見通しとの関係

2. 途上国での技術普及－インド石炭火力発電の評価

2.1 はじめに

CO₂排出量を削減するためには技術の普及が必要であり、その具体策を検討することが早期のCO₂排出削減を進めるためにも有効である。本節では以下、インド石炭火力発電所に注目し、優れた運用保守技術を普及させることで、どの程度のCO₂削減が見込めるかを示す。

2.2 インド石炭火力の発電効率

CO₂削減余地を検討する前に、まずインド石炭火力の現状について見てみる。データ収集が可能であったのは、74の発電所、合計設備容量は69.5GWである(インド石炭に対する設備容量カバレッジは83%)。図4はそのインド石炭火力の発電効率を発電所別に整理したものである¹⁾²⁾。横軸は発電所別の運転開始年である。

インドの電気事業は、国営、州営、民営など多様なプレーヤーから構成されている。そこで図4は、インド電気事業者の最大手であるNTPC(国営)、褐炭発電専門のNLC(国営)、民営などを区別して提示した。図4から、運転開始年が最近の発電所ほど優れた発電効率となる傾向があること、事業者別にみるとNTPCの発電効率が相対的に優れていること、が伺える。

さらなる定量把握のため重回帰分析を適用し、1)発電所の全発電容量が大きい発電所ほど発電効率が高いこと、2)運転開始年が最近の発電所ほど発電効率が高いこと、3)設備利用率が高いほど発電効率が高いこと、4)NTPC及び民営の石炭火力は他の条件が同じでもそれら以外の発電所と比べ1.2%ほど発電効率が高いこと、などを別途確認している²⁾。

このようなインド石炭火力の発電効率を改善するために、既存石炭火力の運用保守水準を改善することが重要である。具体的には、ボイラー内の灰洗浄の効率的実施、燃焼の最適化(未燃分の低減、NO_x発生量の低減)、運転の最適化(主蒸気の温度、圧力の安定化)などが挙げられる。

このようなインド石炭火力の発電効率を改善するために、既存石炭火力の運用保守水準を改善することが重要である。具体的には、ボイラー内の灰洗浄の効率的実施、燃焼の最適化(未燃分の低減、NO_x発生量の低減)、運転の最適化(主蒸気の温度、圧力の安定化)などが挙げられる。

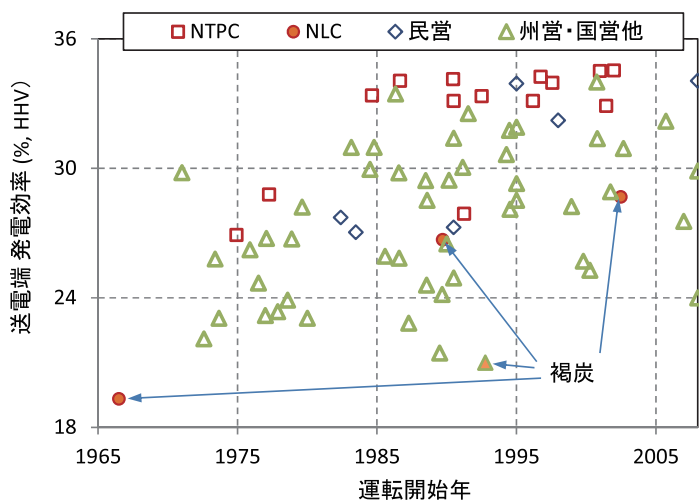


図4 インド石炭火力の発電効率(2007年度~2009年度平均)¹⁾²⁾

2.3 インド石炭火力の排ガス中PM濃度

言うまでもなく温暖化対策としてCO₂削減は重要だが、インド現地における足元のニーズとしてPM排出抑制も関心が高い。優れた運用保守技術の普及により、発電効率向上のみならずPM排出削減も同時に進めることができればシナジーとなりうる。そこで、発電所別の排ガス中PM濃度についても調査した²⁾³⁾。結果を図5に示す。インドでは、210MW以上の石炭火力プラントに対し排ガス中PM濃度の上限基準値150mg/Nm³が設けられている。多くの民営、国営の発電所はその上限基準値を遵守しているものの、一部発電所ではその上限基準値を超えたPM濃度となっている。

なお、日本の石炭火力は10mg/Nm³を下回る実績が報告されており、(日印間で使用する石炭の性状に大きな差異があるものの)運用保守向上によりPM濃度の大幅な低下が可能とみられる²⁾。具体的には、電気集塵機の容量や稼働時間あるいは集塵効率の向上(例えば高抵抗ダストへの実務上の対応)が挙げられる。

2.4 インド石炭火力におけるCO₂削減ポテンシャル推定

指向性距離関数という環境経済学で用いられる手法により、個々の発電所の運

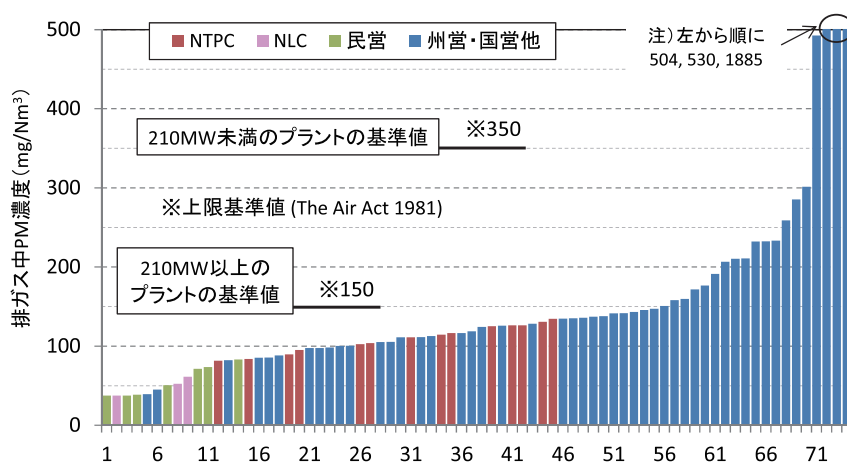


図5 インド石炭火力の排ガス中PM濃度（2007年度～2009年度平均）²⁾³⁾

転開始年、発電所容量の差を認めた上で、発電効率、設備利用率、排ガス中PM濃度を同時にどの程度改善できるか発電所別に試算した。これは、条件の不利な発電所（設備容量が小さく、運転開始年が以前の発電所）は不利な発電所同士、条件の有利な発電所（設備容量が大きく、運転開始年が最近の発電所）は有利な発電所同士で比較し改善余地を特定する手法である。本手法により送電端発電効率が30.1%から32.6%へ上昇するポテンシャルがあると算定された。これは、3600万tCO₂/年の削減（分析対象の総CO₂排出量4.8億tCO₂の7.5%）に相当する²⁾。

2.5 まとめ

インド石炭火力に対し優れた運用保守技術を普及させることで送電端発電効率の向上（30.1%から32.6%へ）が期待でき、その場合3600万tCO₂/年規模の削減が見込めるとの結果を得た。優れた運用保守技術により、インドで現在課題となっているPMの排出削減も可能性として期待できる。最新の高効率な発電プラントの普及に留まらず、このような優れた運用保守技術の早期普及も期待したい。

参考文献

- 1) Ministry of Power, Perform, Achieve and Trade (PAT), (2012)
- 2) 小田, 秋元, 長島, インド石炭火力の発電所別パフォーマンスの分析, エネルギー資源, 36(6), pp.17-26, (2015)
- 3) Central Electricity Authority, Ministry of Power, Performance Review of Thermal Power Station 2011-12, (2014)

3. 革新的な技術開発・普及—水素システムの評価

3.1 はじめに

2011年3月11日の東日本大震災とそれに伴う福島原発事故によって、日本のエネルギー政策は大きな転換が必要となっており、2014年4月に閣議決定された「エネルギー基本計画」¹⁾においても、「将来の二次エネルギーでは、電気、熱に加え、水素が中心的役割を担うことが期待される。」などと記載されており、水素エネルギーへの期待がこれまで以上に高まってきている。

本節では、長期的なCO₂排出削減対策について、システム研究グループが開発

してきている世界エネルギー・温暖化対策評価モデルDNE21+を用いた水素システムを中心とした評価を紹介する。

3.2 水素システム関連の主たるモデル想定

水素製造技術としては、石炭ガス化、天然ガス改質、バイオマスガス化、水電気分解をボトムアップ的に考慮している（各技術の設備費、効率、および設備寿命を明示的にモデル化）。石炭ガス化、天然ガス改質、バイオマスガス化については、CCS（CO₂回収・貯留）の適用もオプションとして考慮している。なお、現在行われている石油精製や鉄鋼部門などで見られる副生水素製造については、モデルで考慮していない。

地域間（DNE21+モデルは世界全体を国レベルで54地域に分割している）の水素輸送技術については、パイプラインとタンカー（各種の技術があるが、ここでは液化水素輸送で代表させた）を考慮している。また、地域内の水素配送については、ローリー配送やパイプライン配送などがあり、供給地と需要地の分布やその規模などによって配送手段の構成が変わり得ると考えられるが、モデルでは地域内の分布は取り扱っていないため、個別の技術オプションは明示的に想定していない。

水素利用技術としては、水素発電、鉄鋼（水素還元製鉄への利用）、水素燃料電池自動車ボトムアップ的に考慮している。なお、DNE21+モデルにおいてトップダウン的にモデル化している気体燃料需要（民生部門における熱需要等であり、ガスと競合）についても水素による供給が可能と想定している。

ここで、水素燃料電池自動車については、近年の開発動向を踏まえつつ、車両価格について表2のように2種類のケースを想定した。まず、標準ケースとして、将来的に価格低減は進むものの、2050年においても電気自動車より車両価格が

表2 主要な乗用車技術の想定 (2020年-2030年-2050年)

技術	車両価格 [万円/台]	燃費 [km/L]*2
小型低効率従来型内燃機関車*1	170-170-170	13.0-13.5-14.1
小型高効率従来型内燃機関車*1	200-200-200	23.8-24.8-25.8
小型ハイブリッド車*1	227-224-203	33.7-38.2-42.2
小型プラグインハイブリッド車*1	328-307-209	53.5-60.6-82.9
小型電気自動車	584-439-220	73.0-78.7-96.1
小型燃料電池自動車	標準ケース： 862-602-233 FCV進歩ケース： 585-430-220	44.6-50.5-61.7

*1 ガソリン車の想定。*2 ガソリン熱量等価換算。

高いケースを想定している。もう一方のケースは、FCV進歩ケースとして、価格低減が更に進み、2050年の燃料電池自動車の価格が電気自動車と同じとなると想定している。文献²⁾など、水素燃料電池自動車を取り扱っている各種のモデル分析があるが、車両価格の想定は様々である。しかしながら、電気自動車との車両価格差という点では標準ケースと同様に燃料電池自動車の方が高いものが多く、FCV進歩ケースは燃料電池自動車について大きな技術進歩を見込んだ想定と位置づけられる。

3.3 DNE21+モデルによる水素システムの評価

複数の排出削減レベルを想定し、DNE21+モデルによって2050年までの排出削減策を評価した。モデル評価においては、世界全体の費用が最小となる地域別・部門別排出量を算定している。前節で述べた水素利用技術は、温室効果ガス濃度を550ppmCO₂eqに安定化するレベル（2050年のCO₂限界削減費用は

150\$/tCO₂程度と評価されている) から導入され得ると評価された。

水素製造については、石炭や天然ガスといった化石燃料資源からの製造が主になると見込まれるが、排出削減のためにCCSの導入が必要であり、化石燃料、更にはCO₂貯留ポテンシャルを豊富に有する中東やロシア、米国などで製造することが費用効率的であるとの評価である。

水素利用については、550ppmCO₂eqシナリオでは、大規模集中電源としての水素発電がまず費用効率的な対策として評価された。このとき水素発電が費用効率的と評価されるのは、CO₂貯留ポテンシャルが小さく石炭火力やガス火力へのCCSの導入が困難であるなど、競合する他の発電技術の競争力が低い国となっている。評価した中で最も厳しい排出削減レベルであるALPS-CP3.0（産業革命以前比2℃未満が期待できるシナリオ。2050年のCO₂限界削減費用は400\$/tCO₂程度と評価された）における世界全体の水素発電発電電力量は2050年で約900TWh/yr（発電電力量シェアは2%程度）と見込まれている。その他の最終エネルギー需要部門での水素利用は、ALPS-CP3.0のように厳しい排出削減レベルでは費用効率的な温暖化対策として導入され、2050年における世界全体の水素消費量は約25EJ/yr（最終エネルギー需要に占めるシェアは5%程度）と評価された。水素燃料電池自動車については、図6に示すように、標準ケースではほとんど導入されず、電気自動車やプラグインハイブリッド車が優位性を有するが、FCV進歩ケースでは電気自動車よりも優位となり、2050年には世界全体で約1億台が普及しているとの評価である。

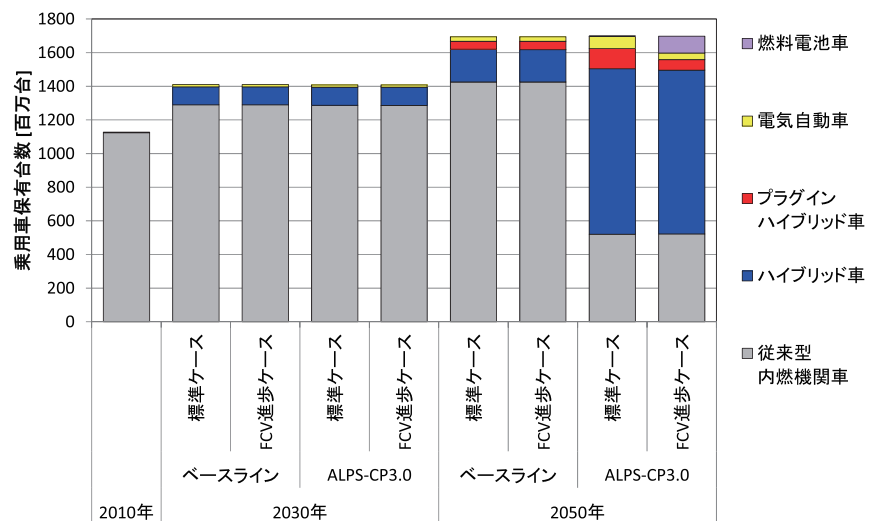


図6 技術別乗用車保有台数 (世界全体)

3.4 まとめ

温暖化対策として大幅なCO₂排出削減に取り組む場合、水素システムは費用効率的な対策の1つとして排出削減に貢献し得ると期待される。この実現のためには、長期的な視点の下での研究開発や水素インフラの構築が重要であると考えられる。

参考文献

- 1) 資源エネルギー庁、「エネルギー基本計画」(2014)
- 2) IEA, Energy Technology Perspective 2012 (2012)