

令和3年度 第2回シンビオ社会研究会講演会

「2050 カーボンニュートラル達成の決め手は安全性を高めた原子力の活用」



2021年12月1日(水)14:50~15:30







東京工業大学 ゼロカーボンエネルギー研究所
特任教授 奈良林 直 (北海道大学名誉教授)

1) CO₂排出の世界ランキング

我が国は既に世界の太陽光発電大国

- 2020年、日本の太陽光の発電能力は**67GW**
100万kWの原発**67**基相当（1GW=100万kW）
- 中国、米国に次いで世界第3位
- 太陽光は原発54基を上回る大規模電源になった。
- 太陽光の発電能力を国土面積で割ると日本は中国の7倍、米国の22倍

<2020年>

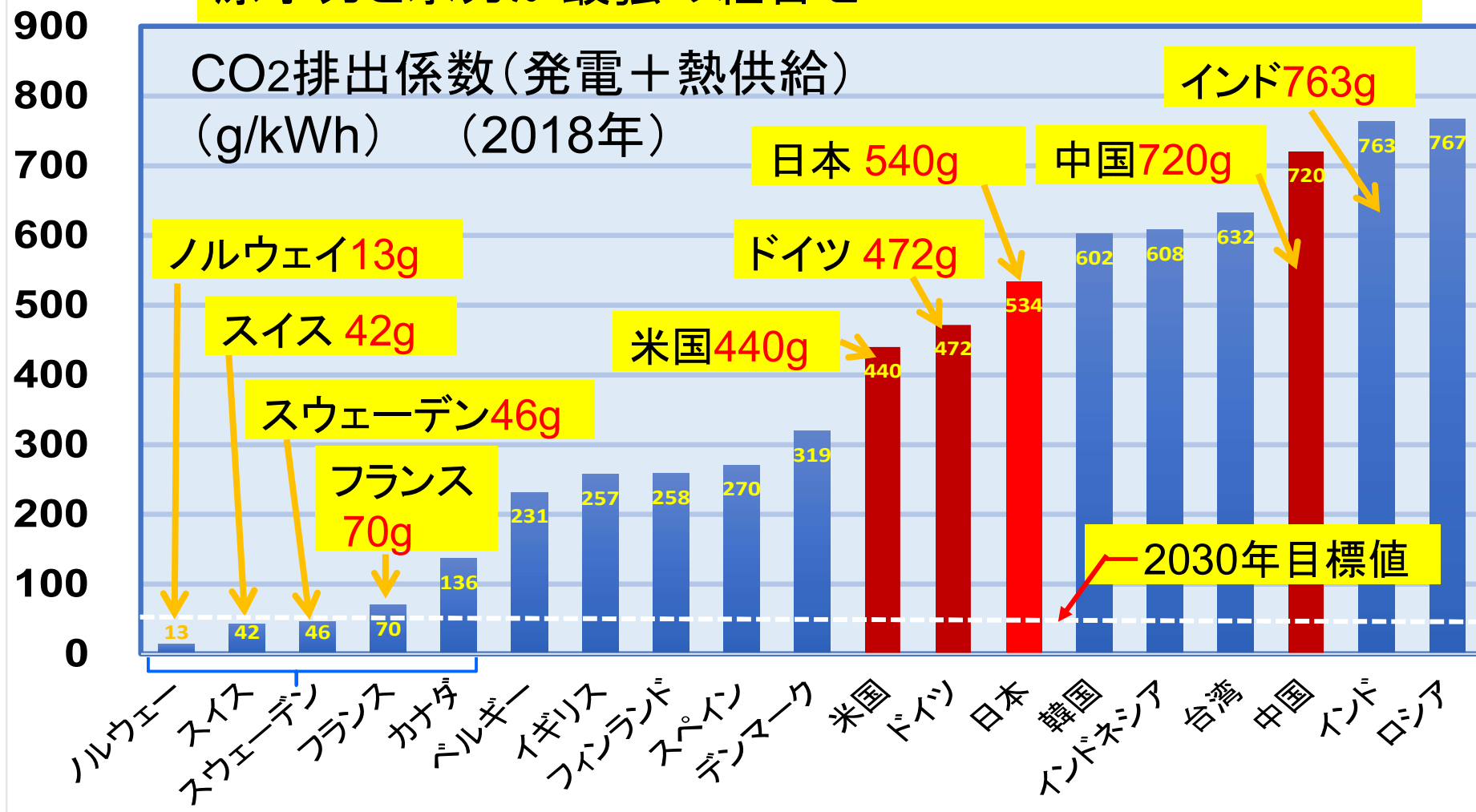
| 順位 | 国名 | GW(ギガワット) | 国土面積当たり 太陽光kW/km ² |
|---|---|-------------|----------------------------------|
| 1 |  中国 | 254GW | 26 |
| 2 |  米国 | 74GW | 8 |
|  3 |  日本 | 67GW | 177 |
| 4 |  ドイツ | 54GW | 151 |
| 5 |  インド | 39GW | 12 |

<https://www.globalnote.jp/post-3240.html>

世界のCO2の排出係数ランキング

1kWhの電気を得るのに何gのCO2を排出したか。
 太陽光はCO2排出削減に十分に貢献できていない
 原子力と水力が最強の組合せ

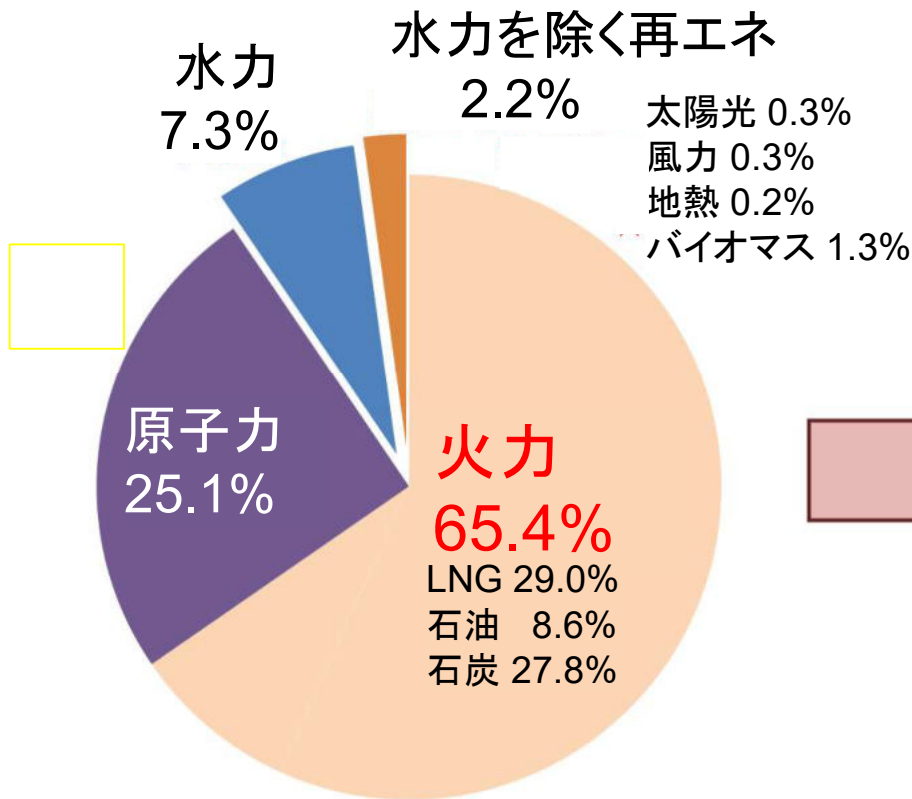
g/kWh



わが国の電源構成(2010年→2016年)

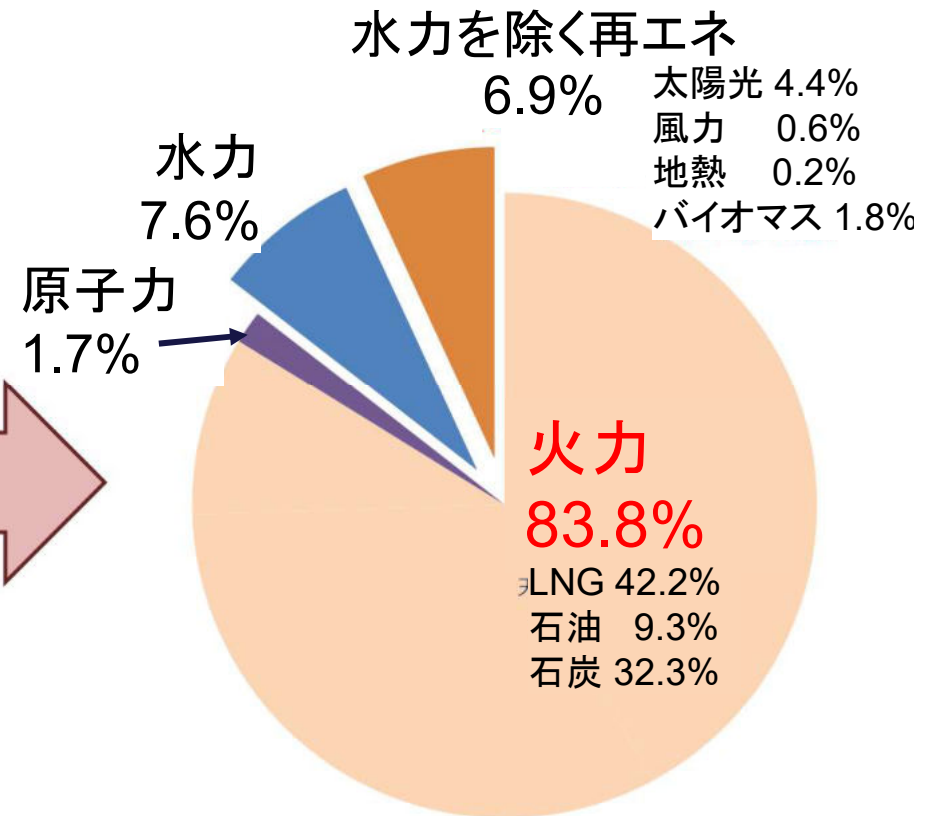
2010

再エネ: 9.5%



2016

再エネ: 14.5%



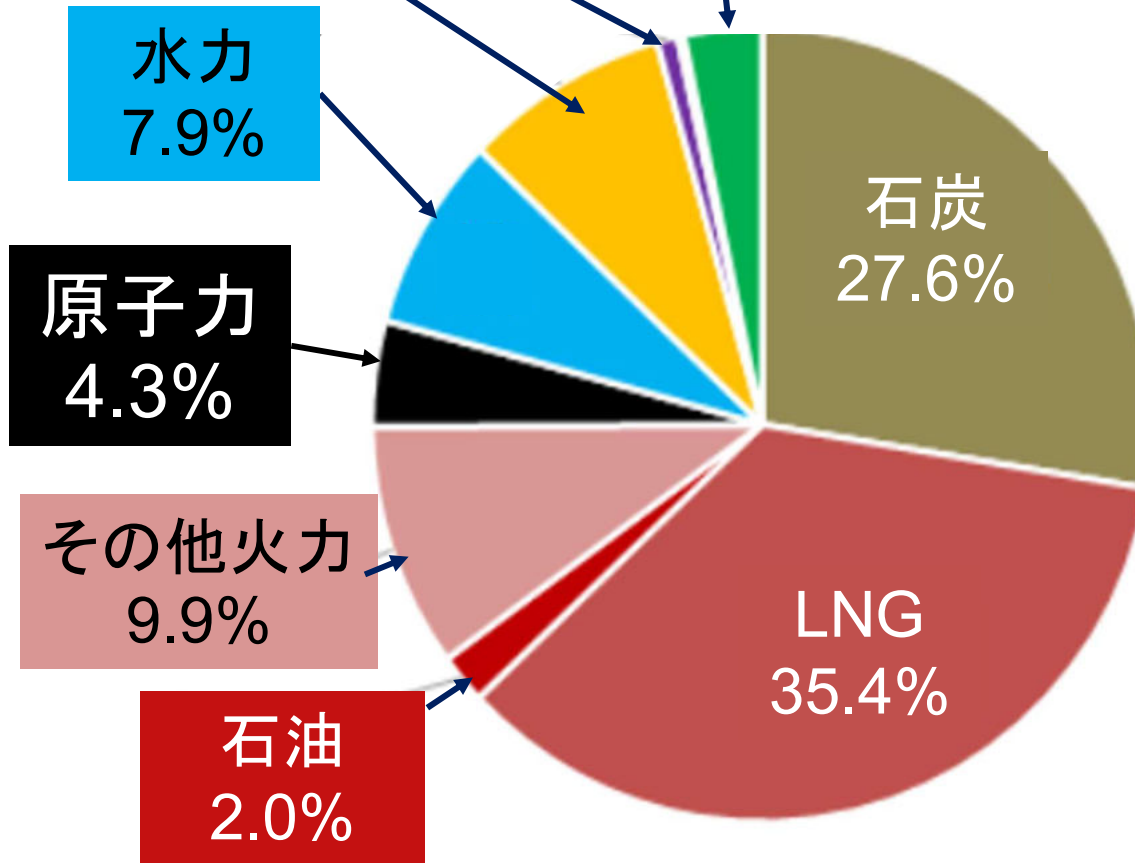
出典：総合エネルギー統計

原発が特重工事遅延で順に停止した2020年

水力除く再エネ計12.9%



再エネ
計20.8%



火力
計74.9%

2019年とほぼ同じ
原子力は2%減
2020年はコロナ禍
で電力需要減
※その分再エネ比率
が増加

2019年度

| | |
|-------|-------|
| 太陽光 | 7.6% |
| 風力 | 0.8% |
| バイオマス | 2.8% |
| 地熱 | 0.2% |
| 小水力 | 1.9% |
| 大規模水力 | 5.8% |
| 原子力 | 6.0% |
| RE合計 | 19.2% |

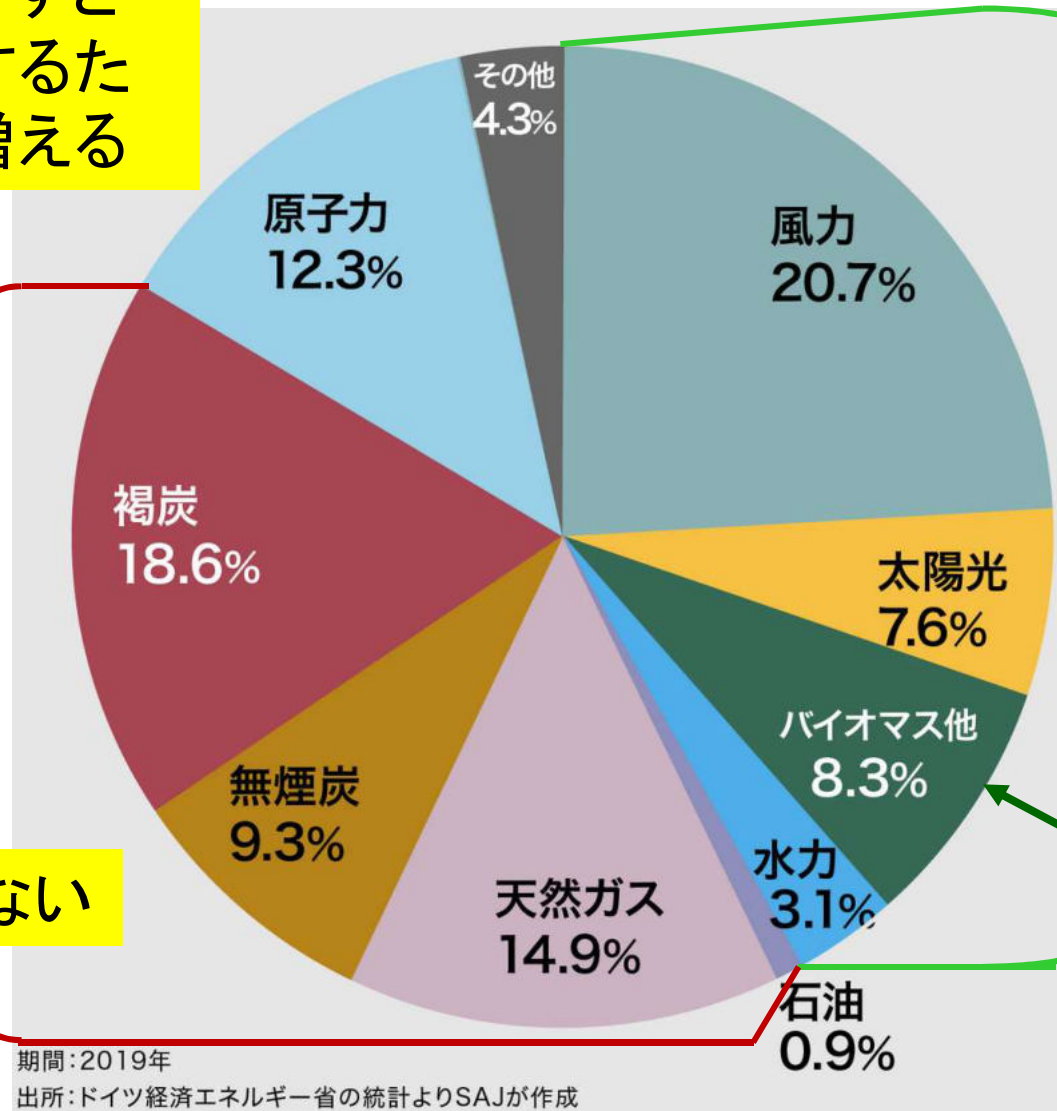
ドイツのエネルギー政策の失敗(2019年)

再エネを増やすと
変動を吸収するための火力も増える

原子力
と火力
56.0%

火力
43.7%

CO₂が減らない



変動再エネ
(太陽光
+ 風力)
28.3%

再エネ
39.7%

ドイツのバイオ
マスのために
熱帯雨林が伐
採・環境破壊

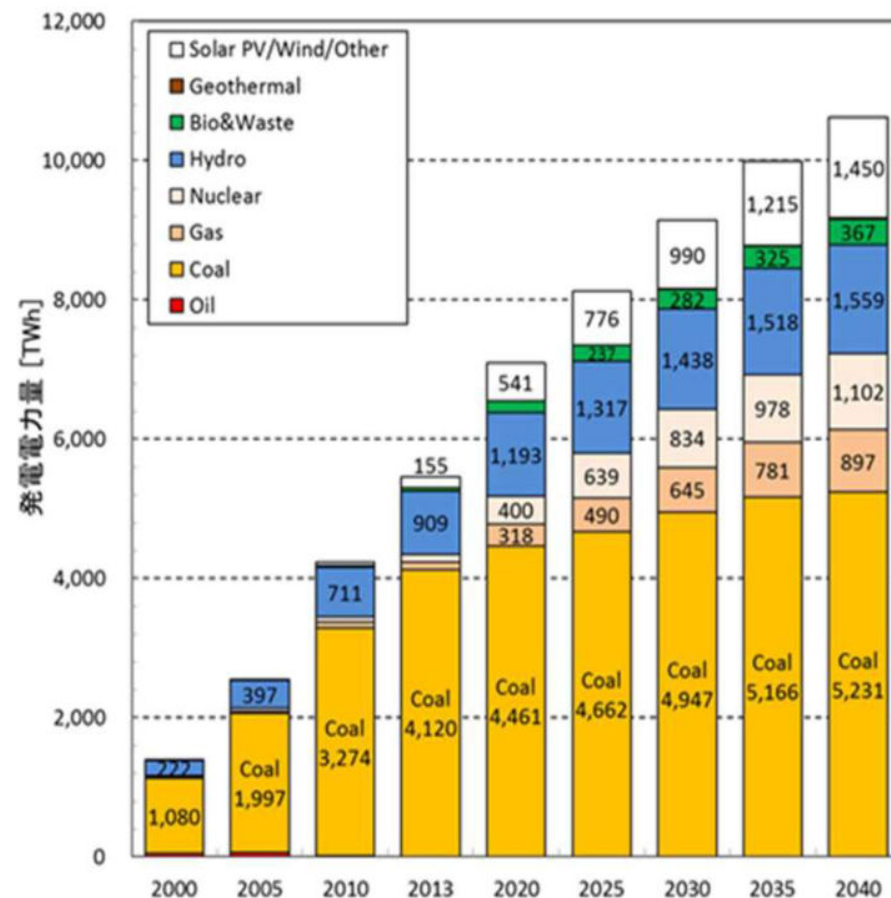
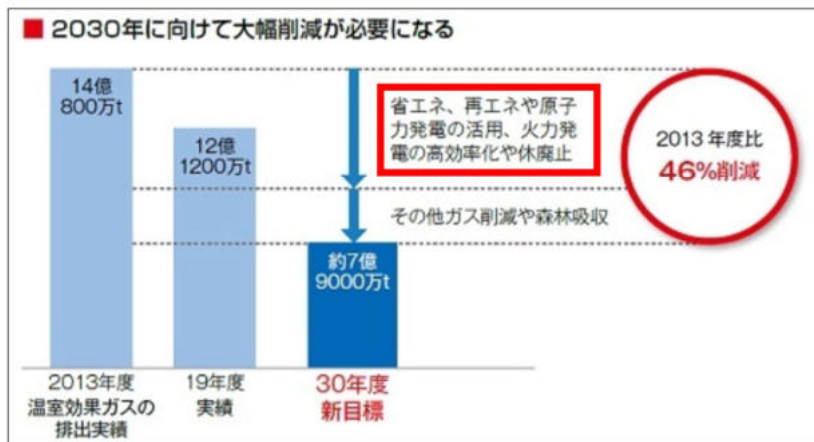
再エネ最優先ではCO2は減らない

【バイデン大統領はアメリカの温室効果ガスを50～52%削減】



中国は2060年まで、石炭火力を最大限利用して国力を増強
石炭火力輸出の世界シェア53%

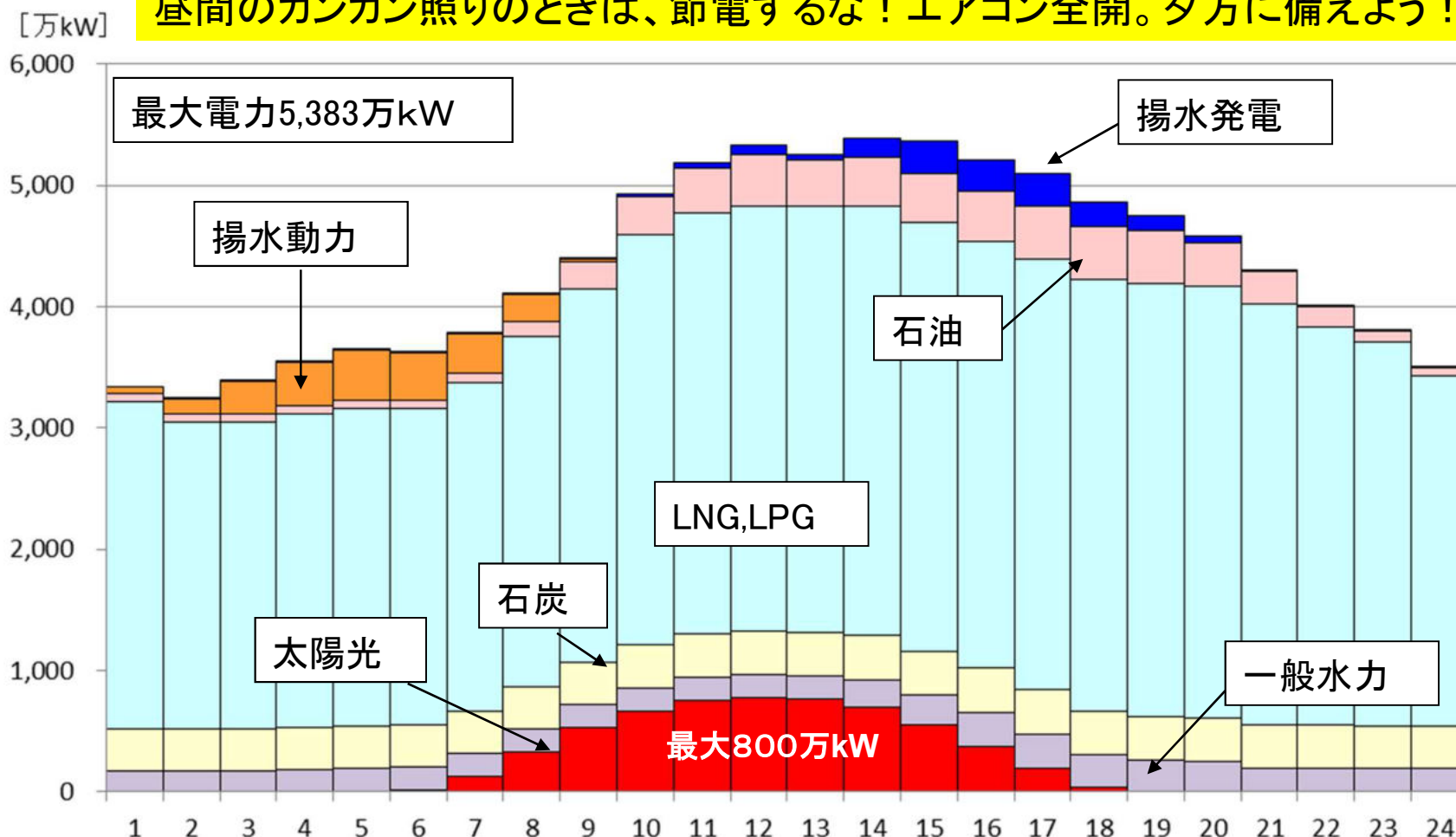
2030年の大幅削減目標(2013年度比46%削減)
【原子力発電の活用で達成すべき】



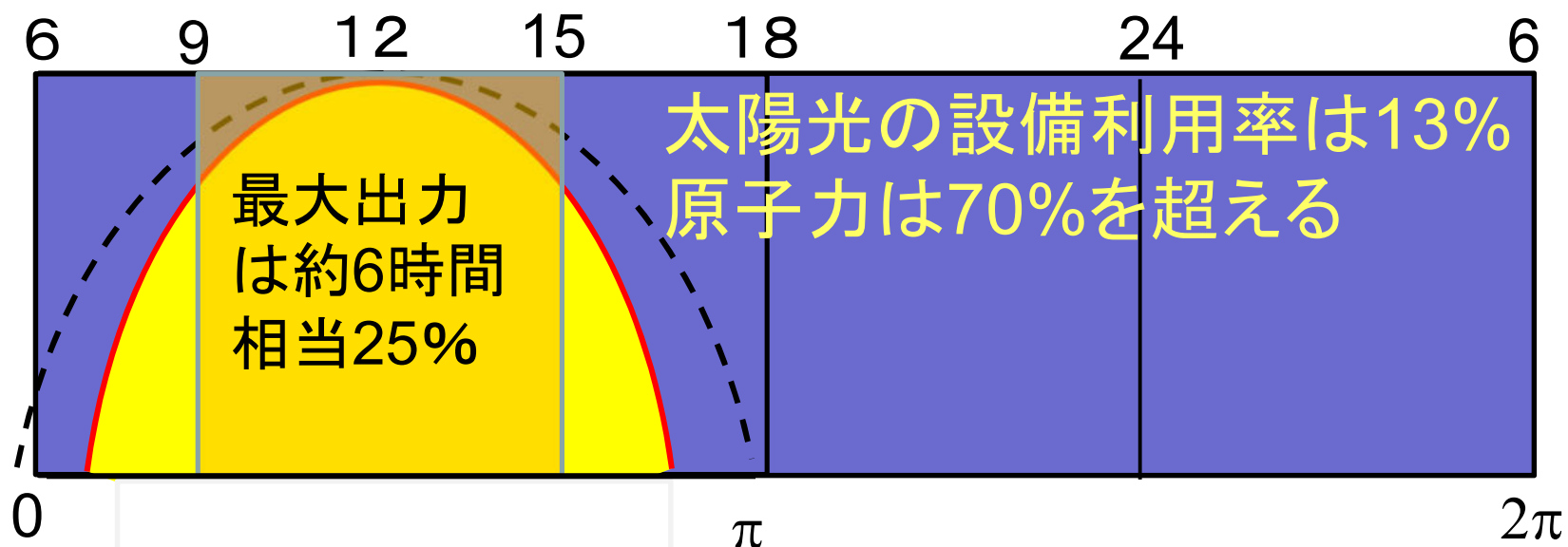
2017年の最大電力発生日(8月9日)の電源運用

- 太陽光発電は需要のピークとなる昼間に出力もピークとなる。このため、従来は揚水発電で対応していた需要の一部が太陽光発電に置き換わり、揚水発電のピークが昼間 → 夕方の点灯帯に移行している。

昼間のカンカン照りのときは、節電するな！エアコン全開。夕方に備えよう！



太陽光や風力は他の電源を必要とする



$$\int_0^{\pi} \sin \theta \, d\theta = [-\cos \theta]_0^{\pi} = 2 \quad 2 / 2\pi = 1 / \pi = 0.32、\text{最大}32\%$$

- 晴天になる確率50%を掛けると16%、電気回路損失など差し引くと、**設備利用率は高々13%が我が国の実績**。
- 1日では6時間相当。残りの分は水力・火力・原子力で補完。
- 風力発電の設備利用率は20%。
- つまり、**再エネを主力電源にするのは困難**。

再エネの弱点は不規則に変動すること

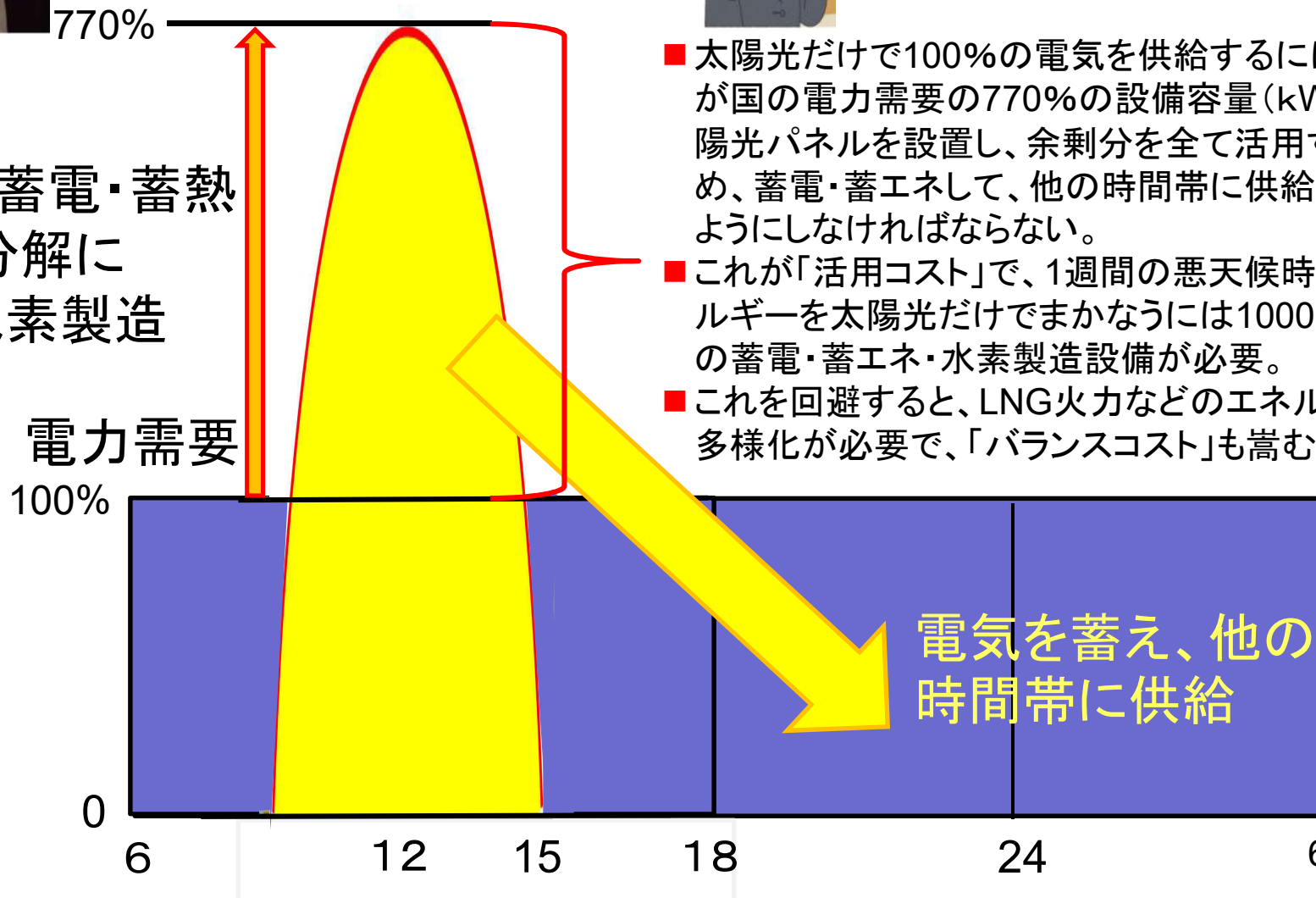


「全電源、自然エネにできる。原発ゼロは、やればできる。あとは頭の良い人が考えてくれる」??



それ、嘘です。例え、国の電力を100%太陽光で供給する設備を作っても、稼働率を考えれば約13%しか供給できません。

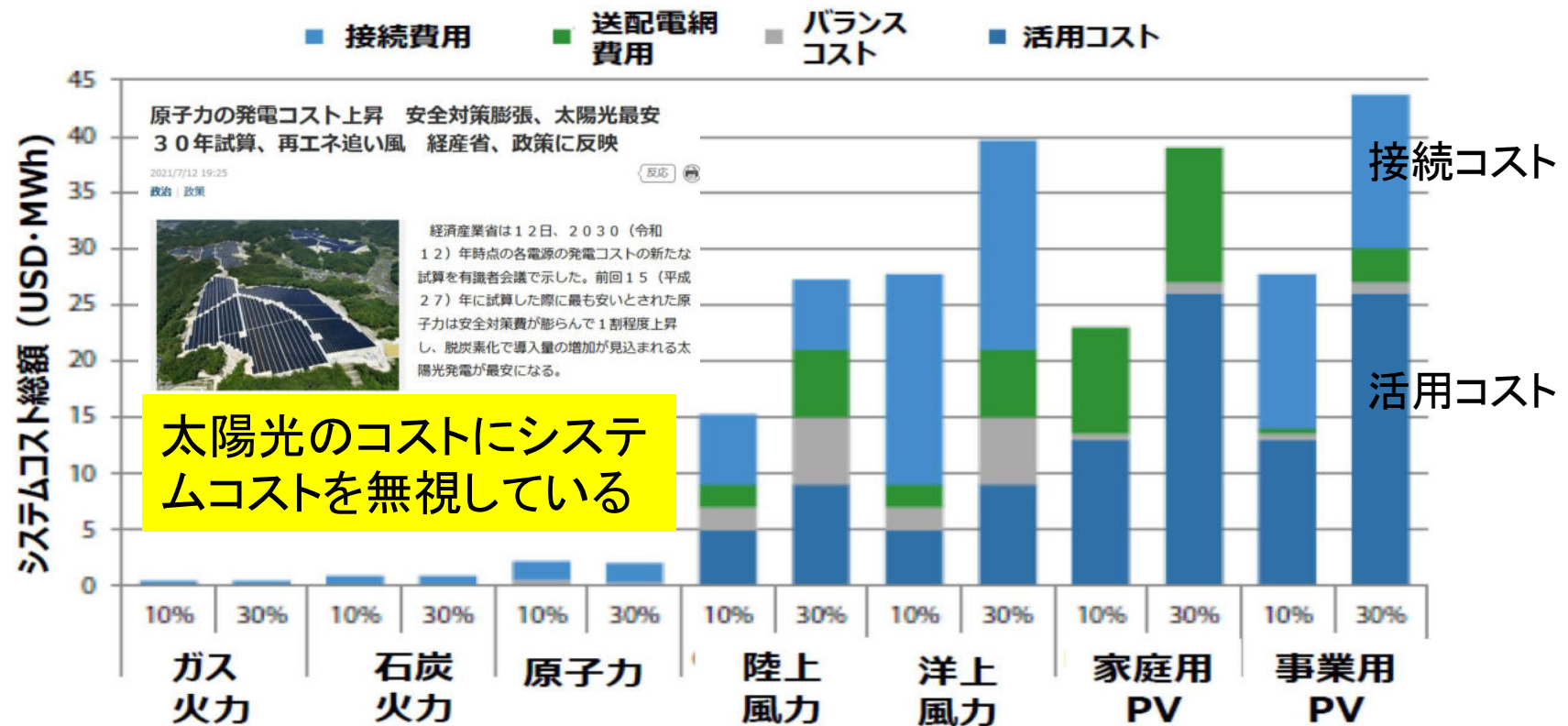
揚水・蓄電・蓄熱
電気分解による水素製造



- 太陽光だけで100%の電気を供給するには、我が国の電力需要の770%の設備容量(kW)の太陽光パネルを設置し、余剰分を全て活用するため、蓄電・蓄エネして、他の時間帯に供給できるようにしなければならない。
- これが「活用コスト」で、1週間の悪天候時にエネルギーを太陽光だけでまかなうには1000兆円級の蓄電・蓄エネ・水素製造設備が必要。
- これを回避すると、LNG火力などのエネルギーの多様化が必要で、「バランスコスト」も嵩む。

太陽光・風力には膨大なシステムコストがかかる

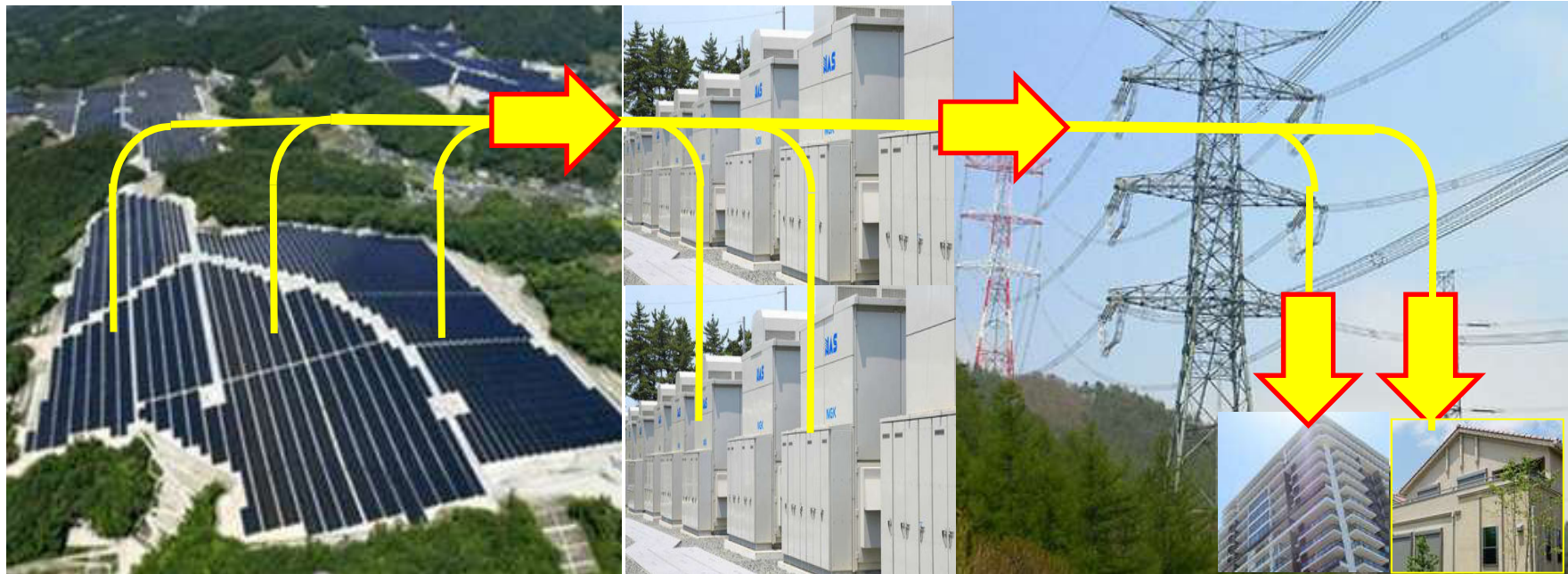
- ◆ 変動性再エネの発電コストは低下しているが、総発電量に占めるシェアの拡大に伴い、接続コスト（電源を送電網に接続するためのコスト）、送配電網コスト（増強）、バランスコスト（変動性再エネの不確実性に備えるためのコスト）、活用コスト（需要と無関係に発電する再エネを受け入れるための調整用電源の利用率低下等のコストアップ等）が増大



出所: OECD/NEA Full Cost of Electricity Provision 2018

14

太陽光のシステムコスト



メガソーラーを国内の
電力需要の7.7倍設置

大容量バッテリー
(NAS電池)

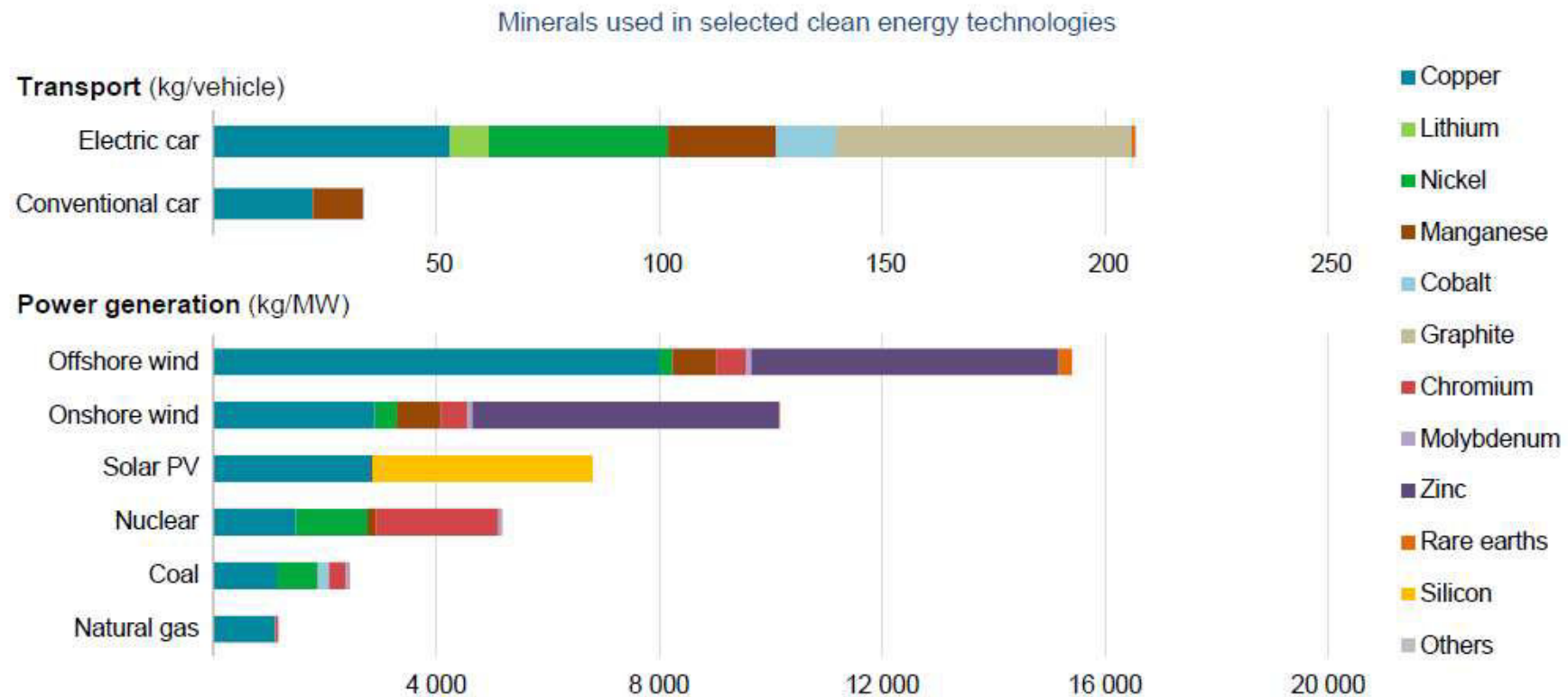
送電線を7.7倍の電気が送電で
きる送電線

太陽光に必要な送電線とバッテリーの膨大なコストが必要
出力を絞った火力発電所の発電コストが上昇する

再生エネルギーで必要となる鉱物資源

電気自動車、洋上風力に膨大な鉱物資源が必要
これらの鉱物資源は圧倒的に中国のシェアが大きい

The rapid deployment of clean energy technologies as part of energy transitions implies a significant increase in demand for minerals



IEA. All rights reserved.

Notes: kg = kilogramme; MW = megawatt. Steel and aluminium not included. See Chapter 1 and Annex for details on the assumptions and methodologies.

再エネ・高温ガス炉による水素製造

- 太陽光のシステムコストが発生しない使い方
- 水素貯蔵のための圧縮エネルギーやアンモニア製造エネルギー
- 水素を燃焼させて電気に変えると元の電気の半分以下
- 電気分解80%の効率 \times (火力で60%、燃料電池70%) = 50%

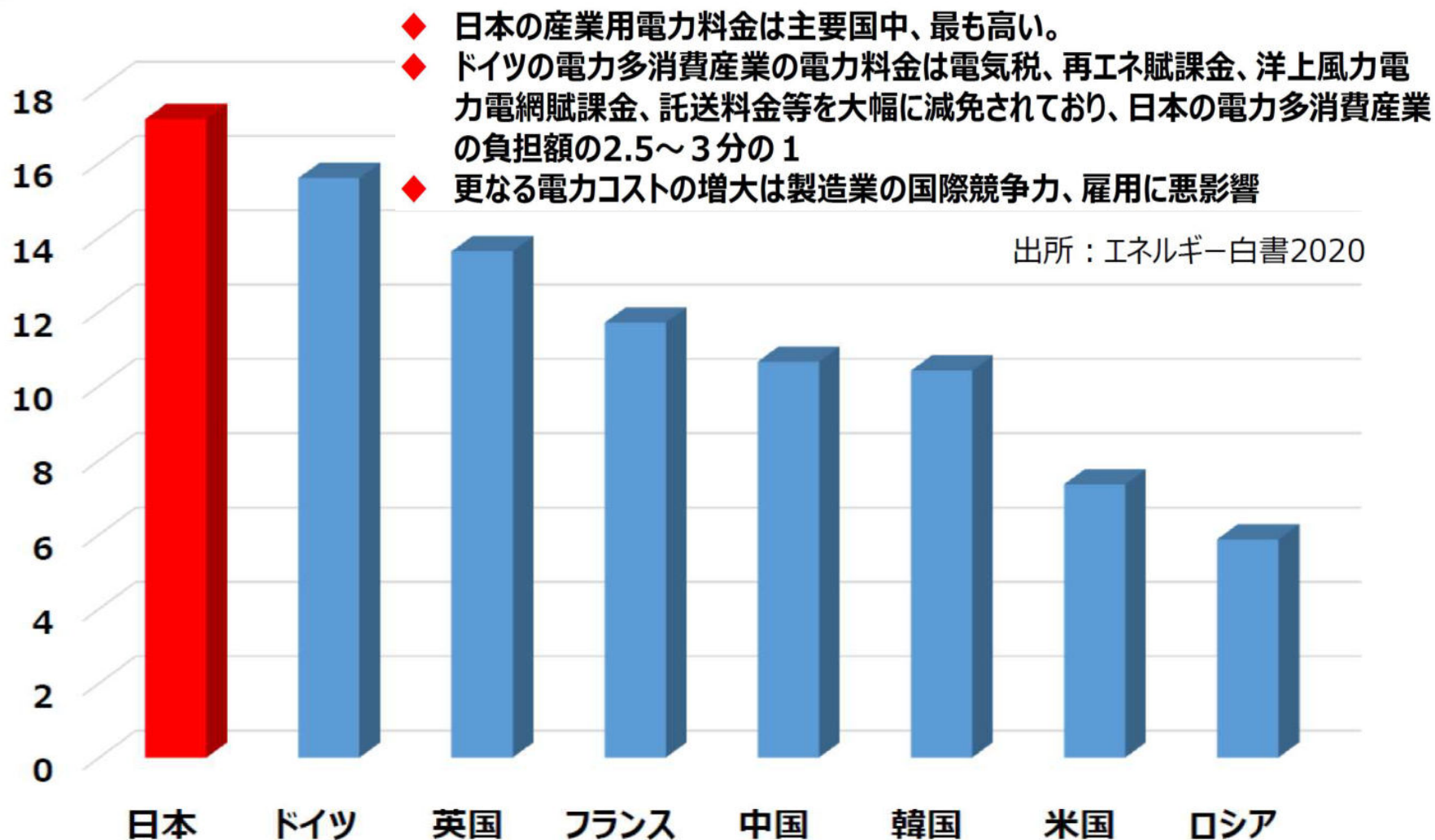


←福島県浪江町の
水素工場

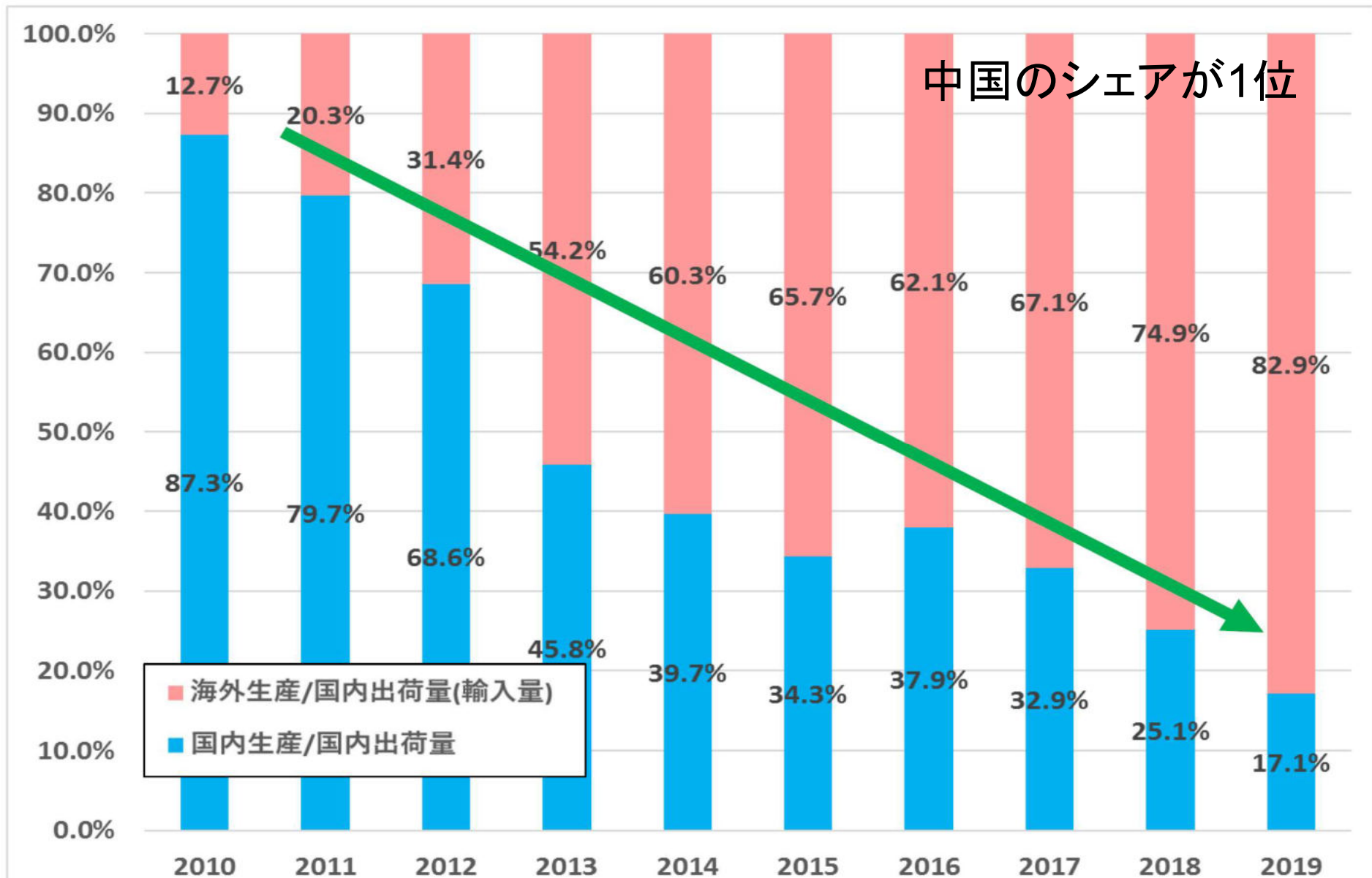
2) 世界一高い電気代と 我が国の産業の凋落

世界一高い日本の産業用電力料金

円/kWh 産業用電力料金の国際比較（2016年）



我が国の太陽光パネルのシェア激減

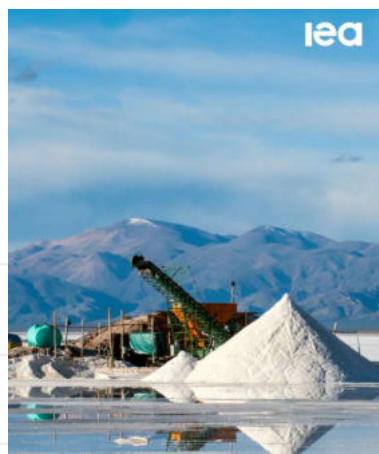
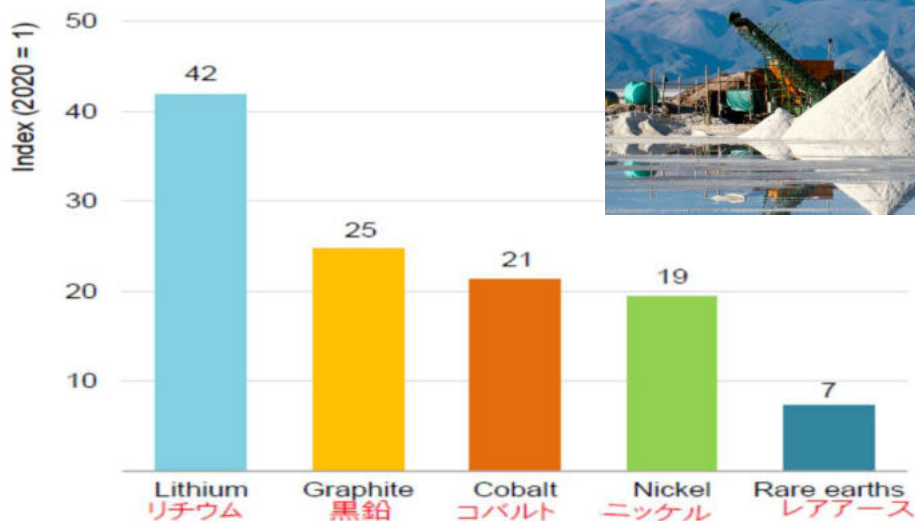


我が国の基幹産業である自動車産業ですら危うい

PHV(プラグインハイブリッド車)を含む世界の電気自動車メーカーランキング

電気自動車 (EV) 量産化で世界の先陣を切った日産自動車が、ついに年間販売台数でベスト10から陥落した。EV Salesの2020年世界EV・プラグインハイブリッド車 (PHV) 販売ランキングによると、日産は2019年の7位から14位へ転落し、トヨタ自動車も同じく10位から17位へ後退。これにより日本勢は、世界販売ベスト10から姿を消した。

The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions



2020年EV (PHV含む) 世界販売トップ20社

| 順位 | メーカー名 | 国籍 | 2020年生産台数 | 2019年順位 | 前年との順位差 |
|----|-------------------|--------|-----------|---------|---------|
| 1 | テスラ | 米国 | 499,535 | 1 | ±0 |
| 2 | フォルクスワーゲン | ドイツ | 220,220 | 6 | +4 |
| 3 | 比亞迪 (BYD) | 中国 | 179,211 | 2 | -1 |
| 4 | 上汽通用五菱汽車 (SGMW) | 中国 | 170,825 | - | - |
| 5 | BMW | ドイツ | 163,521 | 5 | 0 |
| 6 | メルセデス・ベンツ | ドイツ | 145,865 | 25 | +19 |
| 7 | ルノー | フランス | 124,451 | 13 | +6 |
| 8 | ボルボ | スウェーデン | 112,993 | 16 | +8 |
| 9 | アウディ | ドイツ | 108,367 | 21 | +12 |
| 10 | 上海汽車集団 (SAIC) | 中国 | 101,385 | 4 | -6 |
| 11 | 現代自動車 | 韓国 | 96,456 | 9 | -2 |
| 12 | 起亜自動車 | 韓国 | 88,325 | 11 | -1 |
| 13 | プジョー | フランス | 67,705 | - | - |
| 14 | 日産自動車 | 日本 | 62,029 | 7 | -7 |
| 15 | 広州汽車集団 (GAC) | 中国 | 61,830 | 15 | ±0 |
| 16 | 長城汽車 (Great Wall) | 中国 | 57,452 | 17 | +1 |
| 17 | トヨタ自動車 | 日本 | 55,624 | 10 | -7 |
| 18 | 奇瑞汽車 (Chery) | 中国 | 45,599 | 14 | -4 |
| 19 | ポルシェ | ドイツ | 44,313 | 30 | +11 |
| 20 | 上海蔚来汽車 (NIO) | 中国 | 43,728 | 28 | +8 |

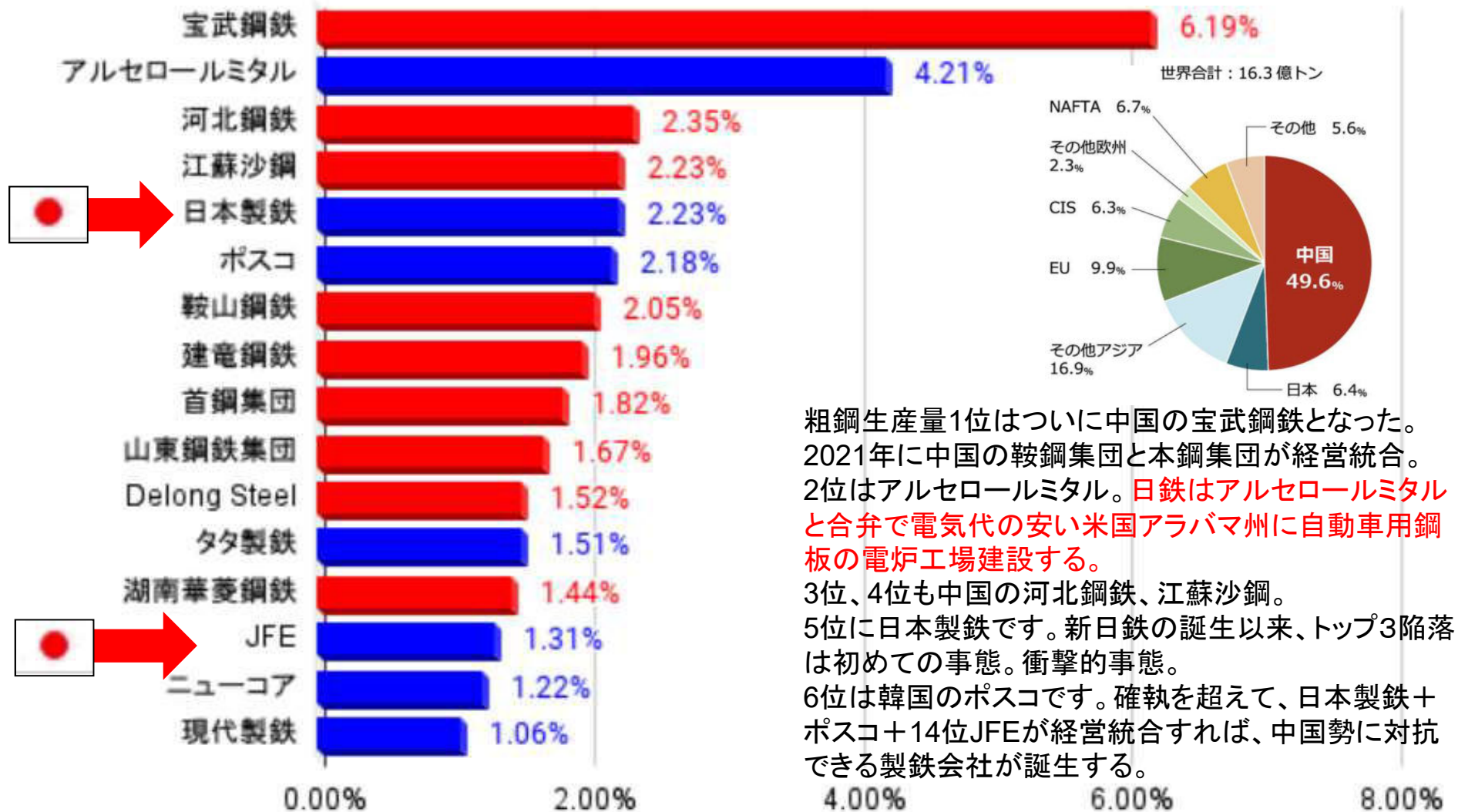
1人当たりのGDP

<2020年>

| 順位 | 国名 | 単位：US\$ |
|----|---|---------|
| 1 |  ルクセンブルク アルセロール・ミタル | 116,921 |
| 2 |  スイス | 86,849 |
| 3 |  アイルランド | 83,850 |
| 4 |  ノルウェー | 67,176 |
| 5 |  米国 | 63,416 |
| 6 |  デンマーク | 60,494 |
| 7 |  アイスランド | 59,634 |
| 8 |  シンガポール | 58,902 |
| 9 |  オーストラリア | 52,825 |
| 10 |  オランダ | 52,248 |
| 11 |  カタール | 52,144 |
| 12 |  スウェーデン | 51,796 |
| 13 |  フィンランド | 48,981 |
| 14 |  オーストリア | 48,154 |
| 15 |  香港 | 46,753 |

| | | |
|----|--|--------|
| 16 |  ドイツ | 45,733 |
| 17 |  サンマリノ | 44,818 |
| 18 |  ベルギー | 44,529 |
| 19 |  イスラエル | 43,689 |
| 20 |  カナダ | 43,278 |
| 21 |  ニューージーランド | 41,127 |
| 22 |  イギリス | 40,406 |
| 23 |  日本 | 40,146 |
| 24 |  フランス | 39,907 |
| 25 |  マカオ | 36,350 |
| 26 |  アラブ首長国連邦 | 31,982 |
| 27 |  韓国 | 31,497 |
| 28 |  イタリア | 31,288 |
| 29 |  プエルトリコ | 30,317 |
| 30 |  バハマ | 29,221 |
| 31 |  台湾 | 28,306 |

製鉄会社別粗鋼生産量の世界ランキング



粗鋼生産量1位はついに中国の宝武鋼鉄となった。2021年に中国の鞍鋼集団と本鋼集団が経営統合。2位はアルセロールミタル。日鉄はアルセロールミタルと合併で電気代の安い米国アラバマ州に自動車用鋼板の電炉工場建設する。3位、4位も中国の河北鋼鉄、江蘇沙鋼。5位に日本製鉄です。新日鉄の誕生以来、トップ3陥落は初めての事態。衝撃的事態。6位は韓国のポスコです。確執を超えて、日本製鉄+ポスコ+14位JFEが経営統合すれば、中国勢に対抗できる製鉄会社が誕生する。

<https://www.nikkei.com/article/DGXMZO65954280W0A101C2TJC000/>

洋上風力の新設は中国が世界一



中国の洋上風力発電設備は7割が江蘇省に集中している。写真は国有電力大手の国家能源投資集団が同省に建設した洋上風力発電所（同社ウェブサイトより）

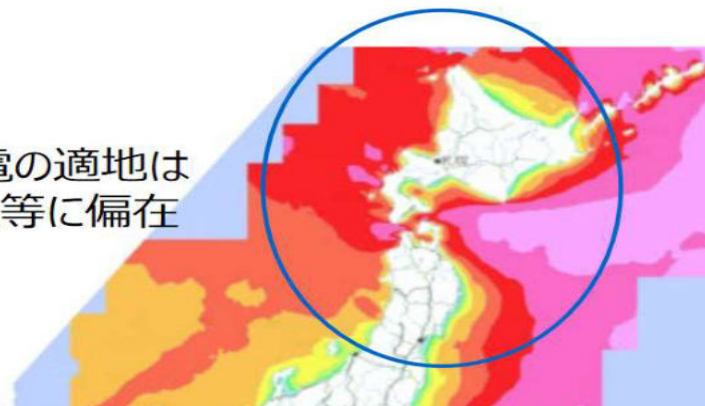
中国の洋上風力発電設備の新設が急増している。2020年の新設容量は国別で世界最大の210万キロワット(kW)に達し、全世界の新設容量の40%を占めた。洋上風力世界フォーラム(WFO)が2月に発表した最新レポートによれば、全世界の洋上風力発電設備の総設置容量は2020年末時点で3250万kW。国別では首位のイギリスが1042万4000kW、2位のドイツが770万1000kW、中国は705万8000kWで3位につける。しかし成長速度は中国が突出している。レポートによれば、中国で現在建設中の設備容量は440万kWに迫り、全世界で建設中の総容量(約1000万kW)の44%に達する。中国の洋上風力の設置容量は2021年中にドイツを抜き、世界第2位に躍進する可能性が高い。中国の洋上風力プロジェクトは、主に沿海部の江蘇省、福建省、広東省、浙江省などで推進されている。なかでも江蘇省は、全中国の設置容量の約7割が集中する洋上風力のメッカだ。補助金縮小後も成長を維持できるか、洋上風力の建設が中国で本格化したのは、2014年に中国政府が打ち出した固定価格買取制度による優遇がきっかけだ。現在の買取価格は、2017年までに送電を開始した設備については1キロワット時(kWh)当たり0.85元(約13.8円)となっている。一方、実際の発電コストは自然条件や設備の規模などによって異なるが、洋上風力発電設備の設計に長年携わってきたエンジニアによれば1kWh当たり0.65~0.80元(約10.6~13.0円)の範囲に収まるケースがほとんどだという。つまり現在の買取制度の下では、洋上風力はかなり儲かる商売なのだ。それが建設ブームを呼び、中国の新設容量を世界首位に押し上げた。 <https://toyokeizai.net/articles/-/414668>

洋上風力は風況が不利。コストも高い

洋上風力発電の適地（風況マップ）

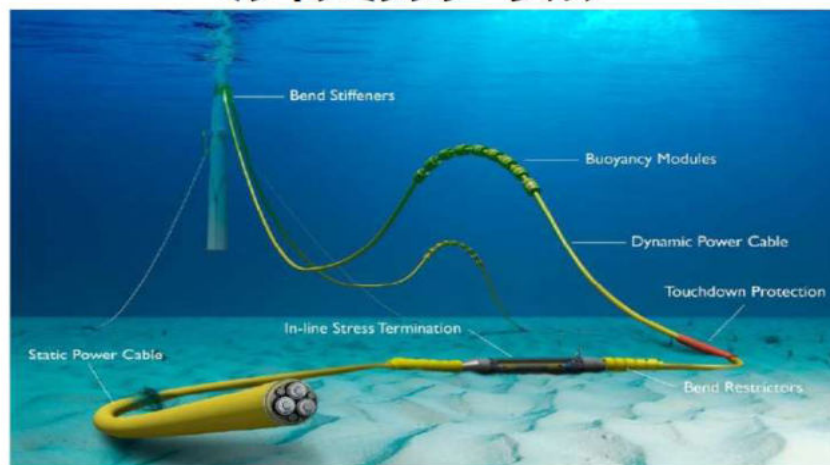


洋上風力発電の適地は
北海道・東北等に偏在



<ダイナミックケーブル>

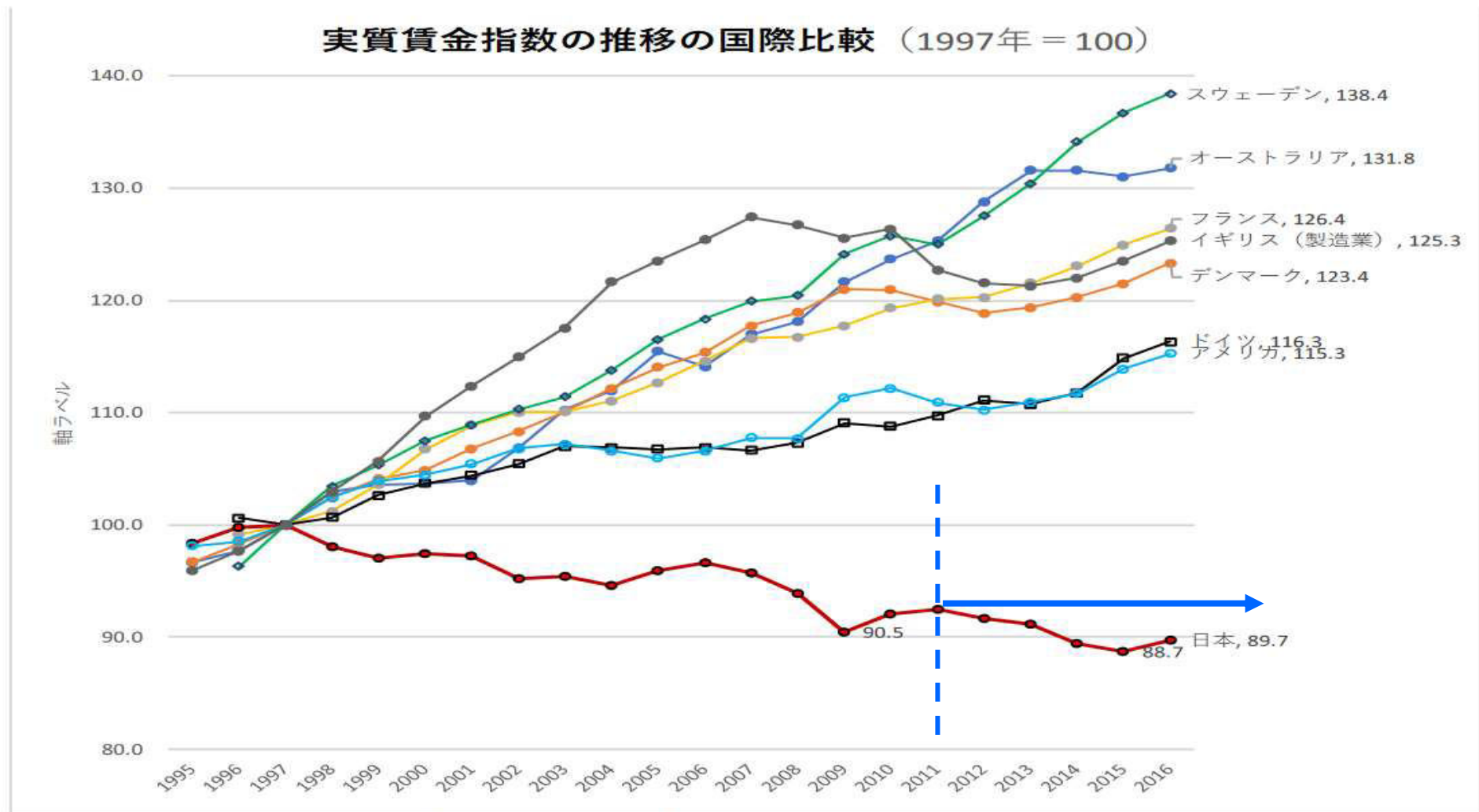
(出



出典：NREL

通常海底ケーブルは海底に固定されるが、浮体式洋上風力発電向けには、浮体の挙動に追随するよう、海中浮遊部を設けて敷設する。繰り返し加わる海流や浮体挙動による曲げや捻れに対し、それに耐える強度を持つ設計とした高電圧のダイナミック送電ケーブルが必要となる。

日本人だけ、どんどん貧乏に



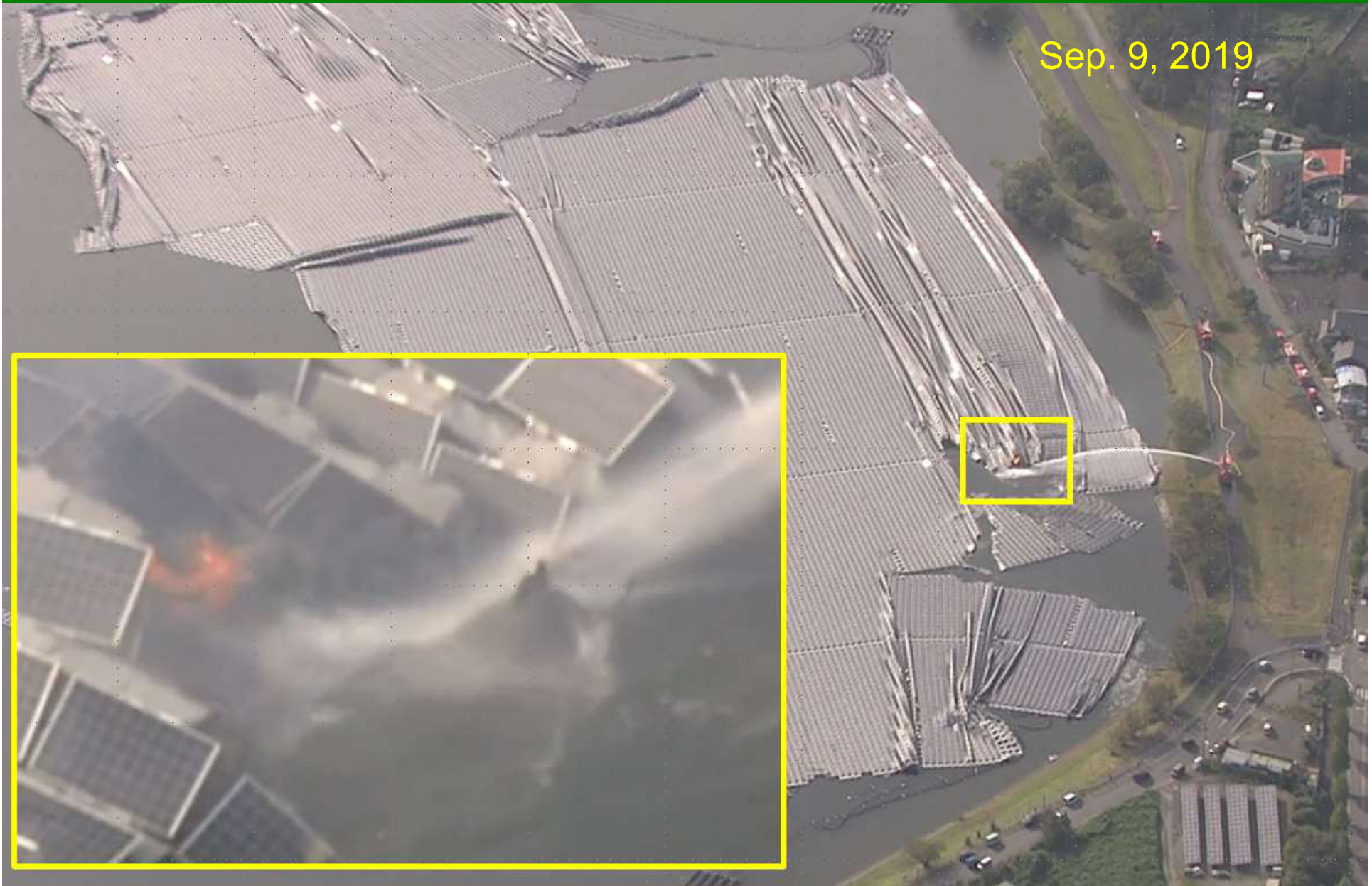
出典: oecd.statより全労連が作成(日本のデータは毎月勤労統計調査によるもの)。

注: 民間産業の時間当たり賃金(一時金・時間外手当含む)を消費者物価指数でデフレートした。オーストラリアは2013年以降、第2・四半期と第4・四半期のデータの単純平均値。仏と独の2016年データは第1~第3・四半期の単純平均値。英は製造業のデータのみ。

https://www.zenroren.gr.jp/jp/housei/data/2018/180221_02.pdf

3) 世界で多発する大停電

台風15号で火災を起こしたソーラーパネル



災害に脆弱な太陽光に数十兆円もの支払い決定み



自然災害で太陽光パネルは...
blog.goo.ne.jp



メガソーラー「一度飛ばさ...
juno.dti.ne.jp



家庭用太陽光発電で火災相...
blog.goo.ne.jp



自然災害（台風や竜巻）で...
xn--o9j2jbpdd3oe0ff3622gs0ta...



九州北部豪雨で太陽光発電...
smartenergy.jp



台風21号の猛烈な風、太陽...
project.nikkeibp.co.jp



相次ぐ損壊 見分けぬ不具合...
premium.toyokeizai.net



台風などで太陽光発電パネ...
loop.club



台風で水没した帯広のメガ...
tech.nikkeibp.co.jp



壊れていても、パネルは太...
matome.naver.jp



「メガソーラーに法規制を...
sankei.com



災害時の太陽光発電【アー...
earthcom-eco.jp

2019年1月の暴風雪でスウェーデンで大停電発生



Island households may be without power for two more weeks after storm

...but most homes on the mainland should have power restored by Thursday



Storm Alfrida knocks out Gotland phone network (including emergency number)



Thousands without power and traffic disrupted as 2019's first storm hits Sweden

スウェーデン政府は、脱原発政策を破棄

Didn't think we would survive. 生き残りをかけて取り組みましょう

""Did not think we would survive"" "Mattias Ritola, 31, ended up in the middle of the storm, Alfrida" "the town of LEKSAND. Mattias Ritola, 31, ended up

05 January 2019 Saturday 03:01

27 reads.

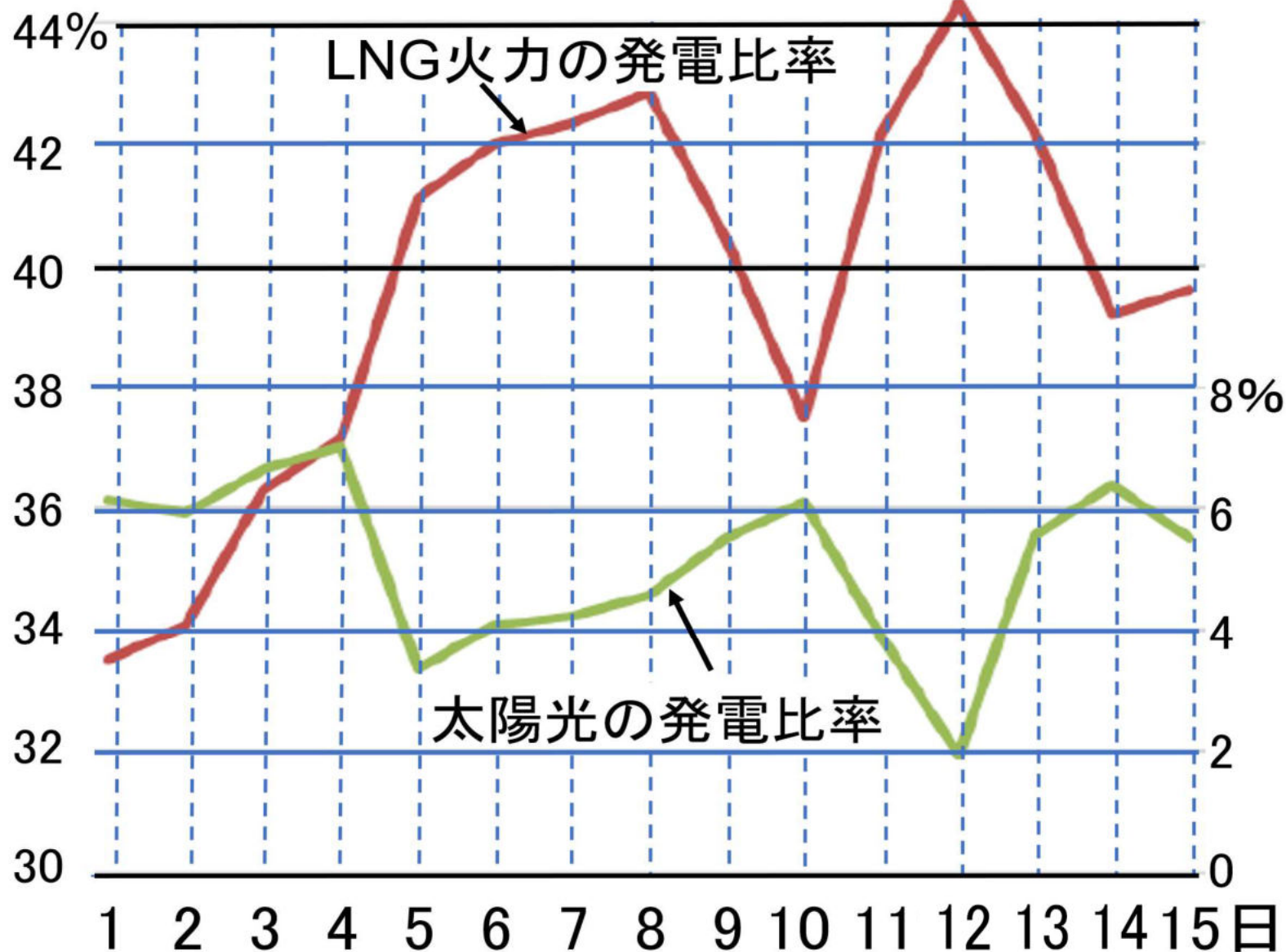


1月上旬・需給ひっ迫で大停電の危機

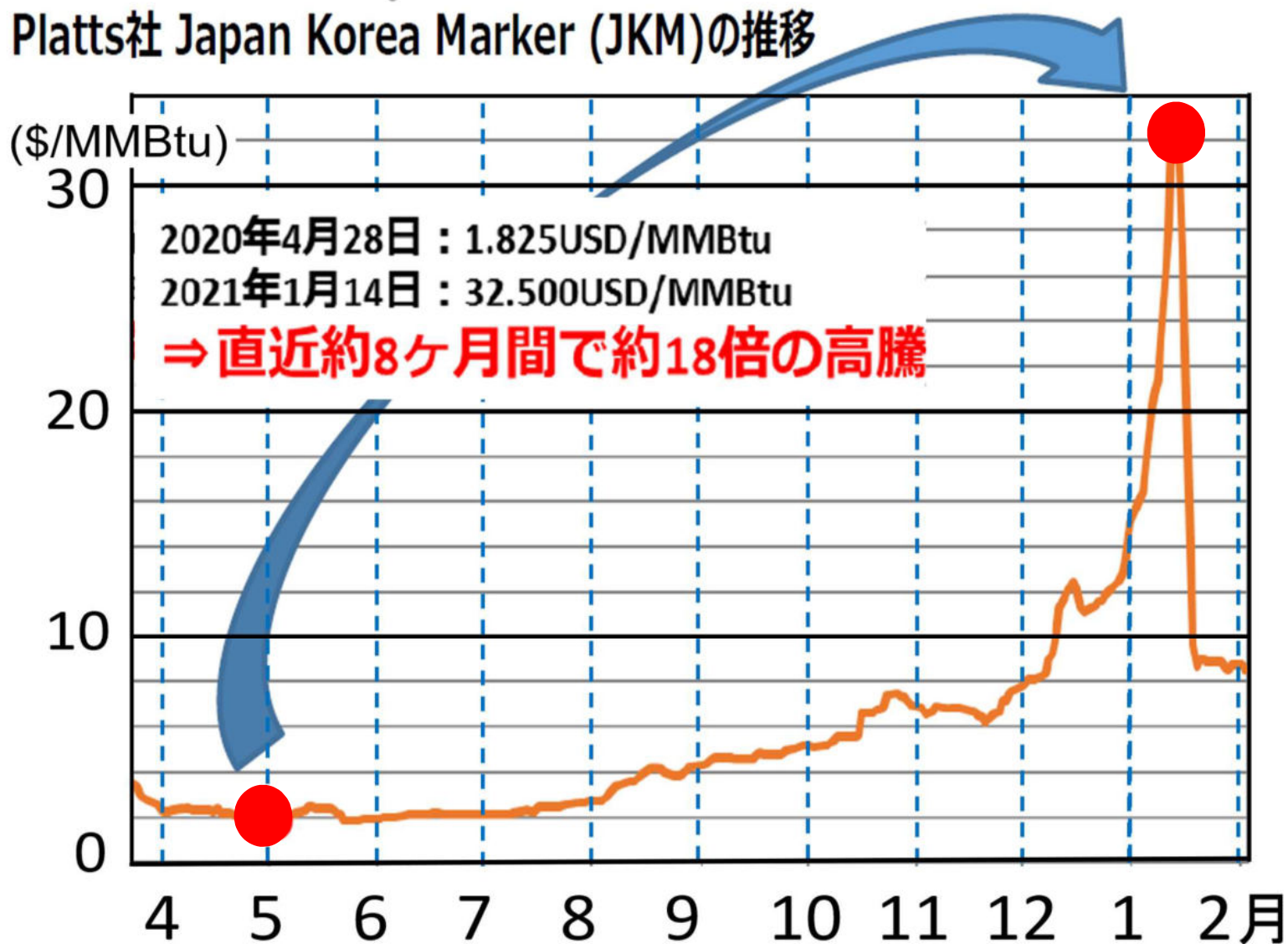
原発は12月23日まで2基、24日から3基、1月中旬から4基となった



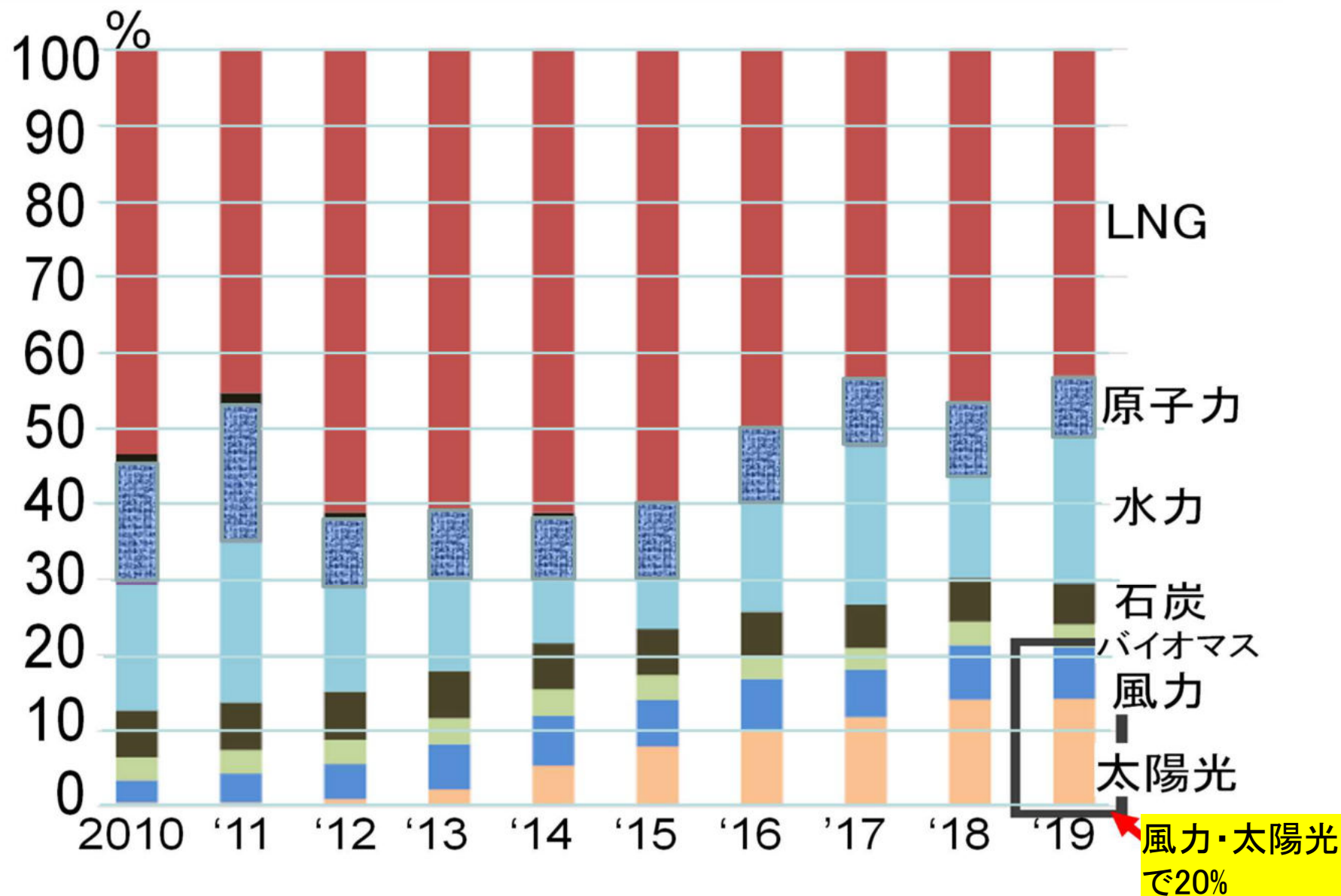
LNG火力と太陽光の発電比率の推移



LNGのスポット価格の高騰(18倍)

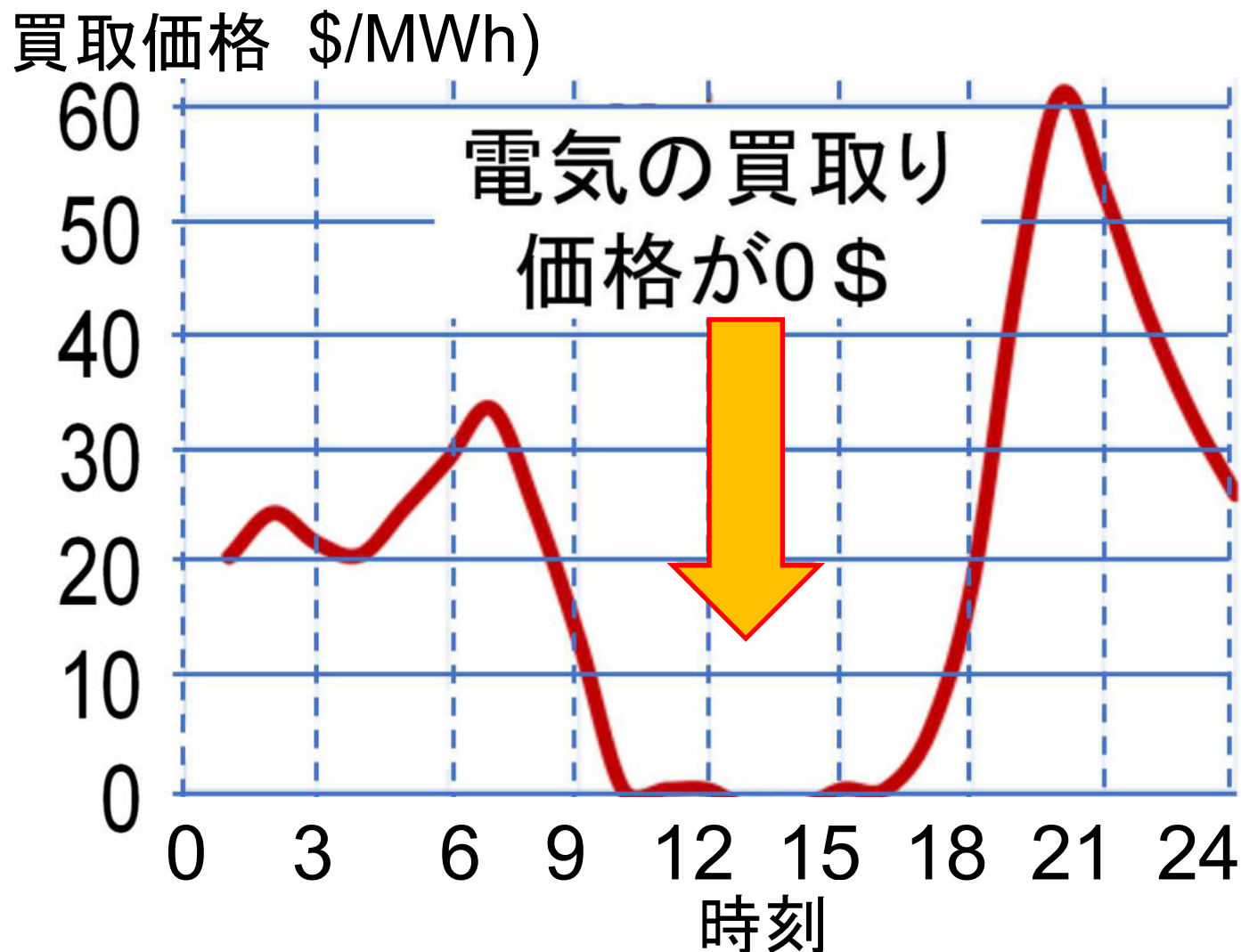


カリフォルニア州の電源構成の推移



カリフォルニア州の昼間の電気の買取価格ゼロ\$

太陽光の比率が高くなると電気は値崩れを起こす

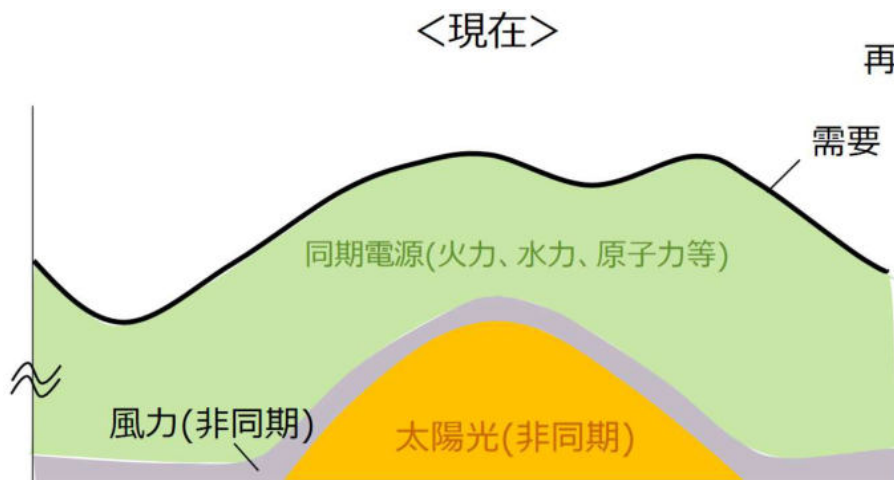
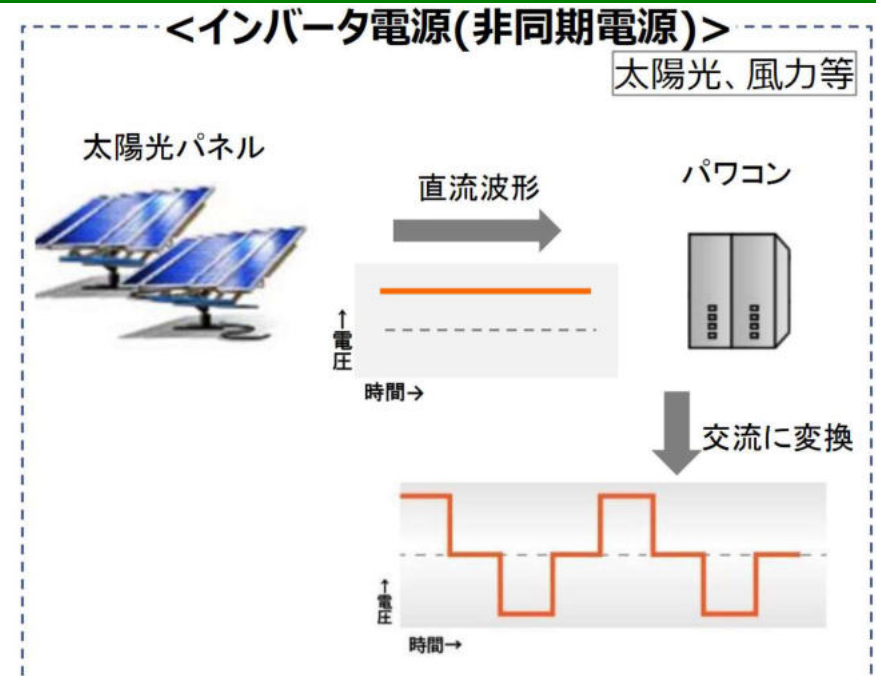
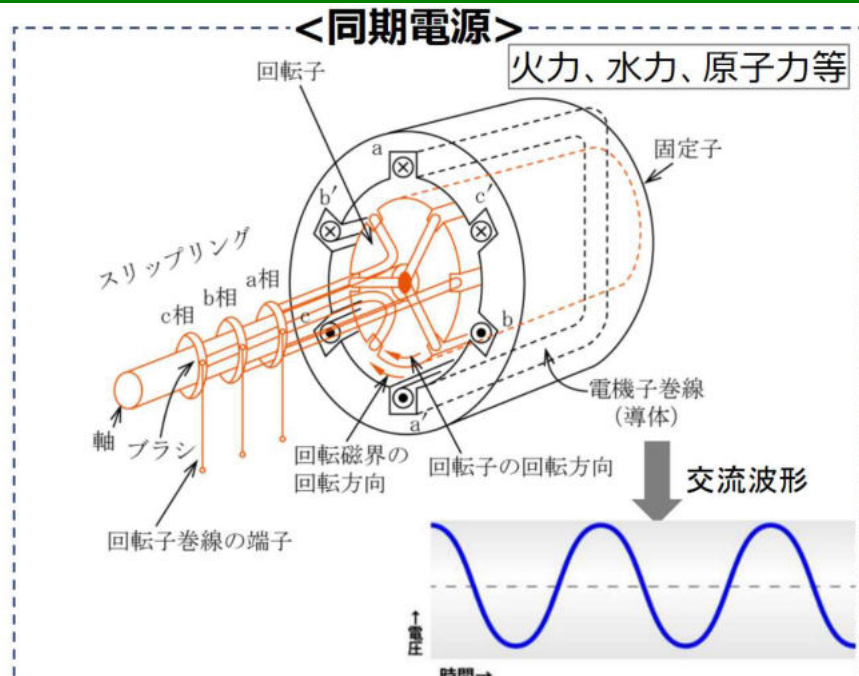


テキサス州大停電・雪で車が立ち往生

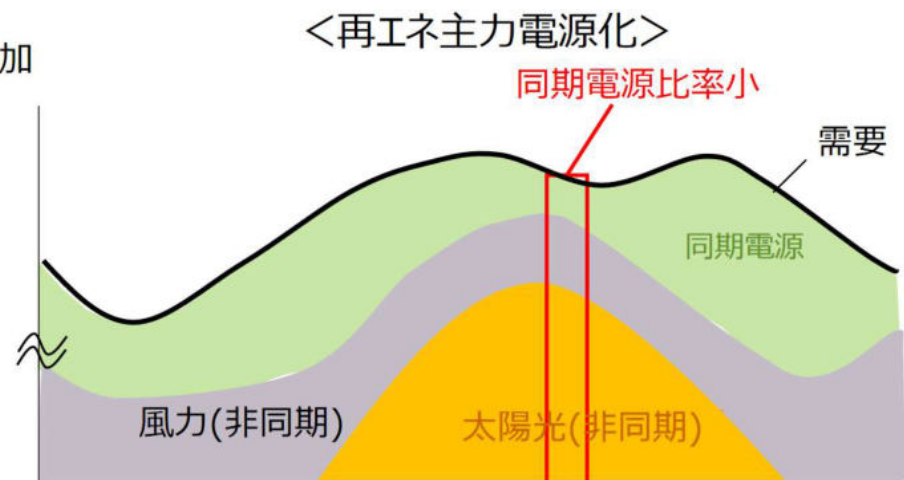
米国テキサス州でも、電力の23%を占める風車の半数が凍結・大停電
死者40名。原発も1基、給水流量計の凍結で一時停止



慣性を持たない再エネは停電リスク増える



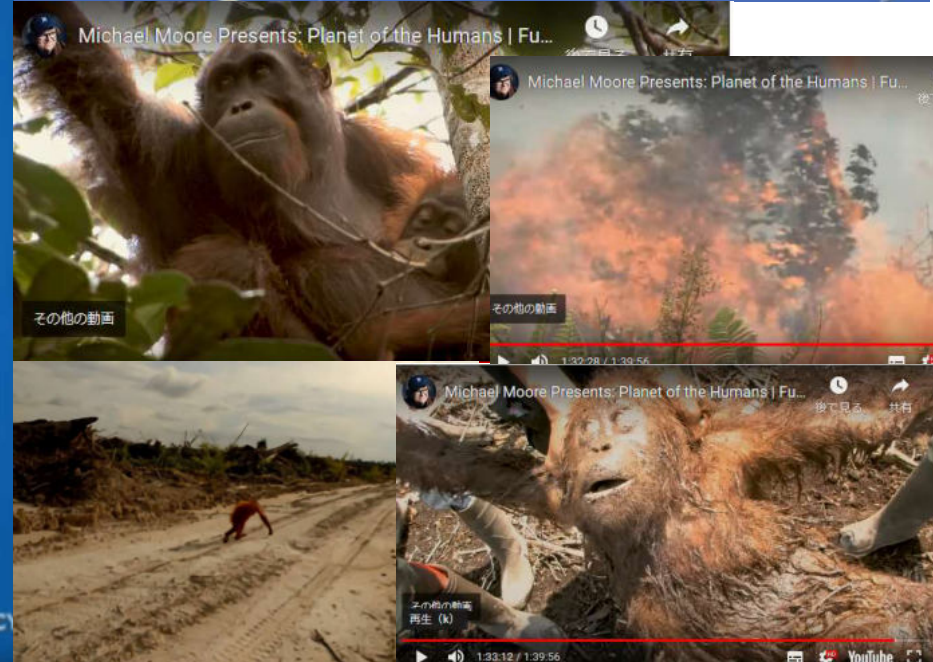
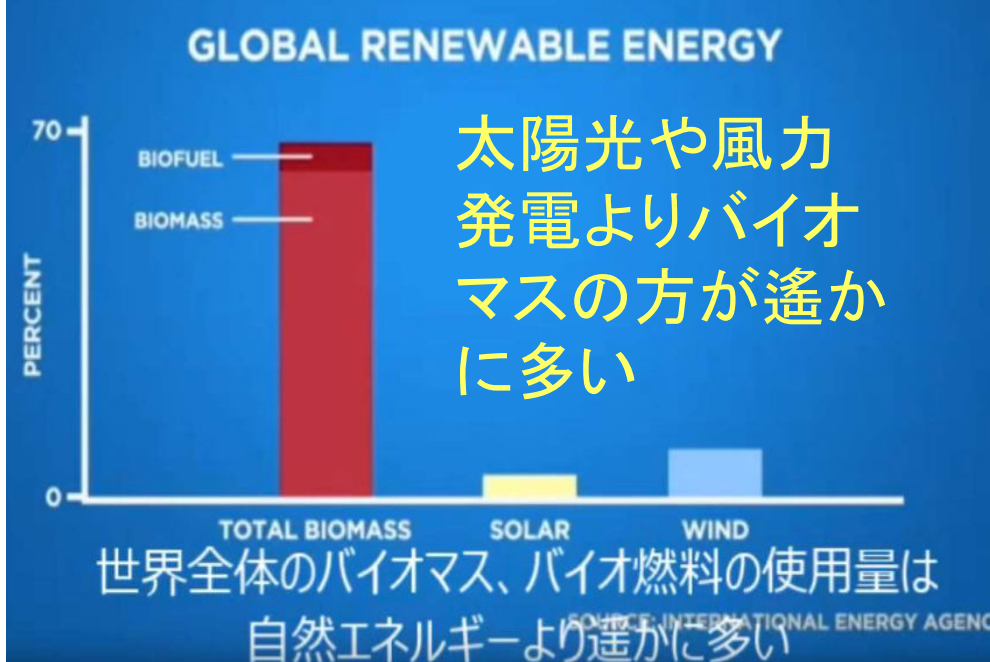
再エネ増加



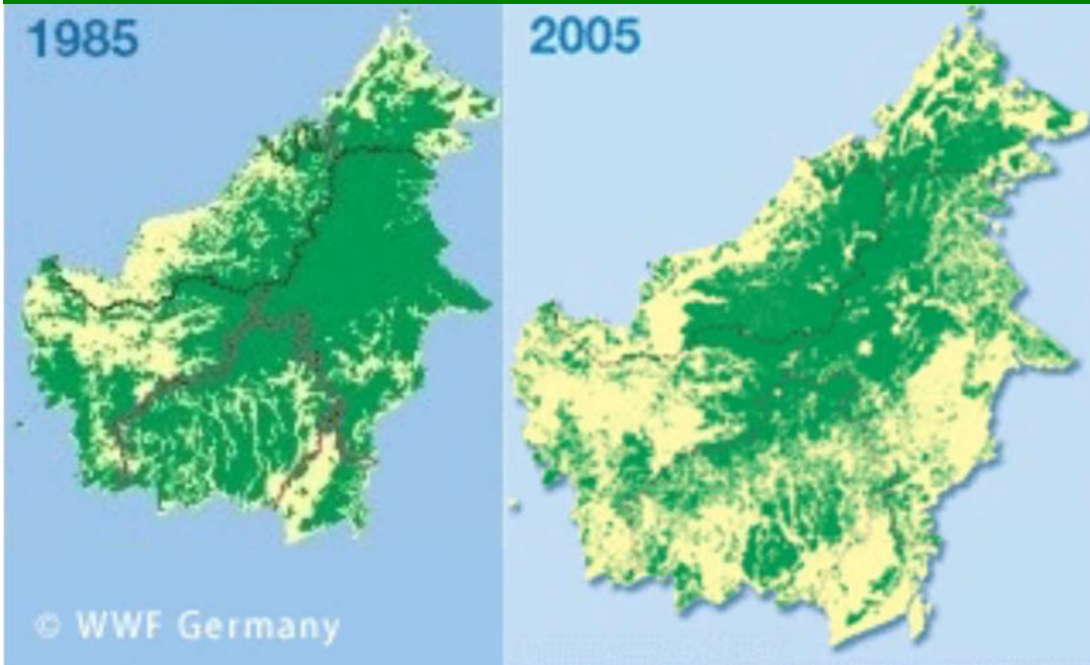
太陽光による環境破壊(規制必要)



世界中の森林伐採木材チップが欧州に



ボルネオやスマトラ島の熱帯雨林の破壊



過去半世紀のあいだに目に見えて森林減少が進むボルネオ島



アブラヤシの実。この果肉や種を搾って得られるパーム油は、世界で最も多く生産される植物油である。



バイオマス火力発電所建設反対



「再エネ」のはずのパーム油発電 なぜ住民反対相次ぐ？

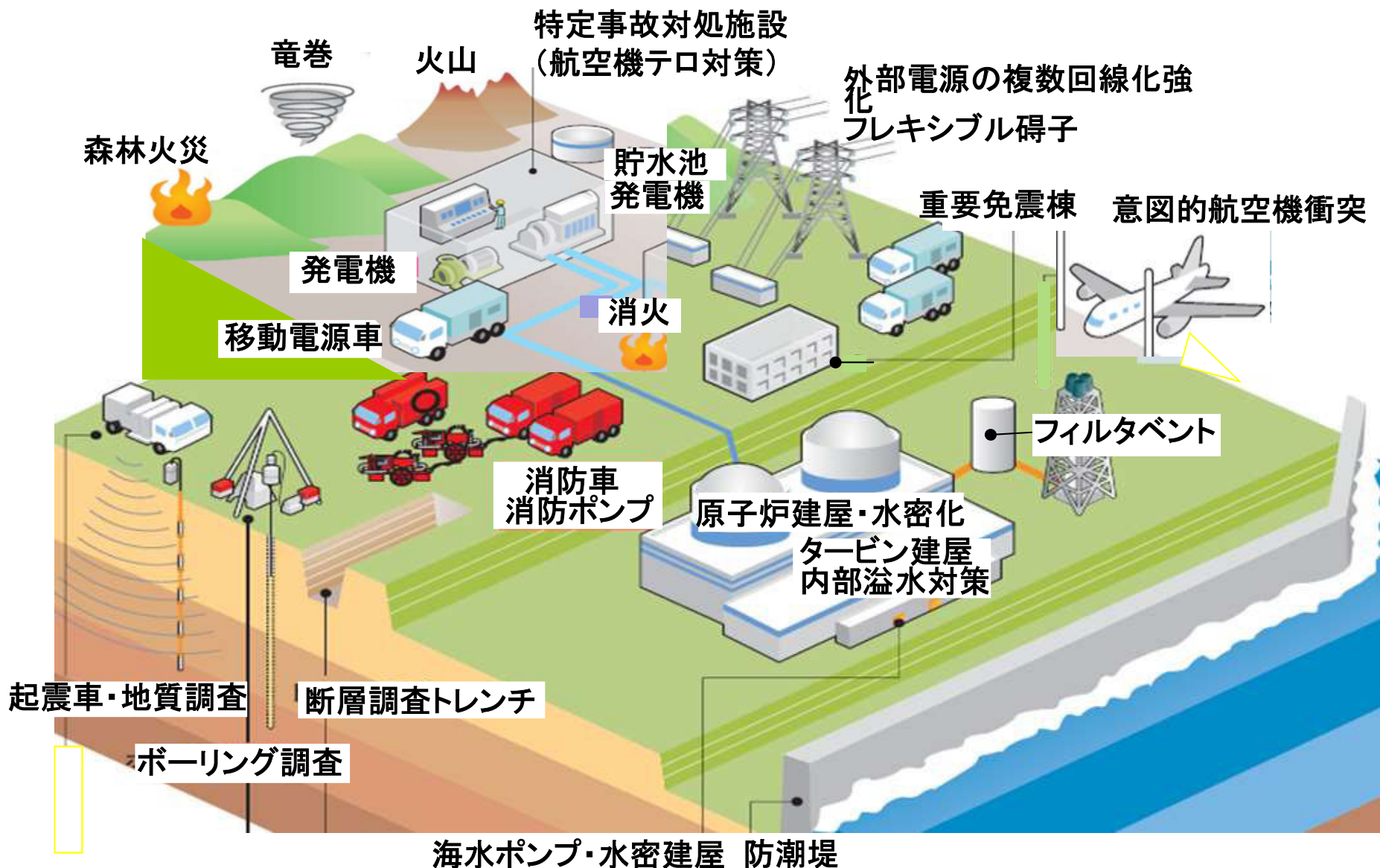


アブラヤシの実を運ぶトラック=2020年 3月、インドネシア・アチェ州、ドローンでArie Kaltu氏撮影

アブラヤシから採れ、食品加工
化粧品にも使われる「パーム油」を
燃料とする火力発電所をめぐり、
近くの住民から反対が相次いでい
る。原料の植物が成長するとき二
酸化炭素 (CO₂) を吸収するバ
イオマス燃料として、国はパーム
油を「再生可能エネルギー」に位
置づけている。なぜ反対運動が起

4) 原子力発電所の新規制基準 による安全対策(リスクは3桁低下)

新規制基準の概要



米デュアボロキャニオン原発の津波対策

- 海水ポンプモータのシュノーケリング
- ドアの水密化（潜水艦内のハッチ）



デュアブロキヤニオン発電所DCPP敷地高さ

DCPP

Fresh Water Reservoirs 95m

85' Bluff 敷地高さ: 26m

Peach Bottomの非常用DG建屋の水密化

非常用DG建屋の1階は水密ドア、給排気口は最上階



津波に対する深層防護の強化

防ぐ・耐える・避ける

高台で津波を避ける

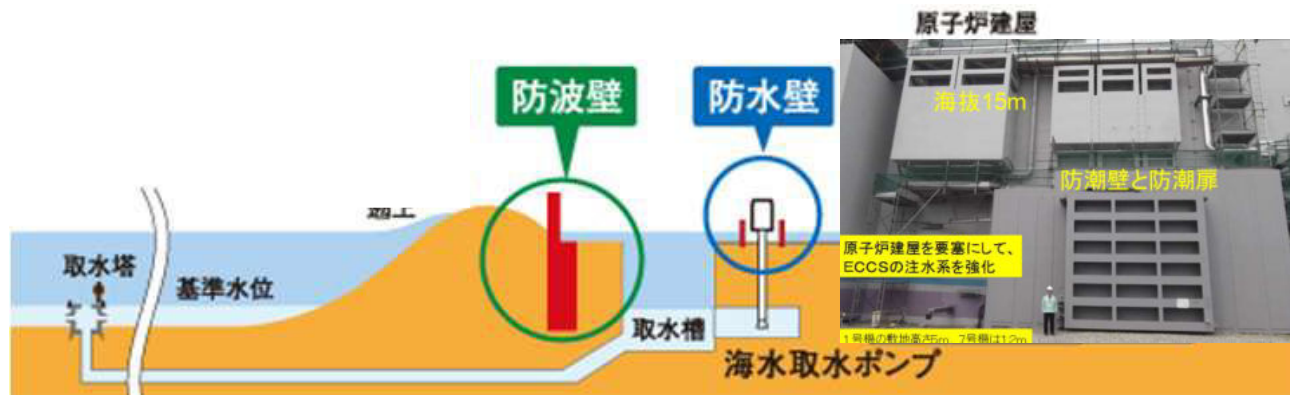
津波検知 防潮壁・水密扉



防潮堤で
津波を防ぐ

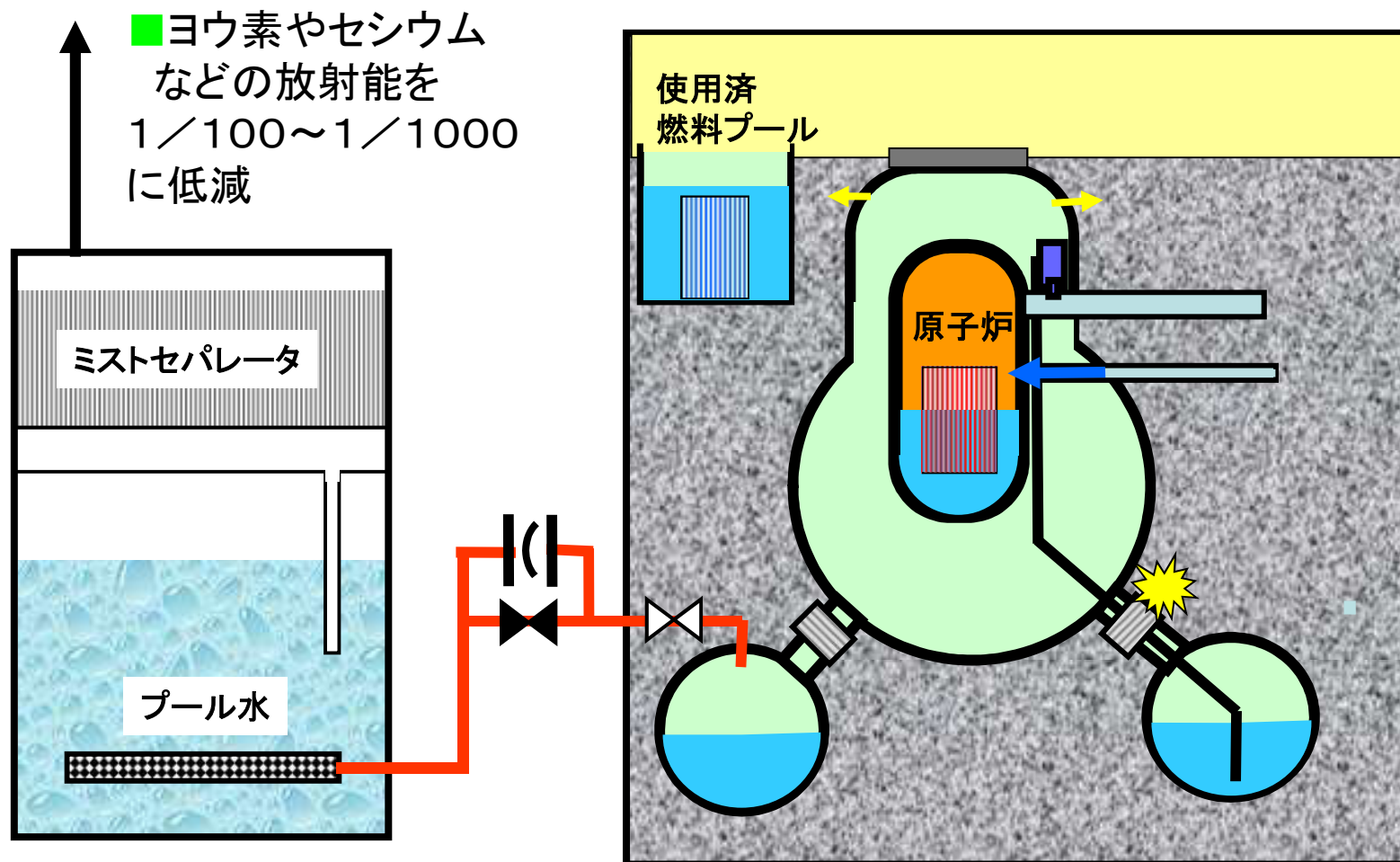
原子炉建屋の
防潮壁・扉で
津波に耐える

機器室の水密扉
で津波を侵入さ
せない



抜本的対策：フィルター付きベント

■チェルノブイリ事故の教訓：「例え事故が起こっても地元には迷惑をかけません」
(フランス、ドイツ、スイス、フィンランド、スウェーデンのほぼ全ての原発に設置)

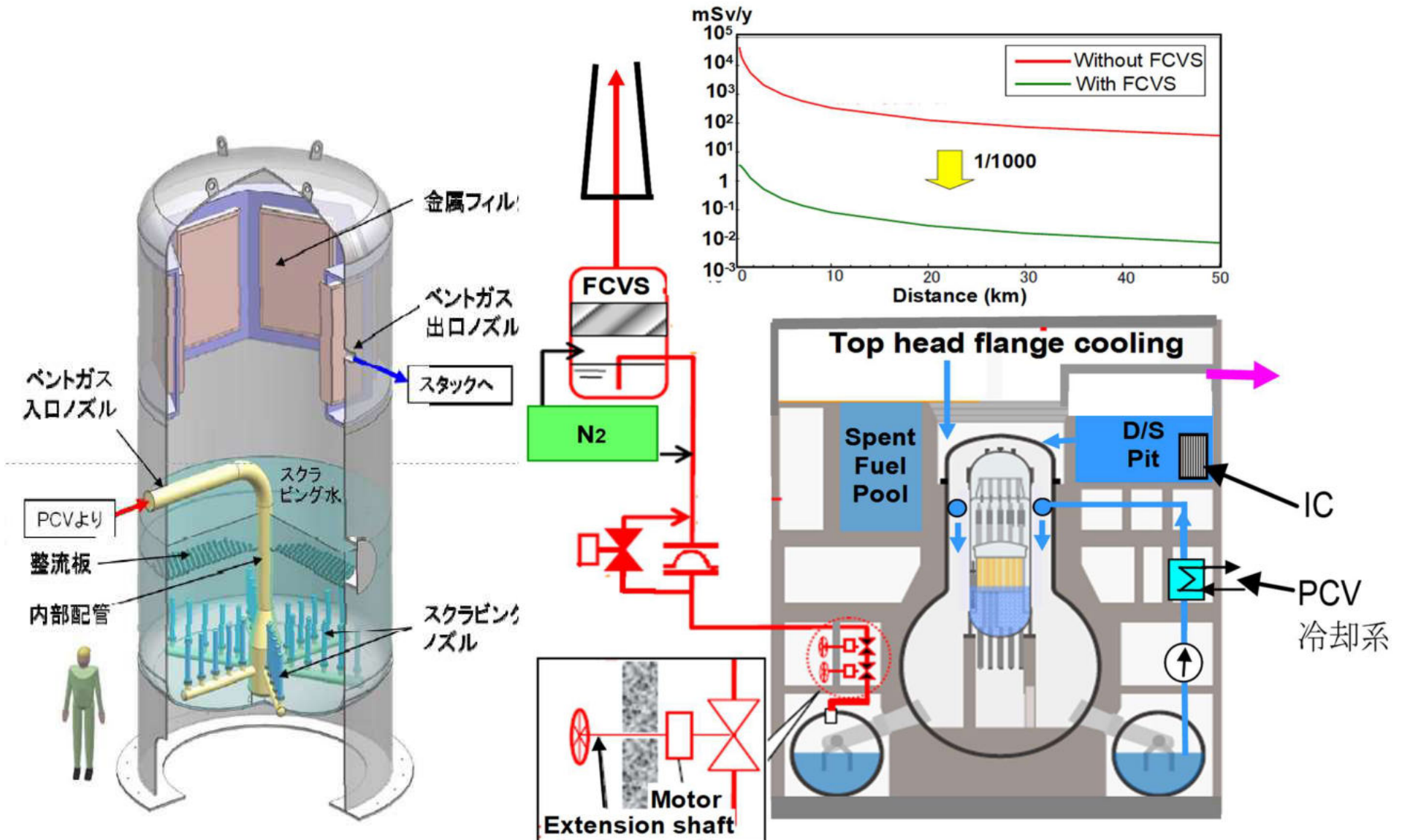


フィルターベント(フィルター付排気システム)



フィルター付ベント

フィルターベントシステム (FCVS)



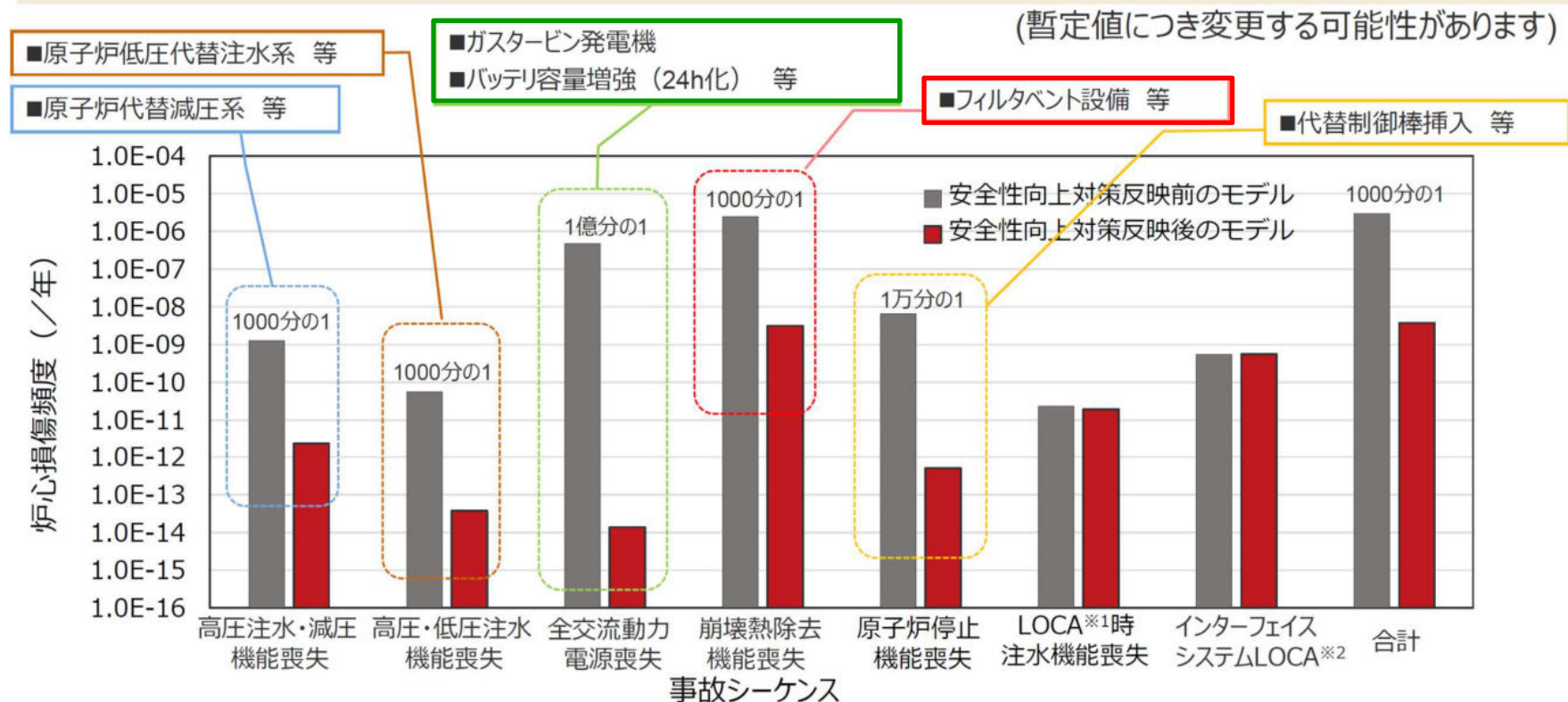
フィルターベントの据え付け(中部電力、東京電力)



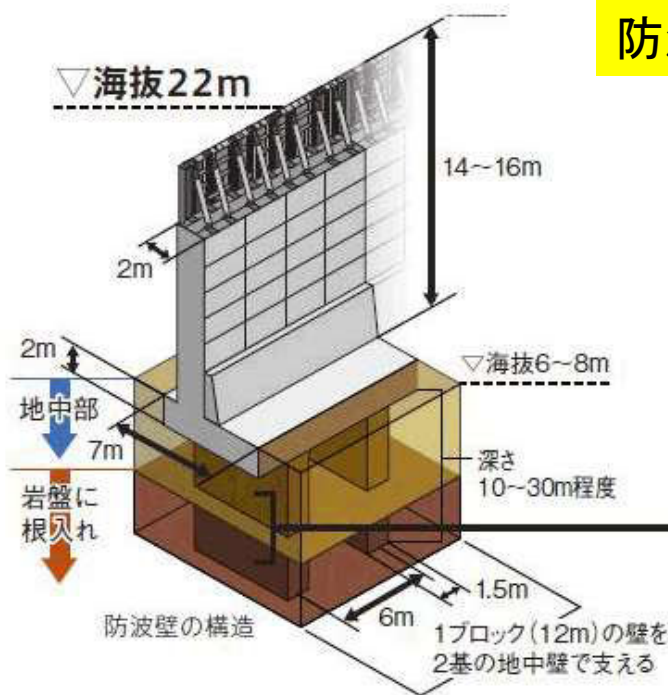
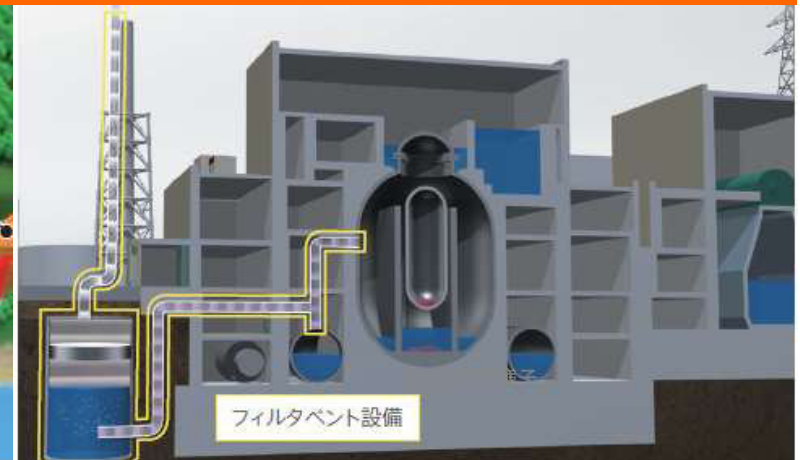
福島第一事故の反省から安全対策は飛躍的に強化

福島原発事故以降の安全対策の強化は他国に例を見ない。
 その結果、事故の発生確率は1億分の1に低下した。
 原子力発電所こそ自然災害に対して最も強靱かつ安全な電源。

安全性向上対策を反映したPRA評価結果（炉心損傷頻度）は、反映前と比べ3桁程度低減することを確認しました（反映前: 2.9×10^{-6} /炉年、反映後: 3.8×10^{-9} /炉年）。



浜岡原子力発電所の津波対策とフィルタベント



防波壁(高さ22m)



強化扉



① 強化扉(厚さ:約1m,重さ:約40 t)

EWSポンプ室(水密)



浜岡原子力発電所の電源・注水対策強化

電源供給



ガスタービン発電機建屋

① 海拔40mの高台にガスタービン発電機を設置

ガスタービン発電機は6台。合計出力は19,200kWで、中規模水力発電所の出力に相当します。その燃料タンクも高台に設置。最低でも7日分の燃料を確保しています。

電源供給



電源車

注水



可搬型の注水ポンプ



注水



緊急時淡水貯槽
海拔30mの高台に緊急時淡水貯槽を設置

40年超原子力はリニューアルプラント

昨年12月の報道関係者(論説・編集委員級)向け講習会で講演。高経年化対策はプラントリニューアル。

NHKの報道に「老朽化」文字が消えた。「40年超」に。

事故の予兆を洞察し、事故前に修復(ROPとCAP)すること

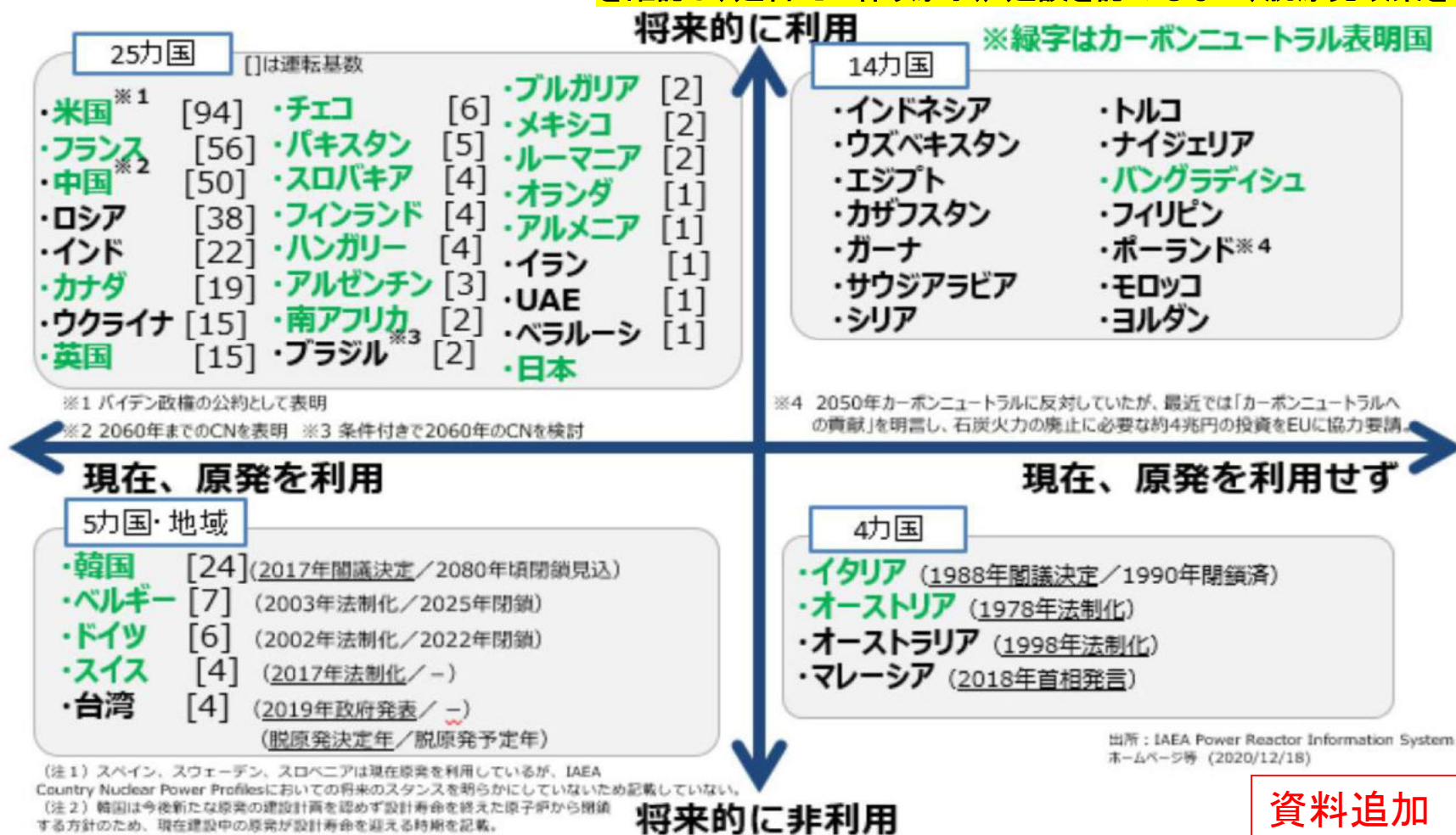


美浜3号のフルデジタル中央制御室・伊方2号の炉内構造機器交換

脱炭素を目指す国々が原子力を利用

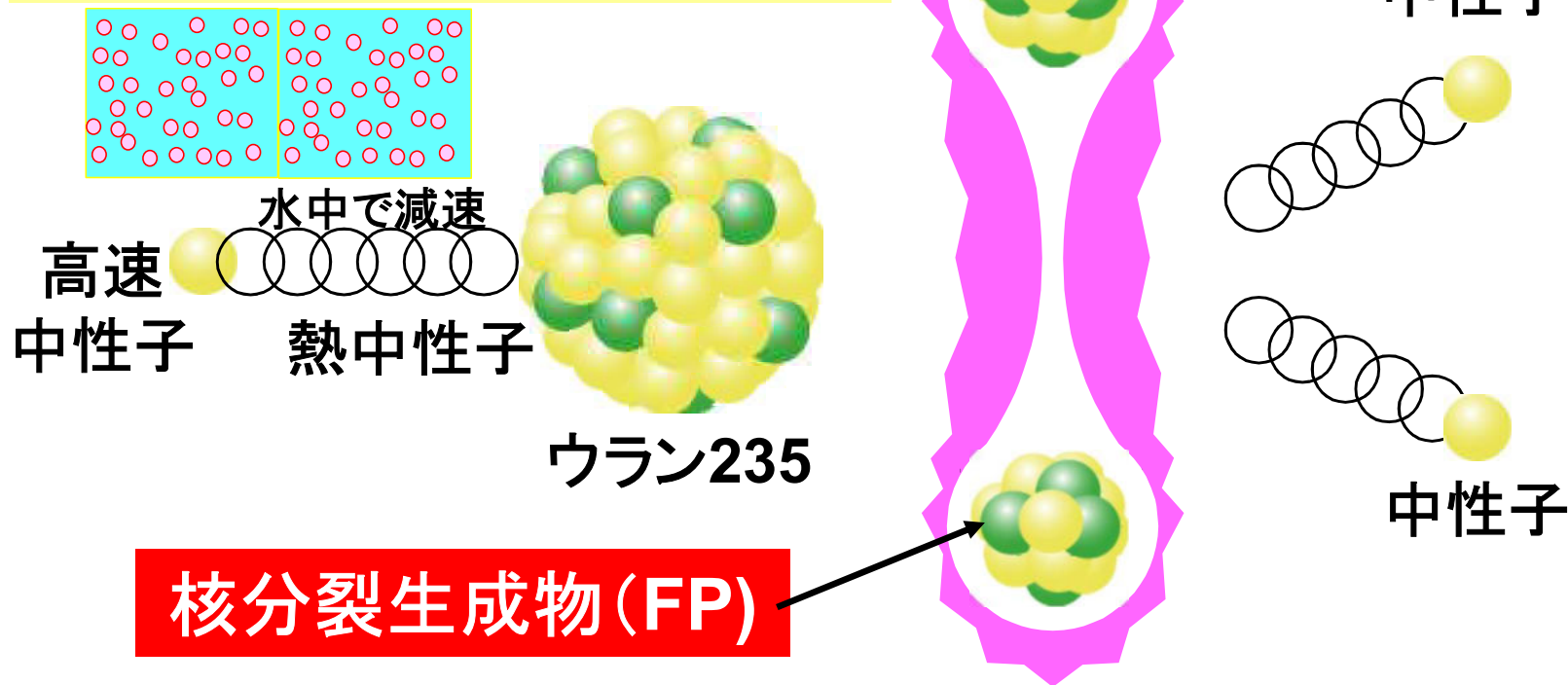
- ◆ カーボンニュートラルを目指す国の中には原発を将来にわたって活用する国が多数含まれる。
- ◆ 脱原発は国際的潮流ではない

◆スウェーデン政府は1980年に国民投票で決定した脱原発政策を見直し、2010年の国民投票で、**脱原子力見直し**に関する法律の有効性を確認し、建替えに伴う原子炉建設を認めるなど、脱原発政策を破棄



高速中性子を減速して熱中性子を生成

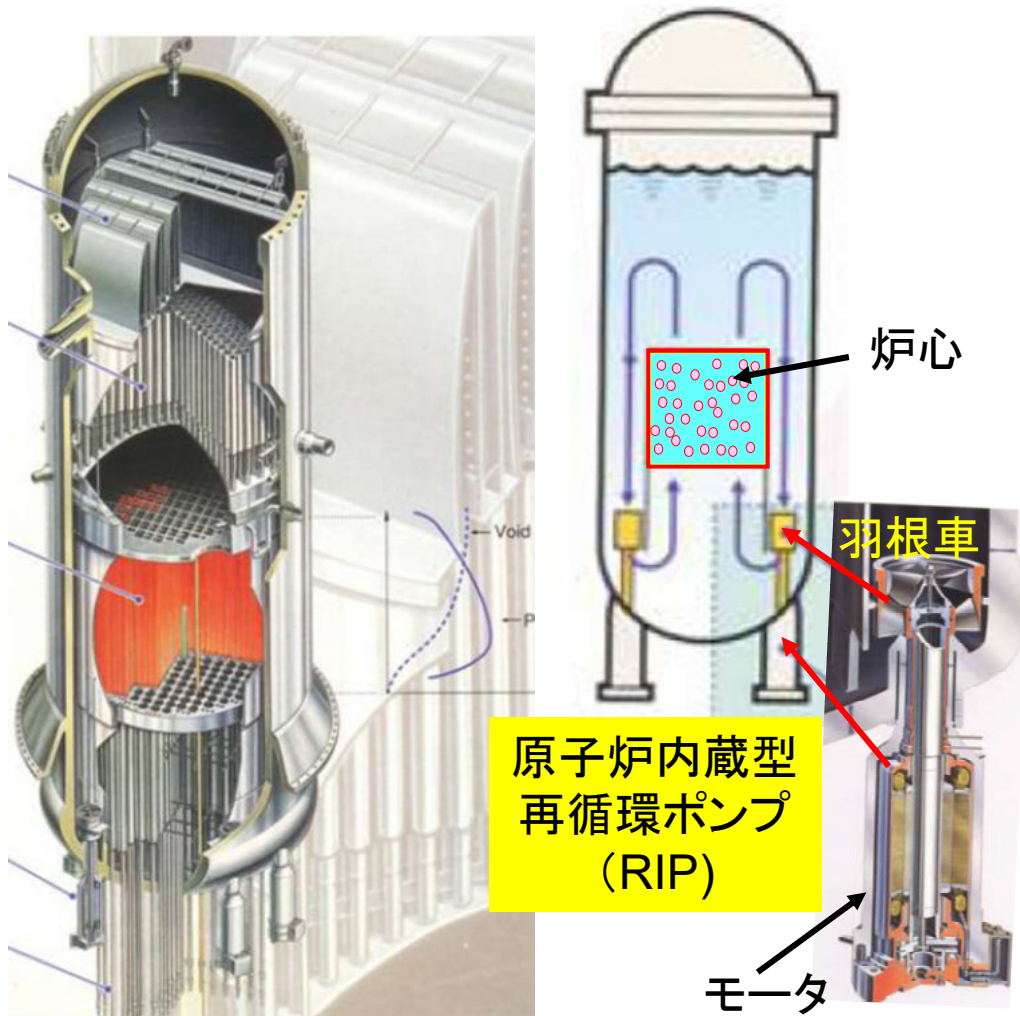
- 熱中性子: 水中で減速された中性子が主に核分裂反応を起こす
- 蒸気が増えると反応度低下



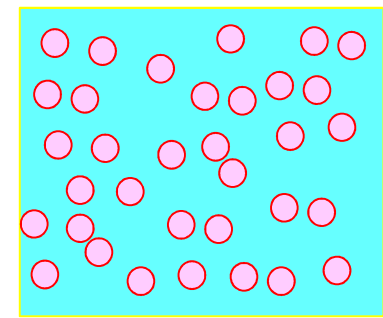
水中の蒸気割合(ボイド率)増加で出力抑制
核分裂生成物からの崩壊熱の冷却が必要

沸騰水型原子炉はポンプ回転数で負荷追従運転OK

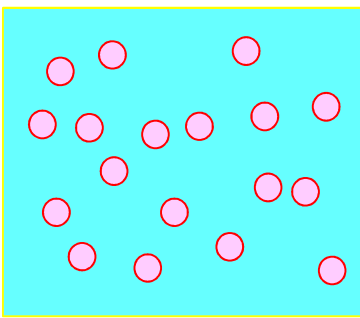
沸騰水型原子炉は、RIPのポンプ回転数変化で炉心の気泡のボイド率で出力を可変できる。二相流状態なので、炉心温度一定



ボイド率大
→ 反応度低下
→ 熱出力小

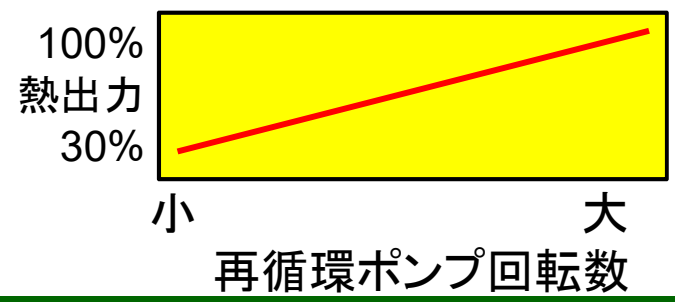


ボイド率小
→ 反応度増加
→ 熱出力大



↑ ↑
再循環ポンプ
回転数小
→ 炉心流量小

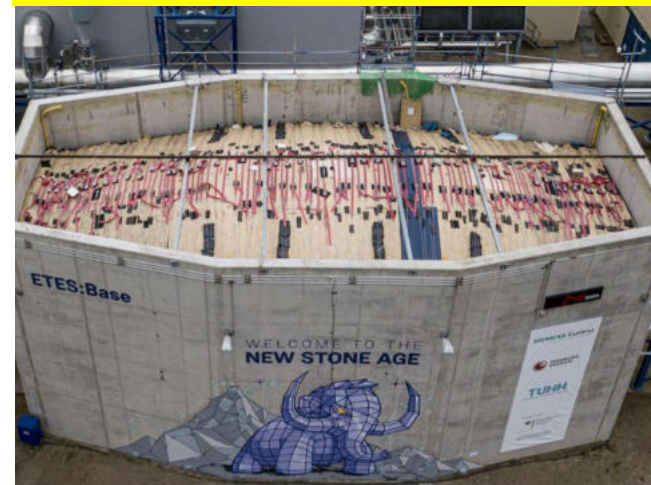
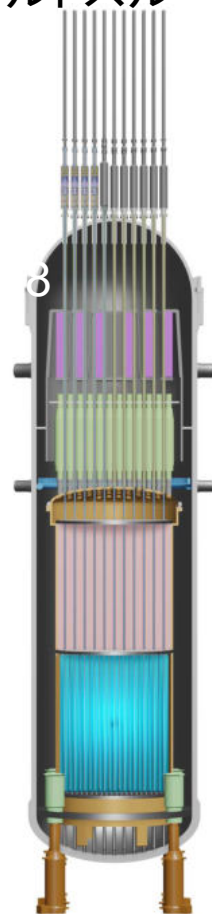
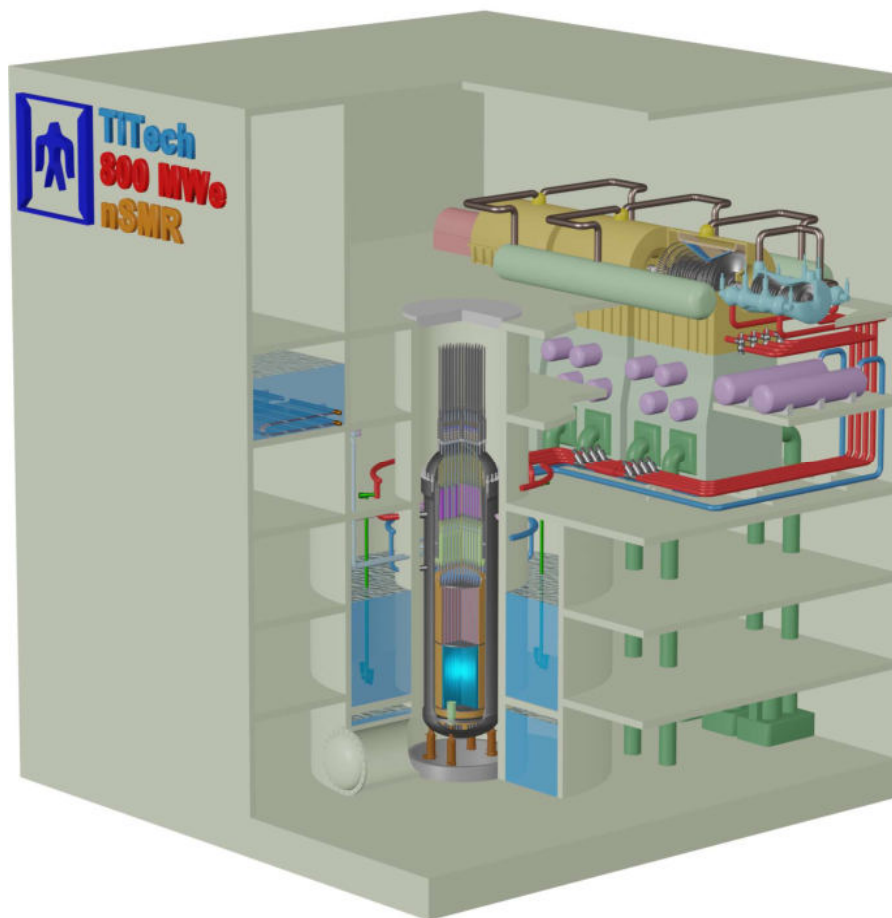
↑ ↑
再循環ポンプ
回転数大
→ 炉心流量大



負荷追従ができる小型モジュール炉(東工大)

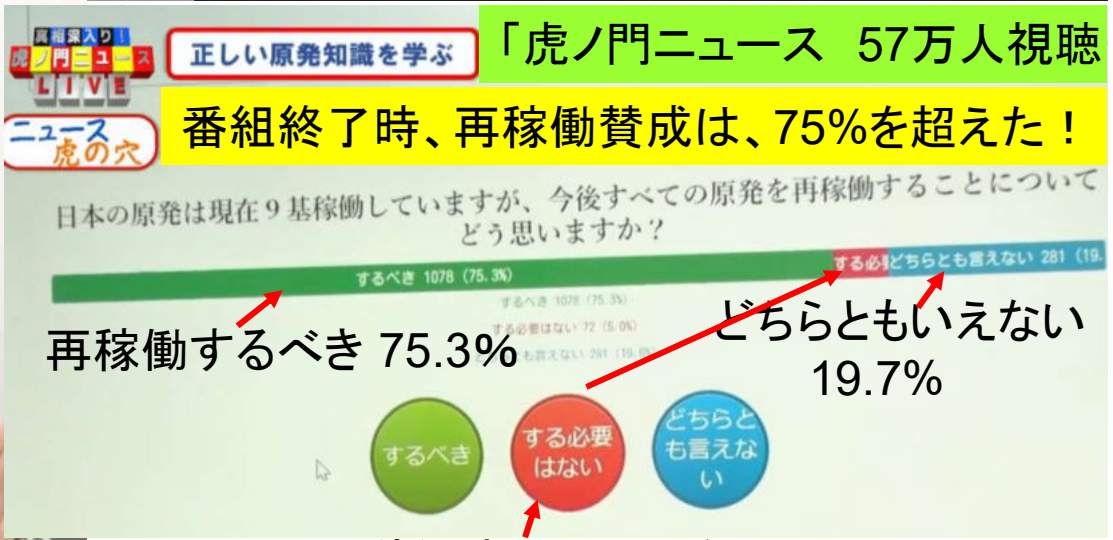
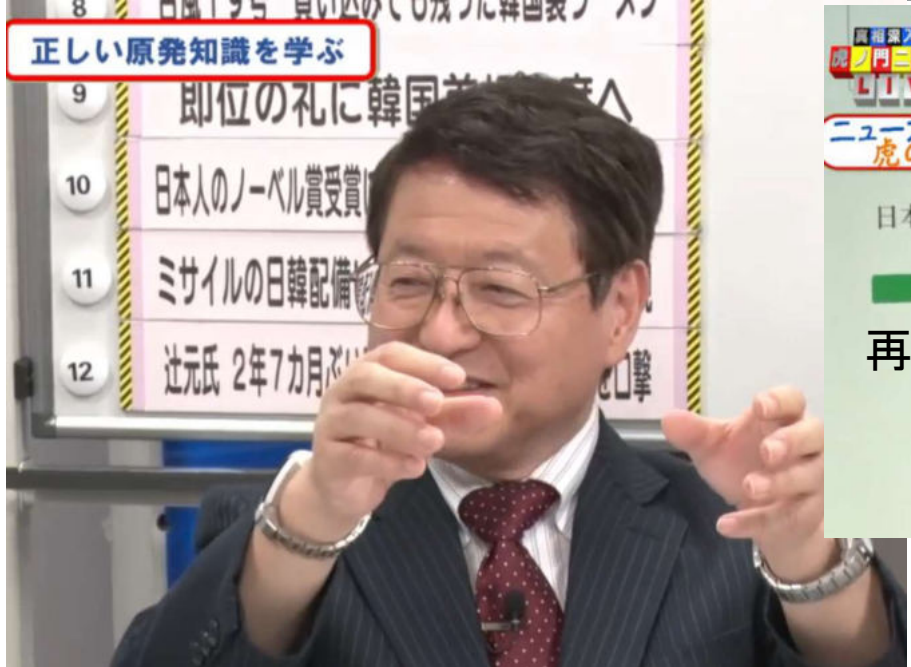
- ・RIPのポンプ回転数変化で簡単に電気出力を可変
- ・二相流状態なので、炉心温度一定(熱疲労防止)
- ・ICによるパッシブ冷却(自然循環で静的に冷却)
- ・上部制御棒駆動機構(CRD)で重力で炉停止(スクラム)
- ・圧力容器底部を水冷して、万一の場合でもメルトスルー防止

・碎石蓄熱発電で深夜電力や太陽光の余剰電力蓄電



20年前に開発していた

2019年10月15日 虎ノ門ニュースに出演しました



<https://freshlive.tv/toranomonnews/272875>
<https://www.youtube.com/watch?v=Th714NEpc8Q> (57万人が視聴)

まとめ

- 地球の環境危機の時代にあっては、脱原発すると人類や生物の存続にかかわる将来的な危機をもたらす。
- 再エネを火力発電所と抱き合わせで使うとCO2減らない。
- 現在、国際的に再生可能エネルギー（再エネ）が礼賛され、世界中が再エネで電力の全てをまかなえるかのような錯覚に陥っている。COP26は壮大な失敗（グretaさんが酷評）
- 太陽光発電の設備利用率は、高々13%しかない。
- CO2排出削減するには、「太陽光があれば原発いらぬは嘘」。原発は必要。
- 安全性を高めた最新型炉の新增設・リプレースを開始しないと原子力発電メーカーの技術基盤（設備と人）が衰退する
- 国産最新鋭技術である石炭ガス化発電を世界に輸出せよ。
- 第6次エネ基計画は、我が国を衰退させ中国に貢ぐだけ。