

2014年5月2日

IPCC第3作業部会第5次評価報告書 のエネルギー技術選択の補足説明

(公財)地球環境産業技術研究機構 (RITE)
システム研究グループ

E-mail: sysinfo@rite.or.jp



本解説は、IPCC第3作業部会（WG3）第5次評価報告書（AR5）の公表を受け、RITEで4月11日に公表した「IPCC最新報告および国際的な最新のシナリオ分析動向を踏まえた長期の温室効果ガス排出削減パスと中期の排出削減分担の分析」について、IPCC WG3 AR5との関係を補足説明を行うことで、WG3 AR5の意味するところのより良い理解のために作成したものである。

「IPCC最新報告および国際的な最新のシナリオ分析動向を踏まえた長期の温室効果ガス排出削減パスと中期の排出削減分担の分析」
http://www.rite.or.jp/Japanese/lab0/sysken/about-global-warming/ouyou/midandlongterm_analysis.html

※ RITEシステム研究グループ グループリーダーの秋元圭吾は、IPCC WG3 AR5 第6章の代表執筆者として、特に本資料で指摘対象のIPCC関連記述章（第6章）の執筆に携わった。

はじめに

- ◆ 2014年4月12日にIPCC第3作業部会（気候変動緩和）の第5次評価報告書（AR5）が公表された。本解説では、エネルギー技術の利用に関して解説を行う。
- ◆ 一部の新聞報道（2014年4月21日）で、「原発抜きでも温室ガス削減「風力や太陽光で可能」 IPCC付属文書*を公表」、「今回、追加公開された付属文書は、既存の原発は耐用年数まで使い、新規建設はやめる脱原発依存のシミュレーションでも「温室効果ガスを削減するコストの上昇はごくわずかだ」と言及した。そのうえで、風力や太陽光発電と原子力などは相互に置き換えることが可能だとしている」が見られた。しかし、これはIPCC報告書がとりまとめている分析をより正確に理解する必要があり、この資料において特にその点に焦点を当てて解説を行う。

* 記事で「IPCC付属文書」と書かれているのは、「政策決定者向け要約（SPM）」ではなく、技術要約（TS）と報告書本体となる各章のことを指していると想像される。実際には、IPCCの報告書は、16章からなる本体であり、それとは別に用語の解説等の付属文書（Annex）がある。これらを要約したものが技術要約（TS）であり、政策決定者用に更に要約し、政府交渉によって1文1文承認プロセスをとって決定されたものが「政策決定者向け要約（SPM）」である（そのため科学に基づきながらも極めて政治的にもなっている）。

450 ppm CO₂eqシナリオ実現の対策技術面での条件についての記述としては、IPCC報告書（個別章はIPCC公表の最終ドラフトにおける記述）には、例えば以下のような記述が存在している。

- ◆ SPM p.17 : 「多くのモデルによると、もし追加的な緩和策がかなり実施が遅れたり、例えば、バイオエネルギー、CCS、そしてそれらのコンビネーション（BECCS）のようなキーとなる技術の利用が限定されたりすれば、2100年までに約450 ppmの濃度レベルを達成することはできない可能性を示している。」

ここには、原子力発電技術が具体的に挙げられているわけではないが、「キーとなる技術の利用が限定されたりすれば」は”such as”として「バイオエネルギー、CCS、BECCS」を挙げているに過ぎない。

- ◆ 6章 ES (p.7) : 「最近のモデル比較における多くのモデルでは、重要な緩和技術に広範に悲観的な仮定を置くと、2100年までに約450 ppm CO₂eqとなるシナリオを作成できない。これらのシナリオの多くでは、今世紀後半に大規模なCDR*技術の利用に依存している。そのようなシナリオを作成できているモデルにおいても、非電力のエネルギー供給を脱炭素化する重要な技術に悲観的な想定を置くと、今世紀終わりまでに約450 ppや550 ppm CO₂eqを達成するための世界の温暖化緩和コストは劇的に増大することを示している。」

* CDR: 大規模な植林、大気中からの直接的なCO₂吸収、バイオマスCCS（BECCS）など

- ◆ TS p.47 : 「580 ppm CO₂eqを超えない緩和策シナリオの検討では、技術ポートフォリオから原子力を除いた場合でも、全技術が利用できる場合のコストと比べて、緩和コストはごく小さな上昇に留まる。もし、CCSのような他の技術も制約される場合には、原子力発電の役割は拡大する。」

この記述が、記事の元となった可能性が最も高いと考えられ、“only a slight increase in mitigation costs”と書かれている。後述のように、実際の数字は4~18%増（平均7%増）というのが分析結果であり、その意味については本資料の後で解説する。また、「CCSのような他の技術が制約される場合には原子力発電の役割は拡大」という部分は大変重要な点であり、これについても後で深く解説する。

- ◆ 6章 6.3.6.3節 (p.51) : 「【バイオエネルギー、CCS、そしてそれらのコンビネーション (BECCS) などと比べ】電力（例えば、風力、太陽光、原子力）や熱供給部門に限定された技術の場合、価値は小さくなる傾向がある。それは、それらの技術は負の排出にはできず、また一般的にお互いに代替可能な低炭素技術オプションがあるからである。(Krey et al., 2014)」

CCS、バイオエネルギーはそのコンビネーションによって負の排出が可能。450 ppm CO₂eqといった極めて厳しい排出削減目標においては、21世紀後半には世界全体で排出量を負にすることが必要との分析結果も多く（6章 Figure 6.7など参照）、そのためには負の排出にできる技術が必要になってくるという点の指摘である。またCCSは産業部門の対策、バイオエネルギーは運輸部門の対策にもなり、大幅な排出削減の際にはこれらの部門でも大幅な排出削減も不可欠なため、その点に言及した記述である。なお、電力や熱（水素も）は二次エネルギーであるため、様々な一次エネルギー種が利用可能であることはある意味当然のことである。

部分的には、以上のような記述は見られるものの、少なくとも、「原発抜きでも温室ガス削減「風力や太陽光で可能」」や「風力や太陽光発電と原子力などは相互に置き換えることが可能だとしている」という直接的な記述が存在しているわけではない。

また、「新規建設はやめる脱原発依存のシミュレーションでも「温室効果ガスを削減するコストの上昇はごくわずかだ」」という点については、確かにこれに類する記述は存在するものの、「わずか」と言えるものか、また、なぜそういった計算が成り立っているかを理解しておく必要がある（後述）。

むしろ、IPCC報告書全体にわたるメッセージは、（現在商業化されていないBECCS等のCDR技術を含め）様々な対策技術を総動員し、かつ、即座に世界排出量を大幅に削減しない限り、450 ppm CO₂eqのような厳しい排出削減目標の達成は困難というのが（技術的には可能と評価されるケースもあるが、その場合でも大きなコスト増と評価）、IPCC報告書が示唆しているところである。

IPCC第5次評価報告書における技術利用の有無によるコスト上昇に関する関連図表(1/2)

IPCC WG3 AR5 Table SPM.2

2100 Concentration (ppm CO ₂ eq)	Increase in total discounted mitigation costs in scenarios with limited availability of technologies				Increase in mid- and long term mitigation costs due delayed additional mitigation up to 2030			
	[% increase in total discounted mitigation cost (2015–2100) relative to default technology assumptions]				[% increase in mitigation cost relative to immediate mitigation]			
	No CCS	Nuclear phase out	Limited Solar / Wind	Limited Bio- energy	≤55 GtCO ₂ eq		>55 GtCO ₂ eq	
				2030– 2050	2050– 2100	2030– 2050	2050– 2100	
450 (430–480)	138 (29– 297) [N: 4]	7 (4–18) [N: 8]	6 (2–29) [N: 8]	64 (44–78) [N: 8]	28 (14–50) [N: 34]	15 (5–59)	44 (2–78) [N: 29]	37 (16–82)
500 (480–530)								
550 (530–580)	39 (18–78) [N: 11]	13 (2–23) [N: 10]	8 (5–15) [N: 10]	18 (4–66) [N: 12]	3 (-5–16) [N: 14]	4 (-4–11)	15 (3–32)	16 (5–24)
580–650								

○ 450 ppm CO₂eqシナリオの場合、CCSが利用できない場合にはコストが+138%程度増大、バイオエネルギーが利用できない場合+64%程度増大するとまとめられている。

○ 一方、原子力がフェーズアウトする場合は+7%、太陽光、風力利用が限定的な場合は+6%としている。

IPCC第5次評価報告書における技術利用の有無によるコスト上昇に関する関連図表(2/2)

IPCC WG3 AR5 第6章 Figure 6.24 (Fig. TS.13はこれを簡略にした同様の図)



- 9シナリオ中1シナリオは、原子力フェーズアウトでは450 ppm達成不可能と評価している。
- 再生可能エネルギー拡大が限定されるときも同様に、9シナリオ中1シナリオは達成不可能と評価
- CCSは、バイオエネルギーとの組み合わせで負の排出にもでき、特に厳しい排出削減時(450 ppm)において重要。バイオエネルギーも同様で、また運輸部門における液体燃料の代替性の制約もコスト増の要因

IPCC報告書の解釈 (1/2)

- ◆ 450 ppm CO₂eqシナリオでは、CCSとバイオエネルギーの役割は大変大きいことが示されている。ただしモデル分析で提示されているこれら技術はまだ商業化されていない段階のものが多いことに注意が必要。【⇒ RITEではCCS、バイオエネルギー双方の技術開発に注力して取り組んでいる】
- ◆ 実際には450 ppm CO₂eqシナリオの実現は難しく（RITE解説資料「IPCC第3作業部会第5次評価報告書のシナリオ分析との関係の解説」（2014年4月21日公表）を参照）、550 ppmシナリオを含めて評価すべきと考えられるが、この場合であっても、CCSとバイオエネルギーが仮に使えないとした場合、対策コストの上昇は大きく、これらの技術の重要性が示されている。

【それでは、原子力や風力・太陽光発電の役割は小さいのか？】

- ◆ 報道記事では、「既存の原発は耐用年数まで使い、新規建設はやめる脱原発依存のシミュレーションでも「温室効果ガスを削減するコストの上昇はごくわずかだ」としているが、まず、IPCC報告書提示のデータをそのまま解釈するとしても、原発をこう結論づけるのは適当ではない。分析データをそのまま解釈すれば、むしろ「風力・太陽光発電の拡大が無い場合でも、ごくわずかのコスト上昇で厳しい温暖化対策は可能」と書くべきデータがまとめられている。【注：実際にはこれも必ずしも正しくはなく、厳しい排出削減のためにはあらゆる技術が必要。後でも説明】
(450 ppmシナリオでは、原子力のフェーズアウトは+7%程度、風力・太陽光の利用拡大無しでは+6%程度、また、550 ppmシナリオでは、原子力のフェーズアウトは+13%程度、風力・太陽光の利用拡大無しでは+7%程度のコスト増)

- ◆ 第1に指摘しておくべき点として以下の点が挙げられる。450 ppmのときのコストは、潜在的な消費の2030年では1~4%、2050年では2~6%、2100年では3~11%（世界平均値。理想的なシナリオの下）とされている*。日本の実質GDP成長率を仮に2050年まで平均1%/年とすると、2050年の実質GDPは755兆円となるため、8兆~30兆円の損失が毎年生じる程度である。これに対して、原子力フェーズアウトの場合、この対策コストに比べて7%のコスト増とすると、日本だけで毎年0.6兆円~2.1兆円の対策コスト増となる形となる。これは「ごくわずか」と言えるようなレベルとは言えない（世界平均では原子力比率は11%程度。日本は2010年時点では26%程度であったこと、またIEA WEO2012の450 ppmシナリオにおける日本の2030年時点の原子力比率は26%としているので、これを基準としてフェーズアウトを想定すれば、この2倍を超えるようなコスト増になると推定される）。
- ◆ ただし、IPCC報告書の説明のように、原子力や風力・太陽光発電の役割が、CCSやバイオエネルギーに比べて小さく算定されるのは、原子力や風力・太陽光が発電部門に限定されるため、代替可能な技術が多いということはあるものの、十分な説明にはなっていないので、それについてより深く解説する。

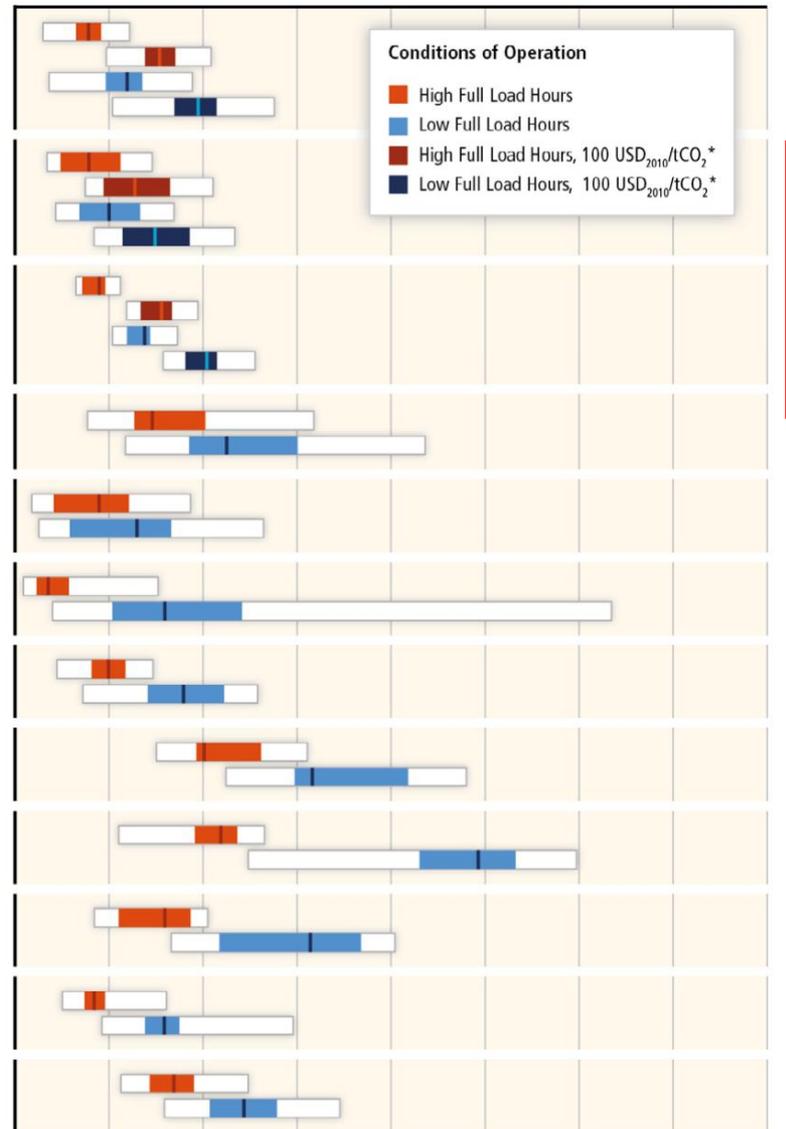
* IPCC報告書は消費の損失として示されているが、GDP損失もほぼ同様のため（Figure 6.21参照）、便宜上、ここではこの数値をGDPに適用して議論する。

IPCC第5次評価報告書における発電コストの整理

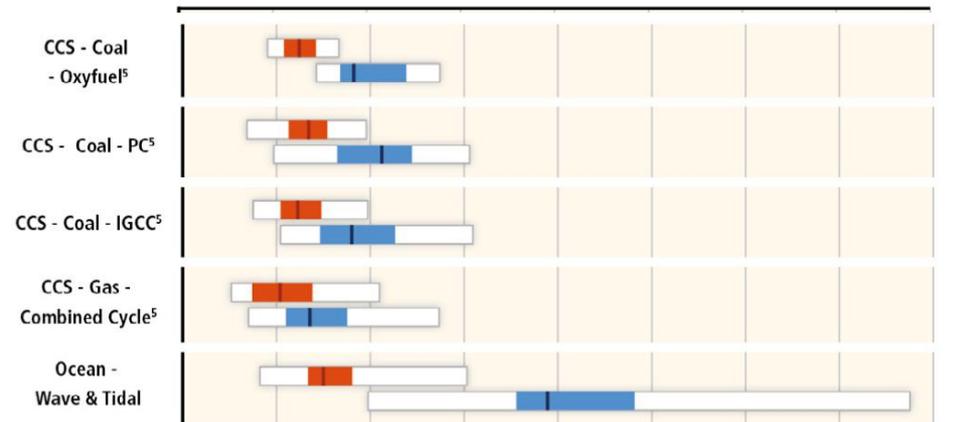
IPCC WG3 AR5 Figure TS.19 & 第7章 Figure 7.7

- 原子力は太陽光よりも相当安価と推計されている。
 - また、原子力はCCS付き火力発電よりも安価
 - 炭素価格が100\$/tCO₂のときは、原子力はいず
れの種類の化石燃料発電よりも安価と推計されて
いる。

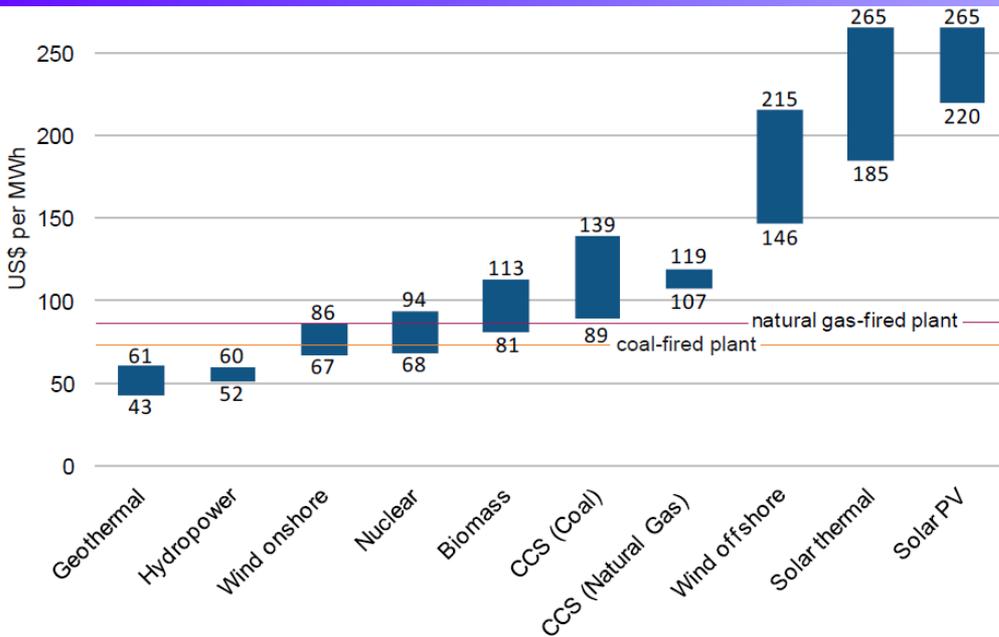
Levelized Cost of Electricity at 10% Weighted Average Cost of Capital (WACC) [USD₂₀₁₀/MWh]



Levelized Cost of Electricity at 10% Weighted Average Cost of Capital (WACC) [USD₂₀₁₀/MWh]

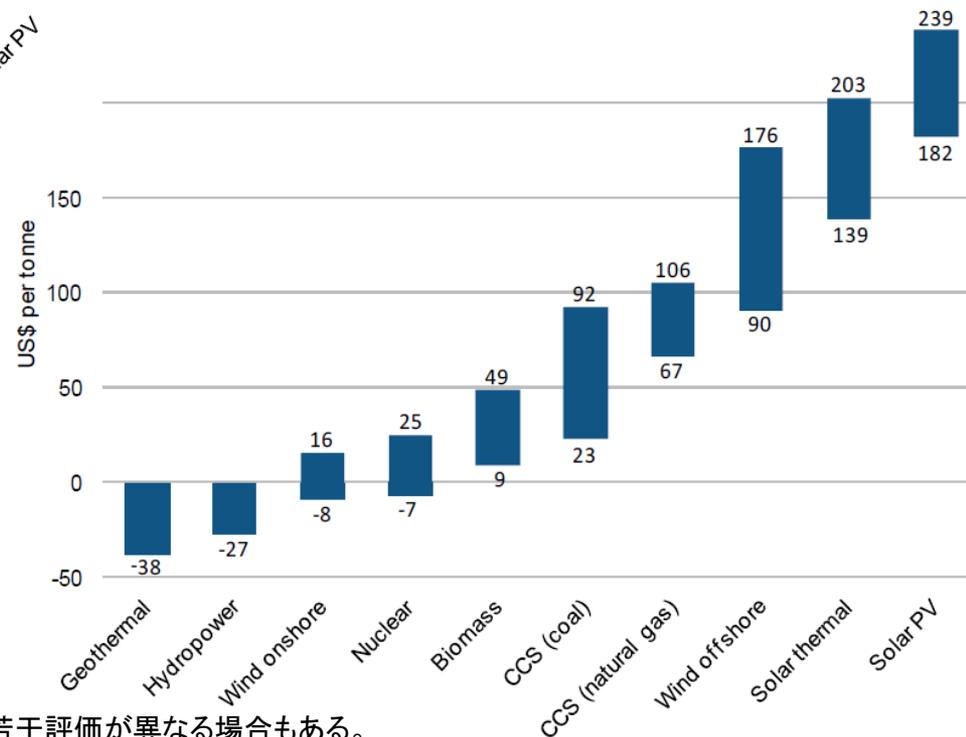


発電技術別発電費用とCO2削減費用の関係 —世界の評価（GCCSIによる）—



- CO2削減費用の安価な対策から実施することがコスト効率的
- コストレンジの重複があるものの、コストが安価な順として、**水力・地熱→陸上風力・原子力→バイオマス・CCS→洋上風力→太陽熱・太陽光** が大きな傾向
- なお、風力や太陽光は導入規模によっては、これ以外に系統対策費も必要

- すなわち、たとえば**CCSが使えない場合は、基本的に洋上風力や太陽熱・太陽光利用を増やすこととなる**(CCSより安価な対策はすでに選択されていると考えられるため)。**CCSが使えない場合、コスト上昇が大きいという結果は、このコスト差(単価の差(CCSと洋上風力・太陽光等)×CCSの経済ポテンシャル(450や550 ppmといった目標の下でどの程度の量が経済性を有するか))が大きいということである。**



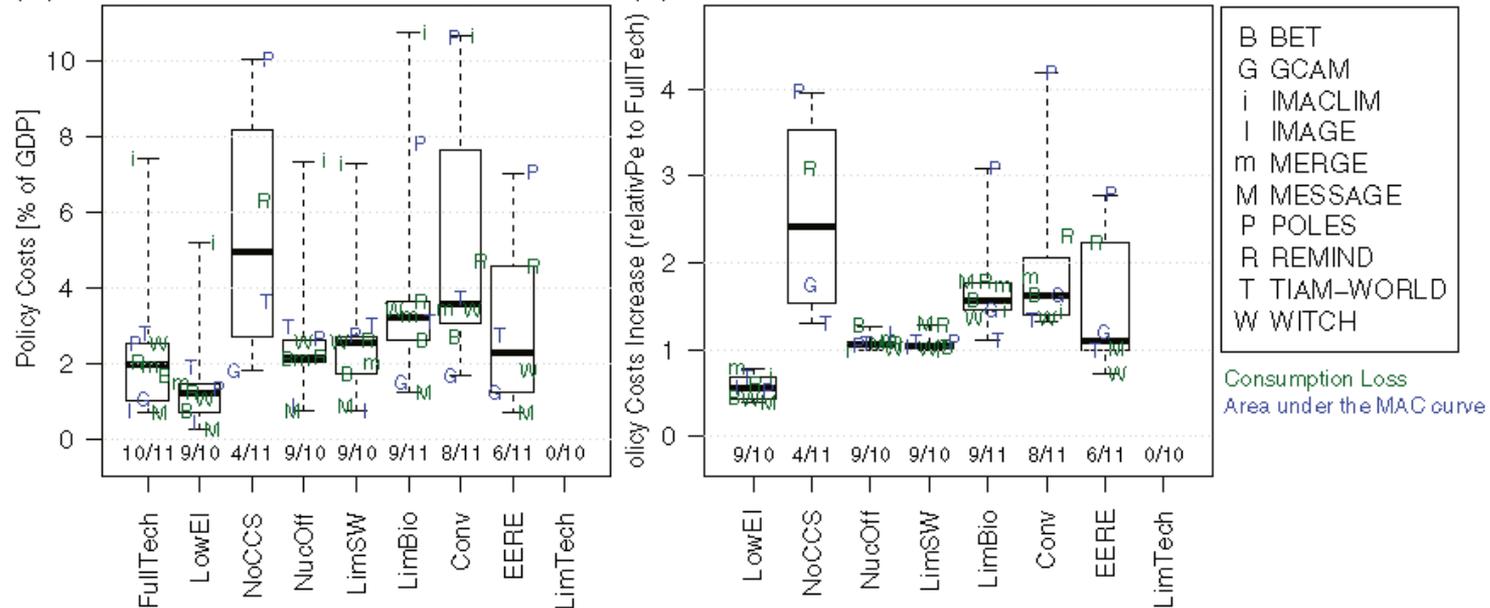
技術利用制約による緩和策コストの変化

—EMF27—

(a) Feasibility matrix of technology variation scenarios for different climate targets

	FullTech	LowEI	NoCCS	NucOff	LimSW	LimBio	Conv	EERE	LimTech
Baseline	13/13	13/13		11/11	11/11	13/13	13/13	13/13	11/11
550 ppm	13/13	13/13	12/12	11/11	11/11	13/13	13/13	12/12	6/9
450 ppm	10/11	9/10	4/11	9/10	9/10	9/11	8/11	6/11	0/10

(b) Policy Costs as fraction of GDP (2010-2100) (c) Policy Costs rel. to 450 FullTech (2010-2100)



Source: V. Krey et al., Climatic Change, 2013 (国際モデル比較プロジェクトEMF27特別号論文)

IPCC報告書の元となっているEMF27の論文。原子カフェーズアウトの場合も、10モデル中1つのモデルは450 ppm CO2eq目標を達成できないとしている。

なお、RITEの分析結果も同じケースについてEMF27に提供しているが、この整理は2100年までの評価を実施したモデルのみを整理しているため、2050年までの評価モデルであるDNE21+モデルの結果は含まれていない。

RITE DNE21+モデルによる分析結果 —EMF27への提供データ—

2050年時点のCO2限界削減費用と排出削減総費用 (括弧内は「すべての技術が利用可能」ケース比)

	すべての技術が 利用可能	CCS利用無し	2010年以降の 原子力新設無し	風力・太陽光発電 の技術進歩低位
450 ppm CO2eq	939 \$/tCO2 —	3400 \$/tCO2 (+260%)	1111 \$/tCO2 (+18%)	1042 \$/tCO2 (+11%)
	5.14 Trillion US\$/yr —	10.27 (+100%; +5.14)	5.91 (+15%; +0.78)	5.33 (+4%; +0.20)
550 ppm CO2eq.	175 \$/tCO2 —	285 \$/tCO2 (+63%)	192 \$/tCO2 (+10%)	179 \$/tCO2 (+2%)
	1.12 Trillion US\$/yr —	1.62 (+45%; +0.51)	1.48 (+33%; +0.36)	1.20 (+8%; +0.09)

Source: F. Sano, K. Akimoto, K. Wada, Impacts of different diffusion scenarios for mitigation technology options and of model representations regarding renewables intermittency on evaluations of CO2 emissions reductions, Climatic Change, 2013 (国際モデル比較プロジェクトEMF27特別号論文)

注) 450 ppm CO2eq、550 ppm CO2eqのそれぞれの排出経路は、EMF27指定のものに合致させているなど、4月11日に公表の「IPCC最新報告および国際的な最新のシナリオ分析動向を踏まえた長期の温室効果ガス排出削減パスと中期の排出削減分担の分析」とは若干計算条件が異なることに注意されたい。

- RITEの分析結果は、IPCCでのまとめ(基本的にEMF27)と傾向がほぼ合致している。
- **CCS利用有無の影響が極めて大きいものの(CCSの大規模な利用がなければ少なくとも450 ppmは事実上まず不可能)、原子力の有無による影響も大きい。原子力の新設がない場合(既存の原発は活用)、450 ppmの場合、世界で年間約78兆円の対策コスト増となる。550 ppmでも年間約36兆円の対策コスト増が見込まれる。決して、「コストの上昇はごくわずか」と表現されるレベルではなく、小さい数字ではない。**

分析結果の理解促進のための追加的なケーススタディ

- ◆ EMF27では行っていない分析であるが、ここでは、より良い理解のために、以下のケースについて追加的な分析を行った。
- ◆ **CCS利用無し+原子力フェーズアウト**：EMF27の分析における原子力フェーズアウト（2010年以降の原子力新設無し）のケースでは、かわりにCCS利用を増やすことでコスト上昇をある程度抑制するような分析結果となりやすい。CCSも利用できない場合について分析を実施
- ◆ **CCS利用無し+原子力の利用上限制約無し**：通常、原子力発電はコストは安価なもの、社会的受容性の問題があるため、モデル内でのコストの優位性からの評価に加えて、上限制約を設けることが多い（もしくは原子力はコストに依らず外生的なシナリオとして固定して分析するモデルも見受けられる）。RITEのDNE21+モデルのEMF27における分析では、世界全体では原子力発電電力量は2050年に20000TWh/yrを上限と想定した（実際には国別に上限を想定）。つまり、費用効率的であっても、この上限以上は導入がなされない。EMF27の分析でのCCS利用無しは非常に高いコスト増がもたらされる結果となっているが、仮に原子力の社会的な受容性を踏まえた上限制約を取り除いたときにどの程度のコスト増と推計されるかの分析を実施

RITE DNE21+モデルによる 技術の利用有無に関する追加分析結果

2050年時点のCO₂限界削減費用と排出削減総費用（括弧内は「CCS利用無し」ケース比）

	CCS利用無し (原子力利用上限有り)	CCS利用無し+2010年 以降の原子力新設無し	CCS利用無し+ 原子力利用上限無し
450 ppm CO ₂ eq	3400 \$/tCO ₂ —	3400 \$/tCO ₂ [+0%]	3400 \$/tCO ₂ [▲0%]
	10.27 Trillion US\$/yr —	14.18 [+3.91]	9.57 [▲0.70]
550 ppm CO ₂ eq.	285 \$/tCO ₂ —	402 \$/tCO ₂ [+41%]	241 \$/tCO ₂ [▲15%]
	1.62 Trillion US\$/yr —	2.39 [+0.77]	1.39 [▲0.23]

注) 450 ppmの場合、限界削減費用は、限界的な対策のコストに張り付いているため、変動はほとんど見られなくなっている。

○ **CCSの利用拡大が制約を受けるとした場合に、原子力がフェーズアウトすると、450 ppmのケースでは世界全体では年間約391兆円ものコストが追加的に必要**（CCS利用可能な場合で、原子力がフェーズアウトの場合は、先述のように約78兆円）。**550 ppmでも年間約77兆円の対策コスト増**が見込まれる。

○ 原子力発電については経済合理性とは別に社会的受容等の面から拡大に制約がかかる場合も多い。仮に**原子力利用の上限制約を想定せず、経済合理性に従って原子力を利用した場合には、450 ppmのケースでは世界で年間約70兆円、550 ppmの場合は年間約23兆円の温暖化対策コストの低減**が見込める。

○ このように、原子力発電の温暖化対策コスト低減効果は大変大きい。IPCC報告書の数値が一見大きく見えないのは、CCSの効果を相当理想的に織り込んでいて、原子力フェーズアウトの場合に、大部分をCCSで代替することを見込んでいるためであり、CCSの利用に制約があれば、原子力の影響は一層大きくなる。

- ◆ 新聞報道（2014年4月21日）は、「原発抜きでも温室ガス削減「風力や太陽光で可能」 IPCC付属文書*を公表」、「今回、追加公開された付属文書は、既存の原発は耐用年数まで使い、新規建設はやめる脱原発依存のシミュレーションでも「温室効果ガスを削減するコストの上昇はごくわずかだ」と言及した。そのうえで、風力や太陽光発電と原子力などは相互に置き換えることが可能だとしている」とした。
- ◆ しかしながら、電力は2次エネルギーであるため、原則様々な燃料種間で代替的であることは言うまでもないが、450 ppm CO₂eqといった厳しい排出削減の場合は代替できない可能性も示されており（9モデル中1モデルの分析は原子力フェーズアウトでは450 ppmは不可能との結果）、IPCCには「風力や太陽光発電と原子力などは相互に置き換えることが可能だ」と直接記述している箇所はない。むしろ、様々な技術選択の可能性がある一方、とりわけ厳しい排出削減（450や550 ppm CO₂eq）のためにはあらゆる技術の利用が重要というのが報告書の大きなメッセージと言える。
- ◆ また、原子力フェーズアウトケースでも温室効果ガスを削減するコストの上昇を7%程度で抑制できる（ただし7%といっても相当大きなコスト増である）のは、CCSで置き換えが可能な場合であり（CCSは重要だが現実の社会において実際にどの程度の規模が実施できるかは更に詳細な検討が必要）、CCSではなく再エネ等で置き換える場合には相当大きな追加的コストが必要である。
- ◆ 上記の新聞報道は、IPCC報告書が示している科学的事実を必ずしも正しい形で社会に伝えるものになっておらず、正確な理解と報道に努めて頂きたい。