

原発は温暖化防止に 役立たない

2020年7月4日

ハカルワカル広場勉強会資料
資料作成: 二宮

「安い」、「安全」、「クリーン」

そして、CO₂を排出しない

原子力発電こそが温暖化対策の切り札

環境適合～原子力発電は、発電時にCO₂を排出しません。

原子力発電は環境にやさしい発電です

The New York Times

Opinion

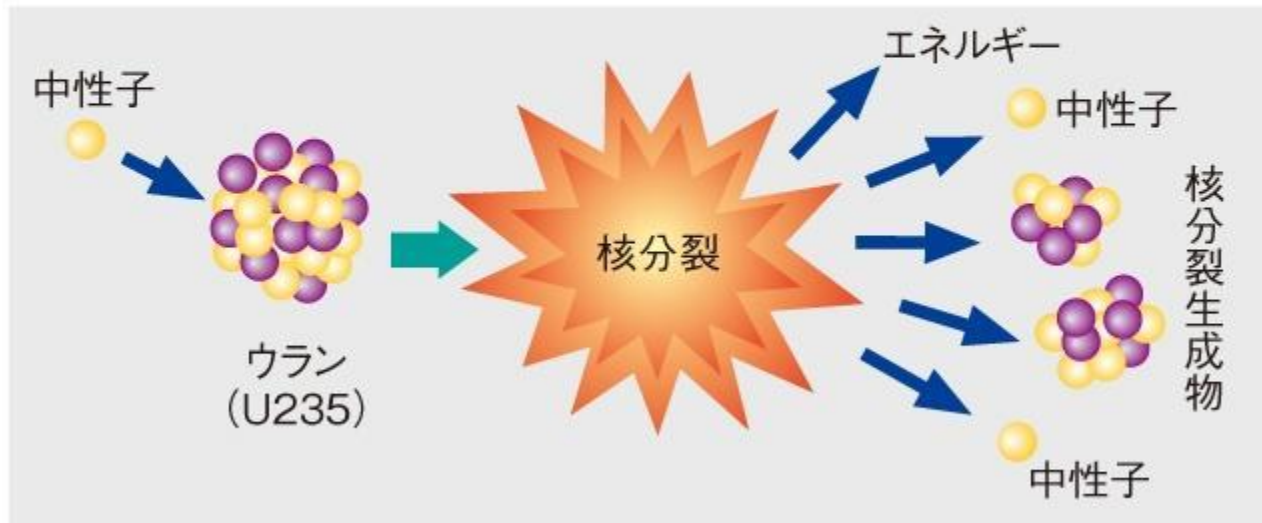
Nuclear Power Can Save the World

一見、もっともらしい

右図を見ても、
Cとか、Oとか、
関係なさそう

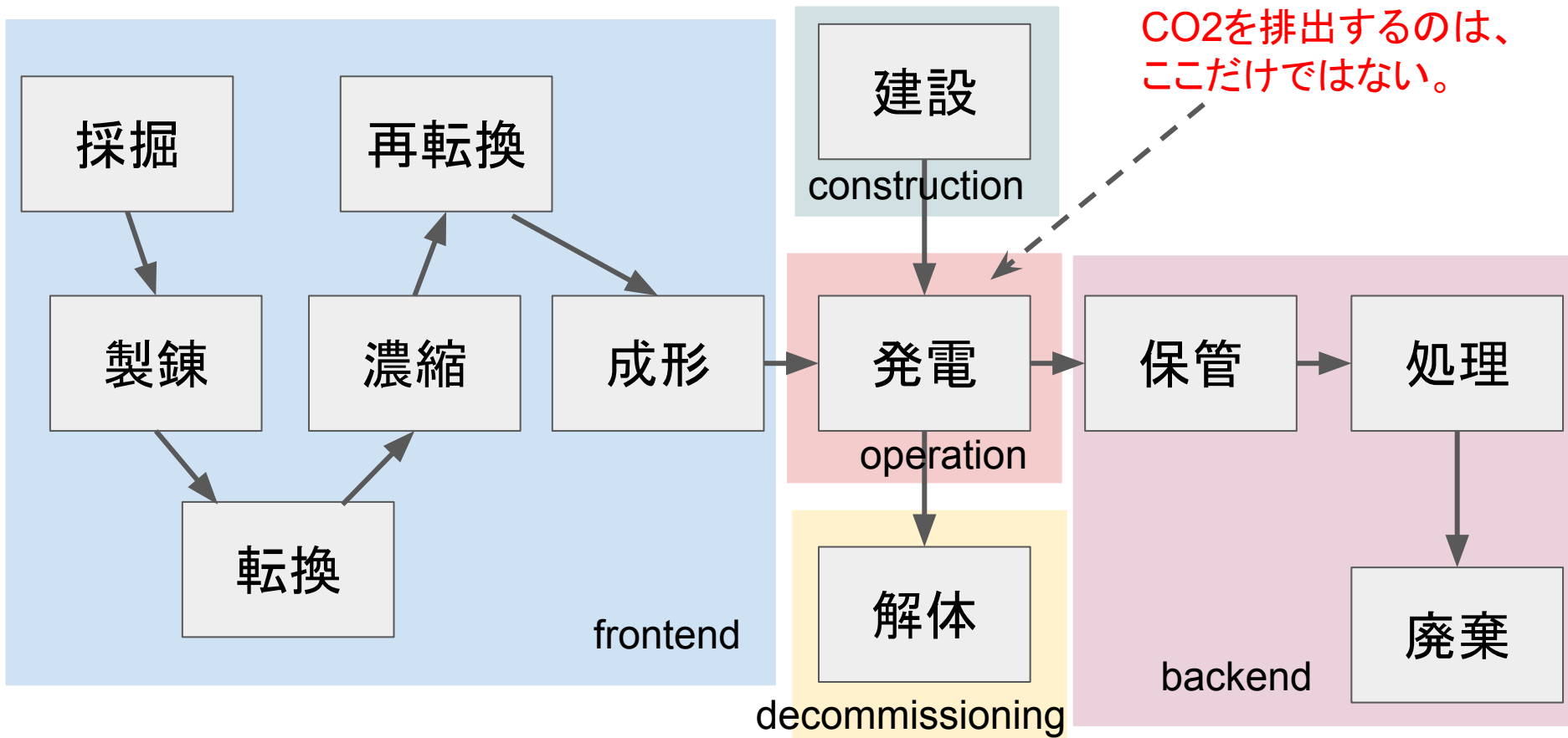
CO₂が出ないのは
明らかに見える

核分裂の原理



(出典：資源エネルギー庁「原子力2009」)

燃料の採掘から使用済み燃料の廃棄まで、発電所の建設・解体
これらを全部総合評価する必要がある。

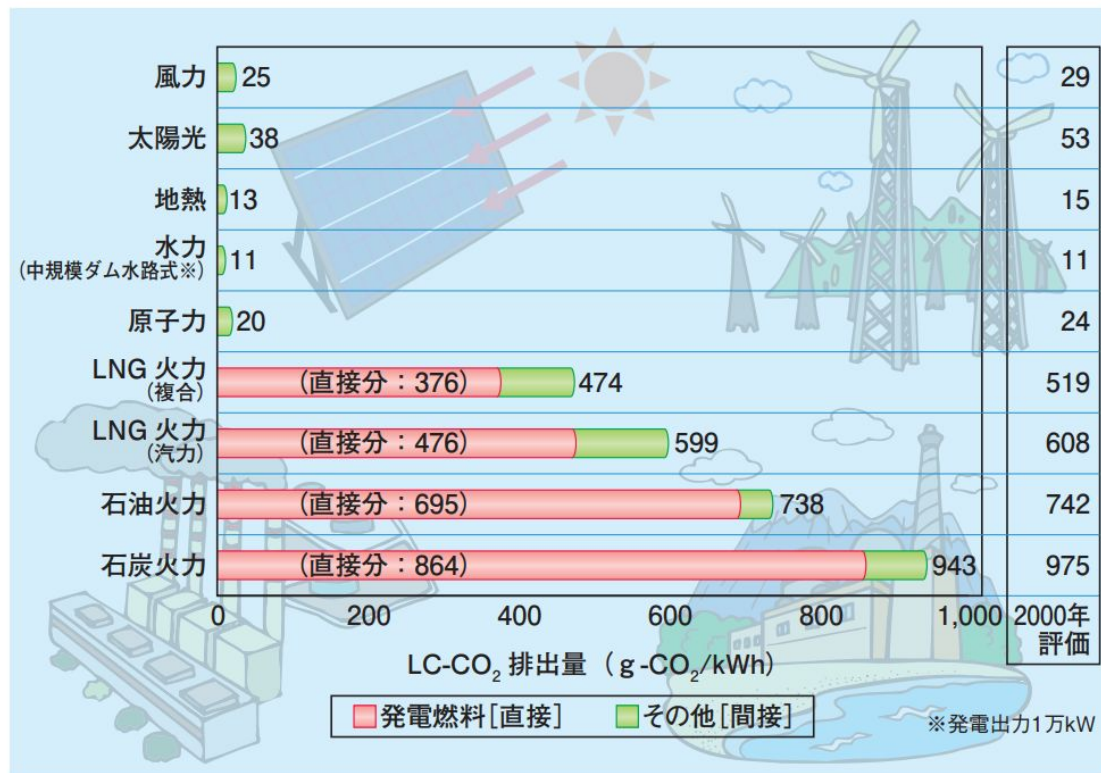


もちろん、評価する人達は
そういうことを全て考慮に入れて
計算している

それは無茶難しいことでは？

電力会社、電事連、政府関係、、、
といったところでは、
みな同じ数字がでてくるのは？

みんな電中研のレポートを引用していた



電源別の LC-CO₂ 排出量

電中研のホームページ: <https://criepi.denken.or.jp>

「[日本における発電技術のライフサイクル CO₂ 排出量総合評価](#)」

電力中央研究所(電中研)とは

電中研のホームページに2019年度収支予算書が公表されている。

経常収益296億のうち、250億円は

「受取経常給付金」＝電力会社から給付してもらっているお金

(おおもとは電力会社が集めている電気代)

現理事長は元中部電力副社長

ここが中立的な立場から評価レポートを出せるとは
考えがたい

総合的評価のことをLCA Life Cycle Assessment と言っている

原発に限らず、いろいろな分野で「本当にエコか？」と悩んでみるために、LCAを調べてみることには意味がある。

例えば、「LED電球の方が白熱電球よりエコか？」
たいていの場合「そうだ」ということになるが、
たまにごく短時間使うだけの電球ではそうではない。

発電設備に関してはEPT,EPRという用語もある。

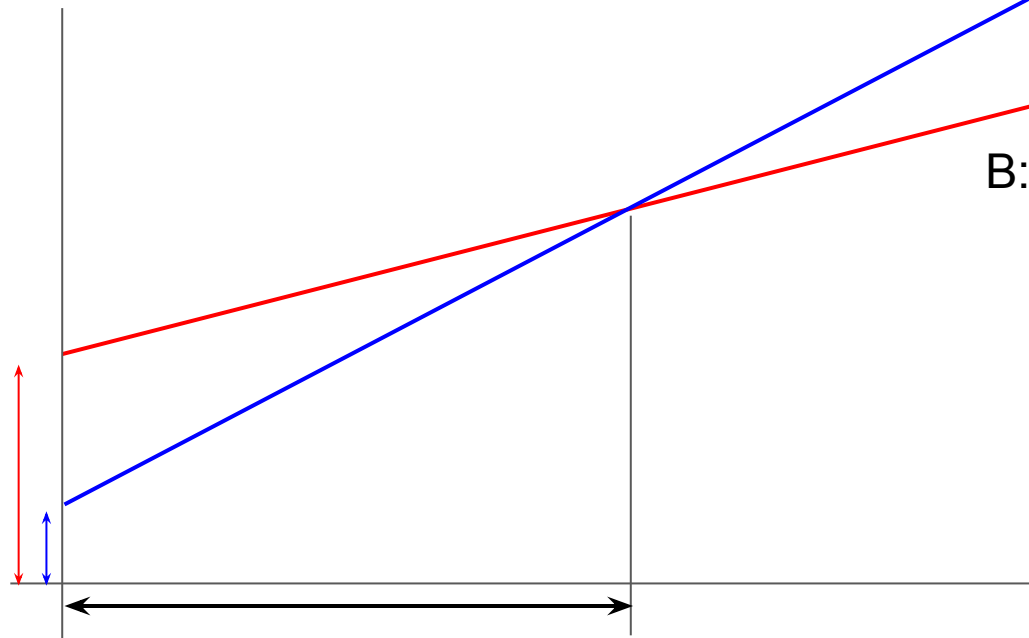
EPT(Energy Payback Time): ライフサイクル中に投入されるのと同じだけのエネルギーを、発電によって節約できるまでに必要な稼働期間。何年で元が取れるか、という数字。

EPR(Energy Payback Ratio): ライフサイクル中に投入されるエネルギーに対する、発電によって節約できるエネルギーの倍率。寿命になるまで使って、エネルギーを何倍に増やしたかという数字。

建設時、解体時などに排出するCO2

A:発電時のCO2排出が多い

B:発電時のCO2排出が少ない



この期間より 長く使えばBが有利 短く使えばAが有利

原子力発電のLCA、 世の中にはたくさんの研究がある

Benjamin Sovacool という人が、2008年に103の原子力発電のLCAに関する論文を調べ上げて、その中で科学的にしっかりしたアプローチの論文 19を選んで調べた結果、 $3\text{gCO}_2/\text{kWh}$ ~ $200\text{gCO}_2/\text{kWh}$ の範囲に評価値は広がっていて、平均では $66\text{gCO}_2/\text{kWh}$ だった。

電中研の $20\text{gCO}_2/\text{kWh}$ は範囲に入っているがかなり下の方である。

こんなに評価値の範囲が広いのでは、どう考えればいいのか？

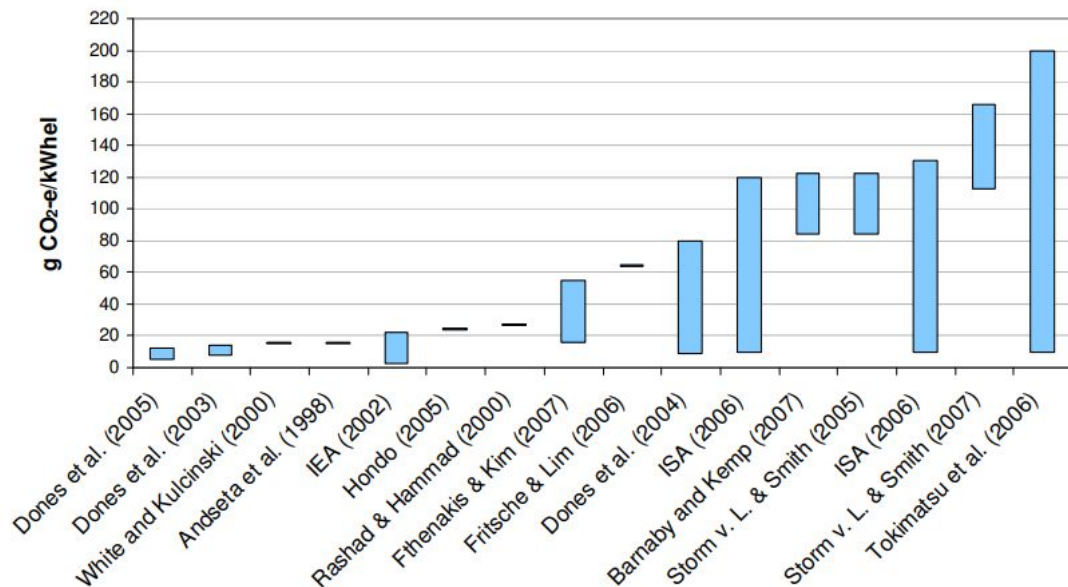


Figure 3: Green house gas intensity of the nuclear fuel chain – Comparison of the range given in different studies (min – max) according to Sovacool (2008)

3gCO₂/kWh~200gCO₂/kWh、何が大きく違うのか

Sovacoolの研究の中身を少し詳しく見ると、
選択された19の研究の中には、**LCAの一部だけしか評価していないものがある。**
3gCO₂/kWhという最低の数字は、Construction, Decommissioning の部分だけしか評価していなく、これでは小さな数字が出るのは当然である。

Frontend, Construction, Operation, Backend, Decommissioning
の**5つのステージ全てを評価できている研究は少なく、不明のまま無評価になっている**
部分は、合算値を出す時'0'として評価されてしまっている。

これでは小さな数字の方へ引っ張られるのではないか？

Sovacoolが選んだ19の研究の評価値

Study	Frontend	Construction	Operation	Backend	Decommissioning	Total
Andseta et al.(1998)	0.68	2.22	11.9	–	0.61	15.41
Barnaby and Kemp(2007b)	56	11.5	–	–	16.5–54.5	84–122
Dones et al. (2005)	3.5–10.2	1.1–1.3	–	0.4–0.5	–	5–12
Dones et al.(2003a,b)	6–12	1.0–1.3	–	0.6	–	7.6–14.3
Dones et al. (2004b)	7.4–77.4	1.0–1.4	–	0.6–1.2	–	9–80
ExternE (1998)	–	11.5	–	–	–	11.5
Fritsche and Lim(2006)	20	11	–	33	–	64
Fthenakis and Kim(2007)	12–21.7	0.5–17.7	0.1–10.8	2.1–3.5	1.3	16–55
Hondo (2005)	17	2.8	3.2	0.8	0.4	24.2
IEA (2002)	1.19–8.52	0.27–4.83	–	1.19–8.52	0.17	2.82–22
ISA (2006)	4.5–58.5	1.1–13.5	2.6–34.5	1.7–22.2	0.1–1.3	10–130
ISA (2006)	4.5–54	1.1–12.5	2.6–31.8	1.7–20.5	0.1–1.2	10–120
Rashad and Hammad(2000)	23.5	2	0.4	0.5	–	26.4
Storm van Leeuwenet al. (2005)	36	12–35	–	17	23–46	84–122
Storm van Leeuwen(2006)	39	13–36	–	17	23–49	92–141
Storm van Leeuwenet al. (2007)	16.26–28.27	16.8–23.2	24.4	15.51–40.75	39.5–49.1	112.47–165.72
Tokimatsu et al.(2006)	5.9–118	1.3–26	2.0–40	0.7–14	0.1–2	10–200
Vorspools et al.(2000)	–	~2	–	–	~1	3
White and Kulcinski(2000)	9.5	1.9	2.2	1.4	0.01	15

5ステージ全部評価しているものだけを見る

Study	Frontend	Construction	Operation	Backend	Decommissioning	Total
Fthenakis and Kim(2007)	12–21.7	0.5–17.7	0.1–10.8	2.1–3.5	1.3	16–55
Hondo (2005)	17	2.8	3.2	0.8	0.4	24.2
ISA (2006)	4.5–58.5	1.1–13.5	2.6–34.5	1.7–22.2	0.1–1.3	10–130
ISA (2006)	4.5–54	1.1–12.5	2.6–31.8	1.7–20.5	0.1–1.2	10–120
Storm van OLeeuwenet al. (2007)	16.26–28.27	16.8–23.2	24.4	15.51–40.75	39.5–49.1	112.47–165.72
Tokimatsu et al.(2006)	5.9–118	1.3–26	2.0–40	0.7–14	0.1–2	10–200
White and Kulcinski(2000)	9.5	1.9	2.2	1.4	0.01	15

これでもまだ、10~200gCO₂/kWhと範囲は広い。

建設(Construction)、運転(Operation)、廃炉(Decommissioning)の様な部分は、難しい見積もりは少ないように思うが、それでも評価値には大きな幅がある。

Frontendはウラン鉱石の品質(ウラン含有率)の仮定で大きな差が出る。

Backendは使用済み燃料処理を含むので、そもそも見積もり不能ではないかとも思える部分で、何か強引な仮定をするのであろうから幅が大きいのは当然だろう。

電中研の評価手法

ライフサイクル分析の評価の範囲、すなわち評価対象のシステム境界を、図 2.1 に示す。

評価の範囲は、燃料の生産から発電までとした。

ただし、石炭火力発電と原子力発電については、発電後の廃棄物処理までを含めて評価することとした。

…、原子力発電の中間貯蔵段階までの評価に際しては低レベル廃棄物(LLW)の処分を、考慮することとした。また、原子力のリサイクルを含む評価では、低レベル廃棄物(LLW)の処分に加え、現在計画中的の使用済み燃料国内再処理・プルサーマル利用(1回りサイクルを前提)、高レベル放射性廃棄物処分等を含めて評価を行った。

5つのステージ全てをより丁寧に評価しているようであるが、再処理、プルサーマルを前提にしており、「絵に描いた餅」をベースにしている感じは否めない。

各ステージでどのような数値をもとに計算をしているのか、このレポートだけではよくわからない。

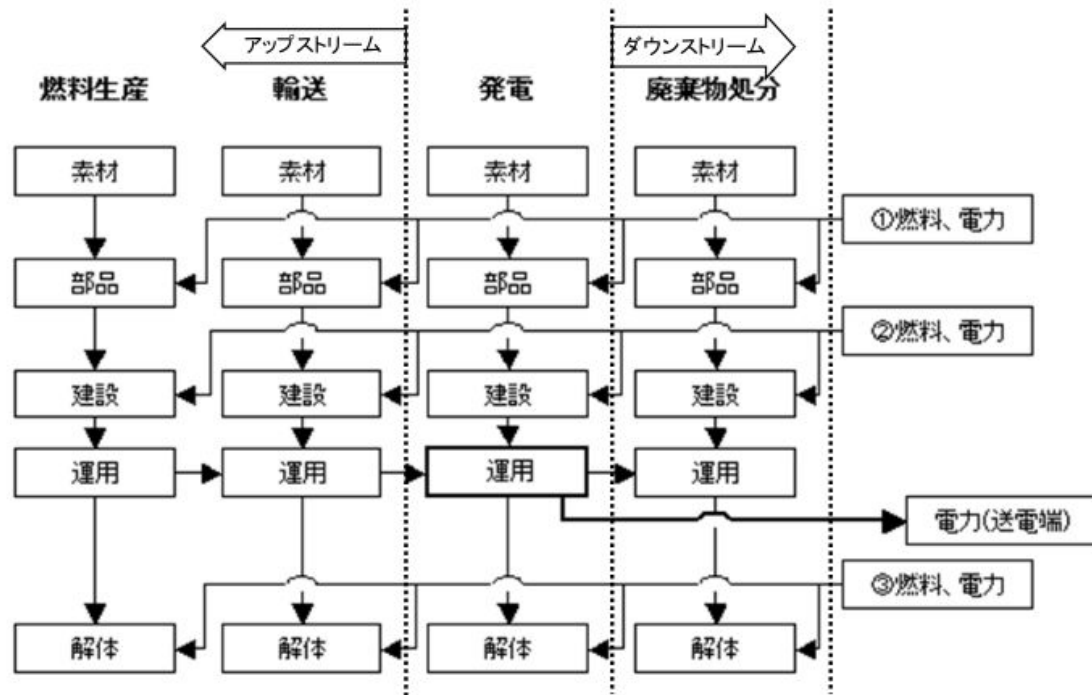


図 2.1 評価対象発電技術のシステム境界

温暖化対策、30年以上かかる対策では無意味

2100年時点において、世界の気温上昇を産業社会前の水準から1.5度程度までに抑える目標を達するには、2050年ごろにCO₂の収支をゼロ(排出する分と吸収する分が釣り合うレベル)に持っていく必要がある。(IPCC SR1.5)

「今すでに可能な技術」で努力しても2050年ゼロはかなり厳しい。

- 増殖炉はあてにできないし、核燃料サイクルは回らない
- トリウム炉、小型モジュラー炉、など新型原発は開発が間に合わない
- 高レベル廃棄物の永久貯蔵場所は見つからない
- 過酷事故は6000炉年に1回(400の炉があれば15年に1回)程度起こる

原子力を温暖化対策に利用することを考えるなら、上記のようなことを前提にして考慮しなければならない。

10万年ローンはありか？

高レベル廃棄物永久保管の道は見えない以上、「キャスクに入れて人間の目の見えるところに置いてお守りをする」という保管方法を仮定するしかない。

そういう保管に使うエネルギーは少ないからそこで排出するCO₂はわずかであろう、しかし10万年分溜まると少なからぬ量になる。

「ここ100年のCO₂排出削減が人類存続の鍵だから未来の分を借りるのはあり」

という説は、CO₂問題に限れば成り立たないわけではない。

ただし、「原発の寿命が来て廃炉にした後はもう作らない」という、あくまで過渡的対策としての原発でなければいけない。

長期ローンで物を買う時、ローン期間は買う物の寿命より短い必要がある。もし長いなら、寿命が来た後の買い替えはできないものと思わないといけない。

個人レベルのローン地獄は救済できるかもしれないが地球レベルのローン地獄は救済できない。

ウラン鉱石のウラン含有率

右表は世界で採掘されているウラン鉱石の品質を示す。
含有率0.1%以上の高品質は少なく、主力は0.01~0.1%
程度の品質になっている。

ウラン鉱石からウランを取り出すのには、鉱石を細かく砕
いて化学処理をする必要があり、そこで必要なエネル
ギーはかなり大きい。含有率が低い鉱石になると、それ
は大きな負担になる。

[Energy Balance of Nuclear Power Generation](#) によると、

含有率0.1~2%でCO2排出14~26g/kWh

含有率0.01~0.02%でCO2排出82~210g/kWh

含有率0.0086%以下になると原発はエネルギー収支が
負になってしまう。

原発利用を増やしていくと、低品質のウラン鉱石に頼ら
ざるを得なくなり、CO2排出量は増えることになり温暖化
対策に役立たないことになってしまう。

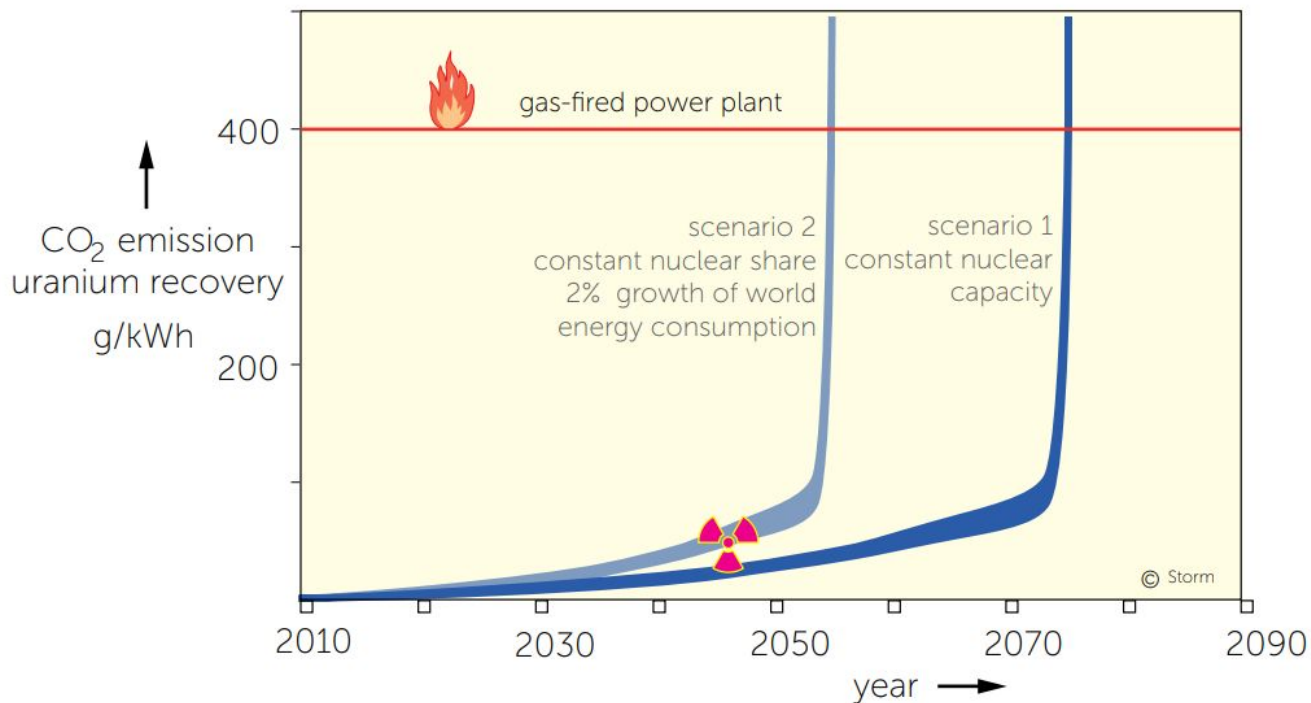
含有率(%)	割合(%)
>5	0.22
1~5	1.99
0.5~1.0	2.6
0.2~0.5	14.11
0.1~0.2	24.74
0.05~0.1	24.46
0.01~0.05	26.95
<0.01	4.15

ウラン鉱石のウラン含有率
World Distribution of Uranium Deposits
(UDEPO) 2016 Edition, IAEA

ウラン鉱石を掘り続けると、

右のグラフでは、
ウラン鉱石を使い続けるシナリオ
を、現状程度で続く場合、年に
2%程度で成長する場合でどうな
るかを推測している。

現状程度で使い続けても、2070
年を過ぎたあたりでウラン鉱石の
品質低下によりFrontendの部分
で排出するCO₂が急激に増える
ことになり、結果的に原発は火力
発電所よりもCO₂を多く排出する
ことになると予測されている。



環境や労働者の健康に配慮した採掘は、、、

右上の写真は露天掘りのウラン採掘地、そして右下の写真はウランを取り出した後の残土を捨てるためにテーリングダム。いずれも環境や近隣住民の健康に与えるダメージは大きい。

坑内掘りの採掘地もあるが、坑内のラドンガスによる労働者への健康被害は非常に大きい。

これらの問題を真剣に考慮して対策したウラン採掘をするとさらにウラン採掘に必要なエネルギー＝CO2排出は大きくなる。

Frontendの部分のCO2排出の見積もりは、環境や労働の問題を考えれば、かなり大きな数字に見直される必要があるだろう。



なにもかも電気で動かせるか？

「原発で電気を大量に作り、なにもかも電気で動かすようにしていけばCO2の排出はゼロに近づけられる」

近年EV普及の勢いはすさまじい。
しかし、写真の様な重機は今のところディーゼルエンジンで動かすしかない。

このようなものまでEV化できる日は来るかもしれないが、遠い未来であり、今叫ばれている温暖化問題に対応できるような話にはなりえない。

そもそもそんなに大量に原発で電気を作ろうとしたらウラン燃料の経済性はなくなる。



過酷事故対策の分はどこに？

過酷事故が起こってしまった時に必要なエネルギーはとんでもない大きさであることは容易に想像がつく。そのために排出するCO₂も膨大である。また過酷事故が実際に起こらなくてもそれへの備えのためのエネルギーも少なくないだろう。

こういうのはどこで計算に入れられているのだろうか？

参考までに、勝手に計算してみる。

[日本経済研究センターの記事](#)によると、福島事故処理費用は35兆円~80兆円

これは日本のGDPの1割くらいの額に相当。

荒っぽい話になるが、日本が年間に排出するCO₂の1/10くらいをそのために排出するすると考えると、1.2億トンほどになる。6000炉年に一回の事故を仮定すると、1炉年あたりの負担は2万トンになる。100万キロワットの発電が70%で稼働していると考え、3.3gCO₂/kWhがこの分の負担になる。

原発のLCAに幅があるといっても、10~200gCO₂/kWh なら、火力発電を置き換えるのに十分小さいではないか？

- 新規発電所は50gCO₂/kW以下にすべきであり、原発の悪い方の評価は十分とは言えない。
- 次の様なことを受け入れるかの議論もなく、単に数字の置き換えで判断すべきではない。
 - 廃棄物に関して10万年ローンを覚悟する
 - ウラン鉱の品質劣化とともに近い未来に使えなくなる
 - 世界的に影響を及ぼすような過酷事故がたまにおこることを覚悟する
 - ウラン鉱採掘地、発電地、燃料処理地、いたるところで人権侵害を引き起こす

原発に未来はないかもしれない、でもすでに建設したものは寿命まで使うべきではないか？

- そのような条件で使う分には、確かにいくつかの点は考慮する必要がなくなるだろう。しかし、以下の問題はまだ残る。
 - 廃棄物に関して10万年ローンを覚悟する
 - 世界的に影響を及ぼすような過酷事故がたまにおこることを覚悟する
 - ウラン鉱採掘地、発電地、燃料処理地、いたるところで人権侵害を引き起こす
- すでに建設したとは言っても、まだ運転開始してない状態であれば、未使用のまま解体する方が、解体作業が容易でリサイクルできる物がたくさんある。

10万年ローンと言うが、すでに1億円借りがあるところでさらに1000万円積み上げるというようなことで温暖化が防げるなら、追加ローンもやむなしと考えるべきでは？

上限が設定されていて、保管場所がはっきり確保できている場合はそのような議論もなりたつだろう。寿命までには十分の時間があり、使用済み燃料は従来通りの方法で敷地内に保管できる余裕があるような炉を使い続けることの是非が問われるようなケースが考えられる。

- 運転する限り「過酷事故」の可能性を受け入れなければいけない、という点はどうしても大きな問題として残る。温暖化問題と簡単に天秤にかけられる問題ではない。最低でも200キロ圏くらいの人々の総意が反映されるべきだろう。
- 1億円で1000万円積み上げる、すなわち10%積み上げるというような想定では、動かせる原発は僅かではない。日本の国内に貯蔵している使用済み燃料は18000トン、1割に相等する量は1800トン。福島事故前並に動かすと年間1000トンくらい排出して、2年分もない。

再生可能エネルギーが魔法の杖のように解決してくれるだろうか？再生可能エネルギーの現状を見れば2050年CO2ネットゼロのターゲットにはとても間に合わない？

- ご指摘ごもっとも、再生可能エネルギーが魔法の杖にはならないことはそのとおりである。
- 2050年CO2ネットゼロを実現するために、様々なアプローチが議論されている。以下の数ページでさわりの部分を紹介する。

再生可能エネルギーのLCAは？

「電中研のレポートだけから判断するな、というなら再生エネルギーに関する数値もそうだろう」と言われればそのとおり。

風力:25gCO₂/kWh, 太陽光:38gCO₂/kWhは電中研評価値という一つの評価値。様々な研究によって評価値に幅がある。

たくさんの研究を評価する研究の一つにあるグラフを次ページに示す。

[\(論文のリンク\)](#)

再生可能エネルギーの場合、設置場所の気象条件などが大きく作用するので、ケースバイケースで考えることも重要であろう。

- ウラン燃料のように掘りつくしていくことで将来 CO₂排出値がどんどん悪くなるというようなことはない。
- 高レベル廃棄物のような、処理方法が未解決のような問題を抱えていない。
- 原発の様な過酷事故は想定しなくてもいい。
- 放射能の心配がないので解体後にリサイクルできる材料が多い。

などといった点で、出てくる評価値以上に再生可能エネルギーに有利な点が多い。

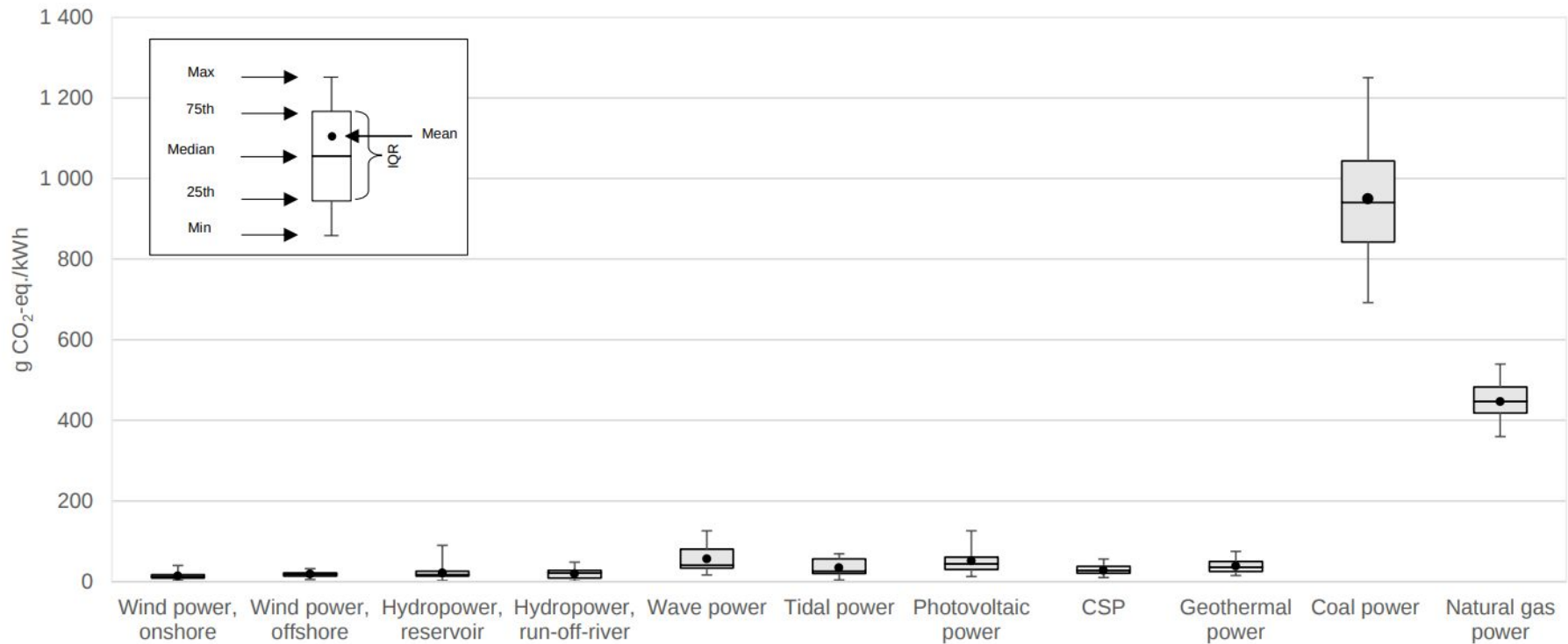


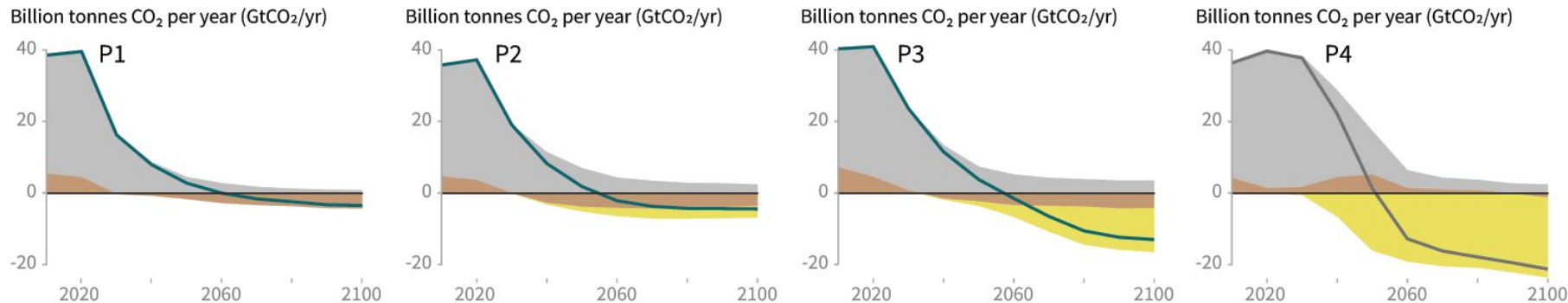
Figure 21 Summary of the GHG emissions for the considered electricity generation technologies

再生可能エネルギーの LCA 評価値をまとめたグラフ

“Life cycle GHG emissions of renewable and nonrenewable electricity generation technologies”

2050年ネットゼロを実現する4つの参考シナリオ

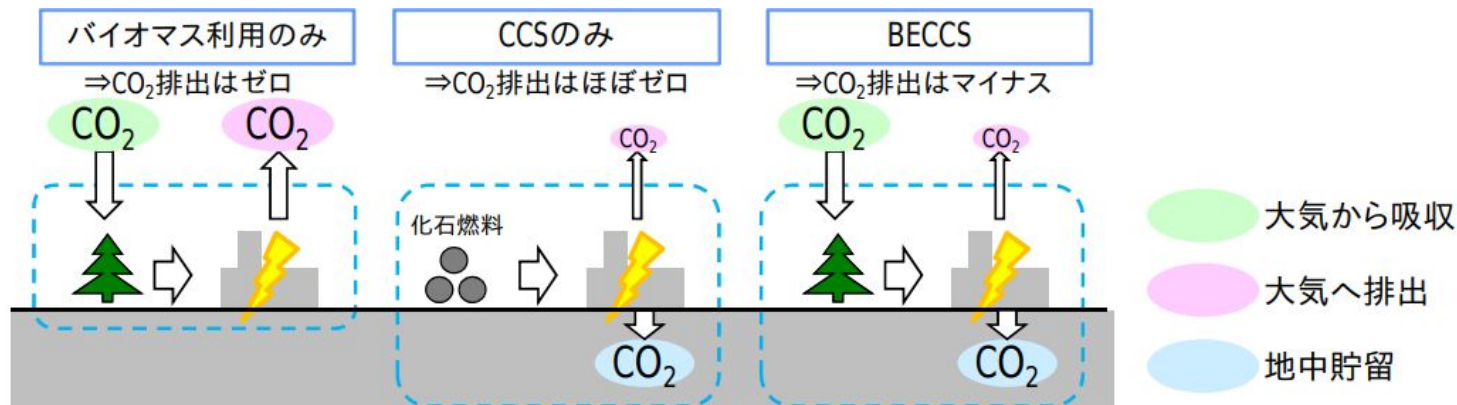
● Fossil fuel and industry ● AFOLU ● BECCS



上のP1~P4はIPCCが2100年時点で1.5度上昇に抑えるやり方として上げている4つのシナリオ。P1の様にすみやかに化石燃料に頼るのを減らしていくことができれば、BECCSというCO2回収技術に頼ることになる。

P1シナリオでは、発電に関しては2030年時点で60%、2050年時点で77%を再生可能エネルギーに持っていくことになる。はたしてそんなに急激に増やすことができるのか？

BECCS(BioEnergy and Carbon Capture and Storage)



環境省

図．BECCSのイメージ

BECCSでは、CO₂を植物に吸収させて、それをバイオマスエネルギーとして焼却する時に、そこで出るCO₂を回収して、地下貯蔵することで、CO₂を大気から回収することを可能にする。

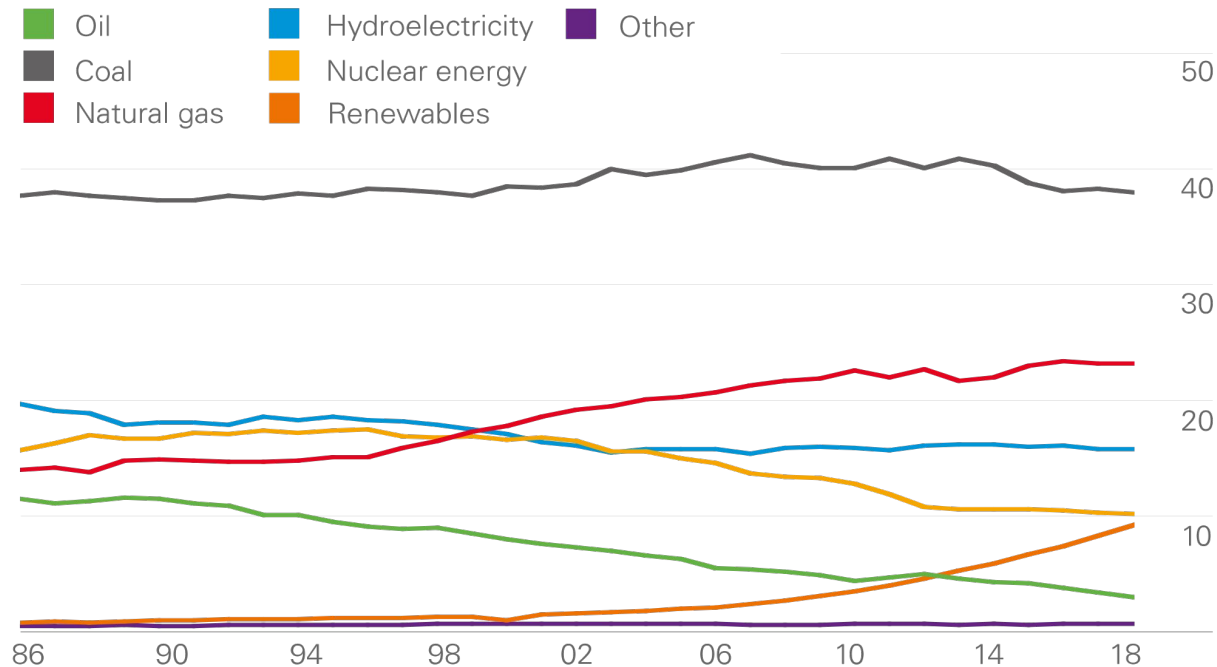
前ページP4のようなシナリオでは大量のCO₂の回収が必要になり、**森林を破壊してBECCSに向く植物の栽培地に変えていくことになる。**

CO₂の地下貯蔵が安全にできるのか、という疑問も大きい。

(BECCS, CCSに関しては機会を改めて勉強していく必要があるだろう。)

再生可能エネルギー発電2030年60%は可能か？

右のグラフを見て、太陽光や風力などを含むRenewableの分野の成長は著しく約10%のところまで来ている。水力が約15%あるがこの分が今後成長することはあまり期待できない。そうすると2030年に、Renewableが45%ぐらいにならないと60%に届かない。



12年間で3倍になるには、年間9.5%の成長が持続すればいいわけで、近年の勢いを見れば行けるような気もするが、事はそう簡単ではない。

再生可能エネルギー発電2030年60%は可能か？

2018年世界の発電量は約26600TWh、この年は約3.7%増大している。

コロナウィルスの様な騒動が連発しない限り、増大が急に止まることは考え難く、年間2%で12年間続くと仮定したら、12年間で約1.27倍になる。そうすると、2030年には、約33700TWh発電することになり、その60%は約20000TWhとなる。

2018年、水力4000TWh、水力以外の再生可能が2700TWh。2030年に仮に水力が5000TWhまで増えたとしても、水力以外の再生可能は12年間で5.6倍になる必要がある。これは**年15%の増大を維持することを要求**する。

太陽光に限れば、IEAの予測を覆して近年は30%を越える成長を続けている。しばらく続く可能性はあるし、さらなる技術革新が伴えば10年くらい高い成長率が続くかもしれない。風力の方も10%くらいの成長率が続くかもしれない。

いずれにしても、**かなり達成が難しい数字**であることは間違いない。さらに、再生可能エネルギーのCO2排出は建設時にそのほとんどが集中することを考えると、急激な増設は発電分野以外のCO2排出でオーバーシュートを作る原因になる。

まとめ

- 原発の様な発電施設のCO₂排出量を評価するにはLCA(Life Cycle Assessment)が必要
- LCAでは、発電施設の運営だけでなく、建設から解体、使用燃料の産出から廃棄処理まで全てを総合的に評価する
- LCAは簡単な作業ではないので、評価結果に大きな幅が出る
- 電中研(資金のほとんどを電力会社が提供する研究機関)が出している原発のLCA 20gCO₂/kWhは単に一つの評価結果でしかない
- 世界の研究者の成果では原発のLCAには10gCO₂/kWh~200gCO₂/kWhくらいの幅があり、新規発電所の目標とすべき50gCO₂/kWhをかならずしも下回らない
- ウラン鉱の品質低下により原発が火力発電以上にCO₂を排出するようになる未来は近い
- 原発はLCAの数値結果が示す以上に、大きな環境問題や人権問題をかかえている
- 再生可能エネルギーのLCAの評価値にも同様に大きな幅があるが、近年の著しい改良のおかげで50gCO₂/kWhはほぼ達成できている
- 2050年CO₂ネットゼロの達成は容易ではない

追記

「原発は温暖化防止に役立たない」ということがすっきり明解になることを期待していた人には少しすっきり感に欠ける話だったかもしれない。簡単にすっきり行かないのは、次のような「自分の立ち位置」に依存することもある。

- 今日明日がよければいいのか、10年後まででいいのか、100年後までか、1000年後までか、そういう時間軸のとり方で結論は大きく変わる。
- 自分と身近な人達によければいいのか、地域社会レベルでよければいいのか、自治体レベルか、国レベルか、世界全体レベルか、そういう空間軸のとり方で結論は大きく変わる。

「遠い未来のことまで考えて、世界中すみずみの人達の人権を考えるのは当然」と言い切ってしまうと割とすっきりするかもしれない。

ただ、一度はそう言い切ってみても、現実の問題をいろいろ突きつけられると、またグラグラしてくるのではないだろうか？

「今すでにある原発はできるだけ動かして、とにかく2050年CO2ネットゼロ達成を考えて、未来のことはその先でなんとかしよう」という主張に反論をするのは簡単ではない。未来に与えるダメージの大きさと、私達が直接目にしない世界のどこかで人々が苦しんでいる現実を、何度も何度も考えて、その先で出てくる結論だろう。すっきりしなくて当然かもしれない。