

エネルギー問題に発言する会
講演 (2025.10.31)

「石炭火力の技術革新の可能性と 将来展望、および日本の貢献」

～カーボンニュートラル時代の新しい火力発電(FLEX POWER)～

2025年10月31日

東京大学生産技術研究所
研究顧問
金子祥三

目 次

§1. カーボンニュートラル時代の電源の在り方

1-1 基本は(S+3E)

1-2 第7次エネルギー基本計画

1-3 再エネ増加の最大の課題：電力コストの高騰防止

1-4 エネルギーコストの重要性

§2. 新しい火力：FlexPower

2-1 水力並みの調整力：高速負荷変化と極低最低負荷

2-2 あらゆる燃料が使用可能

2-3 短納期・安い建設費 (SDT/FMC)

2-4 CO₂削減

§3. 究極の石炭火力：HyGreen Project

3-1 CO₂排出原単位を天然ガス以下に

3-2 IGCC技術と燃料電池技術を融合

2-3 日本独自の技術で世界に貢献を

§1. カーボンニュートラル時代の電源の在り方

1-1 基本は(S+3E)

1-2 第7次エネルギー基本計画

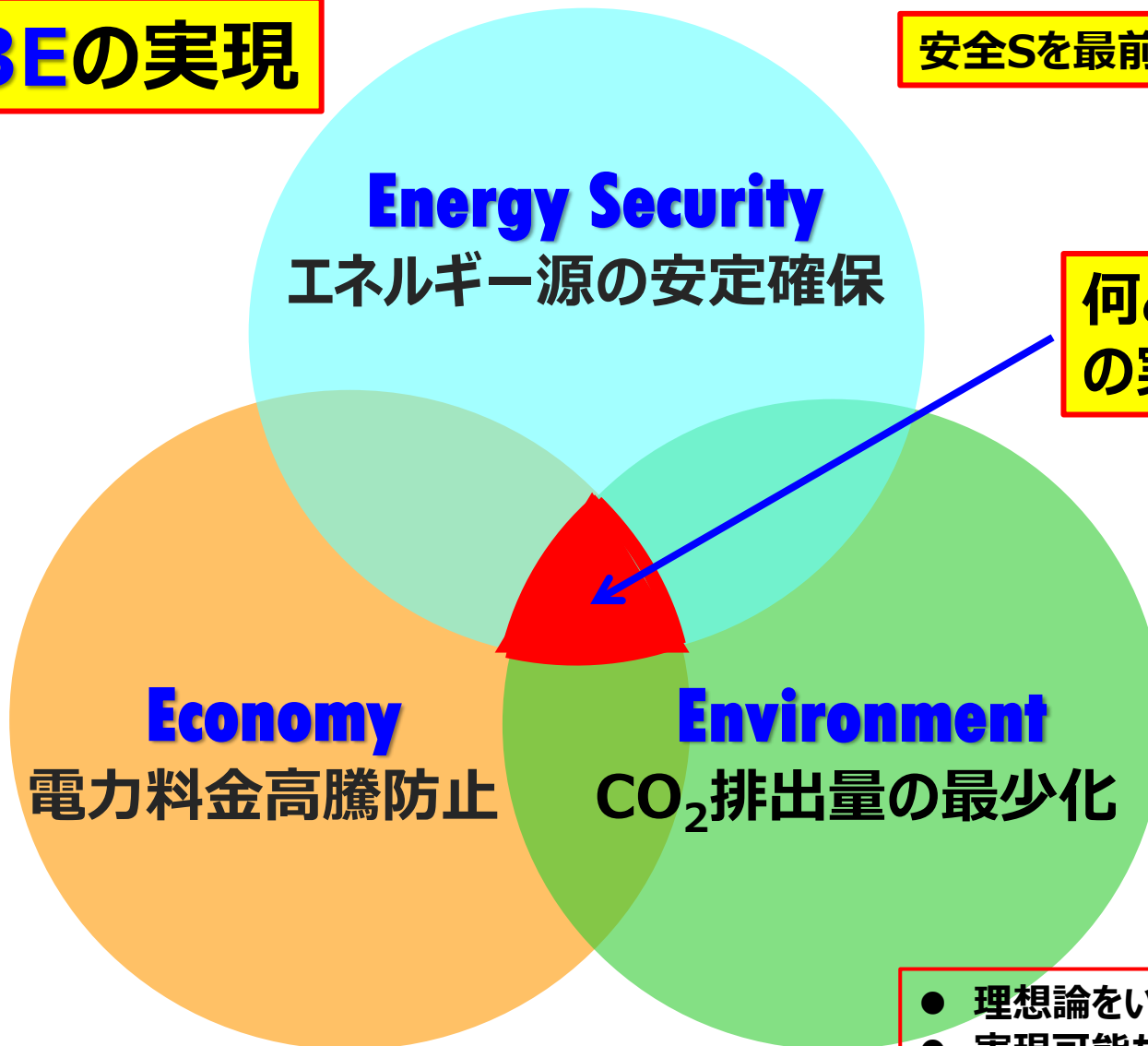
1-3 再エネ増加の最大の課題：電力コストの高騰防止

1-4 エネルギーコストの重要性

1-1 基本はS+3E

S+3Eの実現

安全Sを最前提として



何としても共存解
の実現を！

- 理想論をいうのは誰でも出来る
- 実現可能な具体策こそ重要

1-2 第7次 エネルギー基本計画 (2025.2.18閣議決定)

2040年度見通し

・化石=35%

火力
30～40%

再生可能
エネルギー
40～50%

原子力
20%

・非化石=65%

再生可能エネルギー の内訳(%)		平均値 (%)
太陽光*	22～29	26
風力*	4～8	6
地熱**	1～2	1.5
水力**	8～10	9
バイオマス**	5～6	5.5
合計	40～50	48

[注] *印：変動性再生可能エネルギー(VRE)

**印：安定性再生可能エネルギー(SRE)

前回
21%

32%

16%

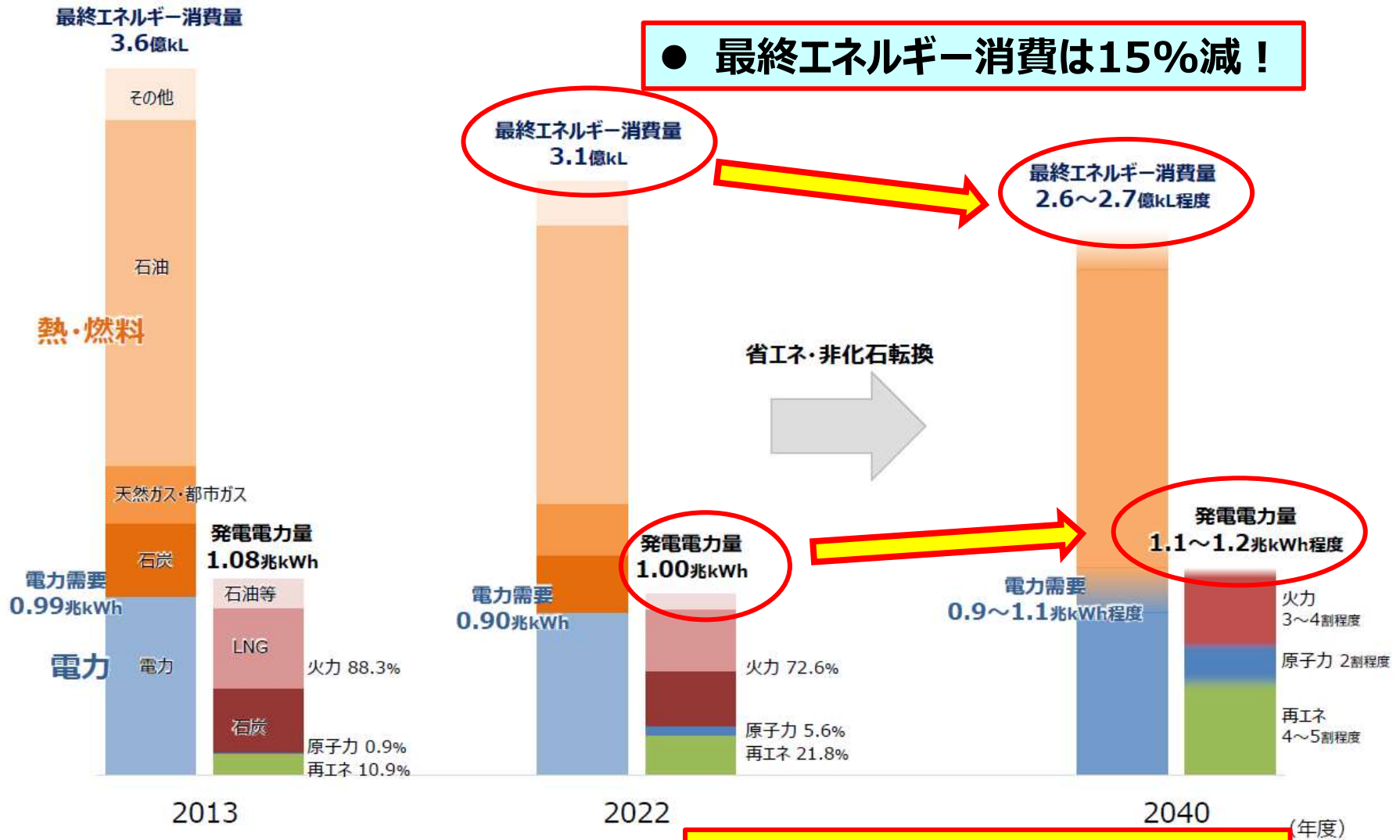
前回
16%

②火力の内訳は示さず

①再エネの見通しに幅を持たせている

出典：エネルギー基本計画の概要、2024.12.17、資源エネルギー庁より

➤ 最終エネルギー消費と発電電力量



(注) 左のグラフは最終エネルギー消費量、右のグラフは発電電力量である

● 電力量は1～2割増加！

➤ 2040年の電源構成

【参考】2040年度におけるエネルギー需給の見通し

- 2040年度エネルギー需給の見通しは、諸外国における分析手法も参考としながら、様々な不確実性が存在することを念頭に、複数のシナリオを用いた一定の幅として提示。

	2023年度 (速報値)	2040年度 (見通し)
エネルギー自給率	15.2%	3～4割程度
発電電力量	9854億kWh	1.1～1.2兆kWh程度
電源構成		
再エネ	22.9%	4～5割程度
太陽光	10.9%	23～29%程度
風力	9.8%	4～8%程度
水力	1.1%	8～10%程度
地熱	7.6%	1～2%程度
バイオマス	0.3%	5～6%程度
原子力	4.1%	2割程度
火力	8.5%	3～4割程度
最終エネルギー消費量	68.6%	3.0億kL
温室効果ガス削減割合 (2013年度比)	22.9% ※2022年度実績	2.6～2.7億kL程度
		73%

(参考) 新たなエネルギー需給見通しでは、2040年度73%削減実現に至る場合に加え、実現に至らないシナリオ(61%削減)も参考値として提示。73%削減に至る場合の2040年度における天然ガスの一次エネルギー供給量は5300～6100万トン程度だが、61%削減シナリオでは7400万トン程度の見通し。

➤ 再エネと火力に幅を持たせた理由

公式説明：“技術の進展にいろいろな可能性があり、現時点では一つに絞り切れないため”



【モデルプラント方式の発電コスト】2040年の試算の結果概要（暫定）

検証結果は、標準的な発電所を立地条件等を考慮せずに新規に建設し所定期間運用した場合の「総発電コスト」の試算値。政策支援を前提に達成するべき性能や価格目標とも一致しない。

- 1. 各電源のコスト面での特徴を踏まえ、どの電源に政策の力点を置くかといった、2040年に向けたエネルギー政策の議論の参考材料とするために試算。
- 2. 2040年に、発電設備を新設・運転した際のkWh当たりのコストを、一定の前提で機械的に試算したもの（既存設備を運転するコストではない）。
- 3. 2040年のコストは、燃料費の見通し、設備の稼働年数・設備利用率、自然変動電源の導入量、気象状況などの試算の前提を変えれば、結果は変わる。また、今回想定されていない更なる技術革新などが起こる可能性にも留意する必要がある。
- 4. 事業者が現実に関電設備を建設する際は、下記の発電コストだけでなく様々な条件（立地制約・燃料供給制約等）が勘案され、総合的に判断される。

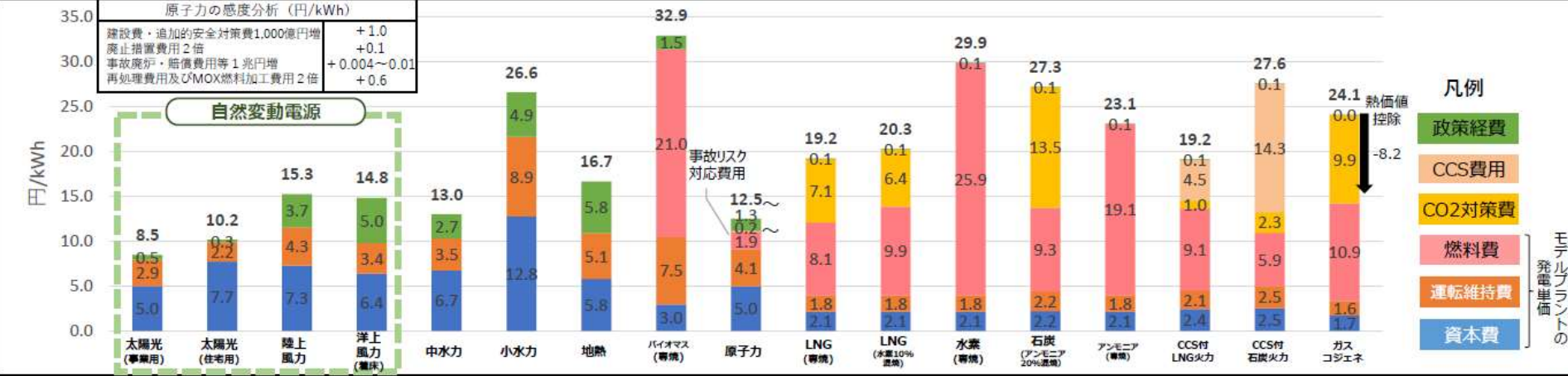
		自然変動電源				水力		地熱	バイオマス	原子力	LNG	脱炭素火力						コジェネ
電源		太陽光 (事業用)	太陽光 (住宅用)	陸上 風力	洋上 風力 (着床)	中水力	小水力	地熱	バイオ マス (専焼)	原子力	LNG (専焼)	LNG (水素 10% 混焼)	水素 (専焼)	石炭 (PM2.5 20% 混焼)	アンモ ニア (専焼)	CCS付 LNG 火力	CCS付 石炭 火力	ガスコ ジェネ
LCOE (円 /kWh)	政策経 費あり	7.0 8.9	7.8 10.7	13.5 15.3	14.4 15.1	13.0	26.6	16.7	32.9	12.5~	16.0 21.0	16.8 22.2	24.6 33.0	20.9 32.0	22.3 27.9	17.1 21.1	26.6 32.2	15.9 17.5
		6.6 8.4	7.6 10.4	10.1 11.6	9.5 10.1	10.3	21.7	10.9	31.4	11.2~	15.9 20.9	16.8 22.2	24.6 33.0	20.8 31.9	22.2 27.8	17.0 21.0	26.5 32.2	15.9 17.5
	政策経 費なし																	
設備利用率 稼働年数		18.3% 25年	15.8% 25年	29.6% 25年	40.2% 25年	54.7% 40年	54.4% 40年	83% 40年	87% 40年	70% 40年	70% 40年	70% 40年	70% 40年	70% 40年	70% 40年	70% 40年	70% 40年	72.3% 30年

(注1) 表の値は将来の燃料価格、CO2対策費用、太陽光・風力の導入拡大に伴う機器価格低下などをどう見込むかにより、幅を持った試算となる。例えばCO2対策費用は、IEA「World Energy Outlook 2024」(WEO2024)における韓国の公表政策シナリオ(STEPS)とEUの表明公約シナリオ(APS)で幅を取っている。

(注2) グラフの値は、WEO2024のSTEPSのケースがベース。CO2価格はWEO2024のEUのSTEPSのケース、水素・アンモニアは海外からブルー水素・ブルーアンモニアを輸入するケース、CCSはパイプライン輸送のケース、コジェネはCIF価格で計算したコストを使用。その他の前提は、後述の、各電源ごとの「発電コストの内訳」(グラフ)のとおり。

(注3) 発電コスト検証WGで考慮した政策経費は、国際的に確立した手法では算入しないことが一般的であることから、政策経費を算入しないケースについても併せて記載することとした。

(注4) 四捨五入により合計が一致しないことがある。(注5) 水素、アンモニア混焼は熱量ベース。(注5) 「CO2対策費用」は環境外部費用の一部を、便宜的にWEOで示された炭素価格に擬制したもの。



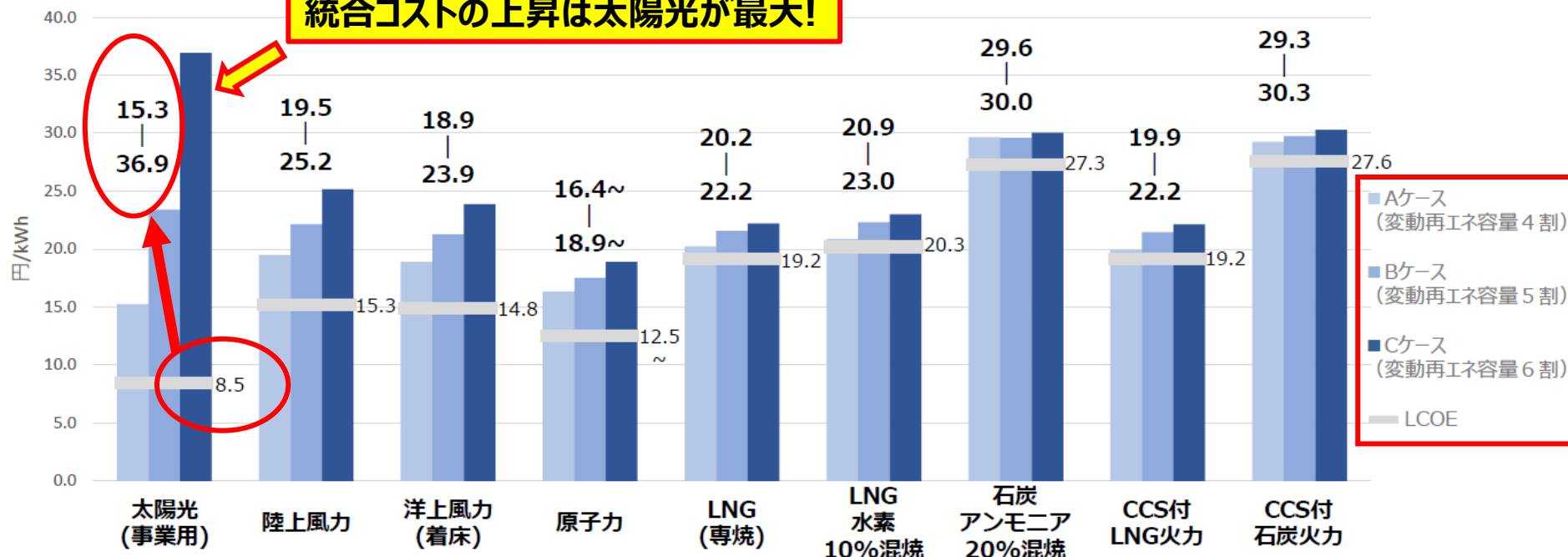
※ペロブスカイト太陽電池と浮体式洋上風力については、現時点では技術が開発途上であり費用の予見性が高いが、諸外国のコストデータをもとに作成したコスト算定モデルや、事業者の見積もりをもとに、一定の仮定を置いて発電コストを試算したところ、ペロブスカイト太陽電池は政策経費あり16.5円/kWh、政策経費なし15.3円/kWh、浮体式洋上風力は政策経費あり22.5円/kWh、政策経費なし14.9円/kWhとなった。(参考値)

【統合コストの一部を考慮した発電コスト】2040年の試算の結果概要（暫定）

委員試算を踏まえた検証結果。
政策支援を前提に達成すべき
性能や価格目標とも一致しない。

- 太陽光や風力といった安定した供給が難しい電源の比率が増えていくと、電力システム全体を安定させるために電力システム全体で生じるコストも増加する。
電源別の発電コストを比較する際、従来から計算してきた①に加え、一定の仮定を置いて、②も算定した。
①新たな発電設備を建設・運転した際のkWh当たりのコストを、一定の前提で機械的に試算したもの（＝「LCOE」）
②ある電源を追加した場合、電力システム全体に追加で生じるコスト（例：他電源や蓄電池で調整するコスト）を考慮したコスト
（■統合コストの一部を考慮した発電コスト）
- 統合コストの一部を考慮した発電コストは、既存の発電設備が稼働する中で、ある特定の電源を追加した際に電力システムに追加で生じるコストを計算している。具体的には、LNG火力など他の電源による調整、揚水や系統用蓄電池による蓄電・放電ロス、再エネの出力制御等に関するコストを加味する。
- 将来のコストは、燃料費の見通し、設備の稼働年数・設備利用率、ある特定の電源を追加した際に電力システムで代替されると想定される電源の設定（今回は、費用が一番高い石炭火力とした）などの試算の前提を変えれば、結果は変わる。今回は、3ケースについて算定。更なる技術革新などが起こる可能性も留意する必要あり。

統合コストの上昇は太陽光が最大！



※2040年の電源システムについて、一定程度、地域間連系線が増強され、系統用蓄電池が実装されているケースを想定しており、これらによる統合コストの引き下げ効果は、上記結果に加味されている。加えて、デマンドレスポンスを一定程度考慮した場合、統合コストの一部を考慮した発電コストが上記より低い水準になる。

※地域間連系線の増強費用や蓄電池の整備費用は、「ある特定の電源を追加した際」に電力システム全体に追加で生じるコストではないため、計算には含まれない。

※水素、アンモニアは熱量ベース。

出典：発電コスト検証ワーキンググループ資料より、2024.12.17、資源エネルギー庁

1-3 再エネ増加の最大の課題：電力コストの高騰

- 再生可能エネルギーのうち**太陽光・風力**といった**変動型再エネVRE**は**出力調整機能が無い**ため、電力網に接続する場合、需給バランスに大きな課題があり、これを解決するために費用が掛かる。
- VRE比率が40%を超えるようになると、電力コストは2倍、3倍、4倍と急増する。これが**統合コスト**である。
- 従って再エネを4割、5割、6割にする場合は電力コストの高騰と対峙しなければならない。許容出来ない電力コストの案は“絵にかいた餅”である。
- 統合コストのうち最大のものは**膨大な蓄電池コスト**である。

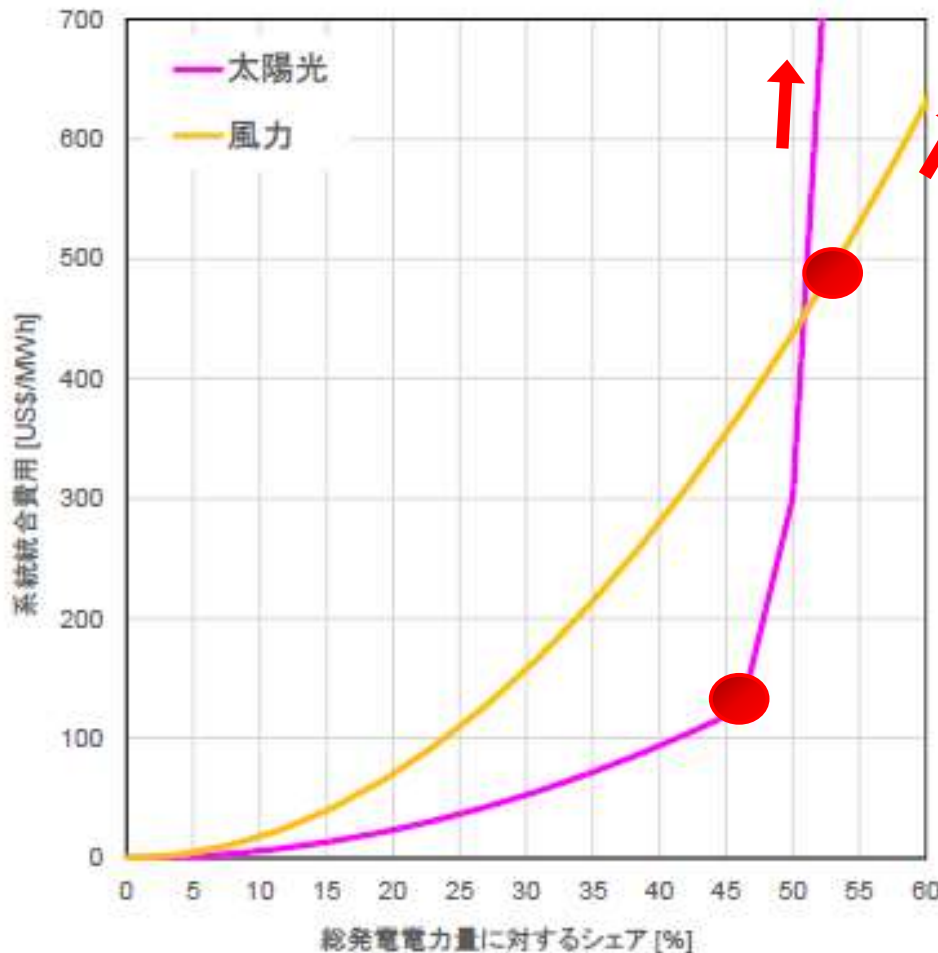
エネ基本文の記載

(2) 再生可能エネルギー

その上で、再生可能エネルギーの電力市場への統合にあたっては、社会全体での統合コストの最小化が重要となる。この観点から、F I P制度の更なる活用を通じて、

● 統合コストとは

● 統合コストの原因は変動性再エネVREの断続性と予見不能性による



VRE比率が高まると、限界統合費用は比較的急速に上昇傾向有。これは、既にVREが大量に導入されている状況で更に導入を進める場合、曇天・無風状態が数日以上継続するリスクに対応するため、利用頻度の低い蓄電システムや送電線を保持することが必要となることによる。

例えば、再エネ比率50%程度（太陽光約400TWh、風力約100TWh）のケースにおいては、蓄電池導入量は最適化計算の結果、870GWh、再エネ100%程度（VRE56%）のケースでは3980GWh程度となる。（足下導入量約10GWh程度）

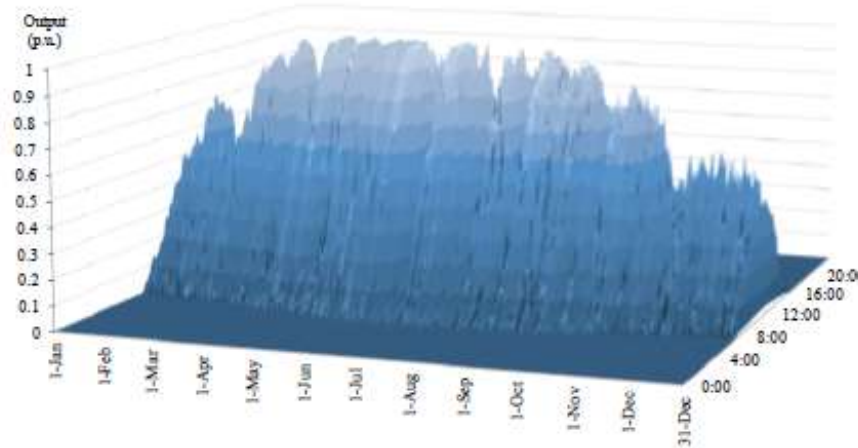
● 統合コスト急増の原因は膨大な蓄電池のコストである！

出典：秋元圭吾、“カーボンニュートラル実現に向けた需給両面での対策とそのシナリオ分析”、2023.12.4

● なぜ統合コストが必要なのか？

- 再エネが40%、50%、60%になると電力コストは2倍、3倍、4倍に上昇する！

- 変動再エネVREは電力需要と無関係に発電



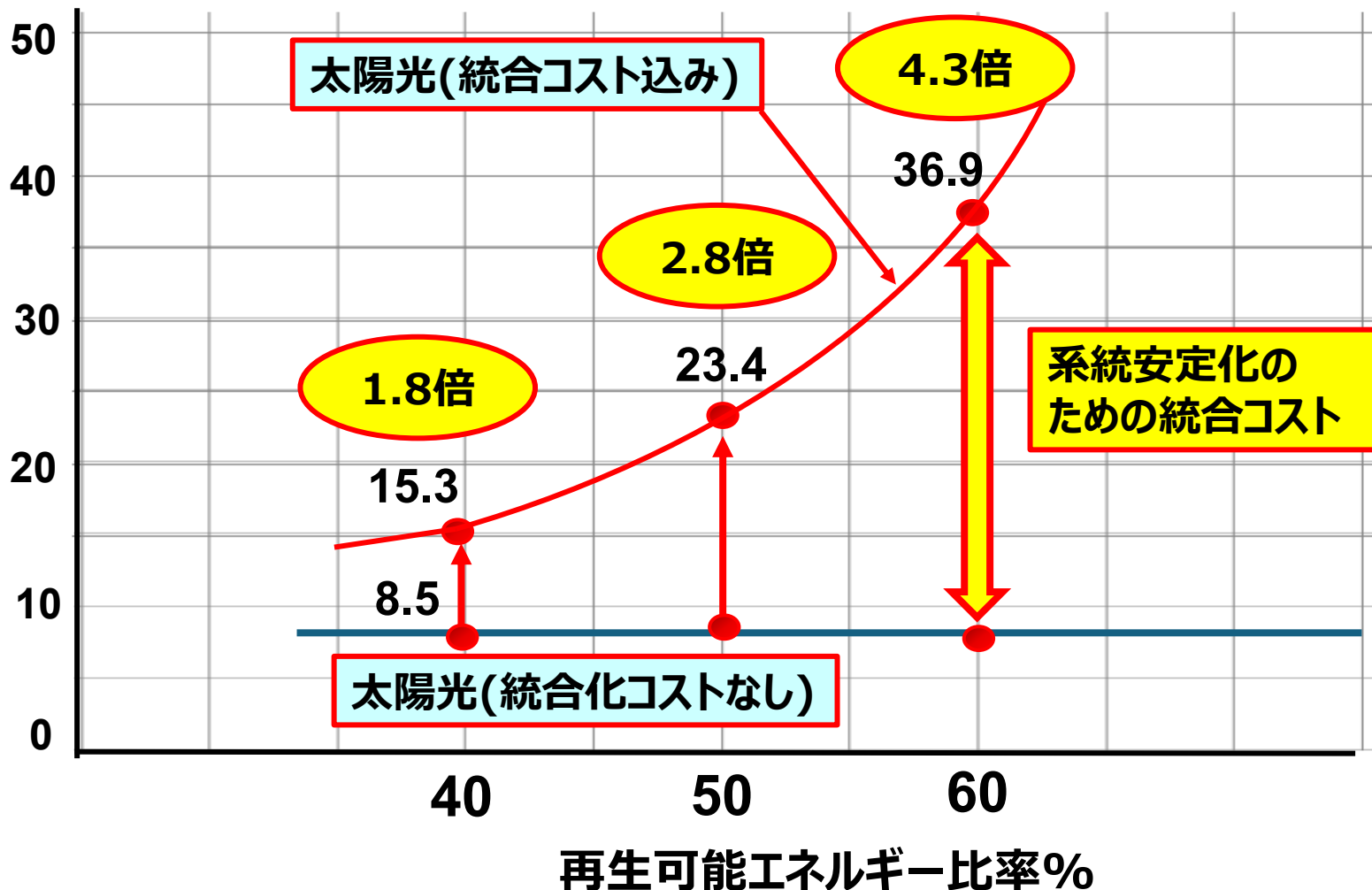
- 変動性再エネVRE（太陽光・風力）の
断続性・予見不能性の代償！

出典：秋元圭吾、“カーボンニュートラル実現に向けた需給両面での対策とそのシナリオ分析”、2023.12.4

● 再エネ比率増加と統合コストの関係

● 再エネ比率が40%を超すと電力コストが急上昇する!

発電コスト
円/kWh



出典：発電コスト検証ワーキンググループ資料より、2024.12.17、資源エネルギー庁

● 家庭用電力料金の上昇予想

電気ご使用量のお知らせ

ご契約種別 従量電灯B		ご契約 40 A	
ご使用量 344 kWh		kWh	
請求予定金額		11,343円	
(うち消費税等相当額10%) (		1,031円)	
上 記 料 金	基本料金	1,247円00銭	料金確定日
	1 段料金	3,576円00銭	今回検針日 8月18日
	2 段料金	6,552円00銭	計器取替日 月 日
	3 段料金	1,781円56銭	振替予定日 月 日
	燃料費調整額	-3,182円00銭	お支払期限日 9月17日
再エネ発電賦課金		1,369円00銭	次回検針予定日 9月16日
			戸 数 戸
			東京電力エナジーパートナー株式会社
			T8010001166930
当月指示数 01020.7			
前月(取付)指示数 00676.5			
差 引 344.2			
計器乗率(倍)			
計器番号(下3桁)		459	
取替前計量値			

(本お知らせ票によるお支払いはできません。)

昨年 8月分は30日間で 338 kWhです。
今月分は昨年と比べ1日あたり 7%減少しています。

電力料金 (2025年7月分)

総額	11,343円
(うち消費税10%相当額)	1,031円
①電力料金	9,974円
②再エネ発電賦課金	1,369円



太陽光発電事業者へ

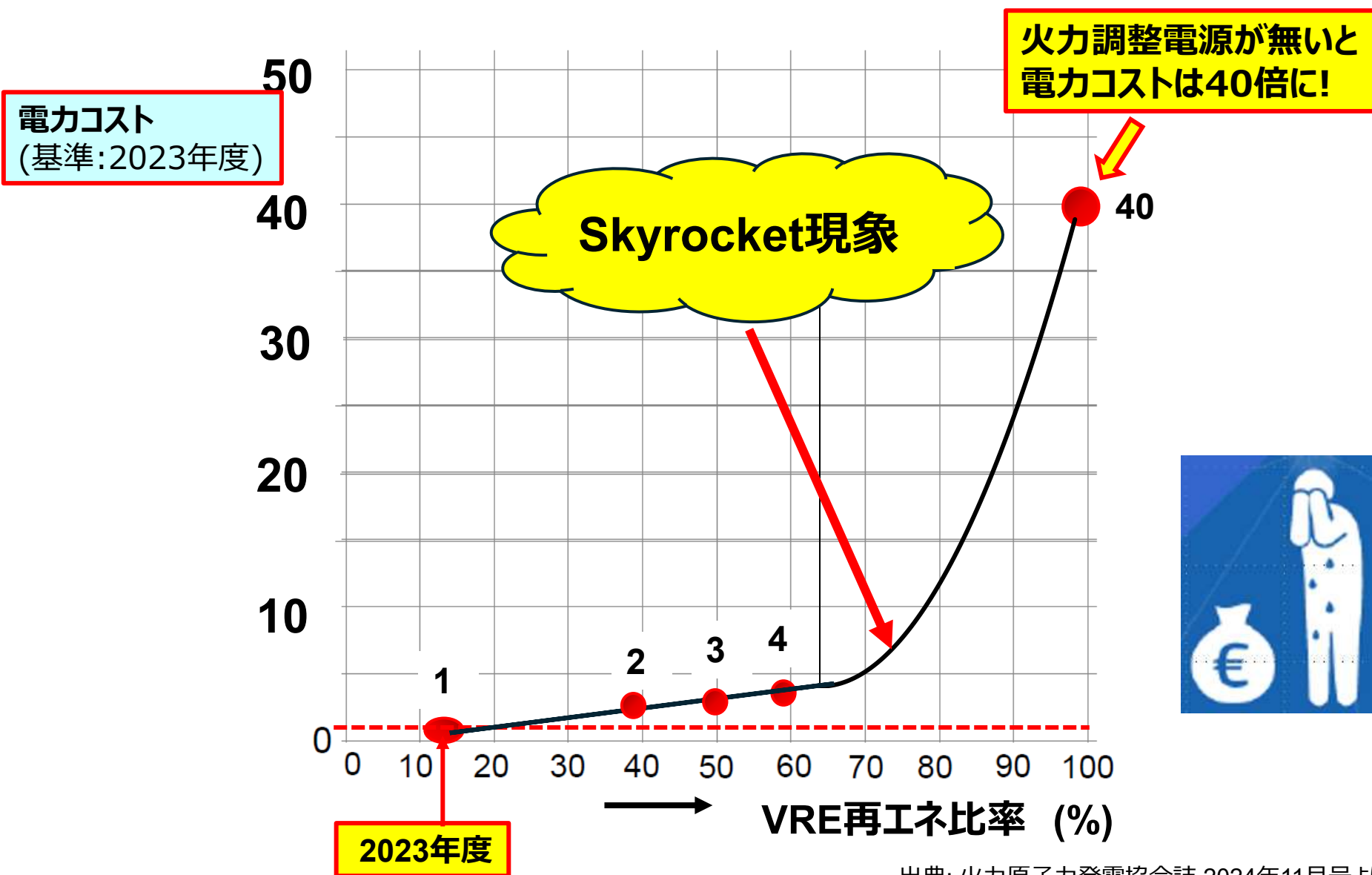
電力料金 (再エネ 60%時)

総額	46,820円
(うち消費税10%相当額)	4,256円
①電力料金	9,974円
②再エネ発電賦課金	6,900円
③系統安定化賦課金 (統合コスト)	29,946円

蓄電池等事業者へ

(備考) 発電コスト検証ワーキンググループ資料をもとに金子自宅の予想費用を試算

● 変動性再生エネVREの増加による電力コスト上昇

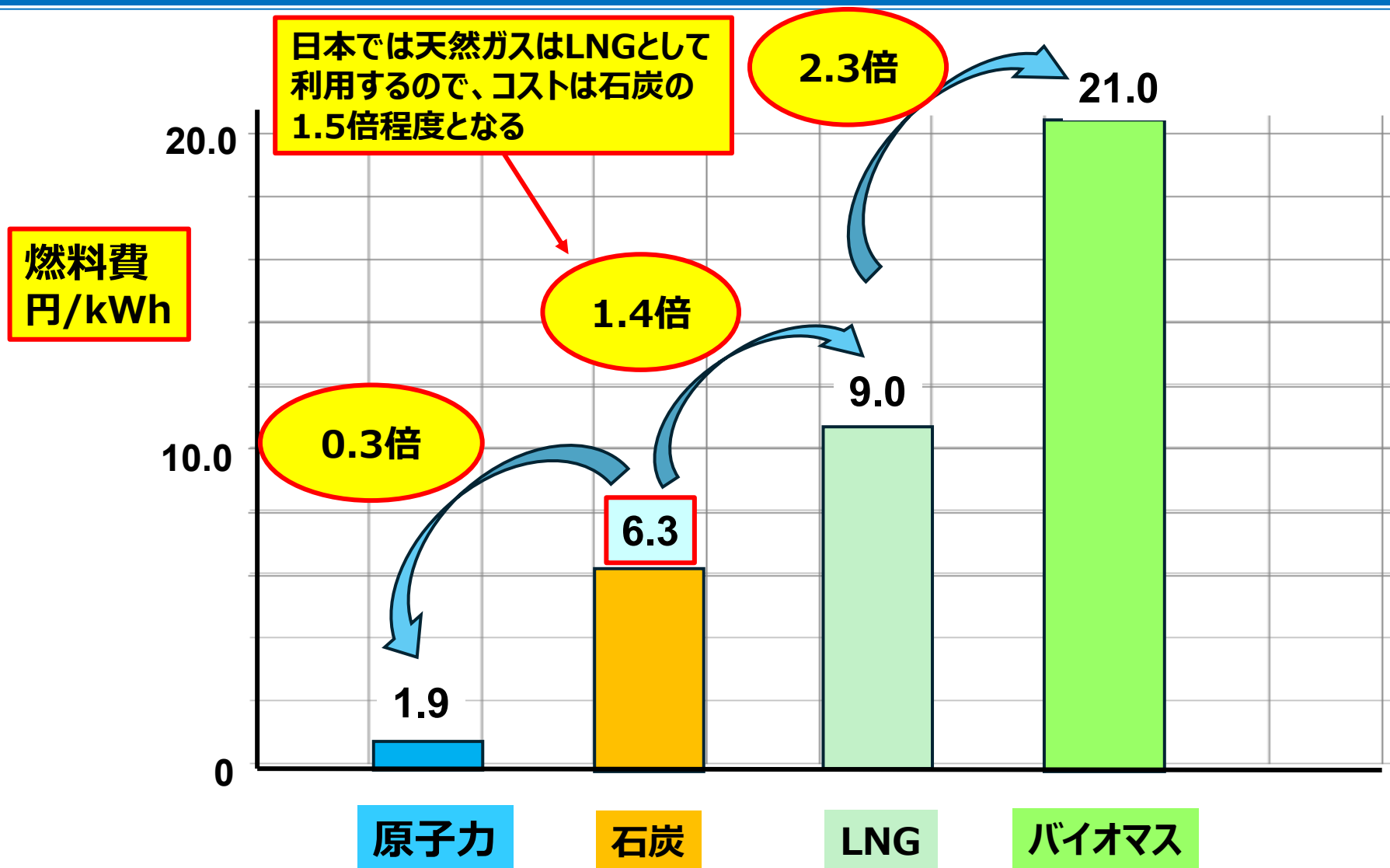


出典: 火力原子力発電協会誌 2024年11月号より

1-4 エネルギーコストの重要性

1. 各電源には発電コストがかかる。
2. 市場に入る優先順序はメリットオーダー。
3. **メリットオーダーでは可変費（燃料費）しか評価しない**
→設備費（償却費を含む）は無視
4. 再エネは燃料費がかからないので市場で有利である。
5. 再エネ以外では安い順に、原子力→石炭→LNG→バイオマス
6. 現実には世界の電力は交流電力網で成り立っており、需要と供給を秒単位で精密に（±5%以内）一致させなければならない。
7. **太陽光・風力などの変動性再エネVREは出力調整ができない。**
需給バランスのための**調整力**や**系統安定化**のための蓄電池増設や送電線強化が必要。これが**統合コスト**として不可避になる。
8. 統合コストは電力料金に付加され、再エネの増加と共に電力料金が上昇する。試算では**再エネ率40%、50%、60%**で電力料金は**2倍、3倍、4倍**となり、**再エネ率100%**で**40倍**となる。

➤ 日本の発電コストへの燃料費の影響



出典：発電コスト検証ワーキンググループ資料より、2024.12.17、資源エネルギー庁

● 日本の各社電力料金比較例 (2025年2月)

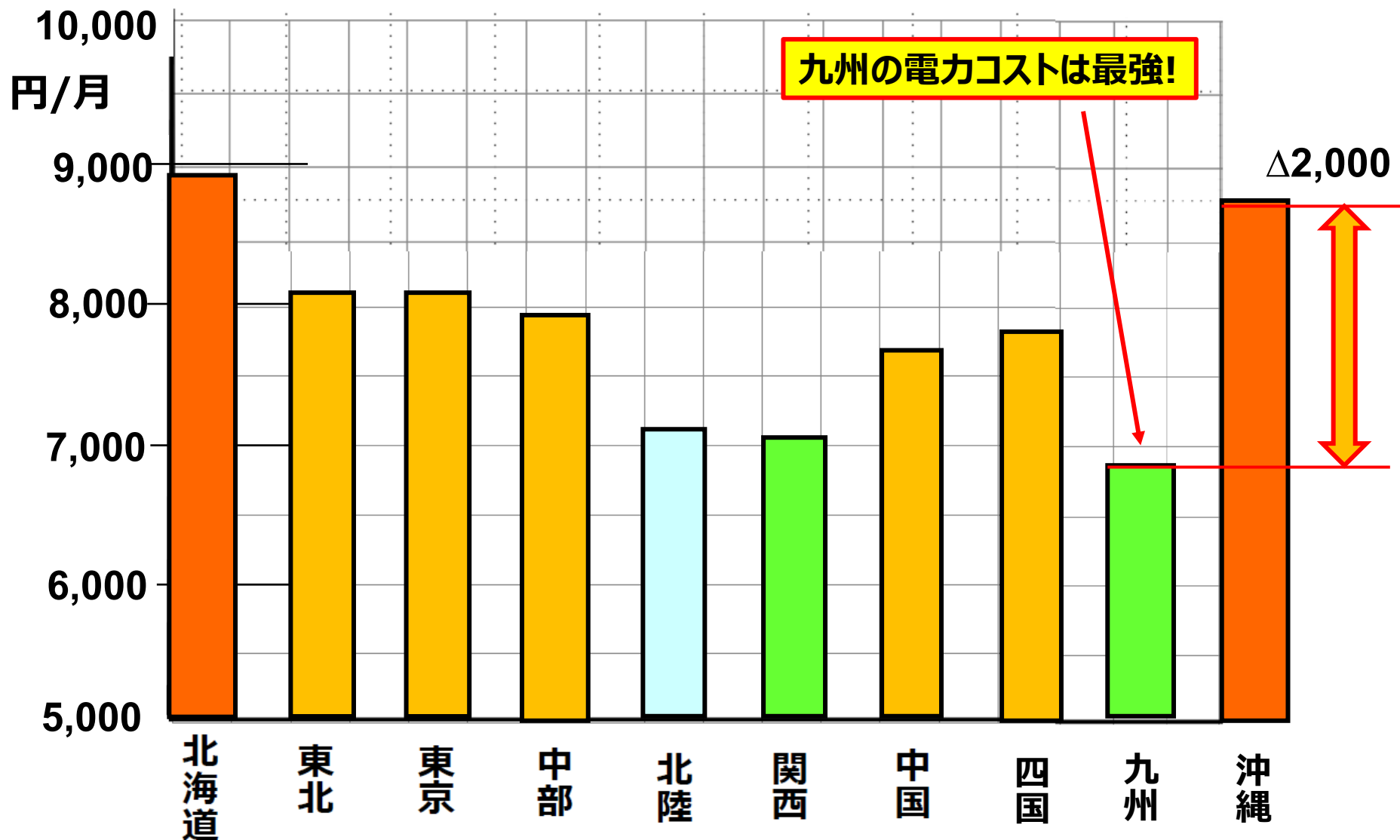
電力会社	電力料金 (円/月)
北海道	8,833
東北	8,080
東京	8,174
中部	7,914
北陸	7,084
関西	7,014
中国	7,721
四国	7,838
九州	6,923
沖縄	8,813

最高値：北海道、沖縄

最安値：九州

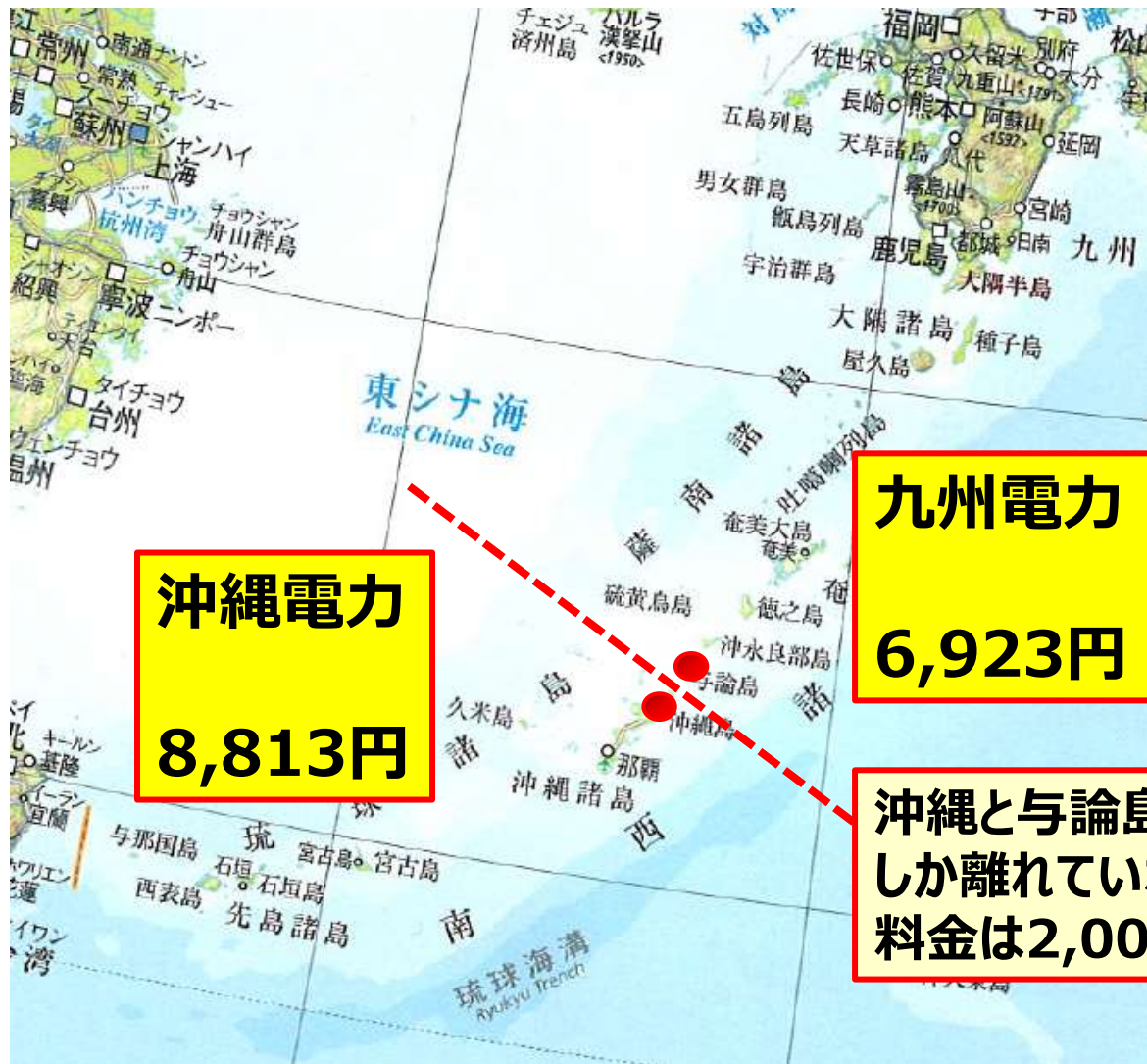
出典：2024年12月27日 電気新聞より。2025年2月の燃料費調整額に基づく
標準家庭1か月の電気料金（標準の基準は各社で異なる）

● 各社電力料金比較例 (2025年2月)



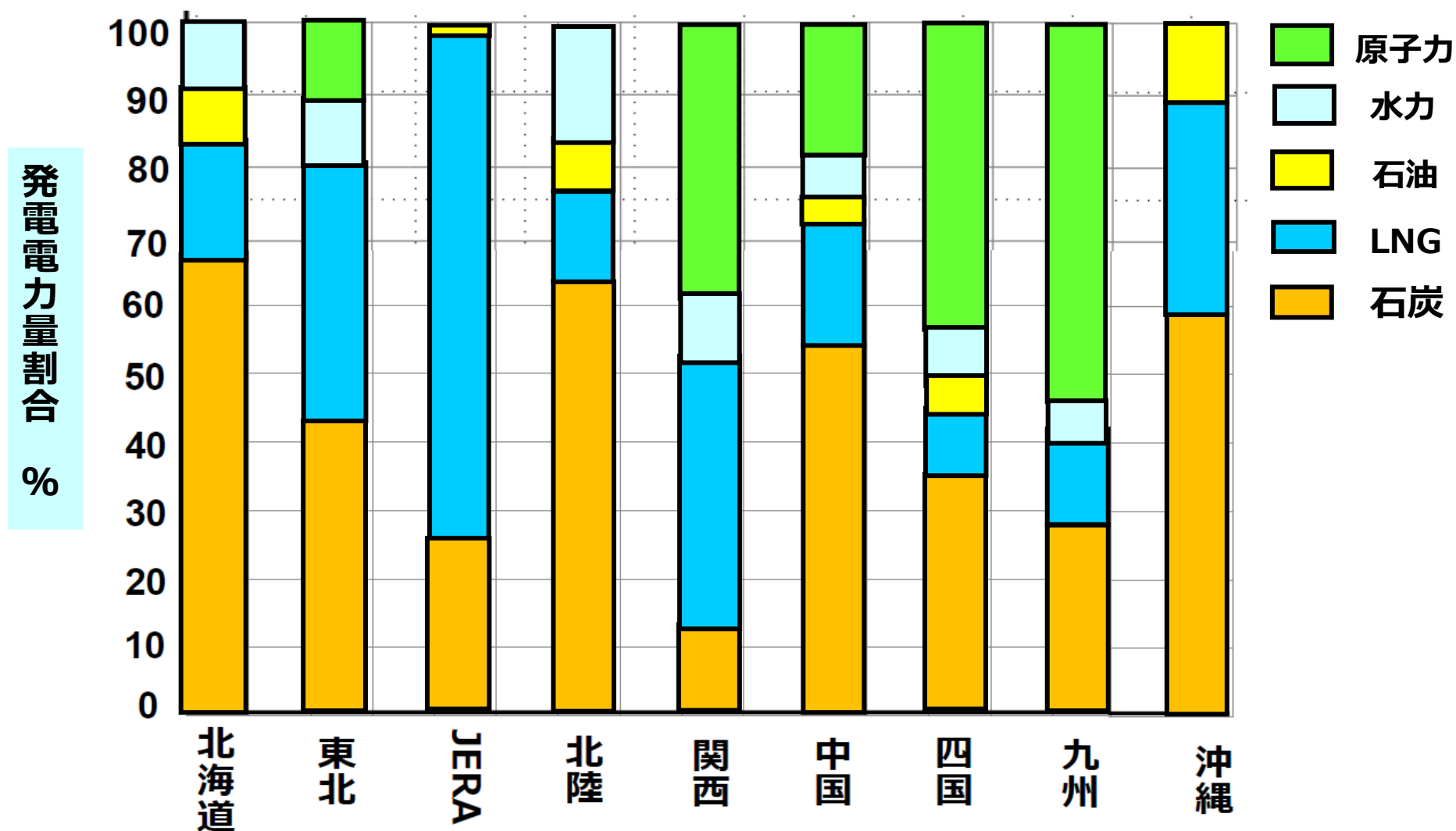
出典：2024年12月27日 電気新聞より。2025年2月の燃料費調整額に基づく標準家庭1か月の電気料金（標準の基準は各社で異なる）

電力料金比較例(月額)



出典：2025年2月電気料金（標準家庭1か月当り、）燃料費調整後、電気新聞(2024.12.27)より

● 各社発電内訳実績例（2025年1月）

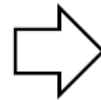


出典：2025年5月12日 電気新聞より

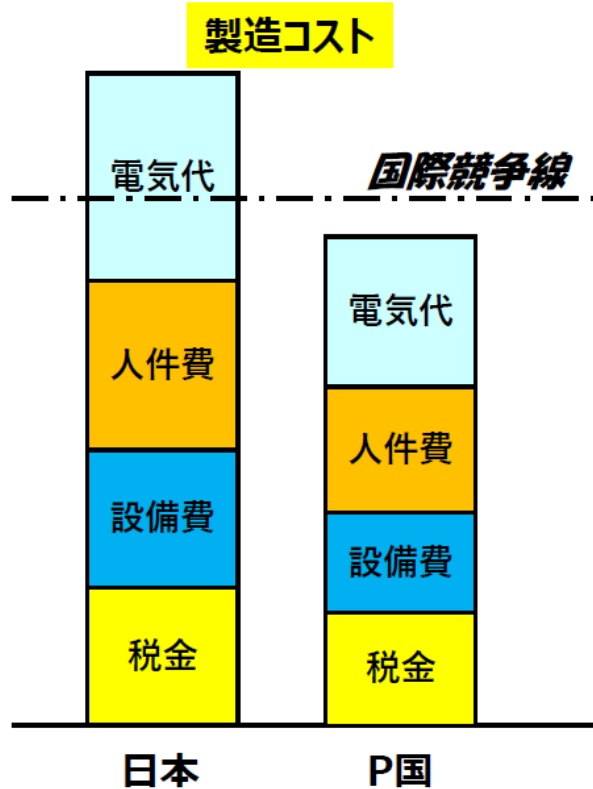
半導体工場での電力コストの重要性

大量生産製品の宿命

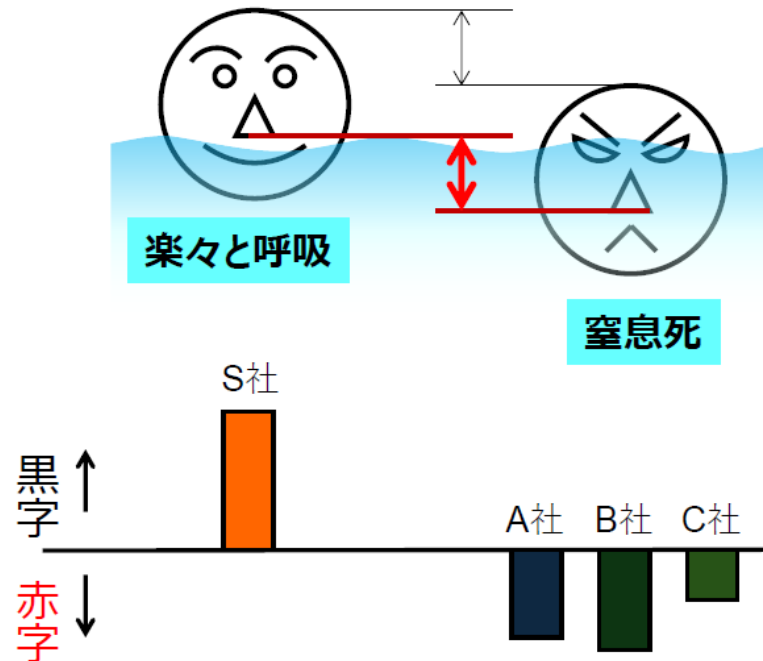
コストがすべてを決める!



勝者がすべてを取る!
Winner takes all!



勝者と敗者の差は僅か!



かつて日本が工業化の先鞭をつけた半導体、太陽電池、液晶...⇒すべて市場を奪われた!

産業空洞化の懸念

- **電気料金高騰の最大の影響**
 - **製造業の国外脱出と大幅な貿易赤字**
 - **工業製品の輸出が国の経済の根幹をなす日本にとっては致命的打撃**



- **火力発電の活用で電気料金上昇を最小限にすべし**

(参考) 海外の状況：皆、自国のことで必死。日本は自衛策を自ら構築しなければならない

ドイツ：電力料金高騰による国内産業空洞化が深刻

EU：排出権取引、EBAMなど国際的縛りで優位を狙う

米国：関税など国際的圧力で製造業再興を狙う：MAGA

§2. 新しい火力 : FlexPower

2-1 水力並みの調整力 : 高速負荷変化と極低最低負荷

2-2 あらゆる燃料が使用可能

2-3 短納期・安い建設費 (SDT/FMC)

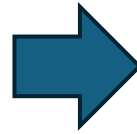
2-4 CO₂削減

SDT : Short Delivery Time

FMC: Fast Modular Construction

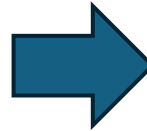
新しい火力発電の必要条件

- 高速負荷変化
- 低い最低負荷



- 交流電力網との共生
- 系統安定化による停電防止

- 多種燃料利用
- 自由な燃料選択



- 最も安い燃料の選択
(化石燃料、合成燃料共)
- エネルギー安全保障

- 短納期
- 安い建設費



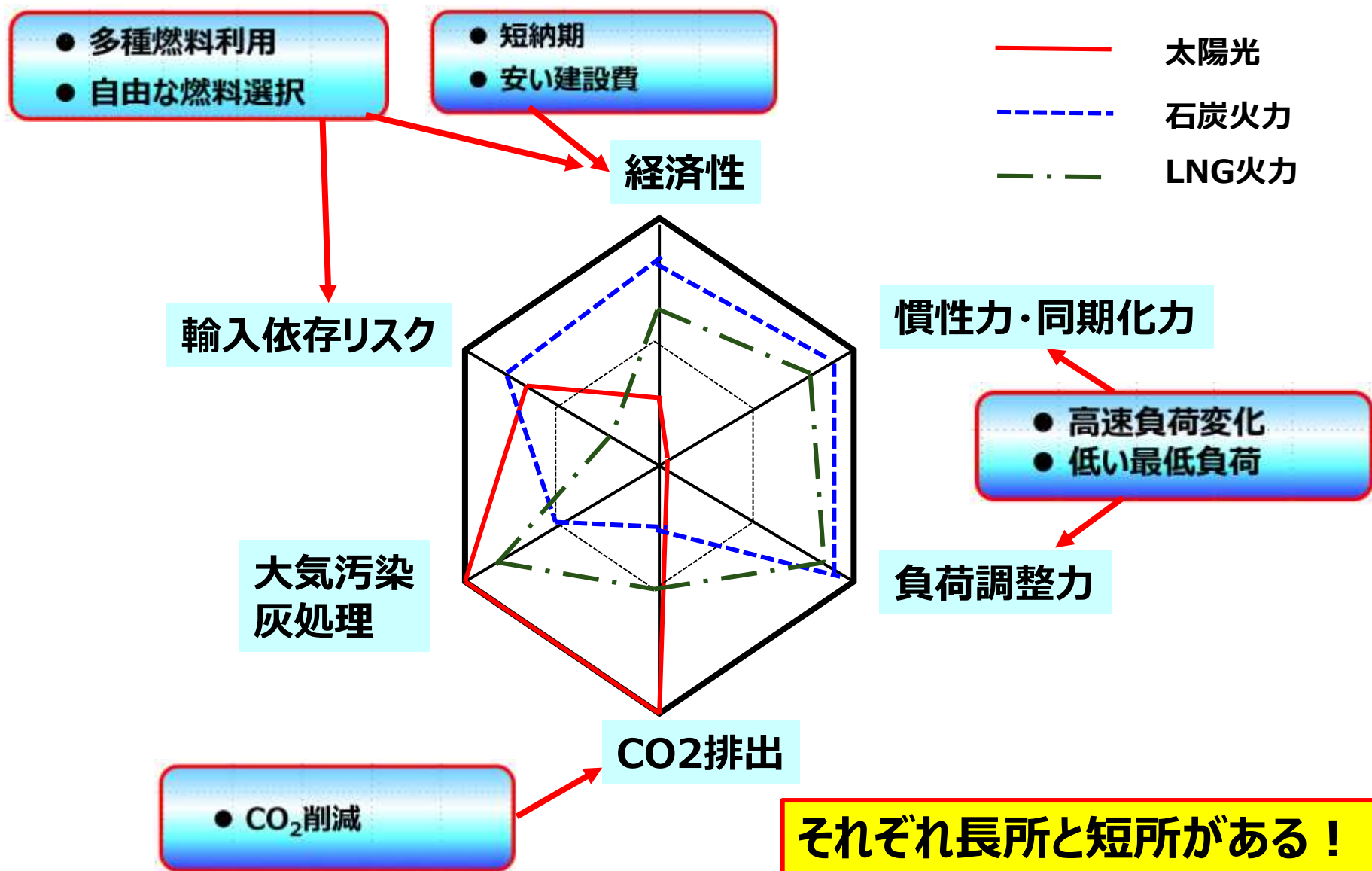
- モジュール工法(FMC)による
納期短縮と建設費削減

- CO₂削減



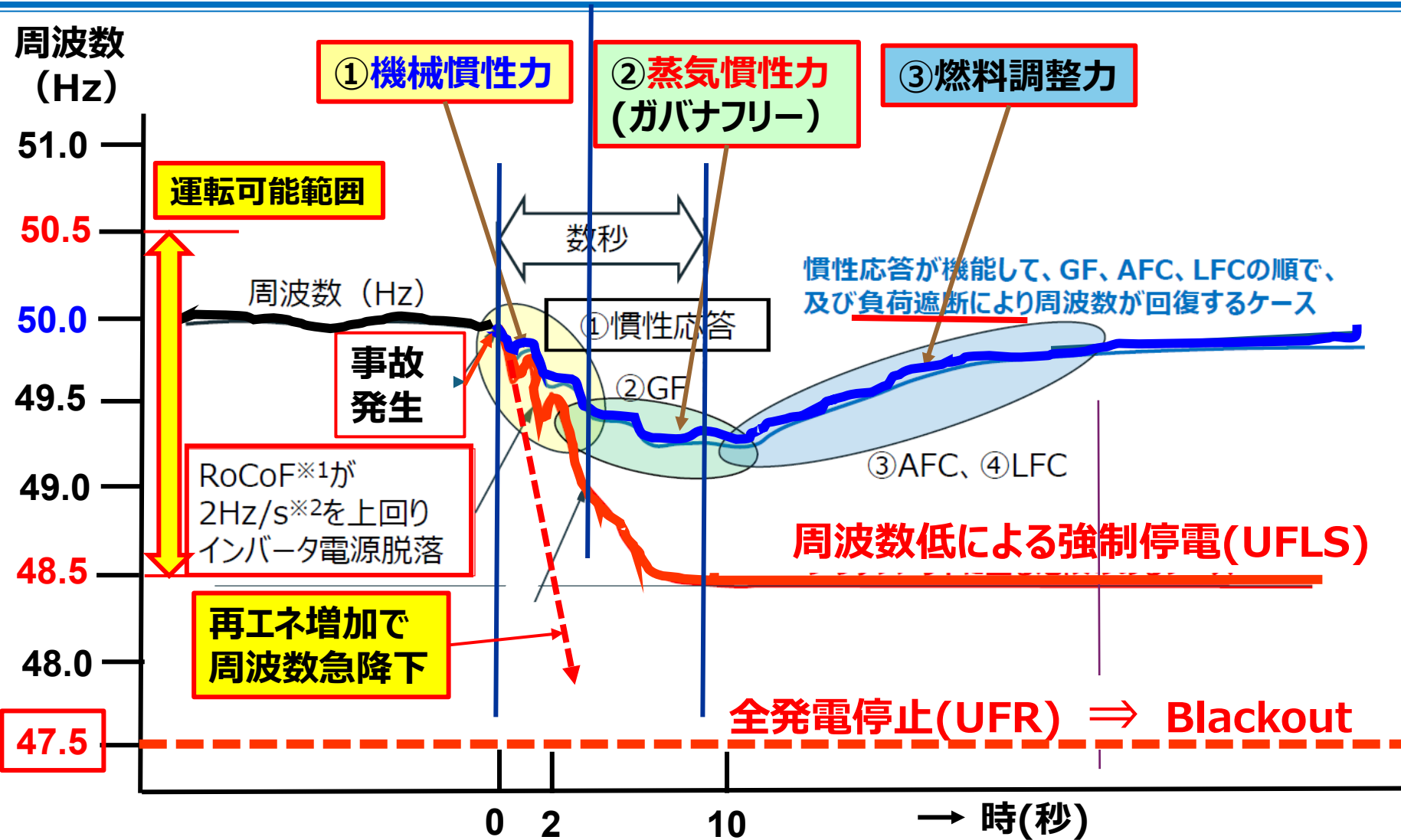
- CO₂排出原単位(g-CO₂/kWh)
の削減
- 石炭利用なら”HyGreen Project”

● 発電設備として要求される性能



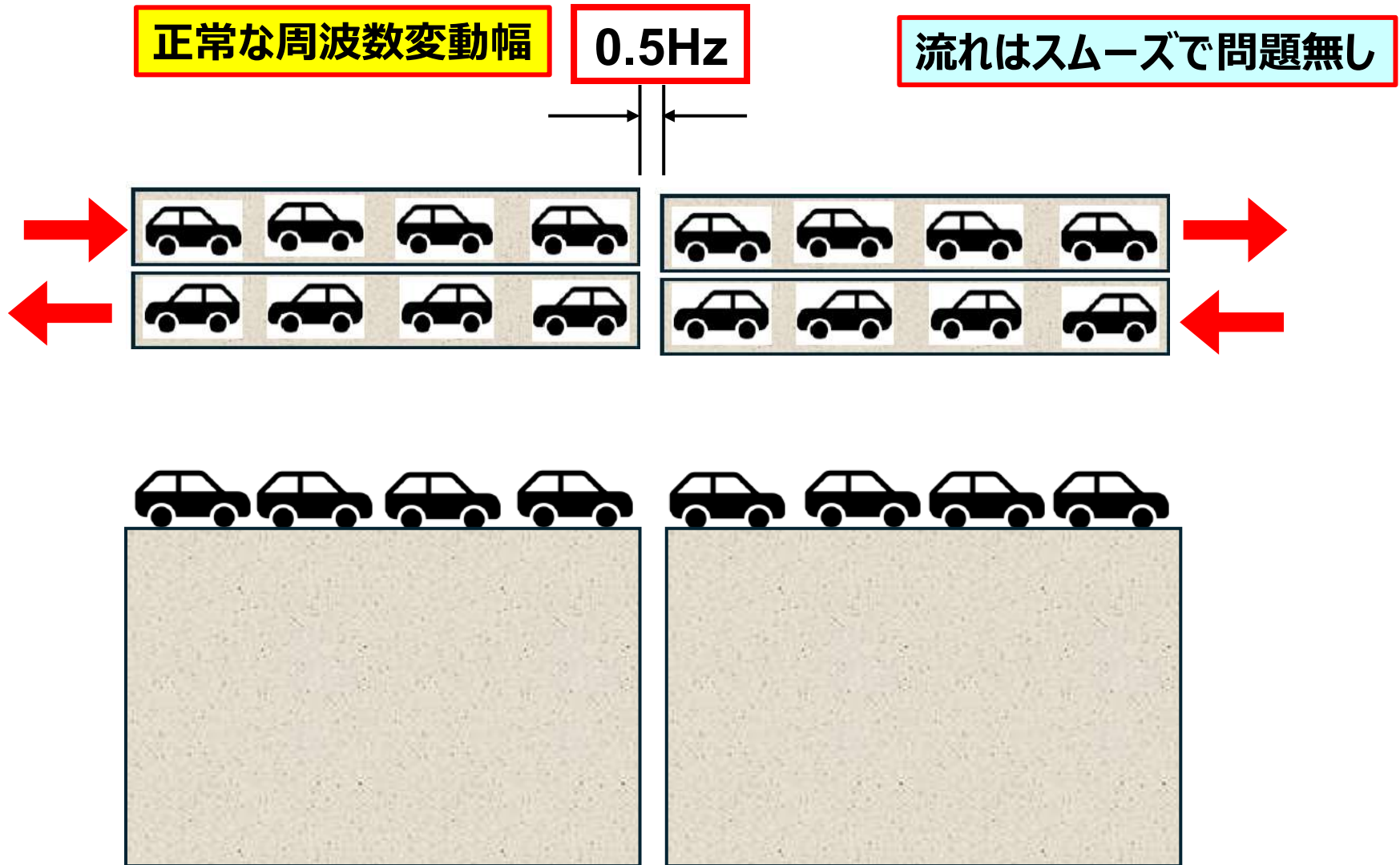
それぞれ長所と短所がある！

交流電力網の特徴⇒秒単位の周波数制御が必須！

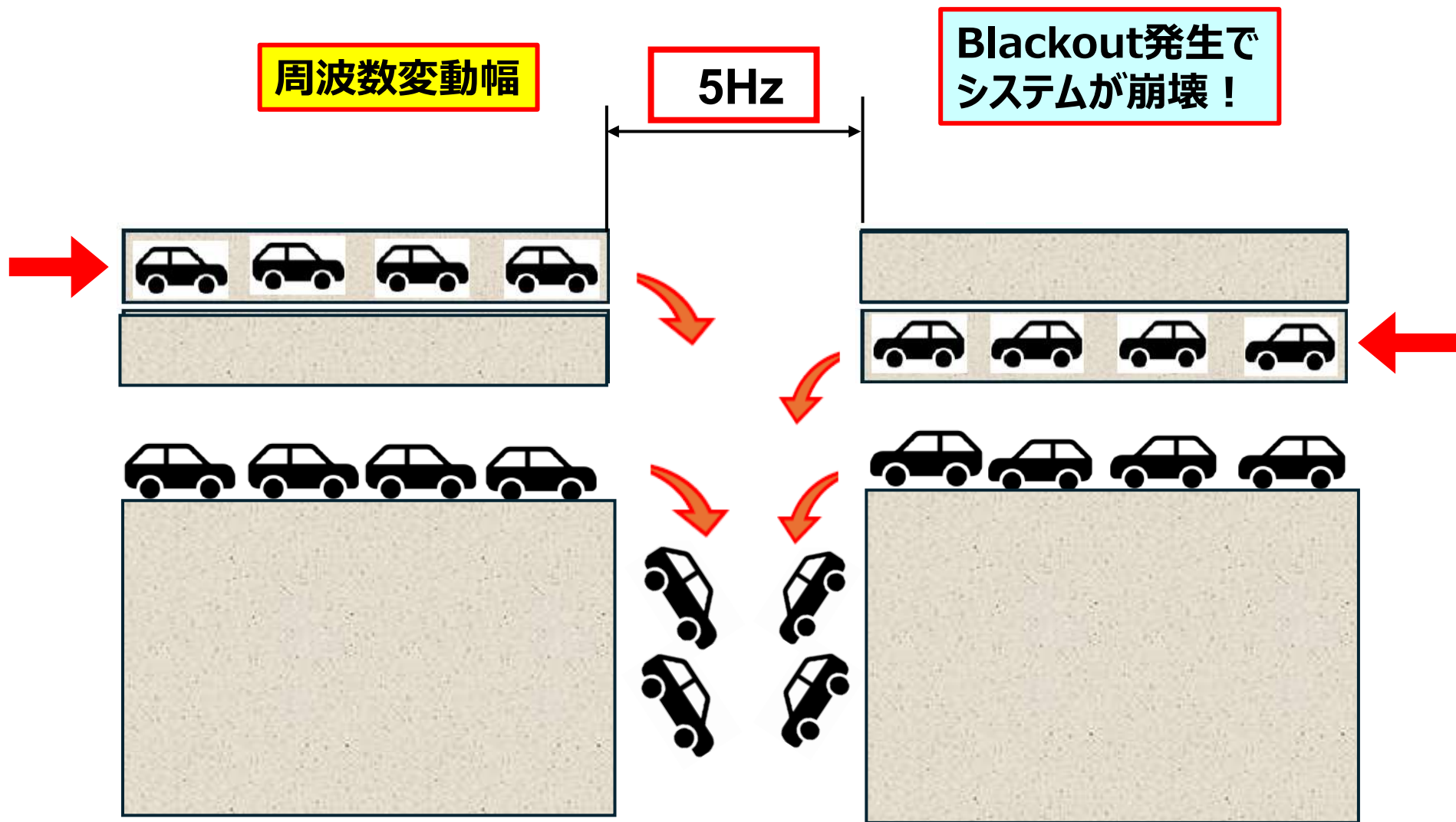


● 秒単位で需要と供給のバランスを取らねばならない！

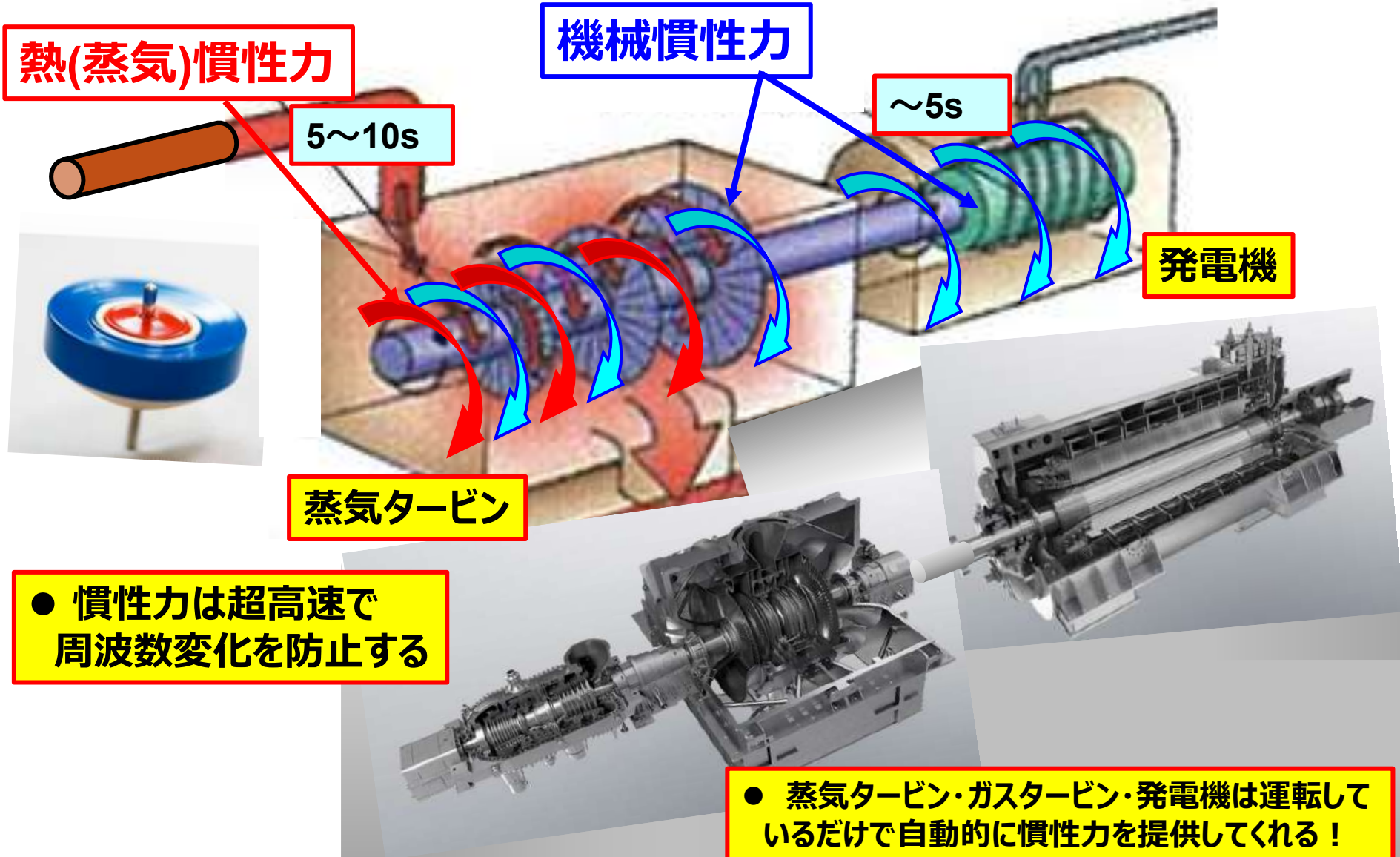
● 正常な交流電力網



● 交流電力網は僅か5%の変動で崩壊！



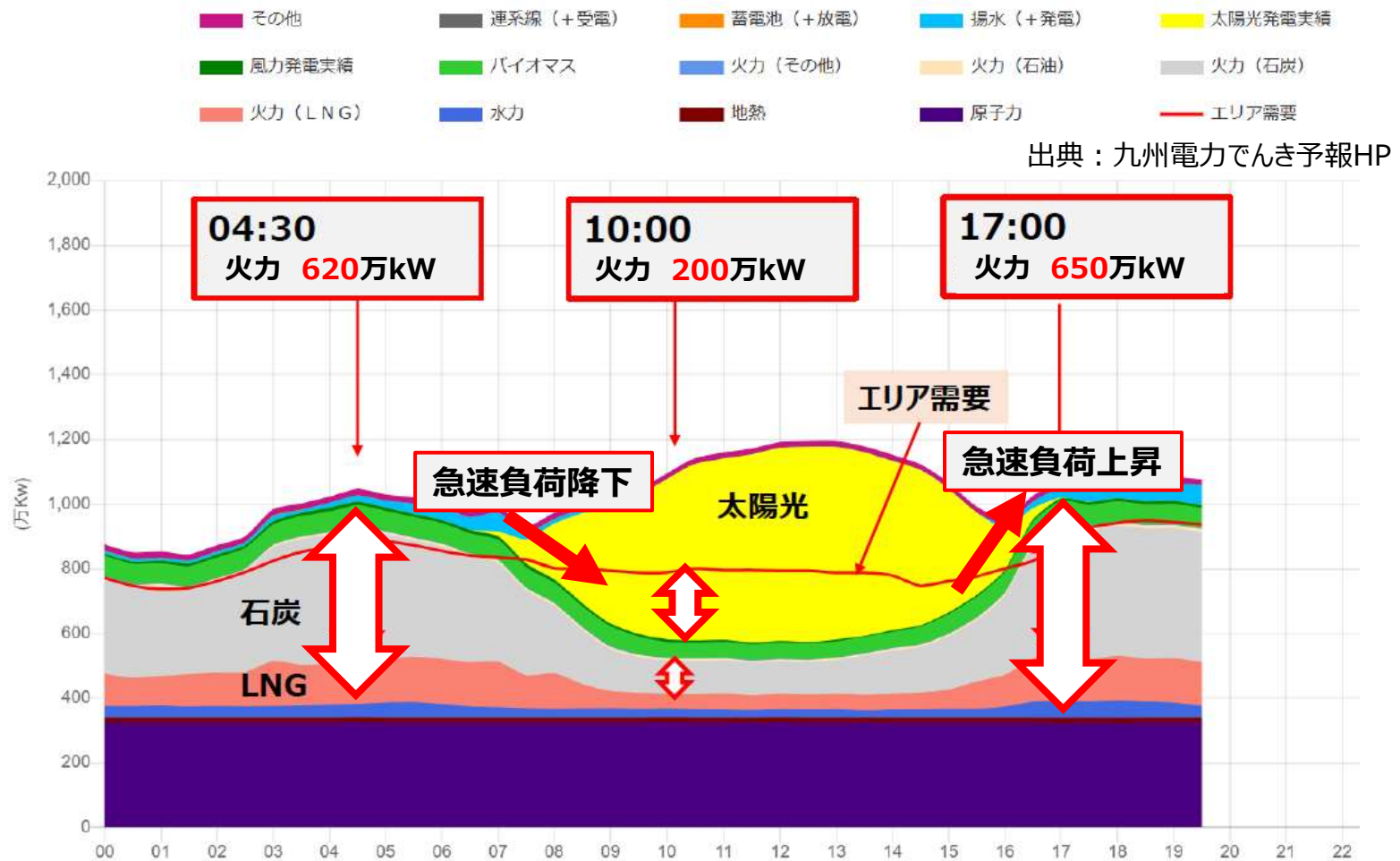
● 慣性力 = 機械慣性力 + 熱(蒸気)慣性力



● 火力が直面する過酷な現実

最強の発電コストの九州も過剰な太陽光で苦勞！

2024年11月24日（日）：九州地域需給実績



これからの火力設計の必要条件

1. 速い負荷変化率：15%/分
2. 超極低負荷運転能力：5% または所内単独



1. とにかく止めないこと---低負荷連続運転と起動停止(DSS)とは熱疲労の点で決定的な差あり
2. 事業用ボイラの損傷原因の50%は熱疲労
3. 大型の石炭火力でDSSをやると熱疲労による破壊が深刻
4. 対象箇所が数百か所に及ぶので、補修にも数か月の停止を要する
5. これが頻発すると“あてにならない火力”の烙印を押される

● Flex-USC・Flex-GTCCの概要

		Flex-USC（BTG）	Flex-GTCC		
システム構成		B-ST-G	GT-HRSG-ST-G		
使用可能燃料	化石燃料	石炭・天然ガス・油・残渣油	天然ガス・軽質油		
	CN燃料	水素・アンモニア・バイオマス	水素・アンモニア・e-methane		
建設工法		モジュール工法	モジュール工法		
高効率化		ST：650℃目標	GT:1650℃ ST:650℃目標		
		Step1	Step2	Step1	Step2
負荷変化率(%/分)		5	15	5	15
最低負荷(%)		15	5 (または所内単独)	15	5 (または所内単独)
蓄熱装置		-	有	-	有

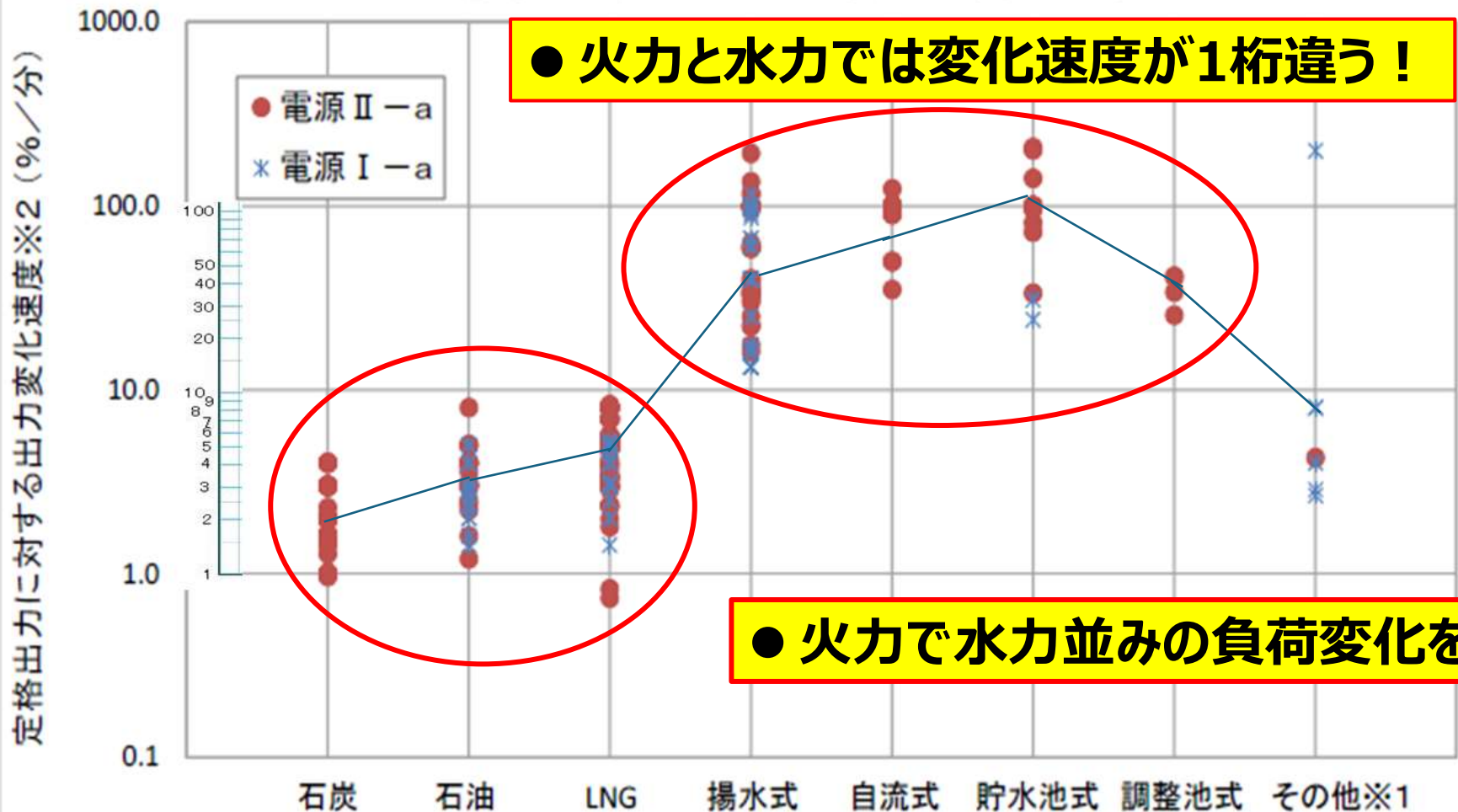
(備考)

1. Step2の初号機は国家プロジェクトとして国内で実施(GX予算活用)
2. 発展途上国への支援は、まずStep1を実施し、将来Step2に改造

● 水力は高速出力変化が可能！

電源Ⅰ-a、Ⅱ-aの出力変化速度の分布

● 火力と水力では変化速度が1桁違う！



● 火力で水力並みの負荷変化を！

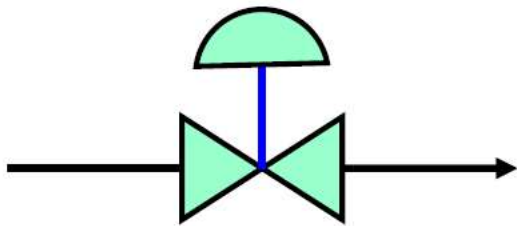
[備考] ※1: コークスガス/LNGやLNG/重原油等の混焼発電設備等
※2: LFC(AFC)変化速度。出力帯等により出力変化速度が異なる場合は最大の出力変化速度。

出典：OCCTO資料より

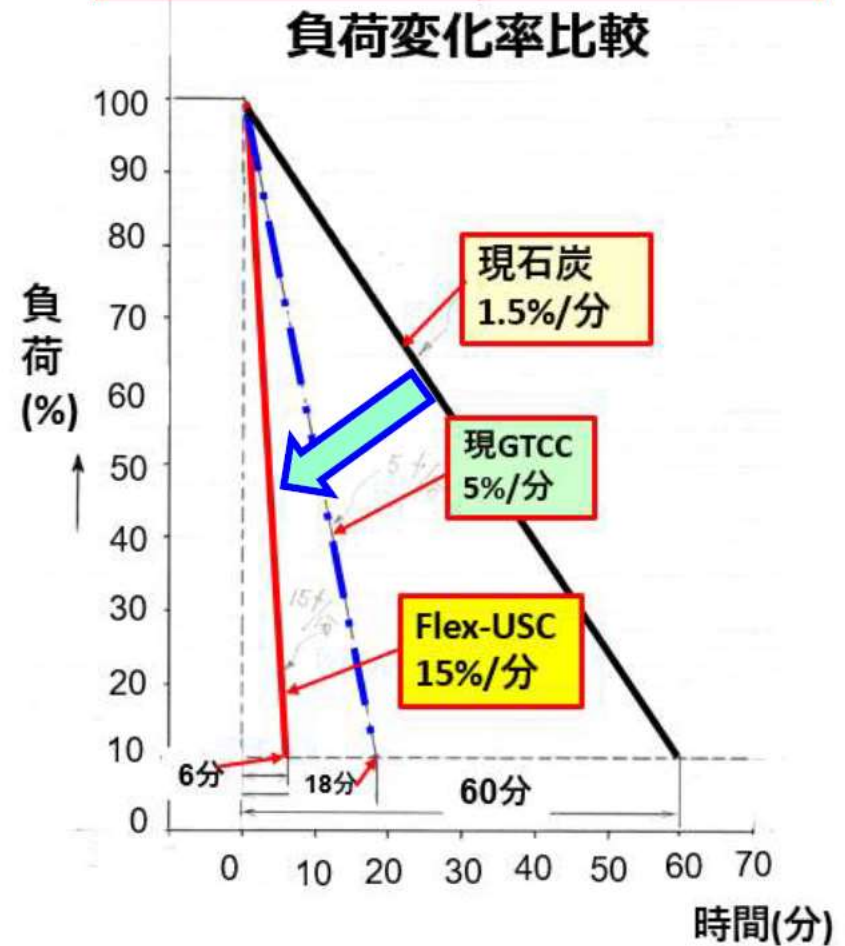
Flex-USC : 負荷変化率15%/分、最低負荷5%

- 日本が世界で初めてIGCCに採用した高濃度搬送技術を通常の微粉炭焼き石炭火力に適用すると、**15%/分の高速負荷変化が可能となる！**

石炭の流量制御を電動弁で制御
→ 高速流量変化が可能に！



- 現在の微粉炭流量制御速度を10倍に上げられる！



従来形火力発電プラントの負荷変化率の制限

ボイラ（燃料により設計が異なる）

蒸気タービン(燃料による設計差なし)

燃料系

蒸気系

石炭バンカー

石炭

給炭機

微粉炭供給管

粉碎ミル

一次送風機

石油

天然
ガス

流量制御弁

気体または液体

固気二相流

高温厚肉部の温度変化率

寿命消費

HP

IP

LP

火力発電プラント(BTG)の負荷変化率は蒸気タービンではなくボイラ側で決まる

石炭火力で実現するための施策

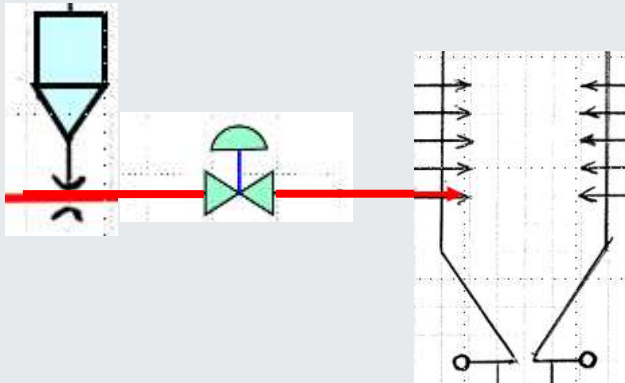
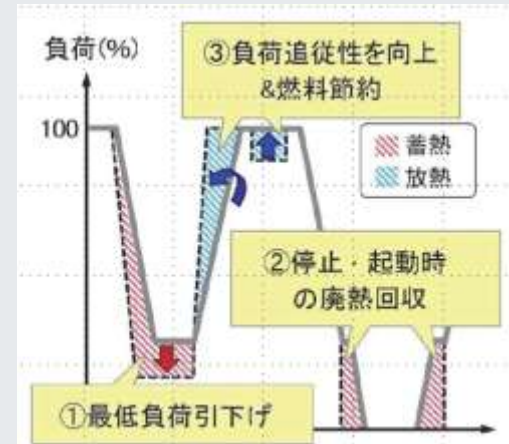
● 負荷変化率15%/分



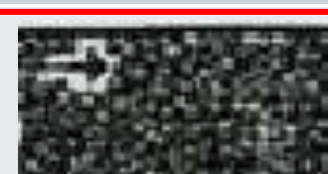
● 最低負荷 5%



- これによってDSS、WSSが減り、疲労破壊を大幅に低減可能
- また起動・停止に伴う熱損失、時間損失が低減

	燃料系	蒸気系
主な改造内容	高濃度搬送システムに変更	蓄熱装置設置
系統・構成		

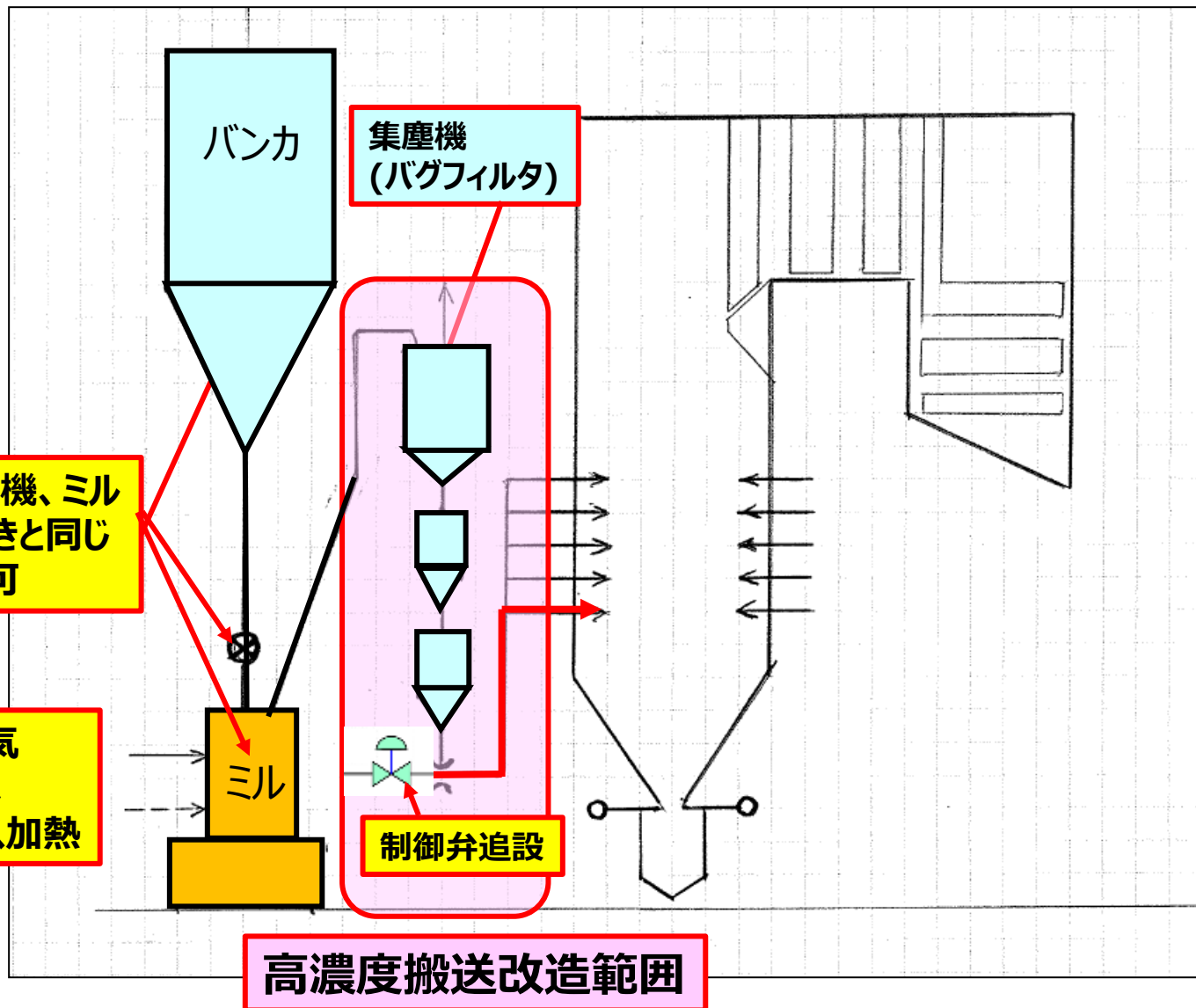
➤ 固気2相流の搬送形態

区分	流動形態		流速 (m/s)	密度 (kg/m)	適用例
A	低濃度均一流		10～30	1～25	・世界中の微粉炭 焚き火力に採用
B	摺動流		5～20	15～60	
C	団塊摺動流		5～15	15～120	
D	高濃度均一流		1～10 (Aの1/10)	20～450 (Aの10～ 20倍)	・弁による流量制御 ・日本のIGCCに採用
E	プラグ流		0.1～5	25～450	

● 逆転の発想→高濃度均一流の実用化!

摩耗量 $\propto w^{3.5}$

➤ 高濃度搬送システム改造範囲



● Flex-USC : どんな燃料も焚ける + モジュール工法(FMC)



ANGEL BOILER

目標工期：
現地着工～運開：24か月

蒸気タービン

Side-by-side Layout
主蒸気管・再熱蒸気管
長さを最短に

ボイラ

主蒸気管

再熱蒸気管

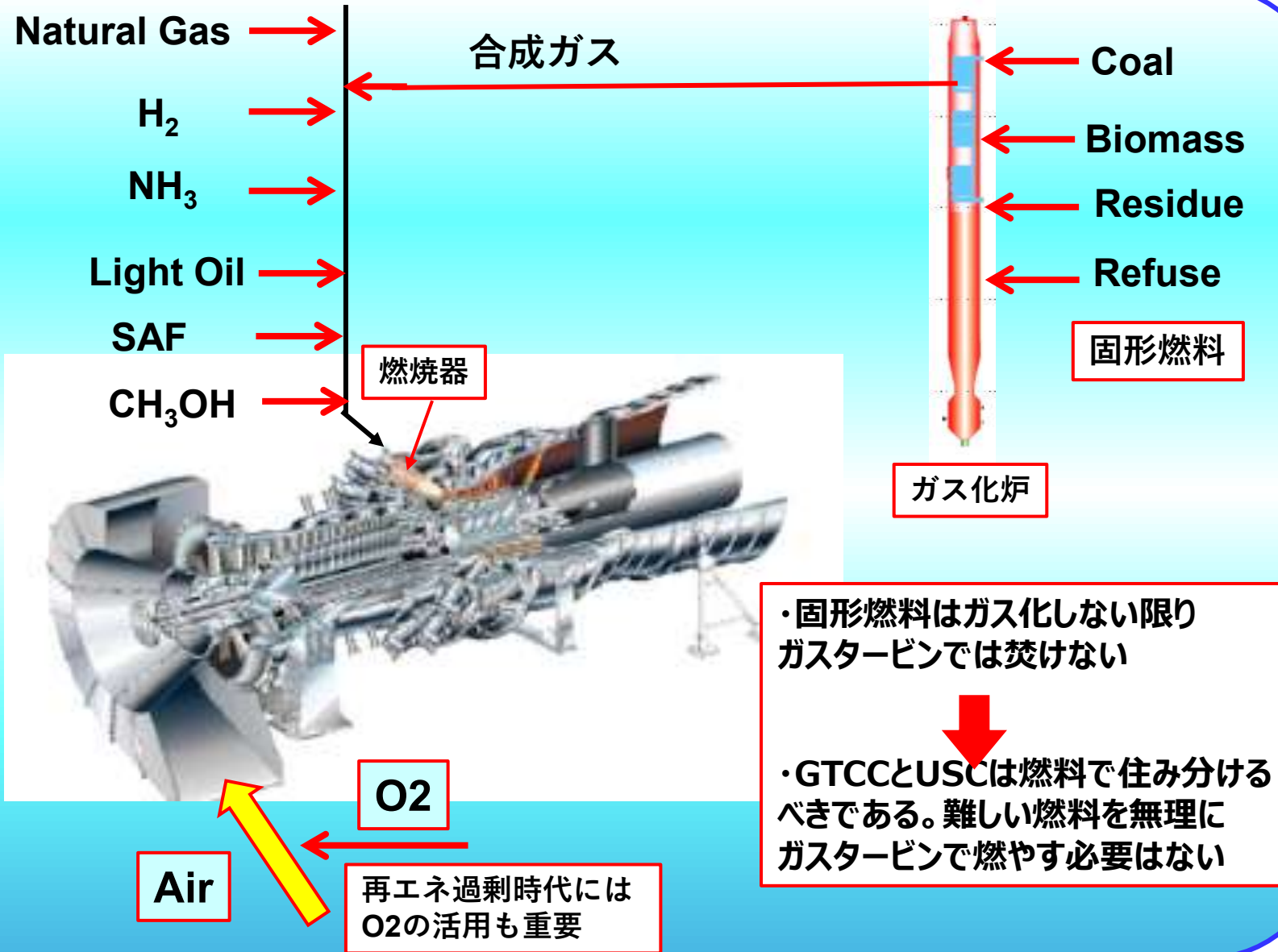
- Coal
- Biomass
- Oil
- Natural Gas
- H₂
- NH₃
- CH₃OH

多種燃料対応
(Multi-burner)

SH・RH・ECON

モジュール工法
(工場で製作し現地に搬入)

Flex-GTCC



● FlexPower の特徴

1. **高速機動性**：再エネの大量導入に対応
→ **プラントを止めない（火を消さない）ことが重要**
 - ① 負荷変化率：15%/分
 - ② 最低負荷：5%または所内単独
2. **燃料多様性**：化石燃料と合成燃料共に使用可
 - ① 天然ガス、水素、アンモニア、バイオマスが混焼可能な石炭火力
 - ② 天然ガス、石炭ガス、水素、アンモニアが燃焼可能なGTCC
3. **徹底した設備費削減で稼働率低にも対応**：
 - ① モジュール工法により現地工事最少化
 - ② 鉄骨吊り下げ構造を止め、自立型を採用

● 火力の重要性：石炭もLNGも必要！



Don't put all your eggs in one basket!



The Ants and the Grasshopper

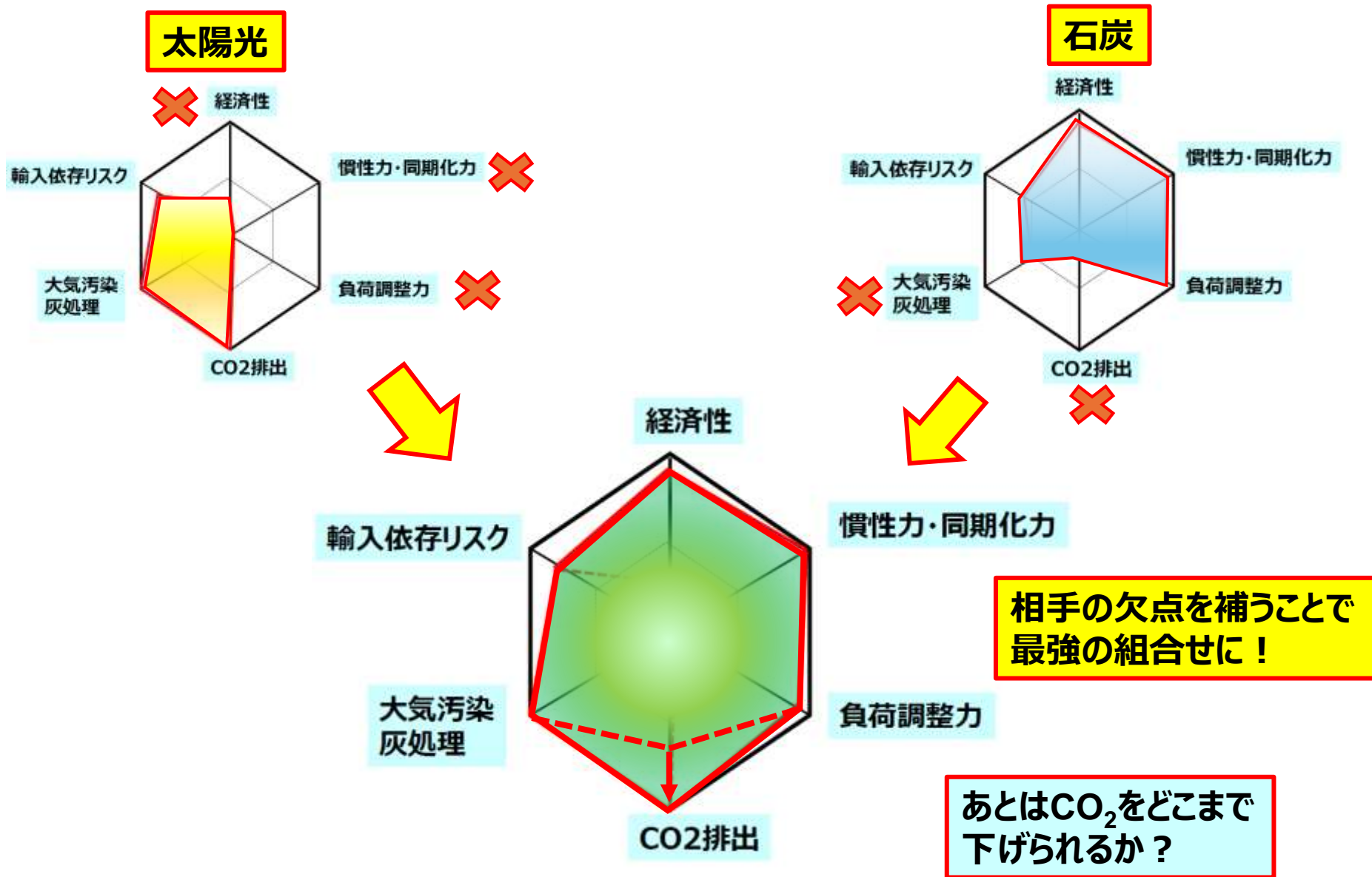
● LNGは戦略商品である!

- LNGは強者のみが利用できる商品である!
- 弱者になった途端に閉め出される!

故電発坂梨副社長の持論：

- ① **石炭は完全な流通性を持つ商品**であるので経済原理が成り立つ
 - ・ 輸送・貯蔵が自由、産地が世界中に存在
- ② **LNGは硬直性があり、自由に流通できない**、(政治的な)商品である
 - ・ 巨額の資金を持つ人のみが参画できる：液化基地・LNGタンカ・気化基地の3点セットが必要。1プロジェクトで1兆円の資金が必要
 - ・ 資金確保が大前提なので銀行の融資成立が最大の鍵(FIDが必須条件)
 - ・ 長期保存ができない(現状、2週間程度)
 - ・ 価格がパイプラインガスより高い⇒LNGにすると価格が4倍に！
- ③ 資源の乏しい日本は一つの燃料に絞るのは危険---オイルショックの教訓
⇒複数の選択肢が必要---**石炭とLNGの両方が必要**

● 太陽光を救うのは石炭火力である！



CO₂削減とHyGreen Project

- ・石炭火力の残る課題はCO₂の削減
- ・CO₂問題さえ解決すれば“太陽光と石炭火力は最強の組合せ”になる。
- ・日本が世界に誇るIGCC技術と燃料電池(SOFC)技術の活用でこの問題を一気に解決可能
→HyGreen Projectによる明るい未来
- ・日本のみならず東南アジアの発展途上国にも救世主となる

§3. 究極の石炭火力：HyGreen Project

- 3-1 CO2排出原単位を天然ガス以下に**
- 3-2 IGCC技術と燃料電池技術を融合**
- 3-3 日本独自の技術で世界に貢献を**

ドイツの失敗：最新鋭の石炭火力を破壊！

Moorburg Power Station

- ・ $2 \times 820\text{MW}$ Coal fired USC Plant : Hamburg, Germany



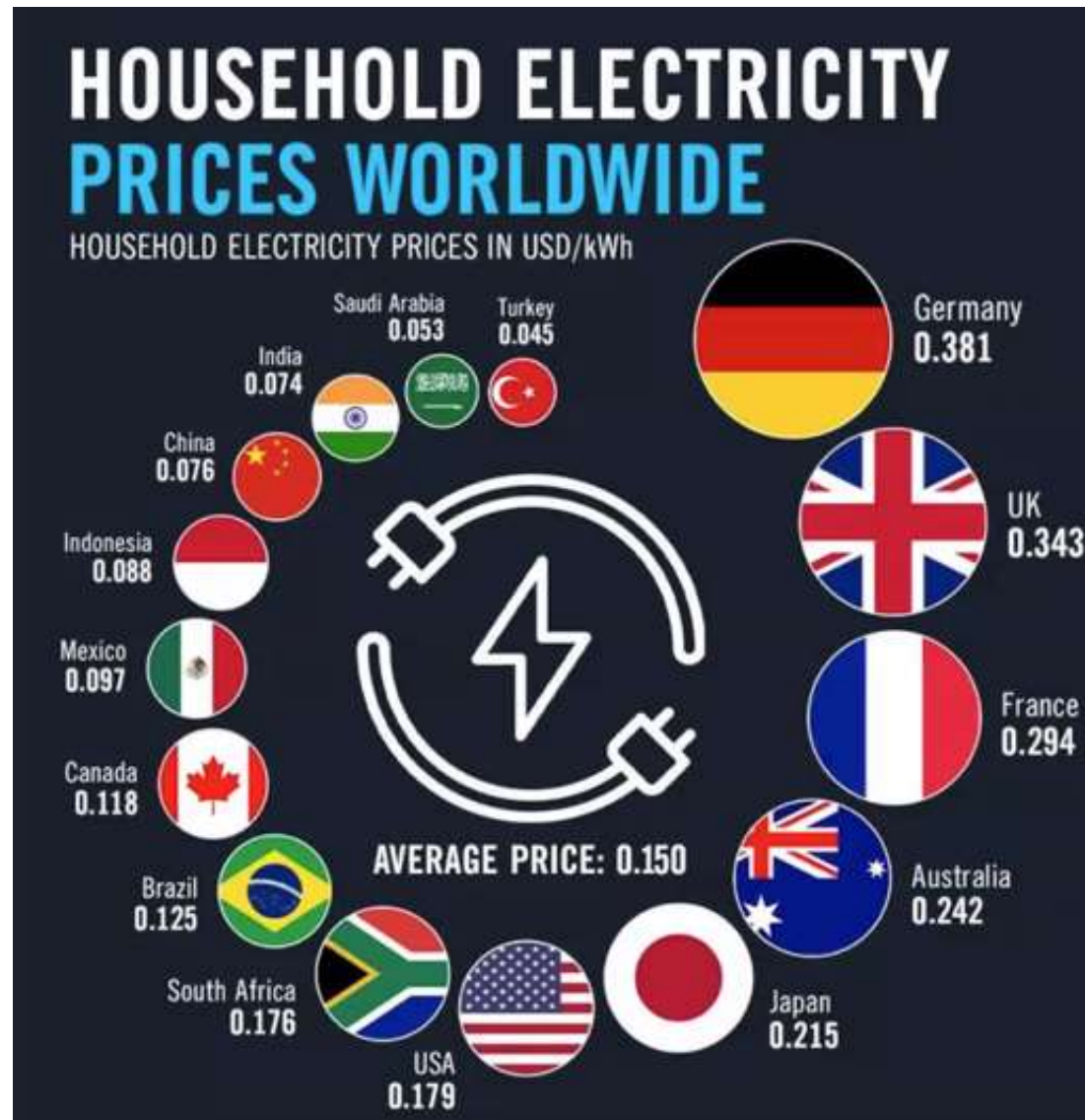
- ・ 最新鋭のUSC高効率石炭火力
- ・ 営業運転開始：2015年11月

ドイツの失敗：最新鋭の石炭火力を破壊！



Moorburg Plant was demolished!
November 11, 2024

ドイツの失敗：石炭火力を破壊し電力料金が高騰！



石炭火力をいかに活用するか？

エネ基本文の記載

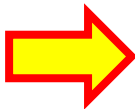
③ 石炭火力発電

石炭火力は現在、電源構成の約3割を占めているが、LNG火力等に比べて温室効果ガスの排出量が多いため、2050年カーボンニュートラルの実現に向けて、電力の安定供給の確保を大前提としつつ、非効率な石炭火力のフェードアウトを着実に推進していくことが喫緊の課題である。

また、アンモニアやCCUS等を活用した脱炭素化を、長期脱炭素電源オークション等を通じて促進する。アンモニアを活用した発電について、燃烧器の技術開発や発電実証をグリーンイノベーション基金も活用しながら進めており、国内外の市場獲得も睨みながら社会実装を目指していく。

加えて、既存火力への追設等を念頭に、脱炭素化を見据え、石炭ガス化複合発電（IGCC）等の次世代の高効率火力発電技術の開発を推進する。

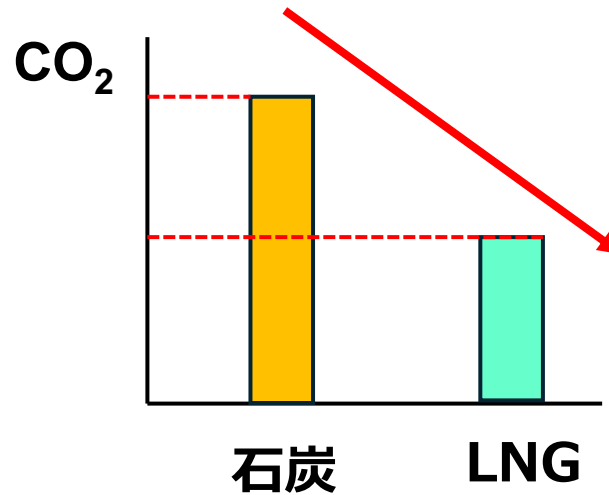
● 石炭火力を活用し、電力コストの上昇を最小にし、CO₂を大幅に削減できないか？



● HyGreen Project: 余剰再エネを利用し、石炭火力のCO₂をLNG火力並みに下げる新技術を提案する

石炭火力のCO₂をLNG以下に!

- CO₂排出レベルをLNG焚き同様にする



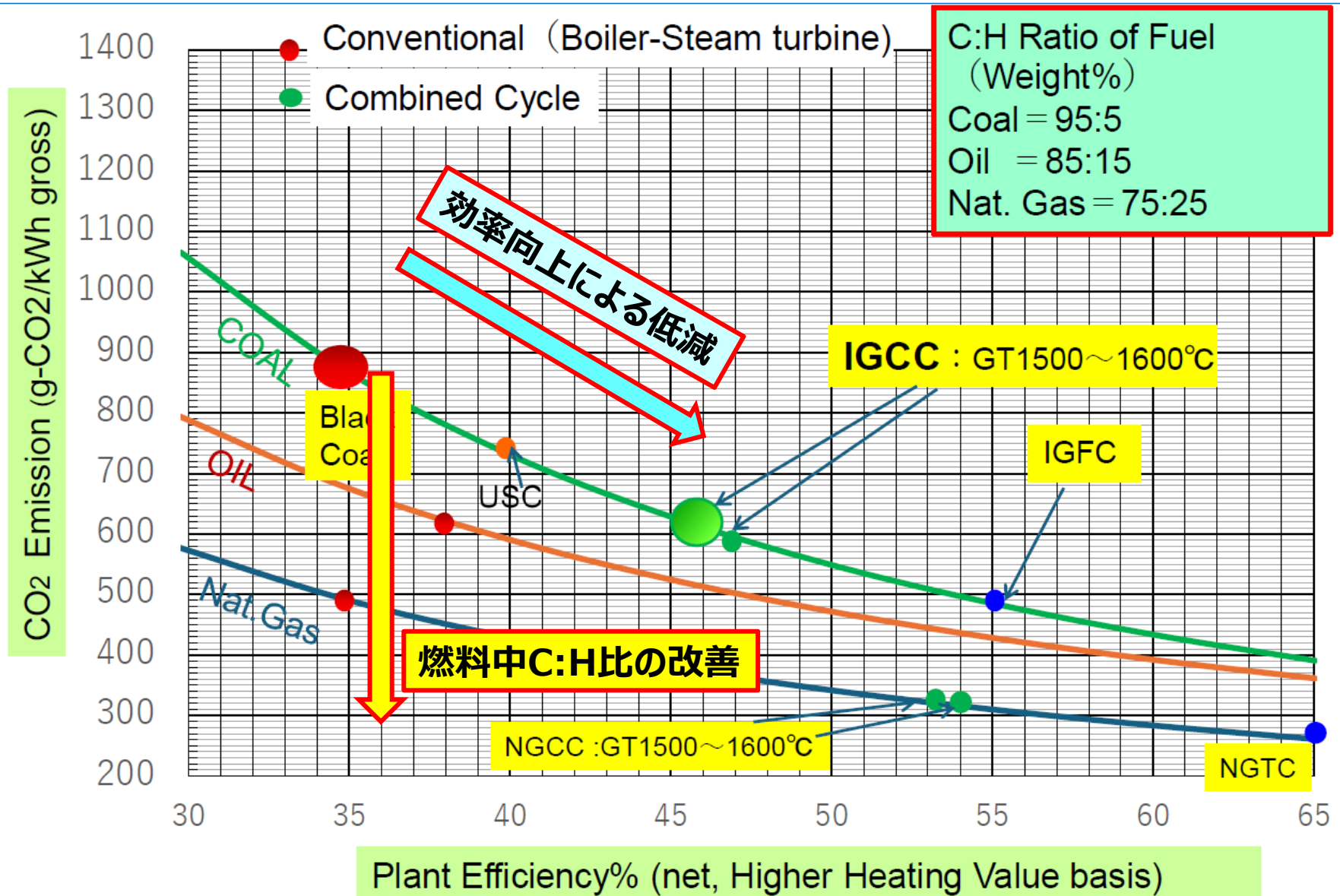
石炭火力



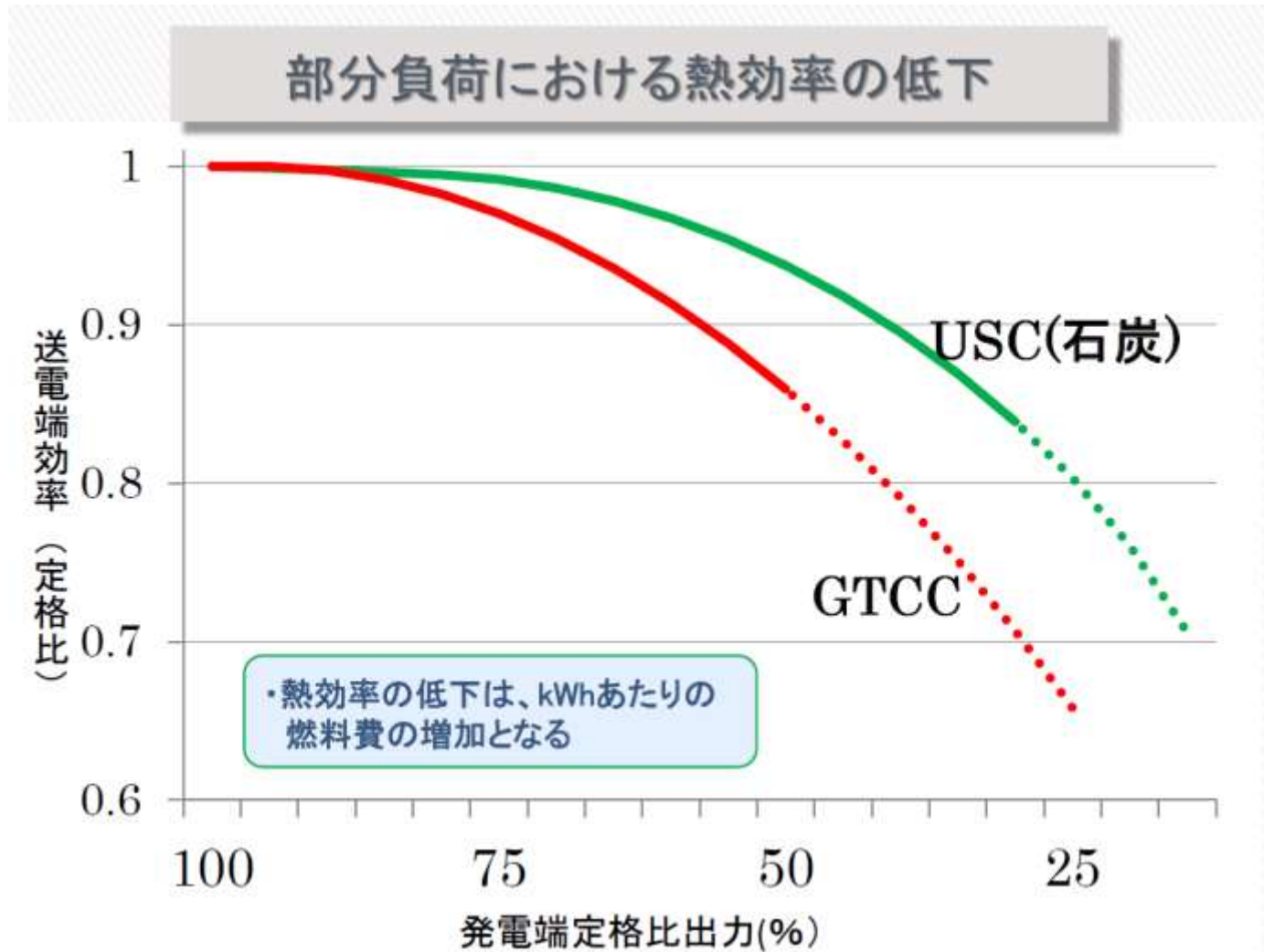
LNGコンバインド火力



燃料中C:H比率低下によるCO₂ 排出原単位の削減

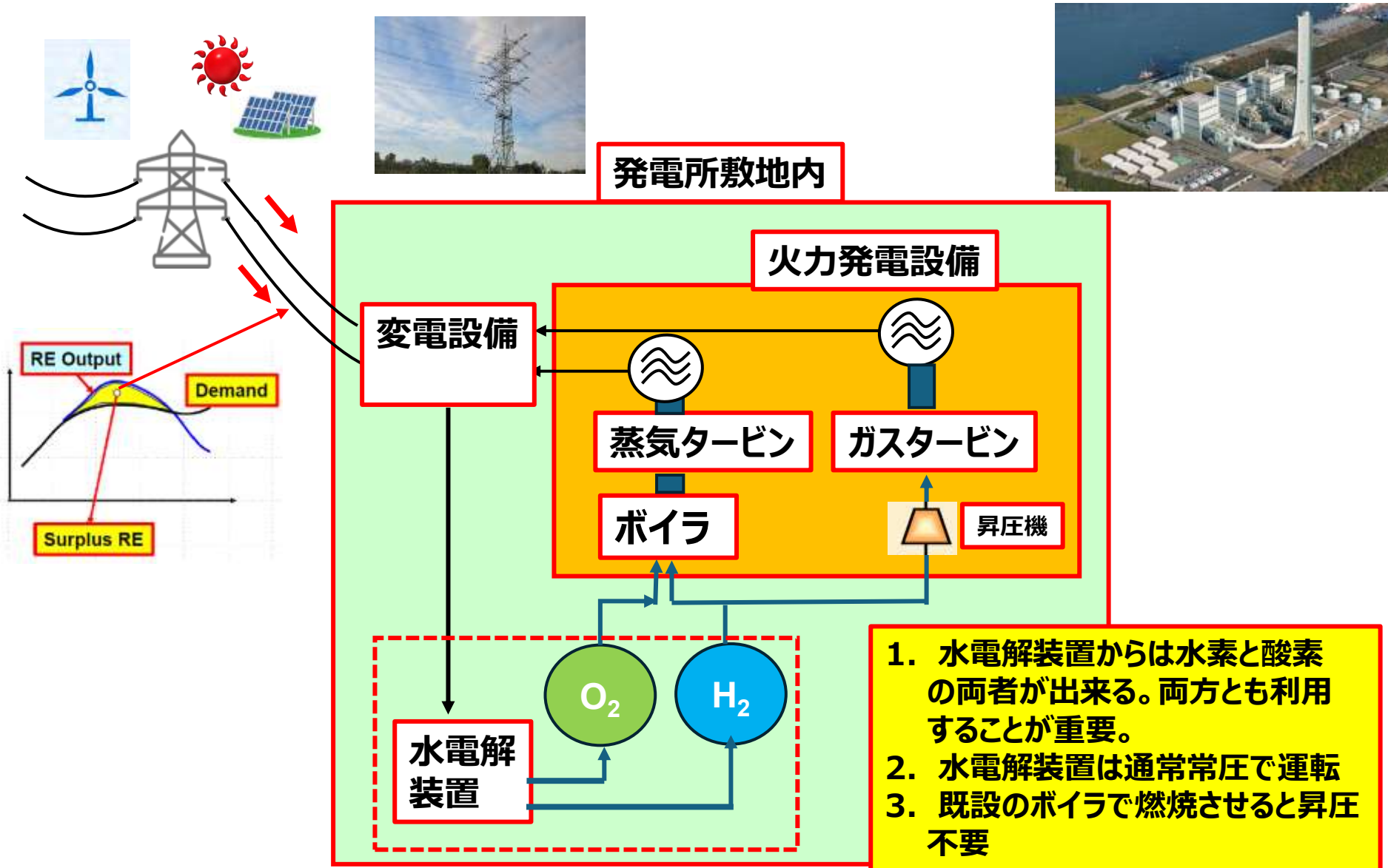


近年の状況変化：定格運転が減少し部分負荷運転が増加



● 部分負荷運転が増加すると、定格負荷の効率向上だけでは不十分！

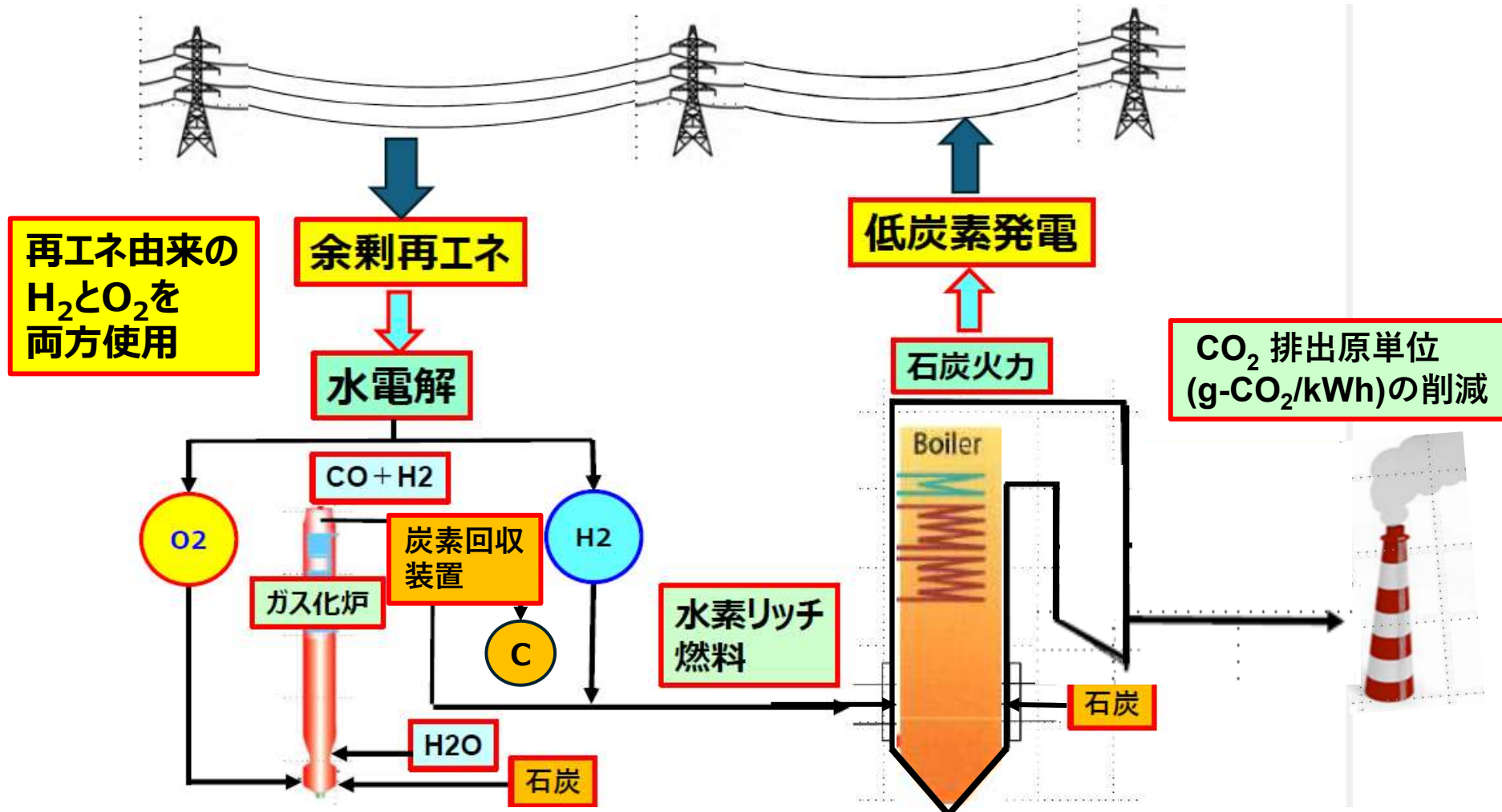
● 膨大な余剰再生エネをいかに活用するか？



➤ HyGreen Project : 石炭火力の救世主に！

HyGreen : Hydrogen Generaton by renewable energy

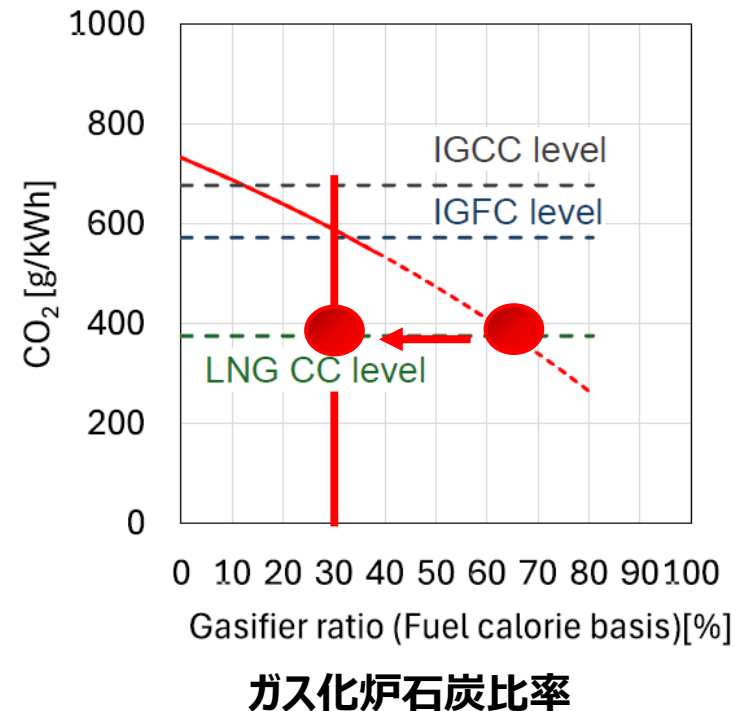
➤ 余剰再エネを利用し、石炭ガス化技術と組合せて、石炭火力のCO₂をLNG以下に！



HyGreen Project の特徴

1. 大量の余剰再エネから電解により H_2 、 O_2 を製造し、これを両方とも使用して、排ガス中の CO_2 原単位を天然ガス並みかそれ以下にする。
2. 燃料は石炭のみで良く、アンモニアも不要
3. 既設・新設いずれの石炭火力にも適用可能
4. ボイラ改造はガス化炉のみで、バンカやミルはそのまま利用可。石炭を酸素でガス化し、この熱で水蒸気から水素を発生させ、水素リッチな合成ガスを製造する。この合成ガスを石炭ボイラで燃焼することにより、排ガス中の CO_2 原単位を削減できる。
5. IGCCに比べ、ガスタービンやガス精製が不要で、ガス化炉も大気圧に近い低圧で設計できるのでコストが安い（IGCCの5分の1以下）。
6. 何時でも石炭専焼が行える。またボイラの所内単独運転やガス化炉のみの運転も可能で柔軟性大
7. 蓄電池の追設よりはるかに安くできる。
8. 将来、大きな CO_2 削減ができるので、日本のみならず発展途上国にも適する→AZECによる東南アジア、BRICSへの石炭火力の輸出が可能になる

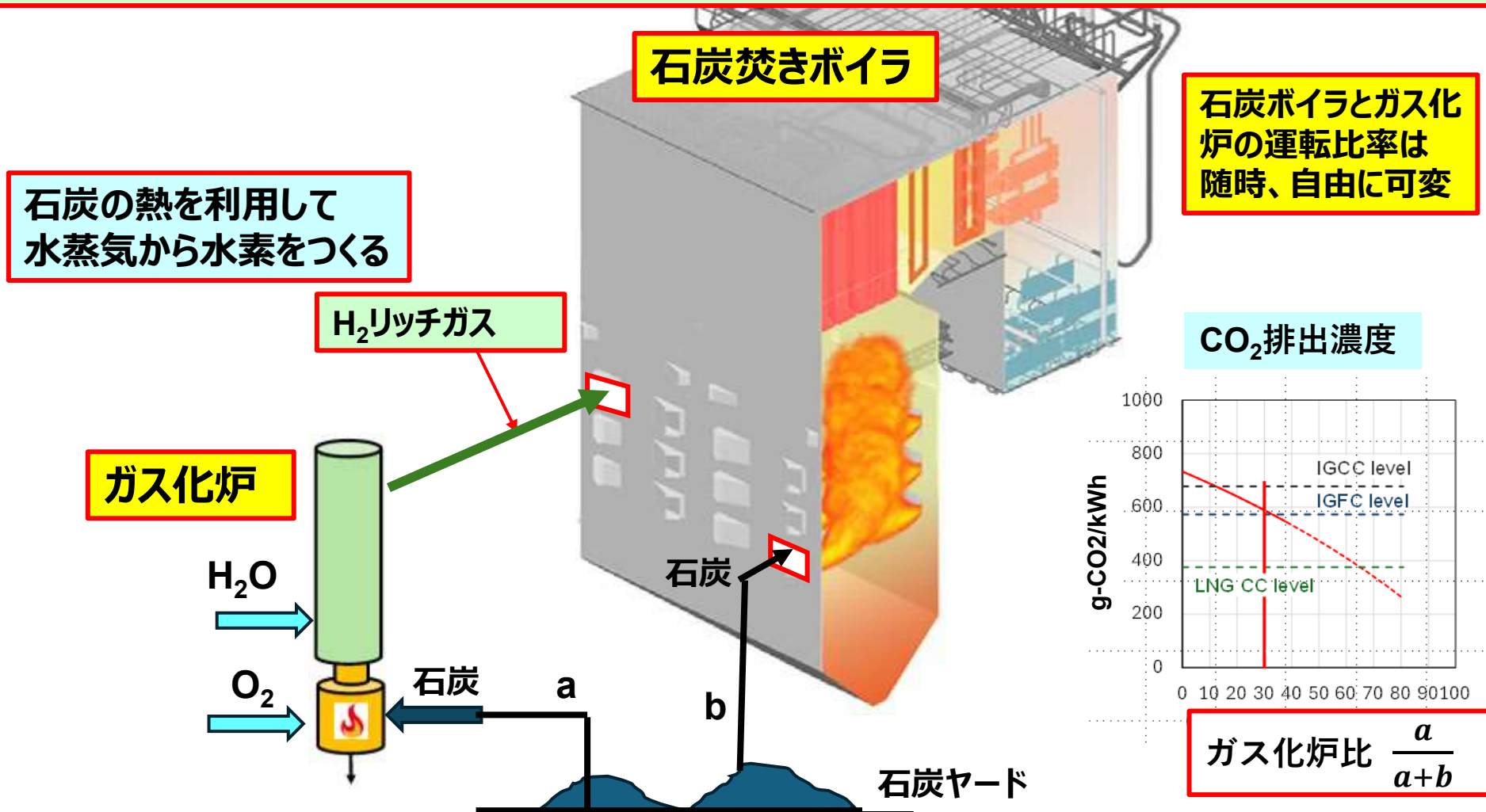
CO_2 削減効果



出典：機械学会 [No.25-13] 第 29 回動力・エネルギー技術シンポジウム[2025.6.5-6, 金沢]

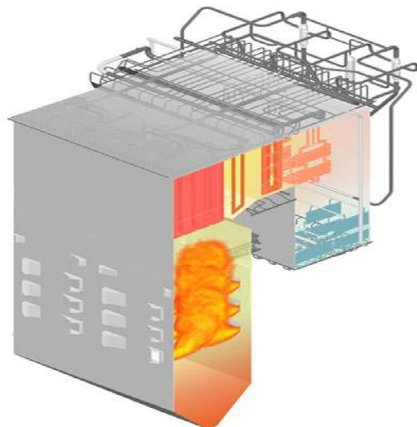
HyGreen Projectの特徴

- ガス化炉を追設し、水素リッチガスを混焼することによって、石炭ボイラのCO₂排出原単位をLNG並みに下げることができる



水素燃焼はボイラの方がはるかに容易！

ボイラ

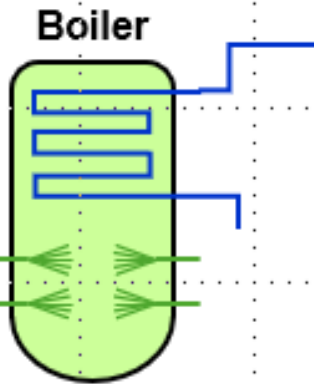


燃焼室圧力：
大気圧

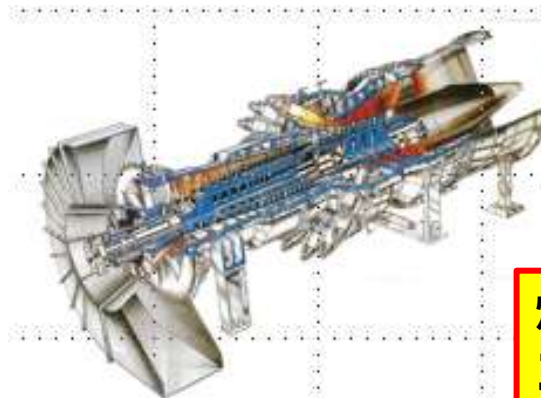
燃料系統

・大気圧も可能
燃料圧力
 $p > 1 \sim 5 \text{ bar}$

・不純物濃度制限無し



ガスタービン

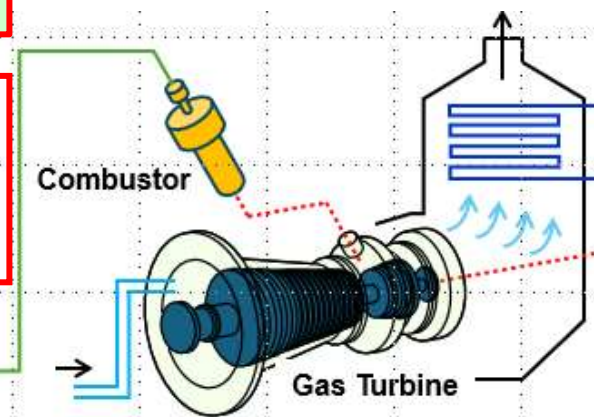


燃焼室圧力：
30気圧以上

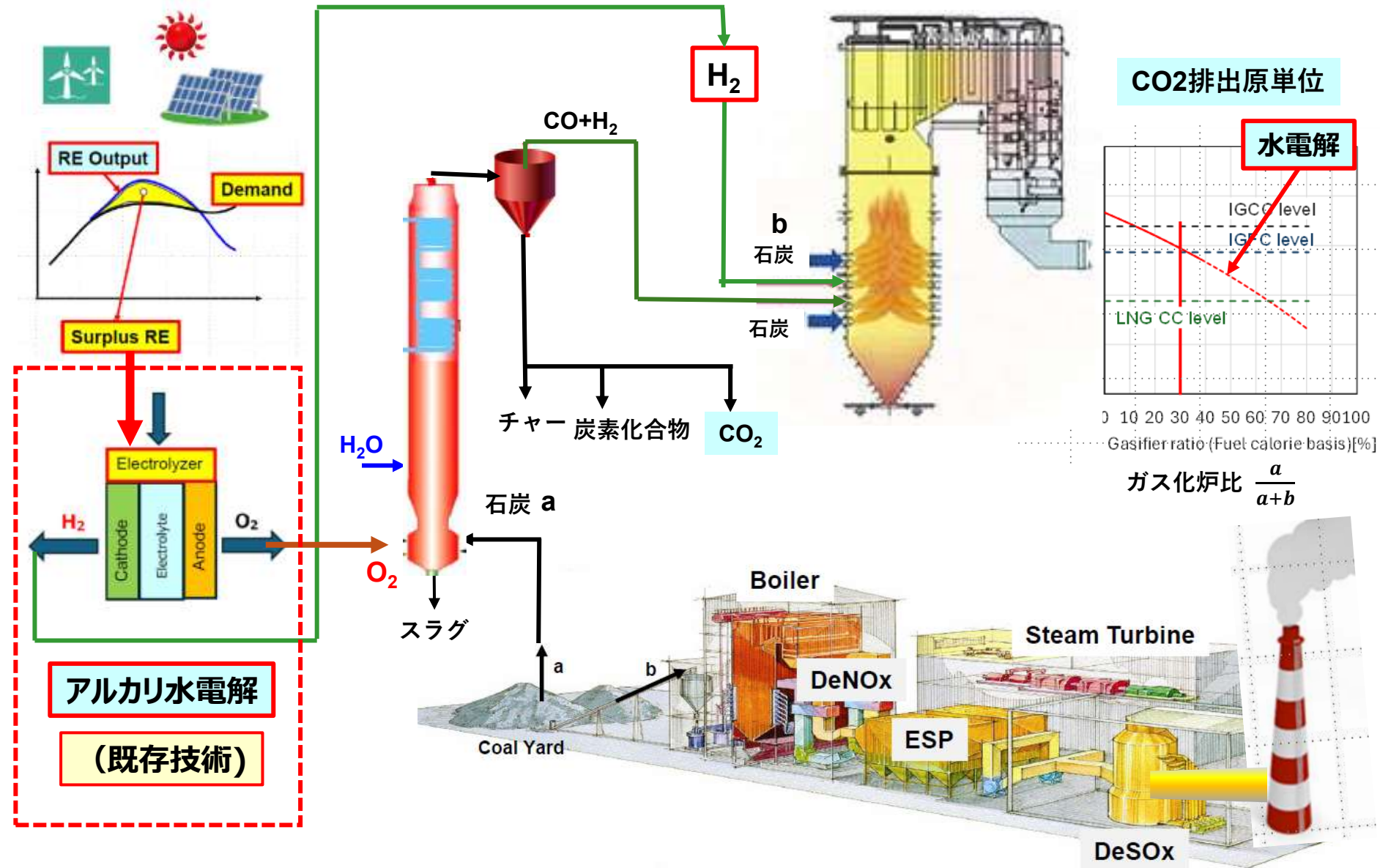
燃料系統

・昇圧が必要
燃料圧力
 $p > 30 \text{ bar}$

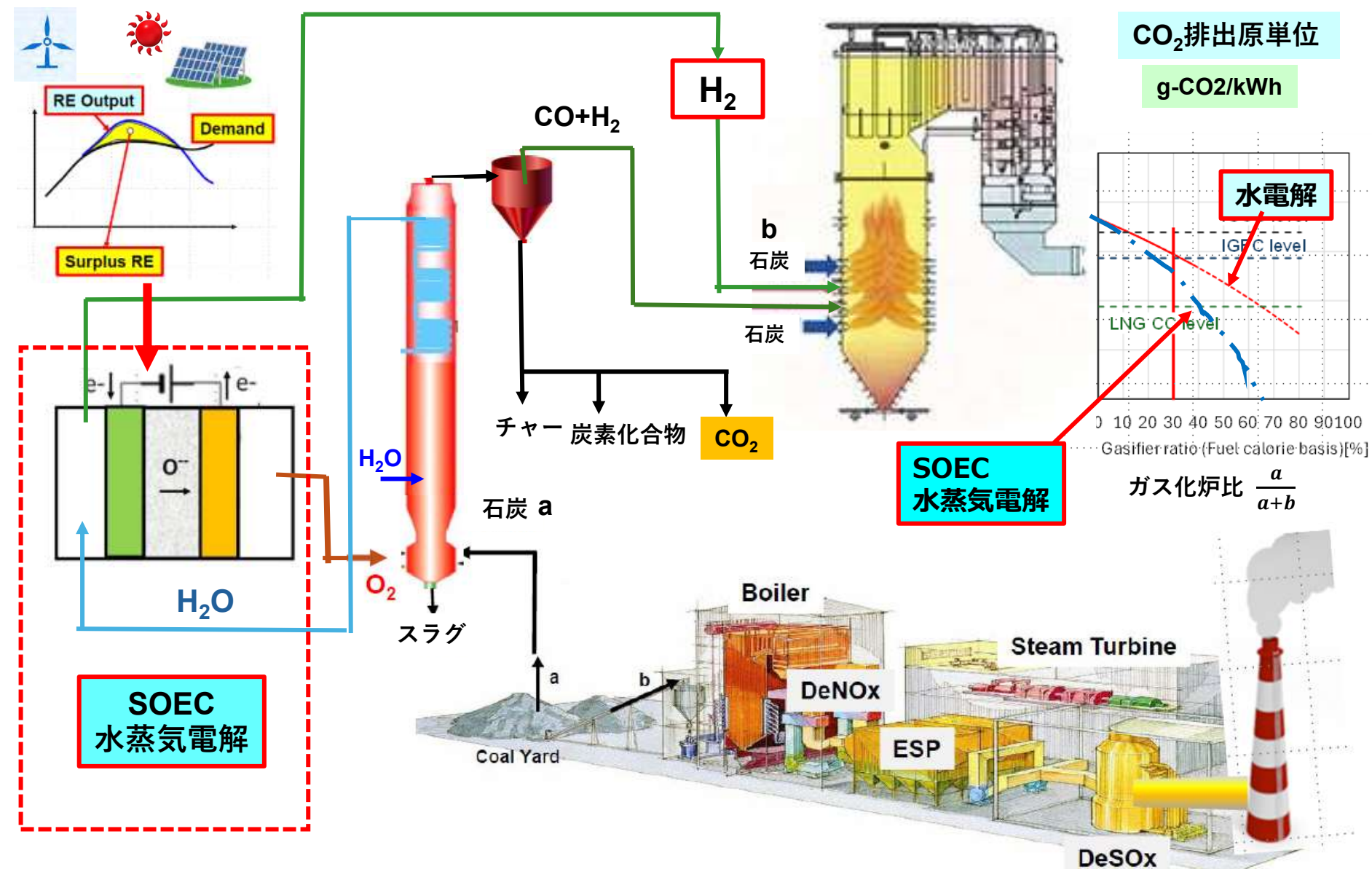
・厳しい不純物濃度制限あり



Step 1: HyGreen Project 1 : 水電解との組合せ



Step 2: HyGreen Project 2 :SOEC 水蒸気電解との組合せ

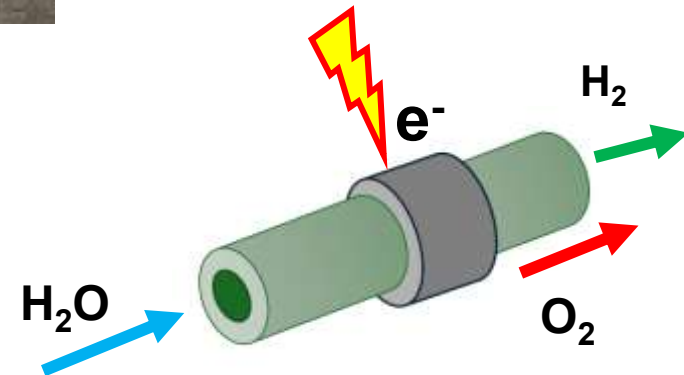
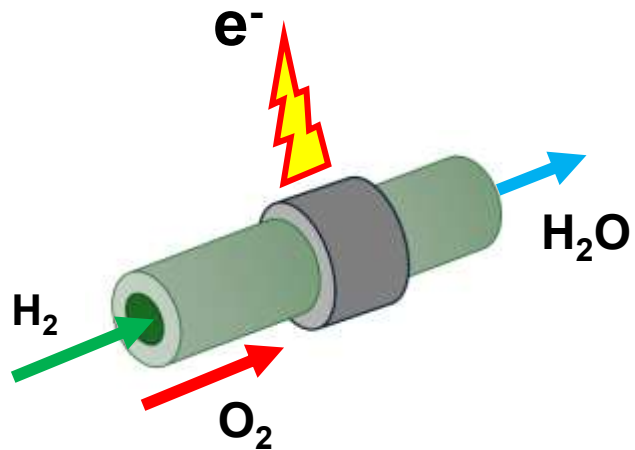


● SOEC : 燃料電池技術の更なる活用

固体酸化物型燃料電池
SOFC(高温作動)
(Solid Oxide Fuel Cell)



高温水蒸気電解
SOEC
(Solid Oxide Electrolysis Cell)



- ・電気分解は高温になるほど電気エネルギーが少なくて済む
- ・同じセルを燃料電池と水蒸気電解両方に使える(Reversible)
- ・同じセルで電解の場合出力は10倍になる(Compact)
(電流密度を10倍に上げられる)

● ガス化炉とSOECの相乗効果

ガス化炉

ガス化炉からの高温水蒸気の利用により
電気分解のエネルギーが2割少なくて済む

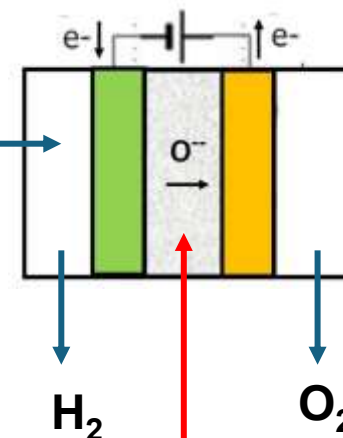
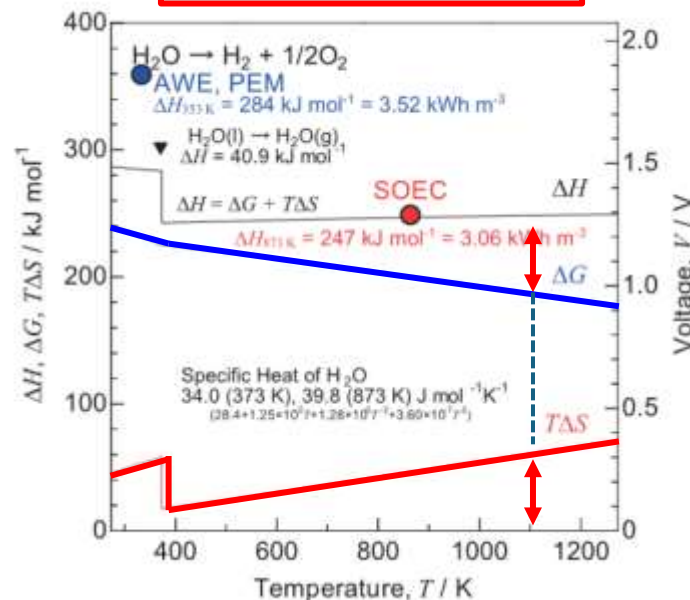
高温水蒸気電解
SOEC (Solid Oxide
Electrolysis Cell)



熱交換器

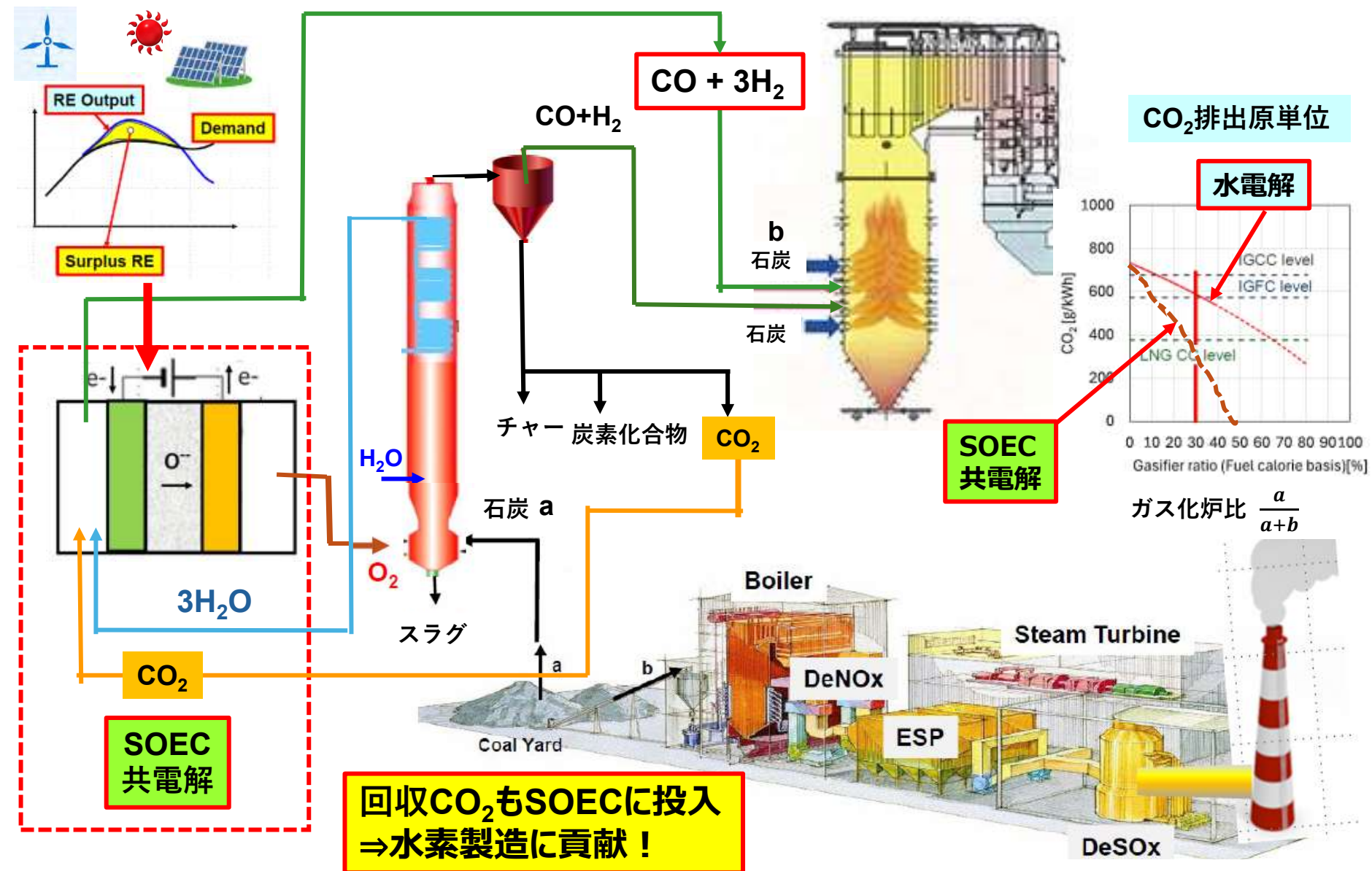
水蒸気

水電解の必要エネルギー

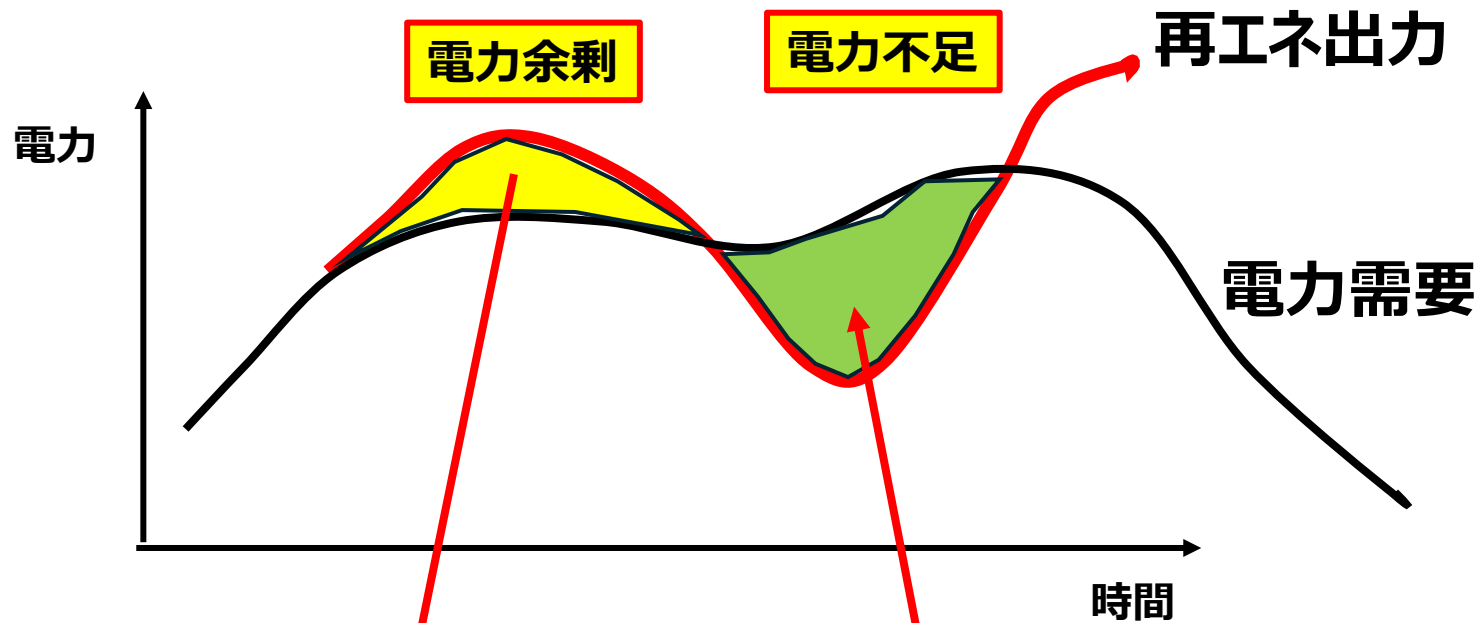


電解質：YSZなど

Step 3: HyGreen Project 3 : SOEC 共電解との組合せ



但し余剰再エネ利用にはTime Shiftが不可欠！



余剰再エネ

発電

貯蔵

H₂, O₂

- 余剰再エネが出る状況では
系統電力は余っているため、余剰
再エネ利用で発電しても系統には
送れない
⇒発生電力のTime Shiftが必要

➤ HyGreenガス化システム系統図

・石炭の熱により水蒸気から
水素を製造する

水素リッチ
合成ガス

石炭火力へ

HyGreen
ガス化炉

H₂O

炭素回収・合成装置

蓄熱装置

固体炭素化合物
貯蔵装置

特許出願済

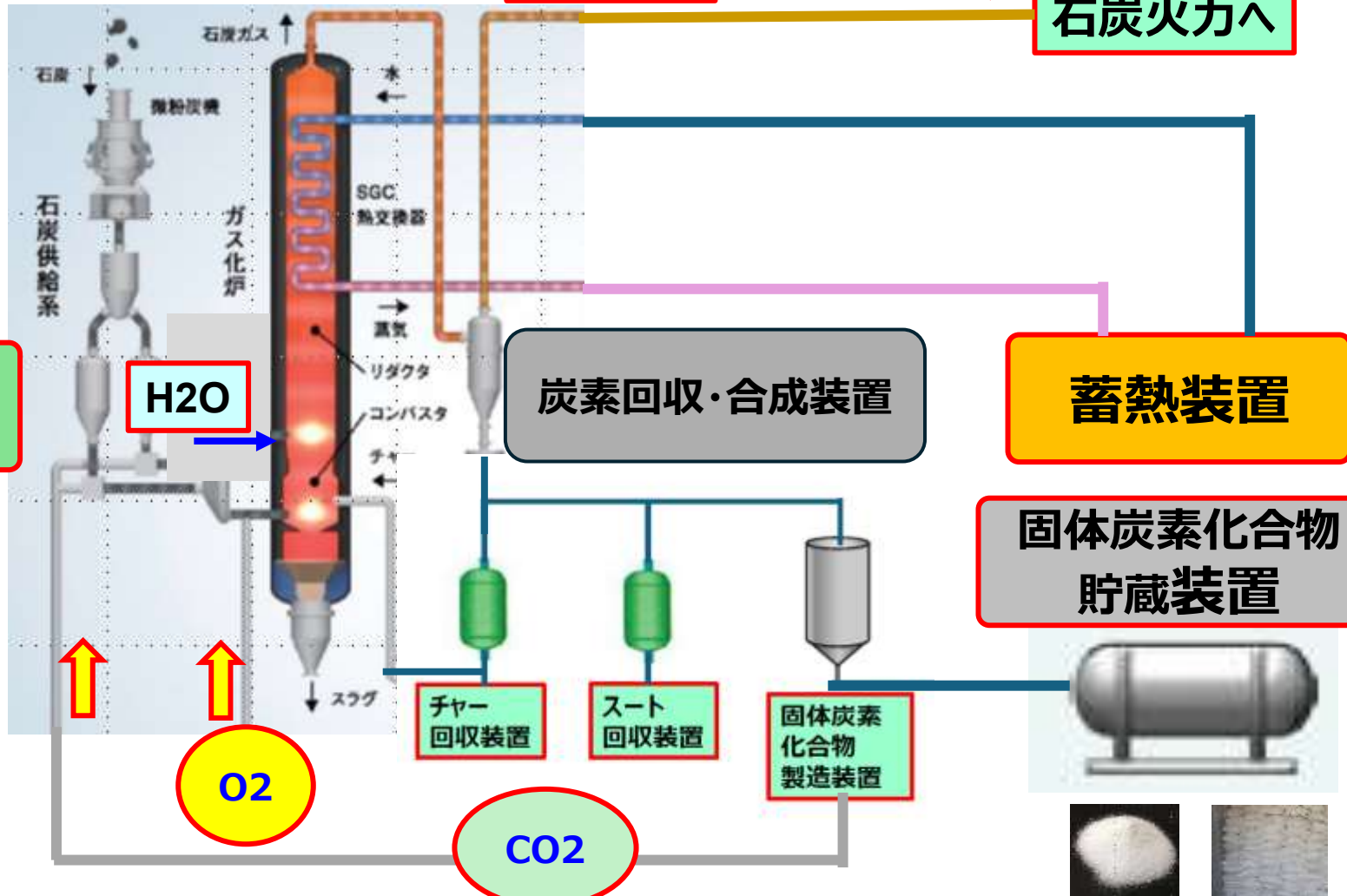
O₂

CO₂

チャー
回収装置

スート
回収装置

固体炭素
化合物
製造装置



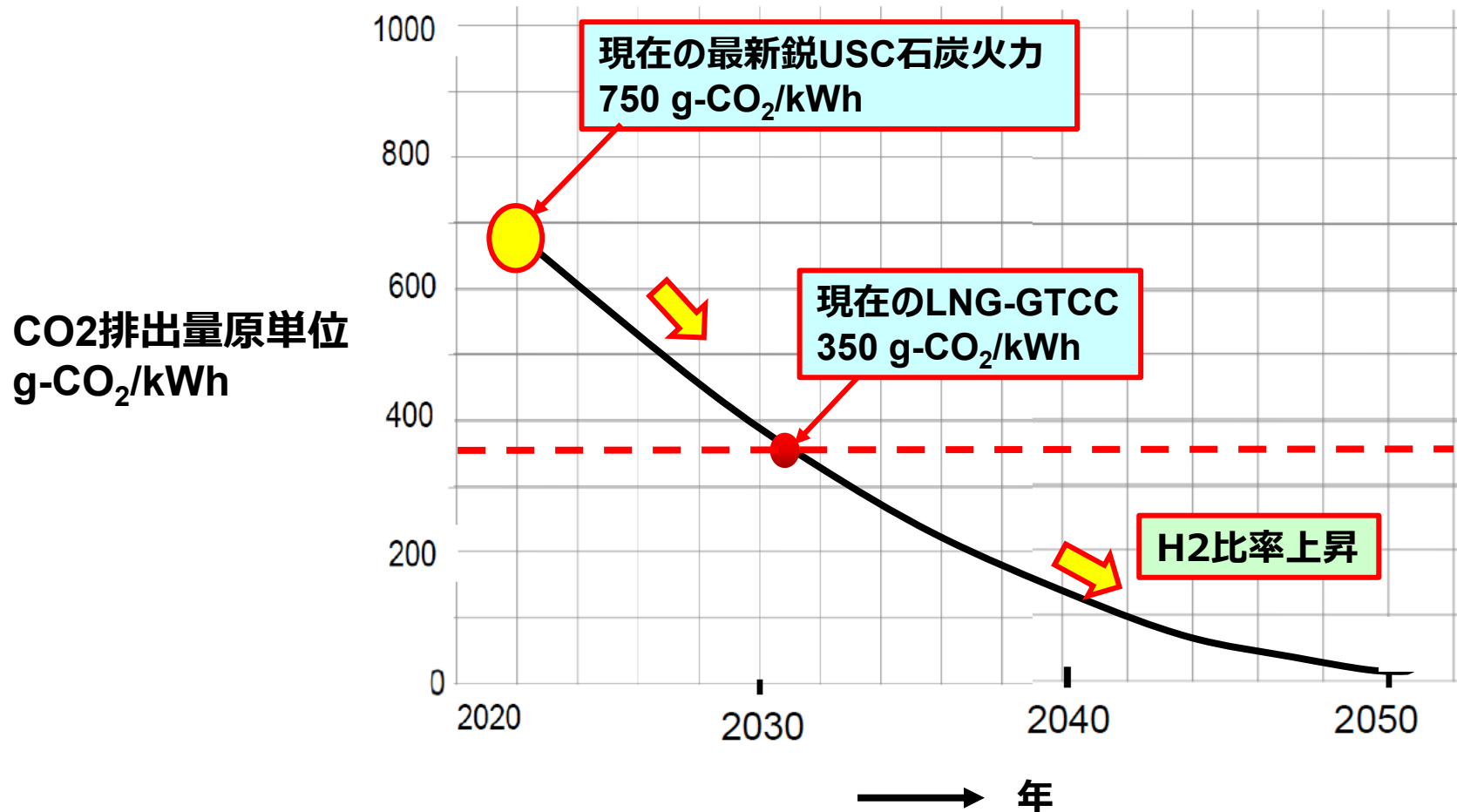
● 2020年以降運開の日本の石炭火力

会社名	発電所名	出力(MW)		運開
東北電力	能代3号	600		2020.3.2
九州電力	松浦2号	1000		2019.12
JPower	竹原新1号	600		2020.6.30
中国電力	三隅2号	1000		2022
四国電力	西条1号	500		2023.6
JERA	武豊5号	1070		2022.8
	横須賀新 1,2号	650 650		2023.6.30 2023.12.22
	常陸那珂共 同火力	650		2021.1.8
鹿島パワー	鹿島2号	645		2020.7
コベルコパワー	神戸第二 1,2号	650		2022.2.1
		650		2023.2.1
小計		8,665		

出典：各社ホームページより

石炭火力のCO₂ 排出原単位の削減計画

**目標：2030年代に石炭火力のCO₂をLNG火力並みに！
2050年にCNも可能！**



HyGreen Project イメージ図



既設石炭火力に電解装置と部分ガス化炉を追設

● HyGreen Projectが最強の切り札になる！

1. 再エネとの共生

・余剰再エネを捨てることなく有効に活用

・電解で生成したH₂、O₂を共に100%有効利用

2. CO₂排出量の最小化

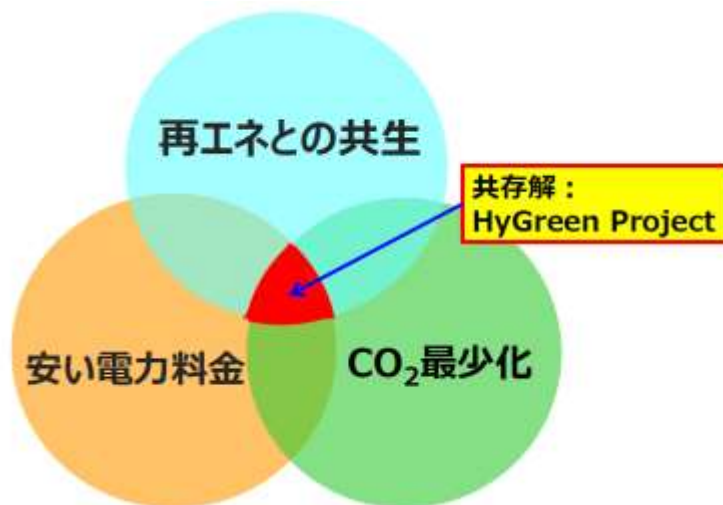
・CO₂排出量を天然ガス以下に

・燃料中のC:H比制御により、排ガスのCO₂排出原単位(g-CO₂/kWh)を天然ガス以下にする

3. 電力料金上昇防止

・需給バランスを常に最適に保ち、統合コストの上昇防止

・火力の高速負荷調整力および慣性力・同期化力で過剰な蓄電池コストと送電線建設費用を抑制



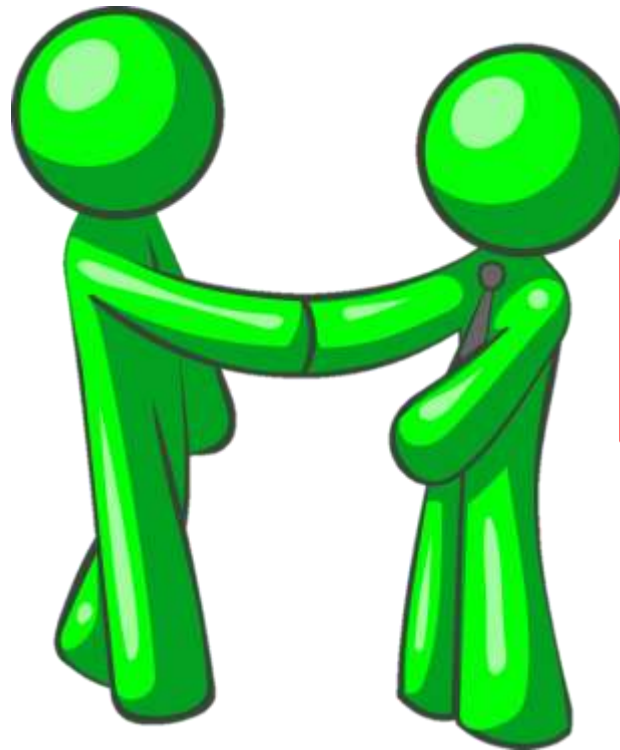
● AZECを本当に活かすには？

AZEC: Asian Zero Emission Community

途上国

日本

- 電気代を安く！
- 停電の防止



途上国が必要としているものを支援

- 途上国への石炭火力支援が最適の選択！
- 日本がやらなければ中国、ロシア、韓国がやるだけ！

参考文献

1. “ガス化炉を活用した微粉炭火力発電のCO₂排出原単位の低減”、
木戸口和浩、梅本 賢、梶谷史朗、金子祥三
No.23-13、機械学会第29回動力・エネルギー技術シンポジウム(2025.6.5-6、金沢)
2. “*HyGreen Project: A New Coordination of Renewable Energy and Coal*”
Plenary Lecture by Shozo Kaneko, University of Tokyo
Polish-Japanese Symposium-Hydrogen Energy and Advanced Energy Systems
(July 2-4, Toyosu, Tokyo)





The future is bright...

Thank you!

The End

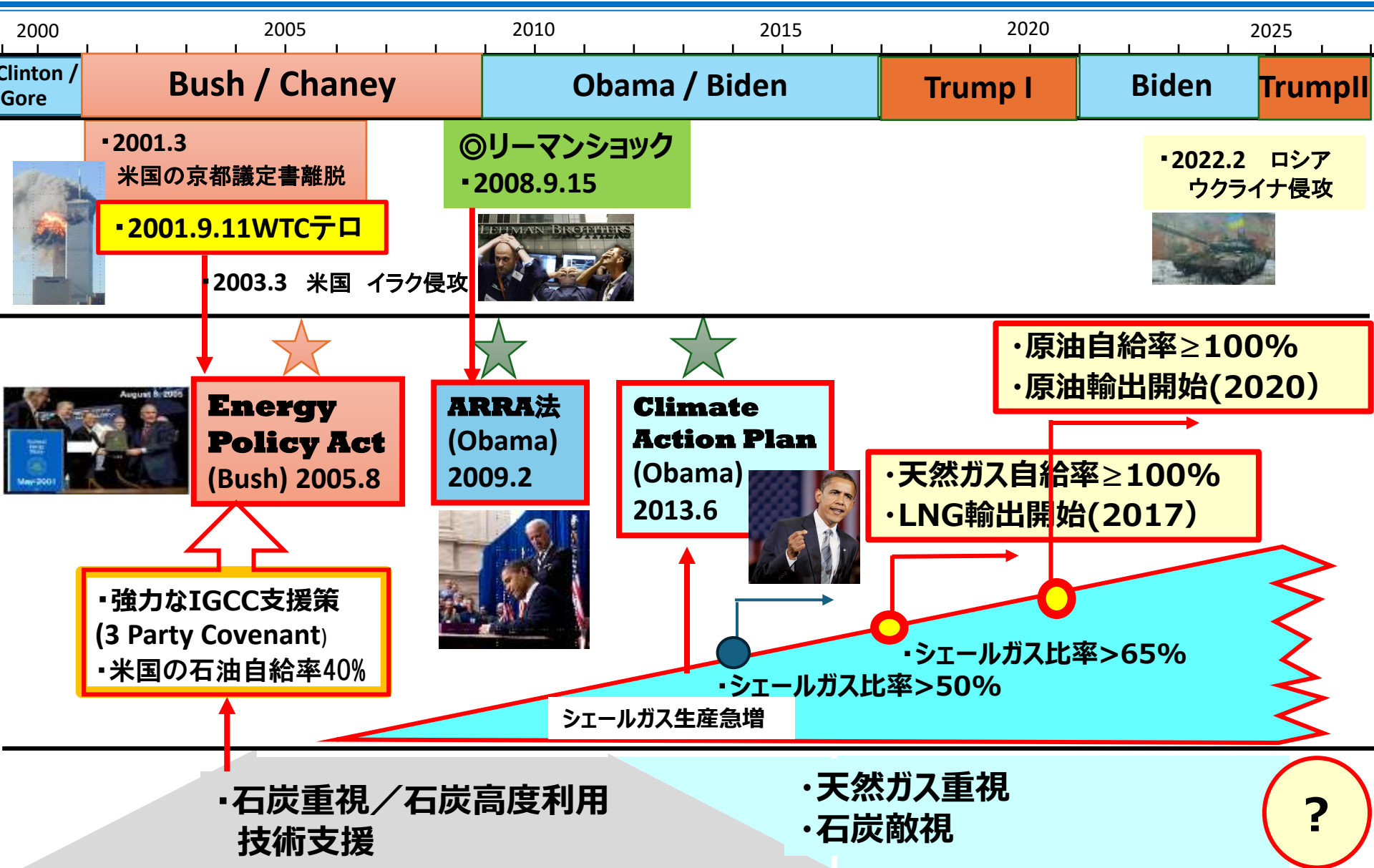
米国のエネルギー政策の変遷

- 米国は日本の強力な貿易相手国であり、また同盟国として日本のエネルギー政策に大きな影響を与える。ここでは2000年以降の米国のエネルギー政策を振り返り、さらに日本に与えた影響を考察する

➤ 米国のエネルギー政策の変遷

1. 米国は世界最大の石炭資源保有国（全世界の25%）であり、米国の一次エネルギーの300年分を賄うことが可能である。
2. 石炭は価格が安く、発電用燃料の主役であり、米国では50%以上が常に石炭火力発電であった。特に露天掘りの西部炭はコストが天然ガスの6分の1以下で圧倒的なコスト競争力を有していた。
3. 一方、天然ガスは価格が石炭の数倍もし、需給バランスによって価格が大きく変動する。このため、発電用には殆ど用いられず、冬季の暖房用が主用途であり、国産率も低かった。石油も自動車用燃料が主で、しかも中東などOPEC諸国からの輸入が多く、自給率は50%以下であった。
4. 1973年のオイルショックやイラン-イラク戦争を経て、輸入に依存する脆弱性が指摘され、膨大な豊富な埋蔵量を誇る石炭の活用が指向された。特に米国の軍事力の根幹をなす軍用航空機燃料は国産化を目指して、石炭をガス化し、F-T法により液体燃料をつくる方針が出され、支援策が進んだ。
5. 2001年9月11日のWTCセンターテロで数千人の米国人が命を落とし、またテロリストの大半が最大の石油輸入先のサウジアラビア人であったことから、エネルギー自立を最短で達成すべく、石炭ガス化の技術の完成は最優先事項となった(Bush政権)。
6. 2005年頃からシェールガスの生産が始まり、その生産が予想外に好調で、2014年には比率は50%に達した。さらなる増産のためLNGプロジェクトが多数推進され、価格安定策として石炭抑制策が始まった(Obama政権)。
7. シェールガスの生産は順調に伸び、米国はついに天然ガス、石油共に自給率100%を達成し輸出も可能という、世界最強のエネルギー国となった。

● 米国のエネルギー政策の変遷



1. ブッシュ政権のエネルギー政策法



- 2005年の米国の石油自給率は40%

Energy Policy Act 2005



President George W. Bush signing H.R. 6, The Energy Policy Act of 2005, at Sandia National Laboratory in Albuquerque, NM, on Monday, August 8, 2005. Congressmen Ralph Hall (R, TX) and Joe Barton (R, TX), and Senators Pete Domenici (R, NM) and Jeff Bingaman (D, NM) also are on the stage.

- \$14.5 billion in tax benefits + other funding assistance
- Provides incentives for power and fuels from coal gasification, nuclear power, grid upgrades, energy efficiency, and renewable power and fuels
- Clarifies rules for siting power infrastructure and investment, and grid reliability
- Addresses climate challenge through sound voluntary actions and acceleration of technology

- 2001.9.11WTCテロやイラク侵攻などにより徹底したエネルギーセキュリティを指向
- 石油の中東依存からの脱却のため自国石炭資源の徹底的活用を目指す

当時、米国国防総省は軍用燃料の国産化 （石炭ガスから航空燃料を製造）を指向

DOD's "Clean Fuel" Initiative

- *To gain secure fuel supplies, DOD seeks domestic commercial sources of clean fuels.*
- To start, DOD will catalyze industrial clean fuels production based on coal gasification for FT fuels.
- DOD will develop fuel specifications; procure supplies of fuels for testing; and **evaluate, demonstrate, certify, and implement** clean fuels.
- DOD's analysis confirms that production of sufficient fuel supplies for testing requires government incentives.
- DOD faces similar roadblocks as IGCC: High cost of fuels production, plant reliability concerns, environmental uncertainties, financing difficulties.
- Collaborative analysis of risks and incentives can create synergies for DOD, DOE, EPA, & states—and opportunities for industry to build commercial plants.



10

- 軍用燃料を自国の石炭で生産するためには石炭ガス化技術が不可欠
- 経済的に自立できるガス化技術をまずIGCCで実現

2. ARRA法

リーマンショック (2008年9月15日)

- Lehman Brothersなど大手投資銀行破綻
- Derivative など数字を弄ぶマネーゲームの破綻
- 住宅バブル崩壊



ARRA法

(American Recovery and Reinvestment Act of 2009)

(米国復興再投資法 2009年2月17日施行)



- マネゲーム偏重を止め、かつての米国製造業を復興させる
- エネルギー多消費製造業を米国に呼び戻すには、エネルギーコストの削減が最優先事項

Obamaの政策：米国の産業復興

◆産業復興のため安価で安定した
エネルギー源の確保が重要
---シェールガスを最大限に活用！



● 米国内のシェールガス開発を本格化

➤ シェールガスの着実な伸び：

● 2005年に5%→2010年に29%→2014年に50%

● 米国天然ガスの最大の課題であった価格変動をいかに防ぐか？

➤ 価格の安定策

①貯蔵を容易にするためLNGタンクを許可

②自給率を100%以上として余剰分をLNGとして輸出

● 輸出市場：ヨーロッパ、アジア

・特にヨーロッパ市場はロシアとの争奪戦となるが、ロシアのパイプラインガスは安いので価格的には厳しい

・アジア向けはLNG同志の競合となる。⇒パナマ運河の拡張を実施

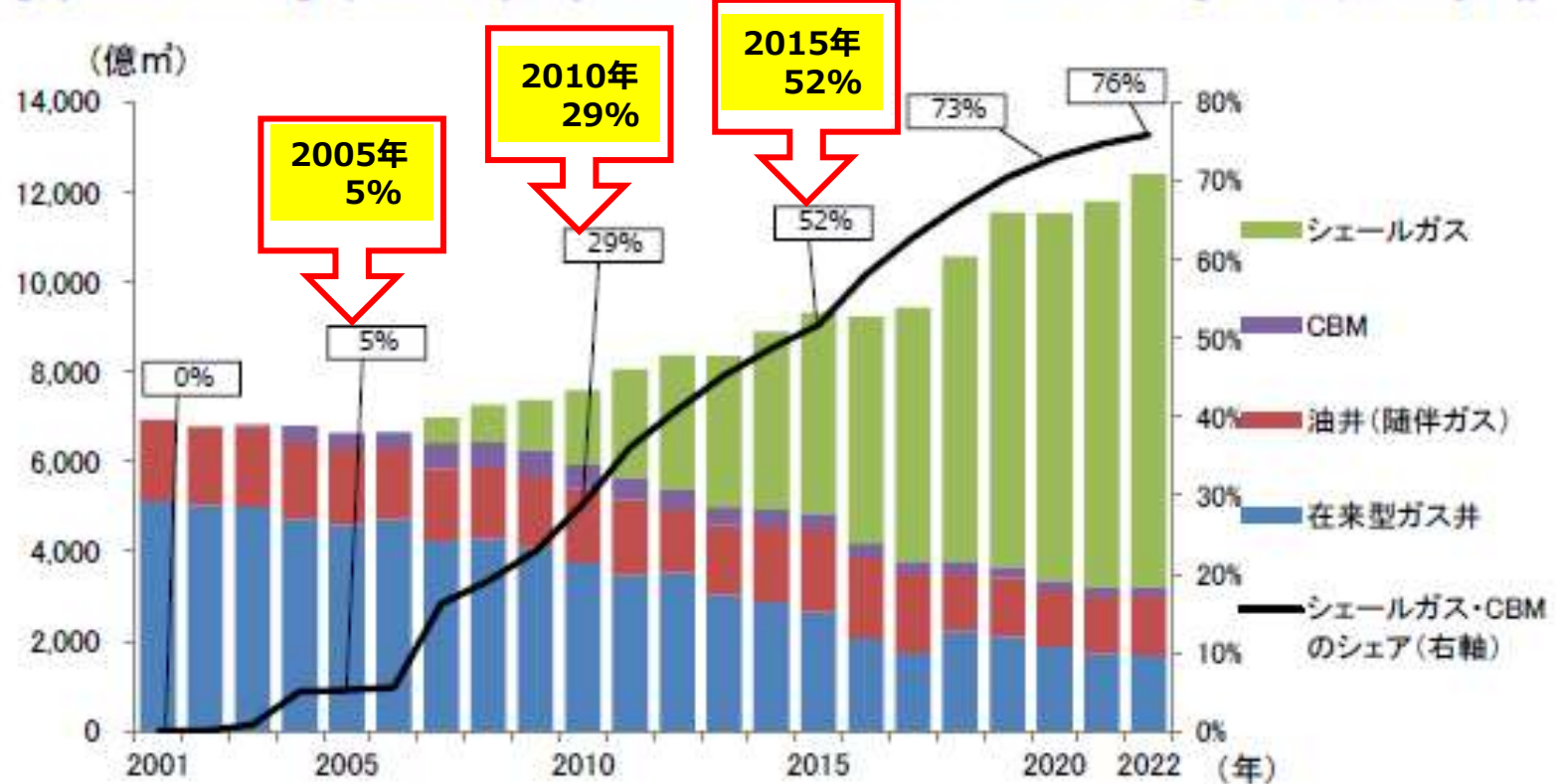
● 安価な石炭火力は邪魔 ⇒いかにして石炭火力の建設を抑えるか？

①CO2規制強化で抑制

②公的銀行の融資禁止(世界銀行、ヨーロッパ復興銀行)

米国のシェールガス生産量の増加

【第222-1-15】米国の在来型ガス・シェールガス等の生産の推移



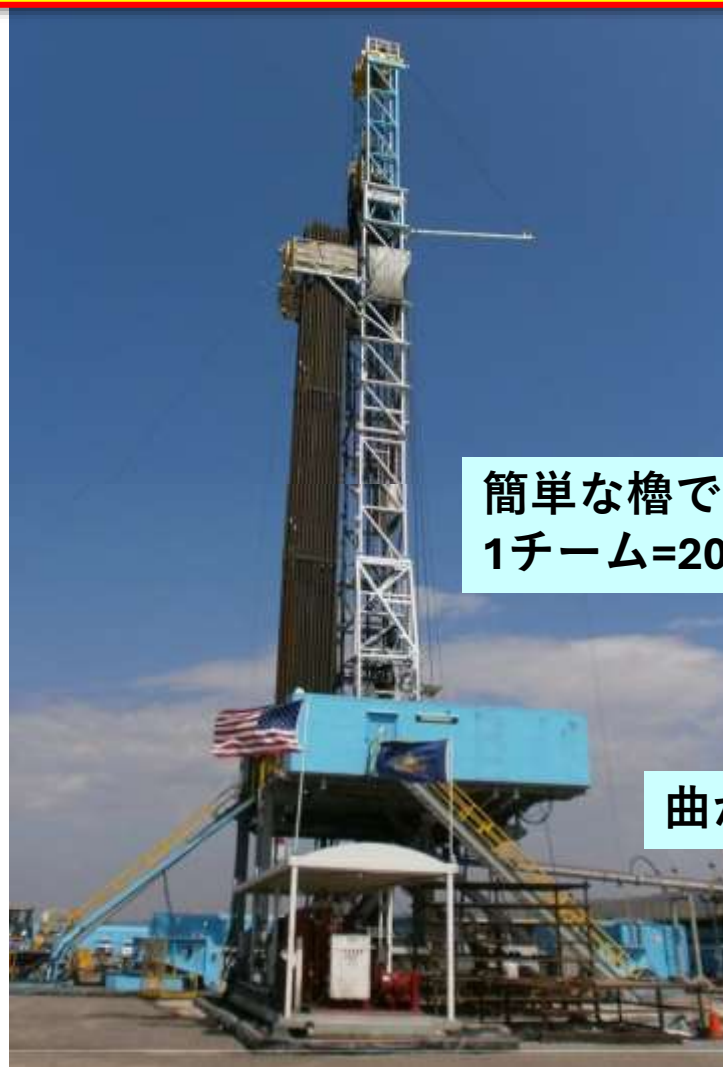
(注) 在来型ガスは、ガス層を目指して掘削したガス生産専用井により回収している。

資料：EIA「Natural Gas Data」を基に作成

出典：エネルギー白書2024

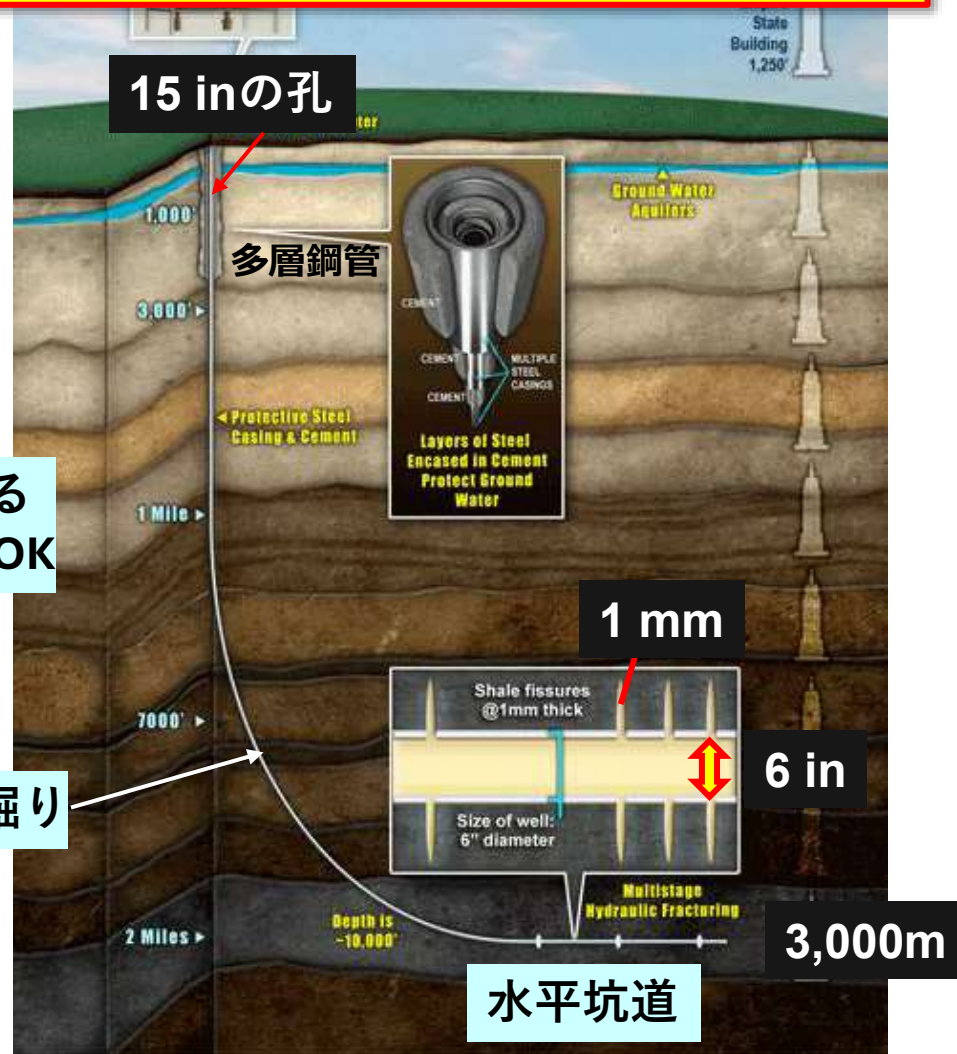
シェールガス革命

- 米国の救世主：シェールガス⇒世界最大の天然ガス生産国に



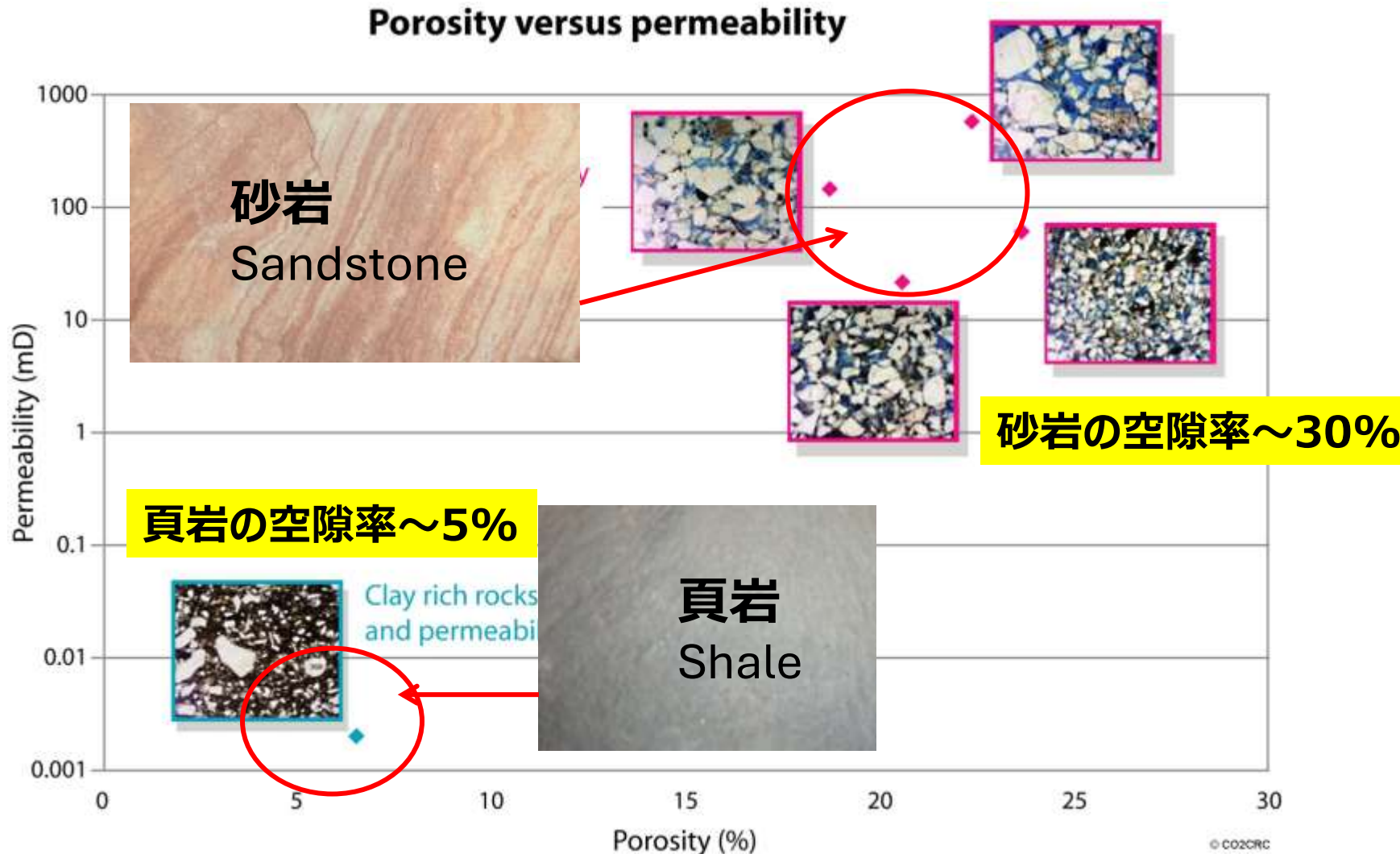
簡単な檣で掘れる
1チーム=20人でOK

曲がり掘り

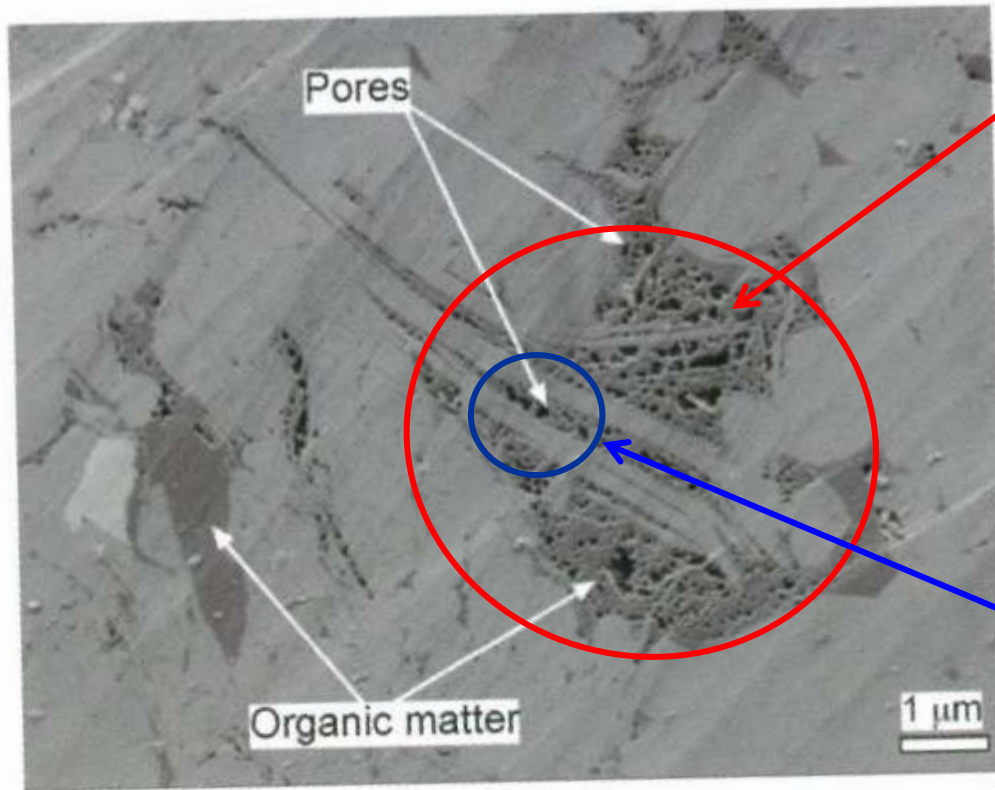


出典：第5回東大エネルギー環境シンポジウム：渡辺 考氏発表資料より引用

どうして大手はシェールガスの実力を見誤ったか?(1)



どうして大手はシェールガスの実力を見誤ったか?(2)



(Sakhaee-Pour and Bryant, SPEREE 2012)

**有機物層～全体の30%
もある**

- 従来の見解：有機物の量が30%あったとしても、空隙率が5%しか無ければ採取できない！

**細孔の割合～全体の5%
しかない**

驚愕の新事実⇒Knudsen Flow

有機物層に超微細クラック(ナノサイズ)が入れられれば、頁岩中の油(ガス)が浸み出してくる可能性

なぜシェール層から大量の油/ガスが回収できるのか？

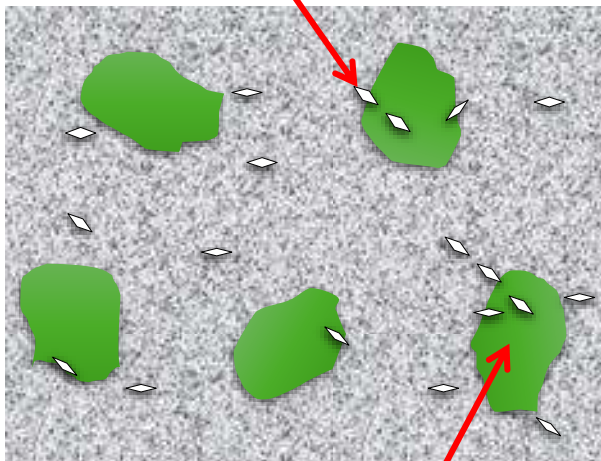
当初予想回収率 2%
(1998年)



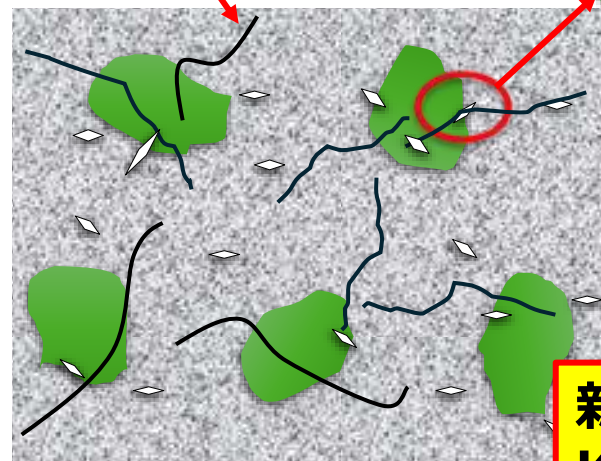
実績 40%
(2010年)

空隙率 5%
頁岩層 (シェール層)

水圧破碎 (フラクチュアリング)
によりナノサイズ(nm)の微細
クラックが多数発生!



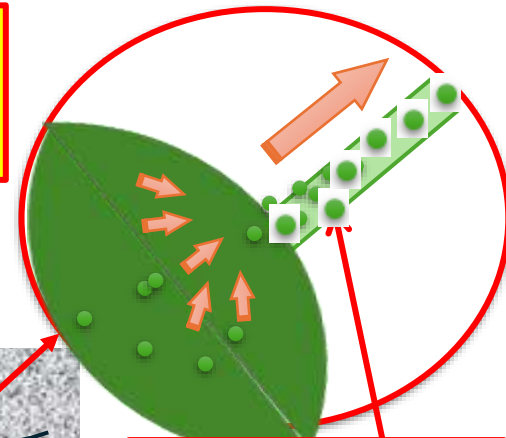
有機物(油/ガスの量) ~30%



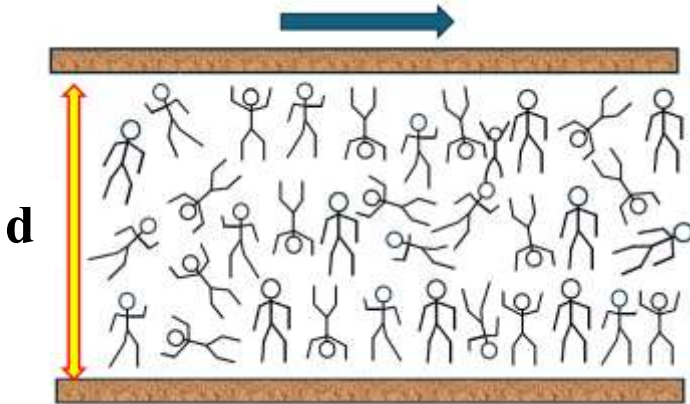
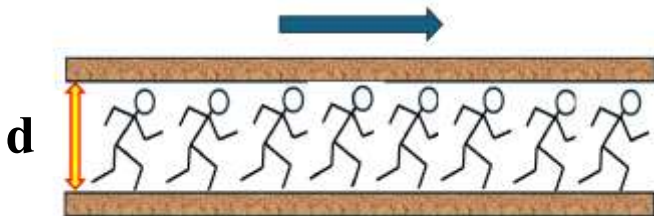
油/ガスが細孔
の中にどんどん
浸み出して来る

新しい流体の挙動：
Knudsen流れ

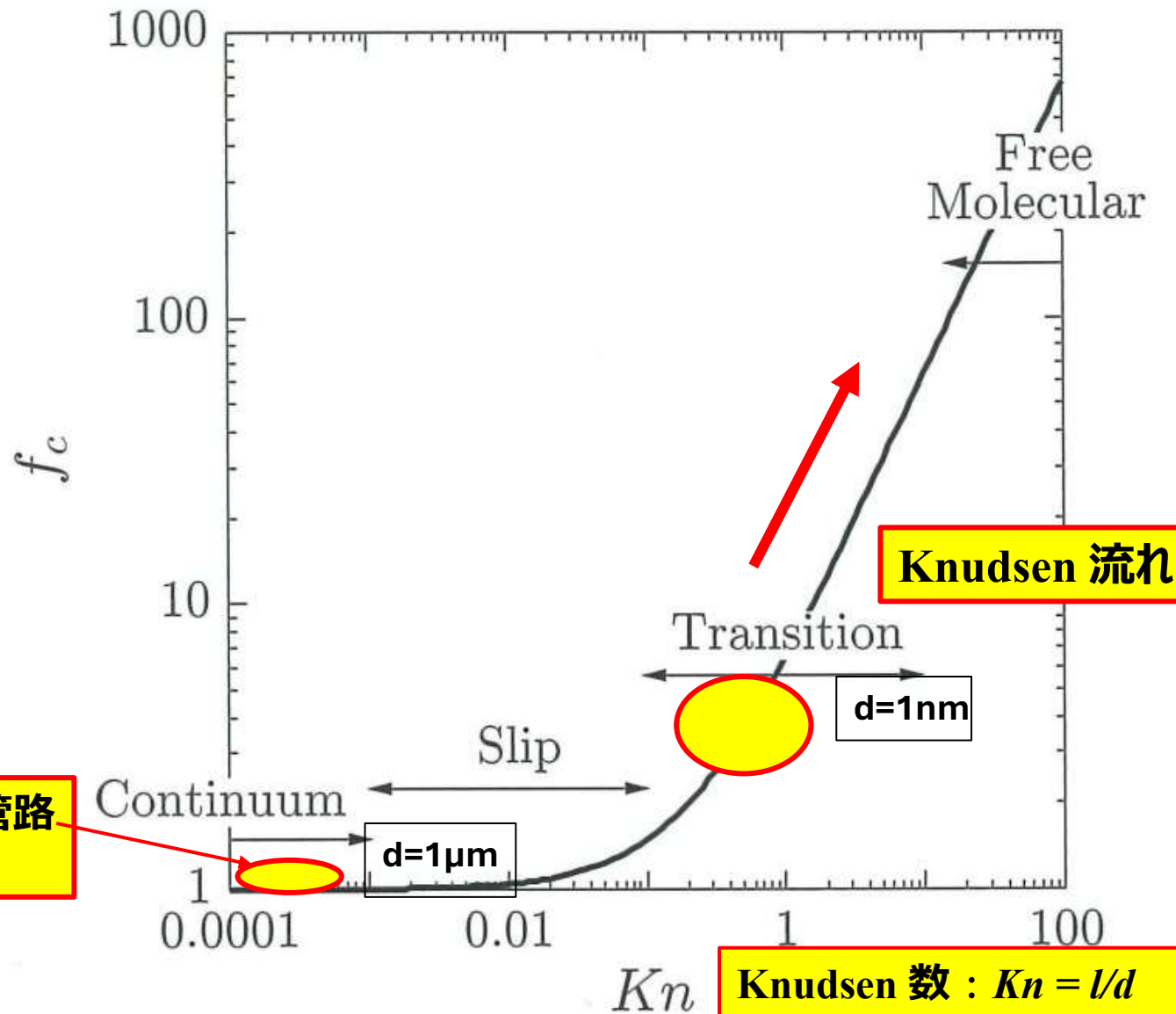
Knudsen 数： $Kn = l/d$



Newton流れとKnudsen 流れの比較

	Newton流れ	Knudsen流れ
管路の径 d	$1\mu\sim 1\text{km}$ (通常の工業用配管) ($10^{-3}\text{m}\sim 10^3\text{m}$)	$1\sim 10\text{nm}$ 以下 (10^{-8}m 以下)
管路の圧力損失	$\Delta p = \zeta \frac{L}{d} \rho \left(\frac{w}{2g} \right)^2$	Knudsen 数 : $Kn = l/d$ の関数
特徴	・管径が小さいほど圧損は大きい ・同じ差圧なら管径が小さいほど流れ難い	・管径が小さいほど圧損が小さい ・同じ差圧なら管径が小さいほど多くの流量が流れる!
流れの比喻	 $d \geq 100l$	 $d \cong l$ l: 分子の平均自由行程 Knudsen 数 : $Kn = l/d$

Knudsen数大で浸透率補正係数 f_c 増大

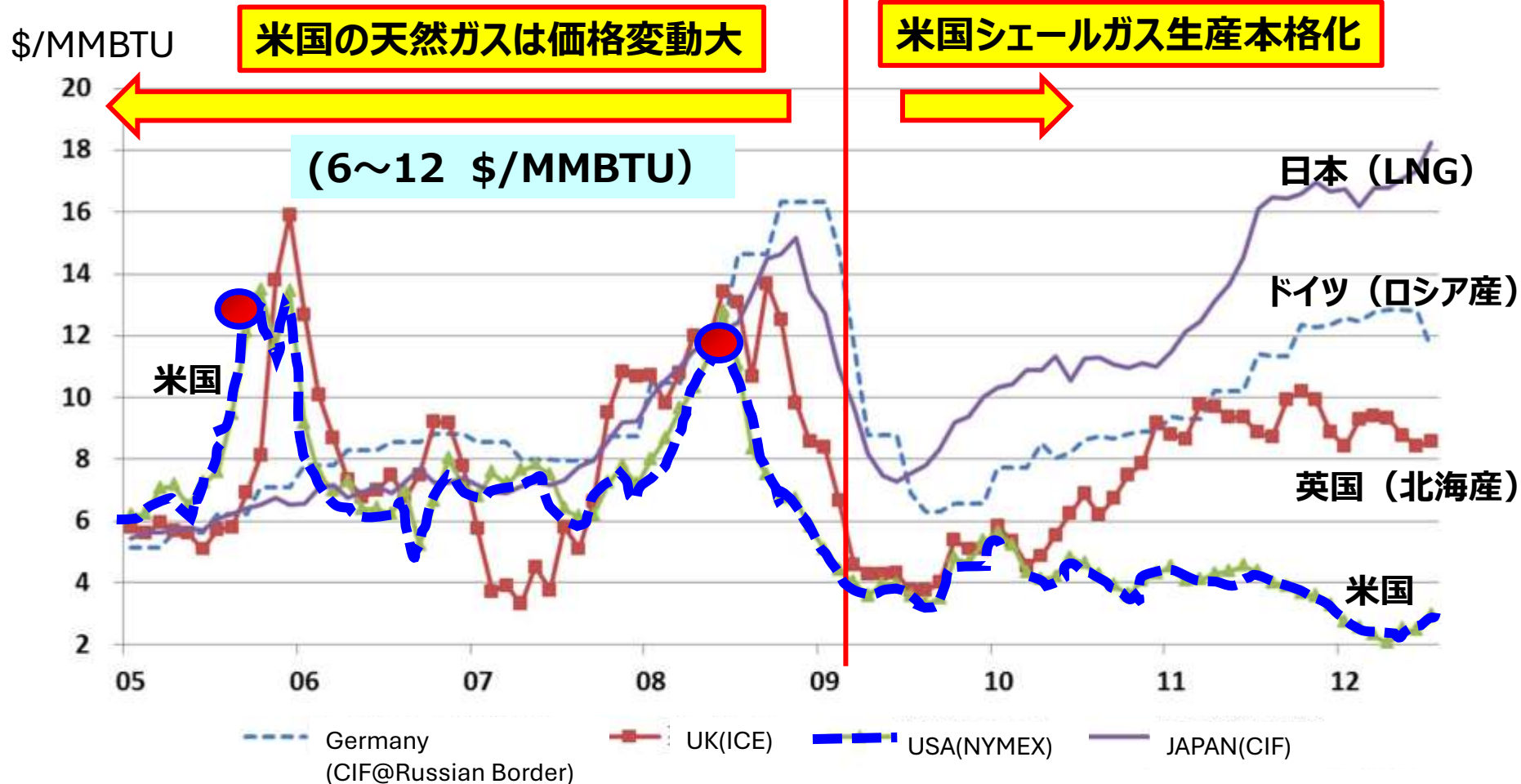


通常の管路
の流れ

Knudsen 流れ

Knudsen 数 : $Kn = l/d$

天然ガス価格の変遷 (2005-2012)



Source: From presentation by Mr. T. Nogami, JOGMEC at No.15 CEE Symposium

- 米国の天然ガスは価格変動が大きかったが、シェールガス生産本格化と共に安定化
- しかし価格が下落すると生産量減少→価格下落防止策が必須となる

米国での天然ガス利用の最大の課題

Price Volatility : 激しい価格変動

1年間で価格が6\$から12\$に倍増した例

Natural Gas

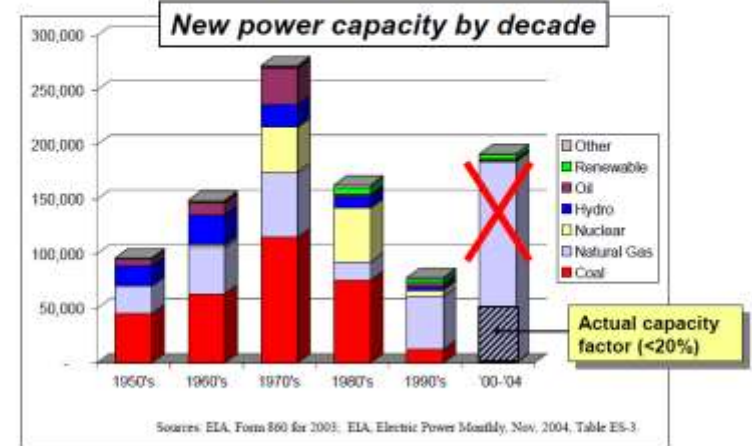
Natural gas price volatility, >100% variation in a year, is damaging key industries that depend on gas (e.g., chemicals, fertilizers, metals, cement). Stakeholders resist LNG terminals.

NYMEX Natural Gas Futures
Close (Front Month)



U.S. Power Plant Sector, 1950 – 2004

The wave of NGCCs built since 1998 faces bankruptcy, mothballs, or idleness due to high gas prices. Many new plants are under study.



- 多数の建設中または計画中のコンバインドサイクルプラント(1億3千万kW分)が中止または倒産となったため、余った何十台ものガスタービンが中古市場に売りに出された。



なぜ米国の西部炭は安いのか？

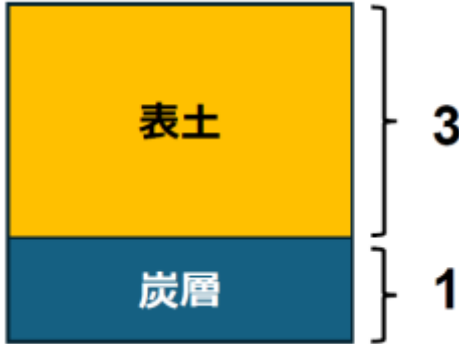
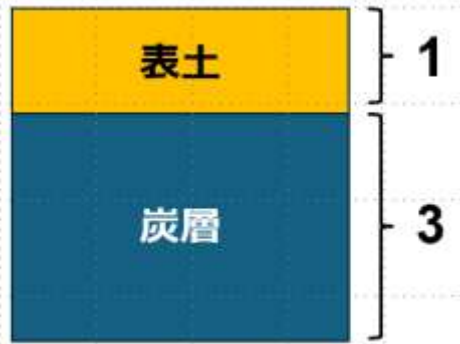
1. 膨大な埋蔵量
2. 露天掘りが可能
3. 表土が薄く、炭層厚さが厚いので非常に経済的に採掘できる
4. 炭層が平坦な平原にあり、人口密度が低く、また大半が連邦政府の所有地
5. 西海岸から日本、韓国や東南アジアに直送できる
6. 日本への輸送距離はオーストラリアからの距離とほぼ同等
7. 日本が米国から輸入すると貿易摩擦の解消に貢献
8. 最大の課題は西海岸に近代的な輸出ターミナルを建設すること
9. Trump1の時は、ワシントン州政府の反対でターミナルが建設できず、日本へはカナダ経由で輸出

産地	価格 (\$/MMBTU)	価格 比率
中央アパラチア炭	2.75	5.5
北アパラチア炭	2.5	5
イリノイ炭	2.00	4
ロッキーマウンテン 地域	1.5	3
PRB炭	0.5	1

天然ガス
より優位

PRB炭のコストは
天然ガスの1/5～1/8

同じ露天掘りでも採掘コストに差

	欧州	米国西部炭
炭層構造	 ・表土が厚く、炭層が薄い	 ・表土が薄く、炭層が厚い
採掘方法	 ・ロータリーカッターで炭層の石炭を削り取って行く	 ・1m四方の間隔で多数の孔を開けダイナマイトを挿入し一気に爆破する

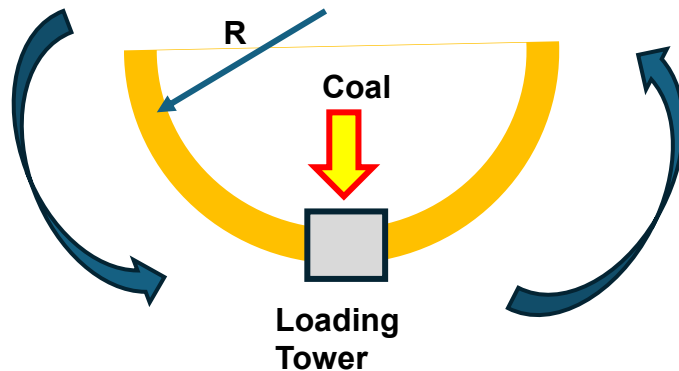
シャベルもダンプも150ton/台



輸送列車は150輻連結（長さ1マイル）



- 貨車は大きな円弧の線路で non-stop で積み込み



● 各燃料の共存可能価格帯

LNG ≥ 12.0 \$/MMBTU

LNG価格はパイプラインガスの3～4倍に設定

LNGはファイナンス成立が絶対条件！
(1プロジェクトで約1兆円の資金が必要！)

パイプラインガス
3～6 \$/MMBTU

パイプラインガスは
石炭の2～3倍以内をしたい

価格主導権は石炭側にあり！

石炭 1～3 \$/MMBTU

結論：
シェールガスを
絶対に成功させる
決め手は石炭叩き！
⇒価格優位性という
絶対的優位性を持つ
石炭に対しては環境
で叩くしかない！

石炭産地	価格 (\$/MMBTU)
中央アパラチア炭	2.75
北アパラチア炭	2.5
イリノイ炭	2.00
ロッキーマウンテン地域	1.5
PRB炭	0.5

> 12.0

6.0

5.0

4.0

3.0

2.0

1.0

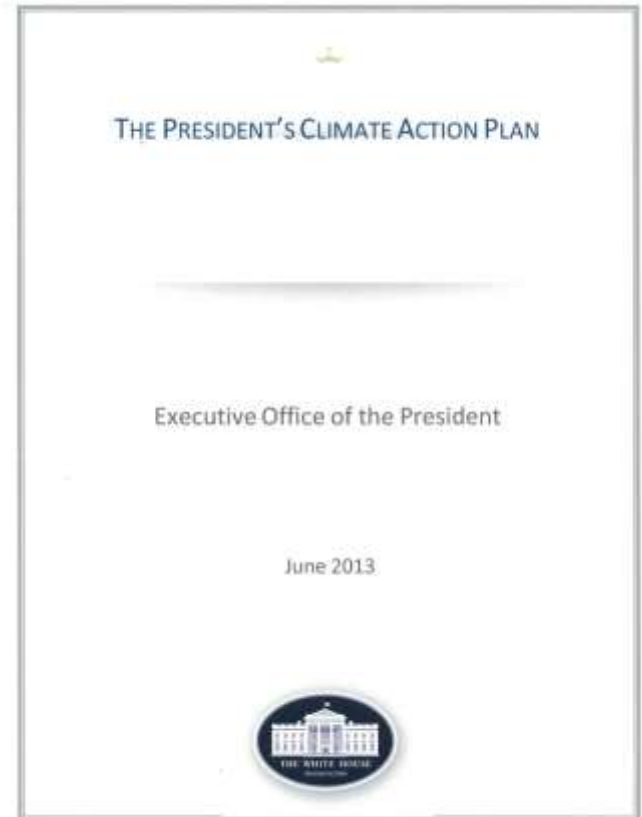
3. オバマ政権によるエネルギー政策の変更と圧力

石炭火力の事実上の建設禁止

1. 目的：安価なシェール天然ガスでエネルギーコストを下げ、米国内の産業復興をはかり、同時に世界のLNG輸出マーケットの支配を実現する
そのためには ①米国内天然ガス価格を3～4\$に抑える
②輸出LNGは出来るだけ高く売る
→この政策推進の最大の障害は“安い石炭”の存在
・特にPRB炭などの西部炭は天然ガスの5分の1以下の低価格
結論：石炭利用を抑制しないとシェールガスの大々的な活用はできない
2. 価格の安い石炭抑制の最も効果的な対策はCO₂問題で攻めること
① CO₂排出濃度を環境規制で制限
米国環境保護庁(EPA) を使って、**行政命令**で自由に石炭火力を抑制
② 米国内老朽石炭火力を最新鋭天然ガスコンバインドサイクルに置き換え
(2040年には石炭火力比率32%に下げる)
③ 国際的にも国連やUNFCCCを使って圧力をかけ、先進国、発展途上国
両方共に圧力をかける
3. とどめは**石炭火力への銀行の融資禁止**
→これで日本やEUへのシェールガスLNGの輸出の展望が開ける

➤ オバマ政権の気候変動対応計画

2013.6.25 Climate Action Plan発表
The President's Climate Action Plan
(June 25th , 2013 at Georgetown University)



1. Cut **Carbon Pollution** in America
2. Prepare the United States for the Impact of Climate Change
3. Using Sound Science to manage Climate Impacts
4. Leading **International Efforts** to Address Global Climate Change

Obama政権の石炭抑圧政策

大気汚染物質

酸性雨、光化学スモッグ、微粒子

温暖化ガス

CO_2 、 CH_4 、...

SO_x , NO_x
Dust(PM)

CO_2

・無害な CO_2 を強引に
大気汚染物質と定義

“Carbon Pollution”
という言葉は造語

・大気汚染物質の排出
規制はEPA長官の権限

・EPA長官の行政命令で
石炭火力の CO_2 排出を規制

2014年6月2日 EPA試案発表

- 既設石炭火力に対するCO₂削減要求案

1. 2030年までにCO₂を30%削減（2005年比）
2. 同時にSO₂、NO_x、煤塵を25%削減
（CO₂狙い撃ちではないというカモフラージュ）
3. 各州ごとに規制レベルを検討（石炭州にも配慮）
4. 国内は既設石炭火力に対する規制をやや緩くし、新設石炭火力を徹底的に阻止
5. 米国外では新設石炭火力を徹底的に抑える⇒将来の米国産LNGの大きな市場に
6. 日本・ドイツに石炭火力輸出抑制の圧力をかける



米国環境保護庁（EPA）長官
Ms. Gina McCarthy



● 石炭抑制の先頭に立つ！

日本での石炭火力の議論 (2013年)



BSフジ
PRIME NEWS
2013年5月23日放映

結論

資源の乏しい日本には
高効率の石炭火力は必要！



日本の石炭火力輸出へ禁止の圧力（2014年）



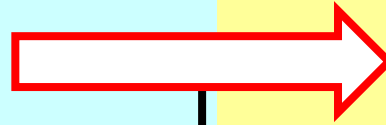
**Washington Post記事
(2014.5.4)**

日本の石炭火力支援に懸念を表明

- In the meantime, Obama is pressing the case for carbon cuts abroad as well as domestically. In his recent bilateral discussions with the leaders of Japan, South Korea and the Philippines, the president spent significant time talking about climate, according to aides. He **raised concerns** with **Japanese Prime Minister Shinzo Abe** and South Korean President Park Geun-hye about **their financing of coal-fired plants in the developing world**, aides said.

地球温暖化を巡る動きの変化

今迄(2009年)



現状(2014年6月)

EU



CO₂を
下げろ！

日本



EU



そうは言っても
石炭も大事...

日本



CO₂を下げろ！

USA



そうは言っても
石炭が頼りだ...

米国の豹変！



USA

EPAは来日して日本にも圧力をかける (2015年)



「座礁資産」に投資考えず 技術と規制で再び主役に

どうする石炭火力

石炭火力発電所の計画が加速する中、環境問題が焦点となっている。図は地球温暖化による海面上昇のシミュレーションを示している。右側にはCO2の排出量を削減するための対策が示されている。

危うい「回帰」か分岐点

石炭火力発電の回帰は、環境問題とエネルギー安全保障の狭間で進む。政府はCO2削減目標を達成しつつ、エネルギーの安定供給を図る必要がある。

座礁資産に投資考えず

「座礁資産」(stranded assets)とは、気候変動対策が進む中で、市場価値が大幅に下落する可能性がある資産を指す。石炭火力発電所は、このリスクに直面している。

金子 祥三さん (金子 祥三さん) は、このリスクを指摘し、企業は「座礁資産」に投資しないよう警告している。

見える石炭火力

石炭火力発電の回帰は、環境問題とエネルギー安全保障の狭間で進む。政府はCO2削減目標を達成しつつ、エネルギーの安定供給を図る必要がある。

技術と規制で再び主役に

石炭火力発電の回帰は、環境問題とエネルギー安全保障の狭間で進む。政府はCO2削減目標を達成しつつ、エネルギーの安定供給を図る必要がある。

(朝日新聞 2015年9月10日)

4. 米国の現状

1. シェールガス支援策、石炭抑制策によっては**米国はエネルギー自立(Energy Independence)を達成**し、世界最大の石油・天然ガスの生産国であり、また輸出国となった。
 - ①石油生産量第1位
 - ②天然ガス生産量第1位
2. 特に**天然ガス**については、石炭への融資禁止という強力な手段により数々の米国内LNGプロジェクトを成功させ、ロシア、カタルを抑え、**世界最大の輸出国**となった。
3. 最大の問題であった天然ガスの価格変動も、国内にLNG基地を多数建設し、また過剰分はLNGとしてアジアやヨーロッパに輸出することにより、価格は安く抑えられ、安定している。
4. ただし米国産シェールガスの圧倒的有利性がいつまで続くかを懸念する意見もあり、2040年には米国石炭火力の復活を予想する意見もある。
5. いずれにしても**膨大な埋蔵量と最強のエネルギーコスト**により、遅かれ早かれ**将来は米国は必ず石炭へ回帰**すると考えられる。
6. 第2次Trump政権は、ObamaのClimate Action Planを廃止し、パリ協定からの離脱、再エネへの援助削減、石炭の推進などを打ち出している。

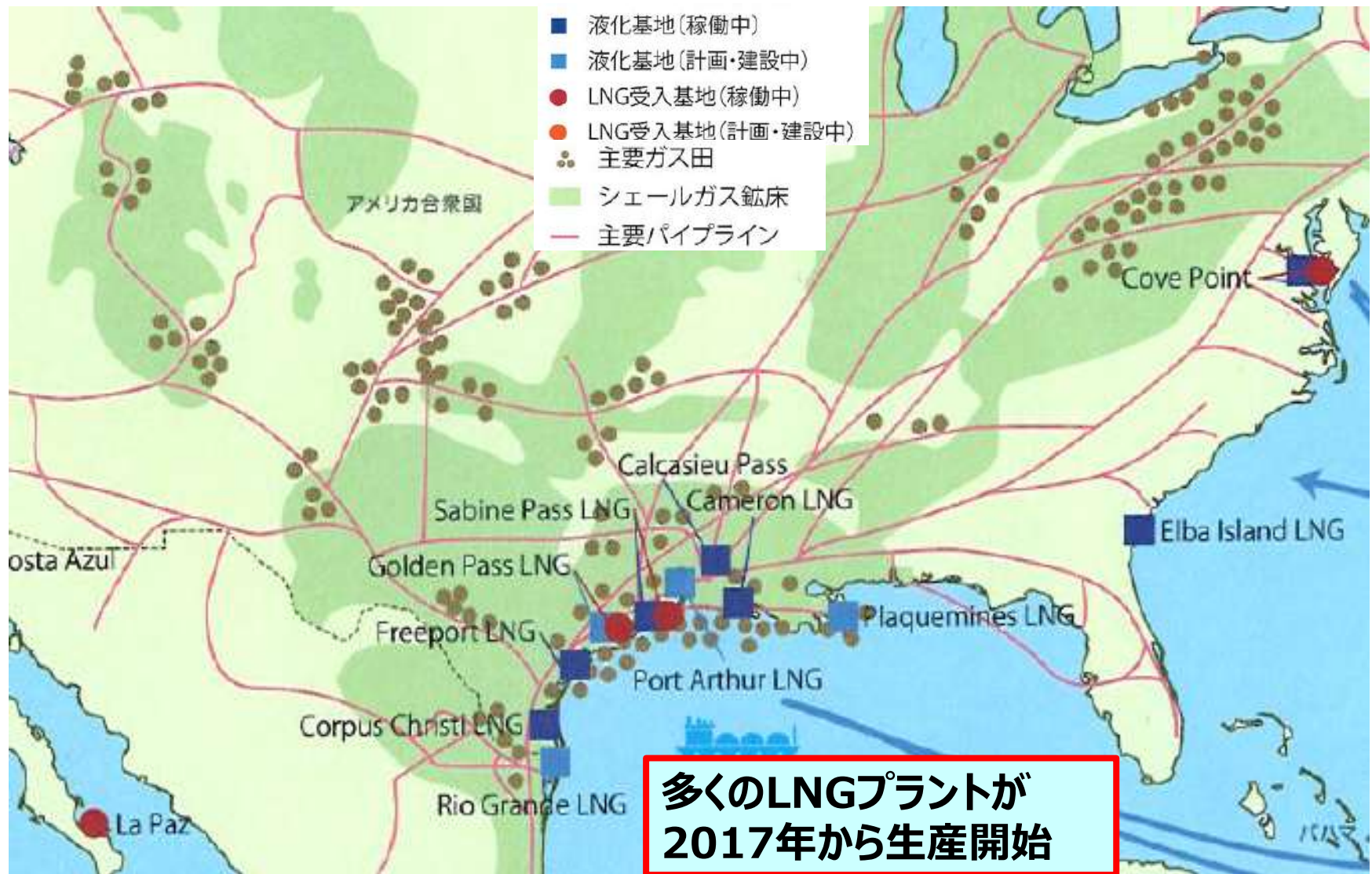
● 米国は石油・天然ガスの純輸出国となった！

	石油* (単位：10 ³ bbl/d)		天然ガス** (単位：bcf)	
	2022年	2005年	2022年	2005年
①消費量	20,280	20,802	32,314	22,014
②生産量	17,793	6,901	35,816	18,051
③正味輸入量		12,549		3,612
④正味輸出量	1,259		3,880	
輸入比率 (③/①)		60.3%		16.4%
輸出比率 (④/②)	7.1%		10.8%	
備考	・石油*は原油および石油製品の合計		・天然ガスはパイプラインガスおよびLNGの合計	

- 現在米国は輸入がすべて途絶えても自国産ですべてを賄える
- 2005年には石油の60%、天然ガスの16%を輸入していた
- 2020年には石油の7%、天然ガスの11%を輸出している
- これらはシェールガス/シェール石油のおかげである

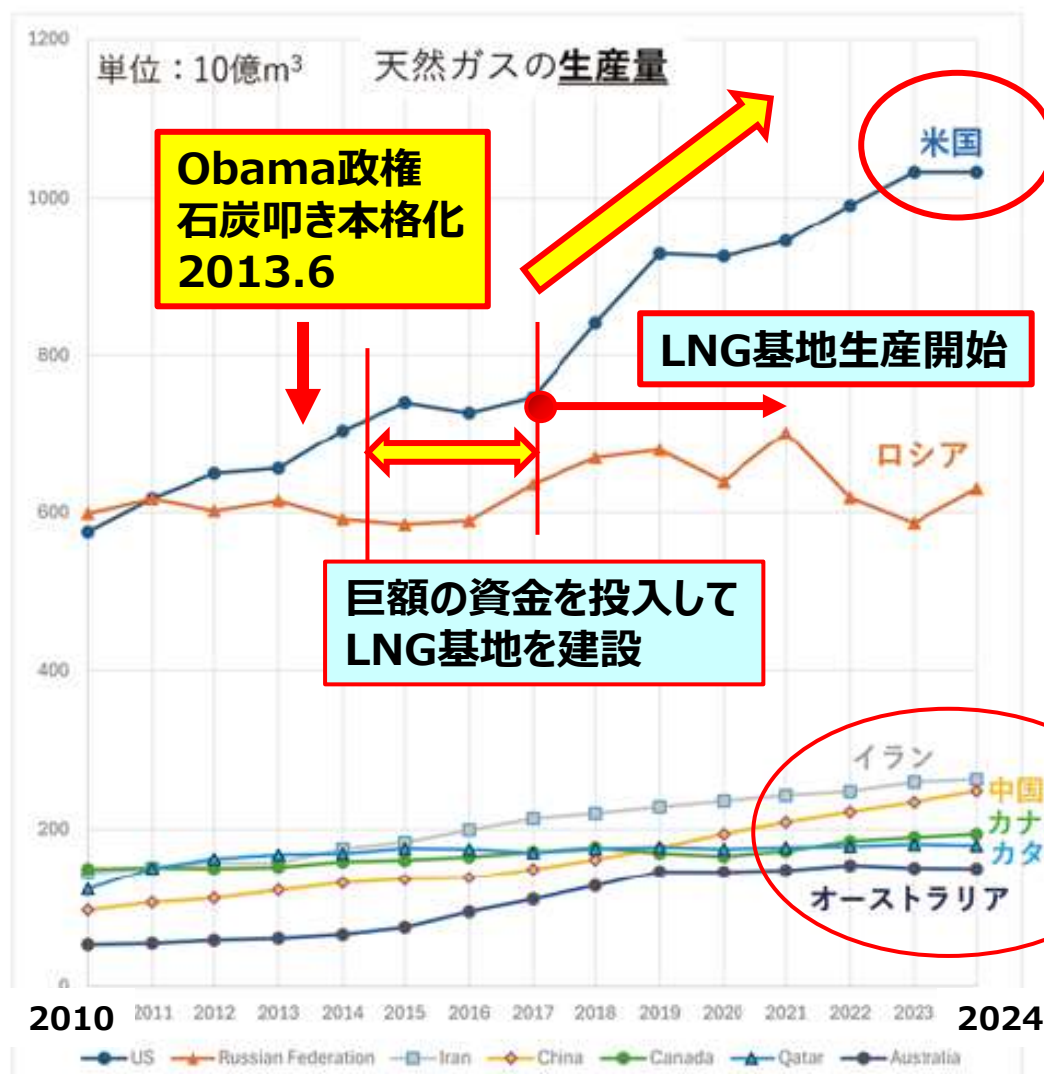
出典：米国エネルギー省統計局のデータを基に作成

米国のLNG基地



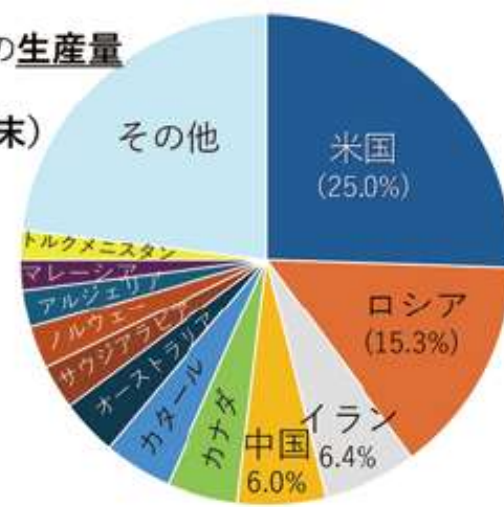
出典：ガスエネルギー新聞

世界の天然ガスの生産量



**2010年にはロシアより
少なかった米国が、今や
ダントツの1位！**

天然ガスの生産量
のシェア
(2024年末)



**これらの国の生産量は
米国の1 / 4 以下！**

出典：Energy Institute 2025年

今や米国は世界最強のエネルギー輸出国！

米国の自給率

	石油	天然ガス
2005年	40%	84%
2010年 ～	・シェールガス革命	
2022年	107%	110%

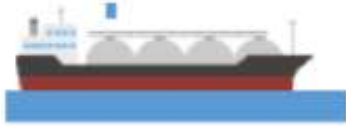


今やホルムズ海峡封鎖も怖くない！

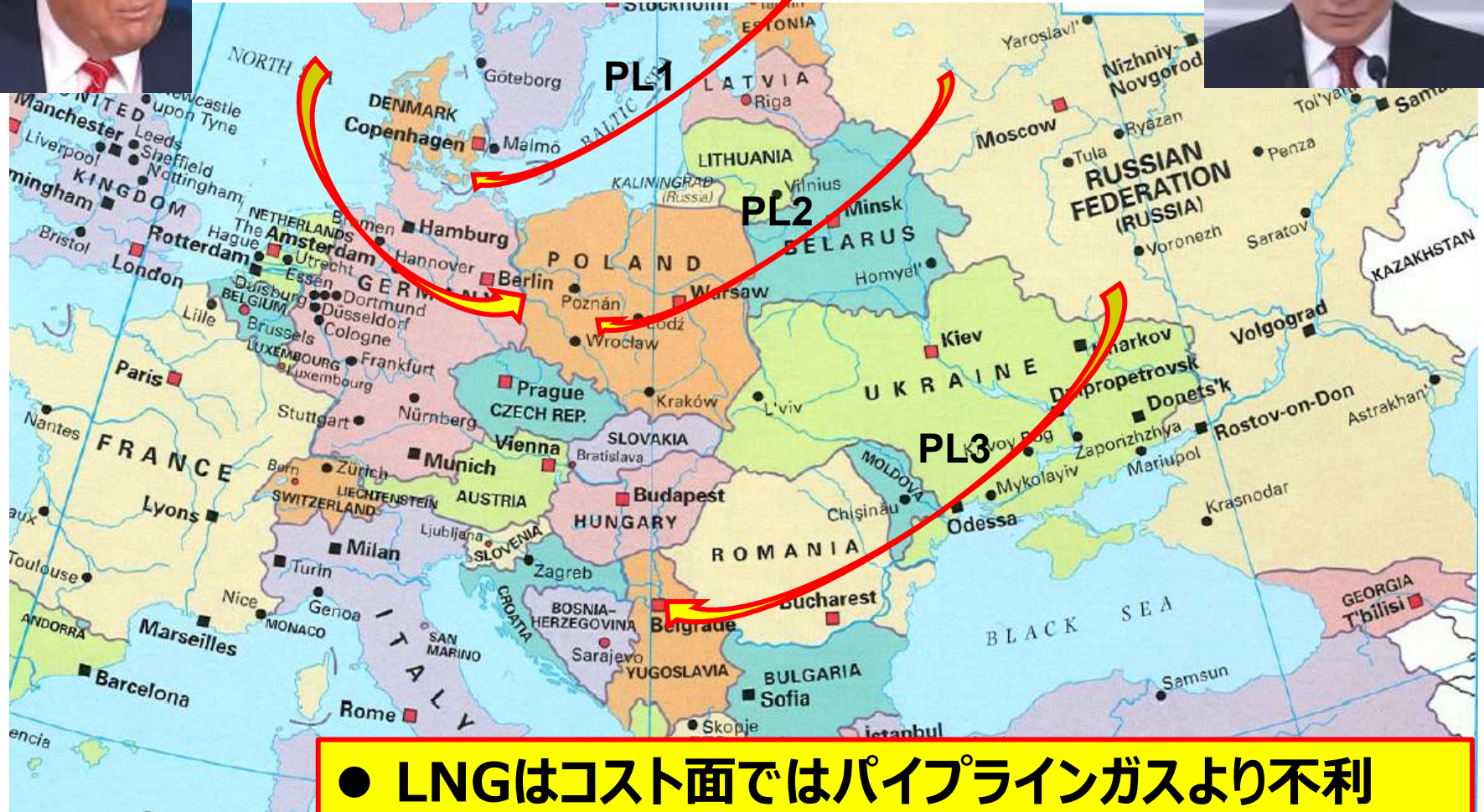
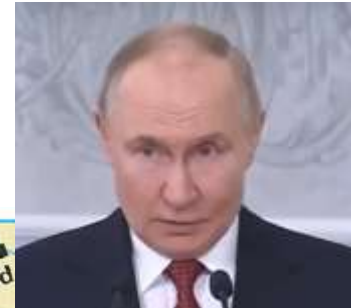
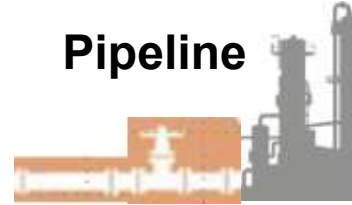
欧州市場への天然ガス供給はどうなる？



LNG



Pipeline



● LNGはコスト面ではパイプラインガスより不利

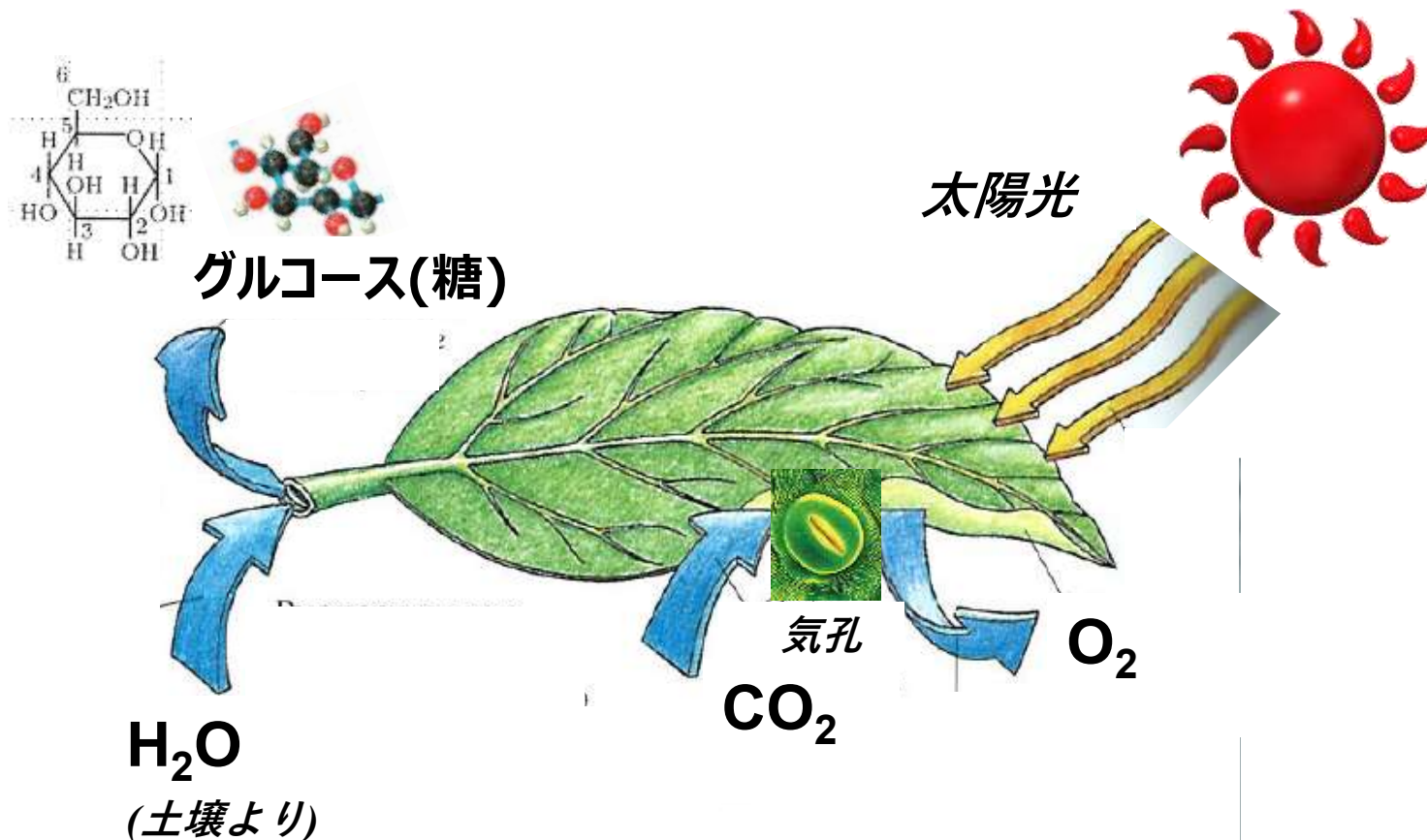
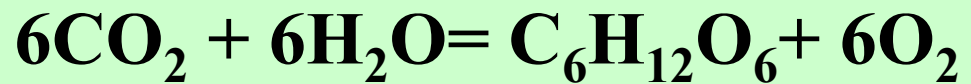
A wide-angle landscape photograph showing rolling hills under a clear, deep blue sky. The hills are covered in dry, yellowish-brown grass. In the distance, a range of mountains is visible on the horizon. On the right side of the image, there is a small cluster of dark green trees. The overall scene is peaceful and open.

May peace come with new energy situation...

The End

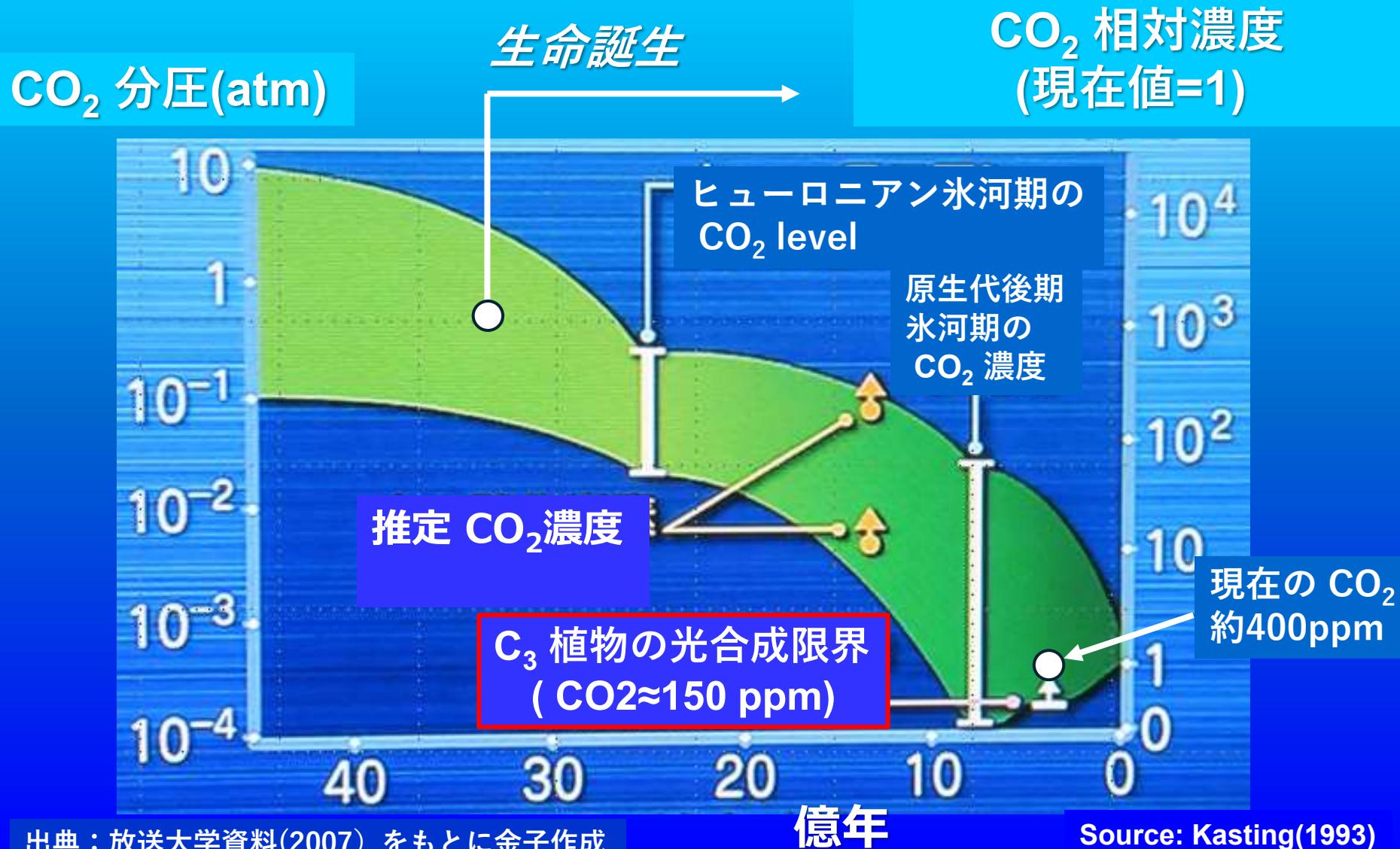
補足資料

光合成反応



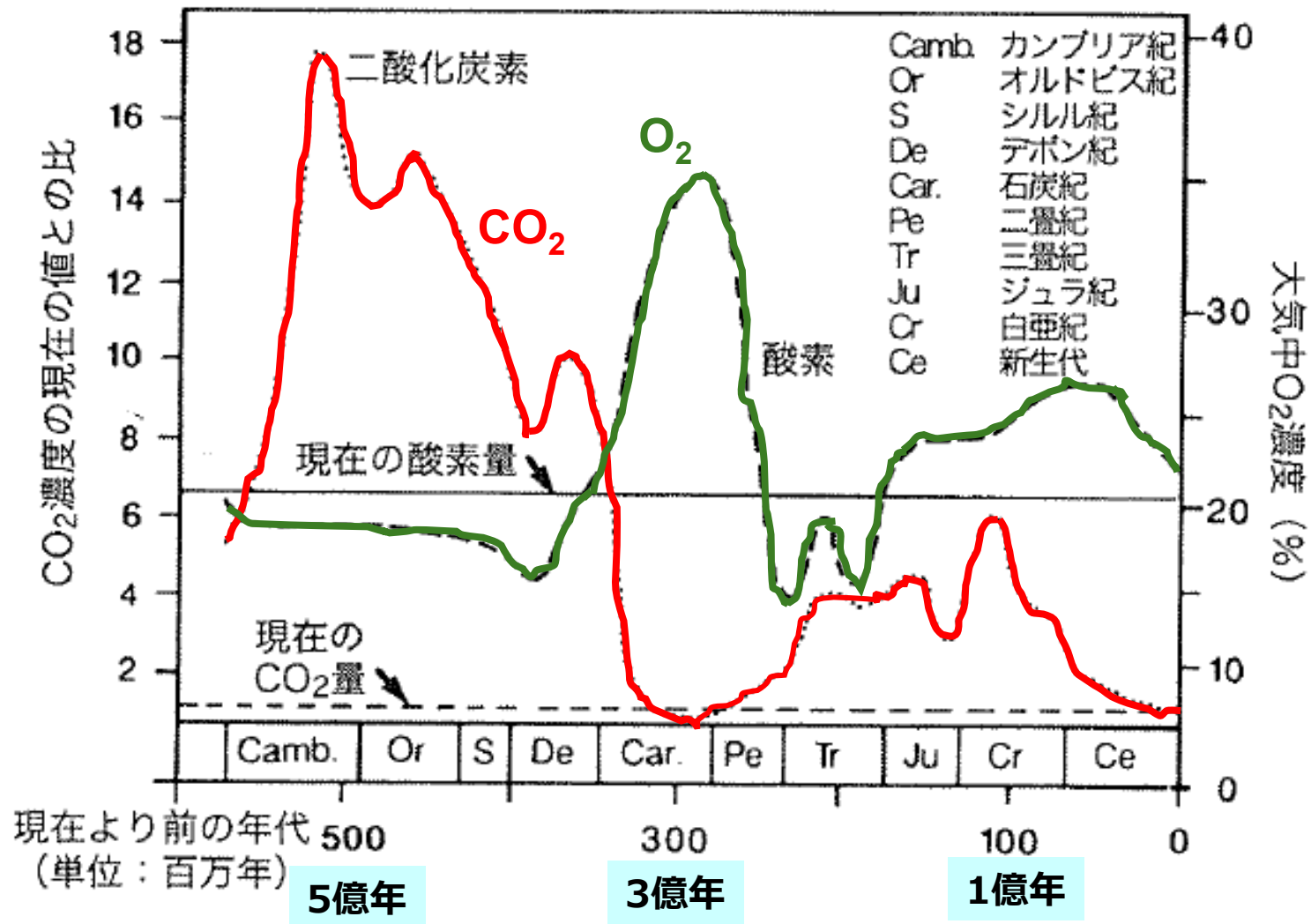
- 光合成は地球の歴史のなかでも最重要な画期的な反応である

地球の大気中の CO₂ 濃度の変遷



出典：放送大学資料(2007) をもとに金子作成

大気中の二酸化炭素濃度と酸素濃度（5億年～）

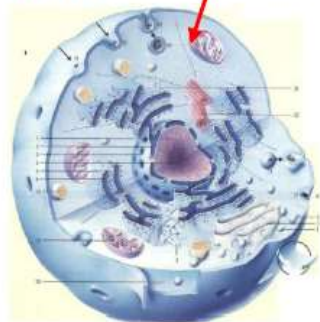


出典：“気候変動”、p.107、W. J. Burroughs著、松野太郎監訳、シュプリンガー・フェアラク東京

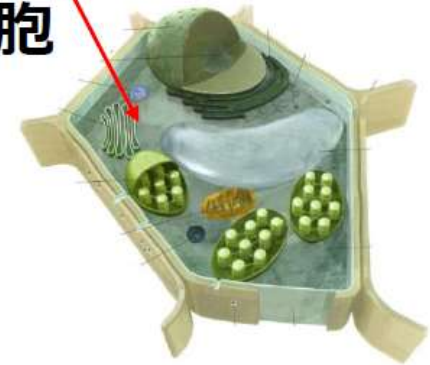
動物も植物も炭素でできている



動物の細胞



植物の細胞

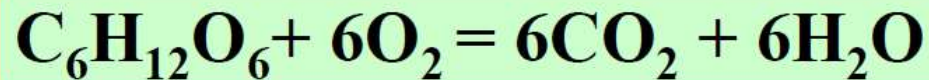


動物も植物も炭素・水素を酸素で燃焼して生きている

動物の細胞



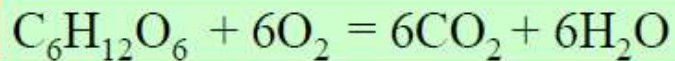
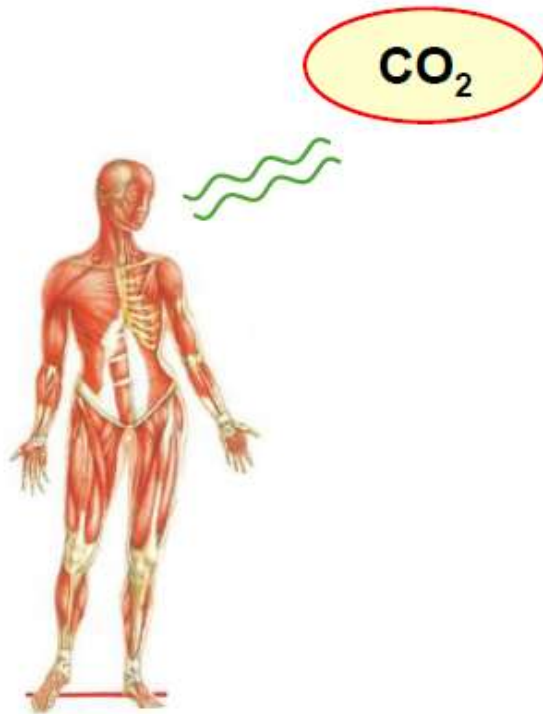
植物の細胞



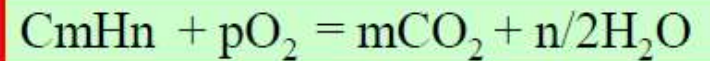
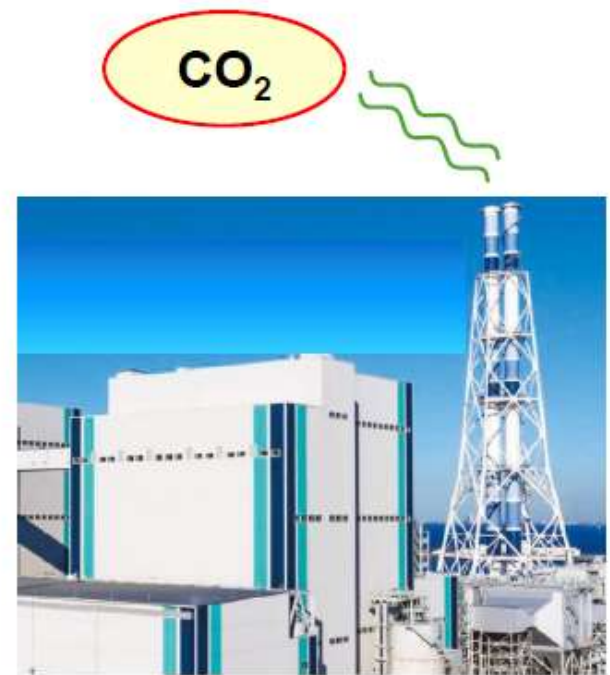
- 細胞の中の栄養素(C、Hの化合物)を酸素で燃焼してエネルギーを出し生きている
- 反応は基本的に光合成の逆反応→生きているということはCO₂を出すこと
- コロナ禍の時に空気中の酸素を肺が血液中に取り込めなくなった
→ECMOで強制的に酸素を血液中に送り込み、救命措置



人間のCO2排出と石炭火力



- 2400 kcal/日/人
- 40 g-CO2/h/人
- 1億2000万人の日本人
≈ 年間4千万トンの CO2 を排出



- 日本人は600万kWの石炭火力と
同量のCO2を排出している

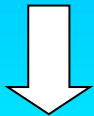
地球の表面温度

放射のみ : - 20 °C

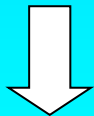
温室ガス効果 : + 35 °C

この温室効果は大気中のH₂OとCO₂が担っている！

太陽からの熱吸収 (6000 K黒体放射) : 大部分を
H₂O が吸収!



大気中の平衡



温室効果 :

H₂O : 21 °C

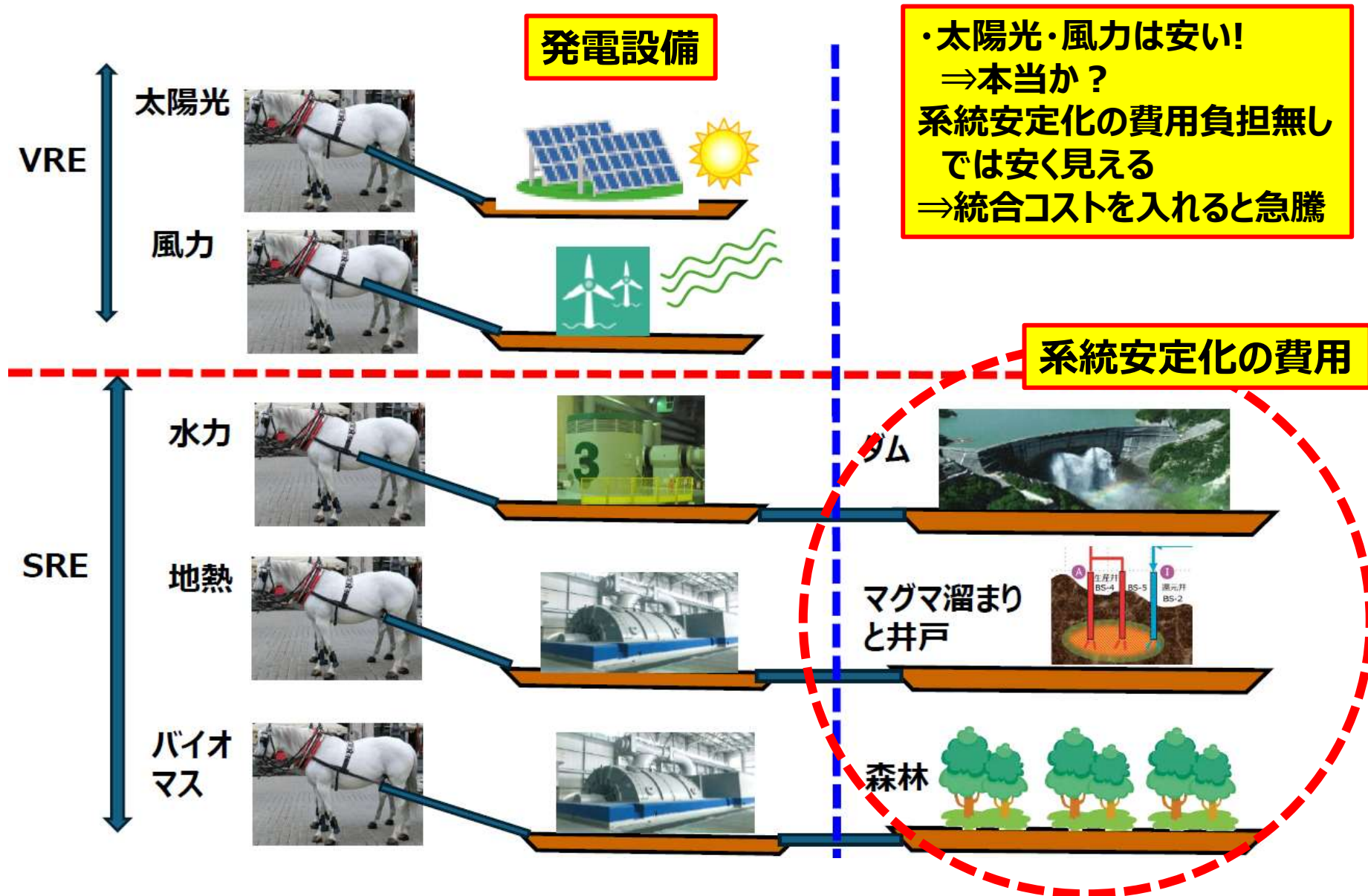
CO₂ : 7 °C

O₃他 : 7 °C

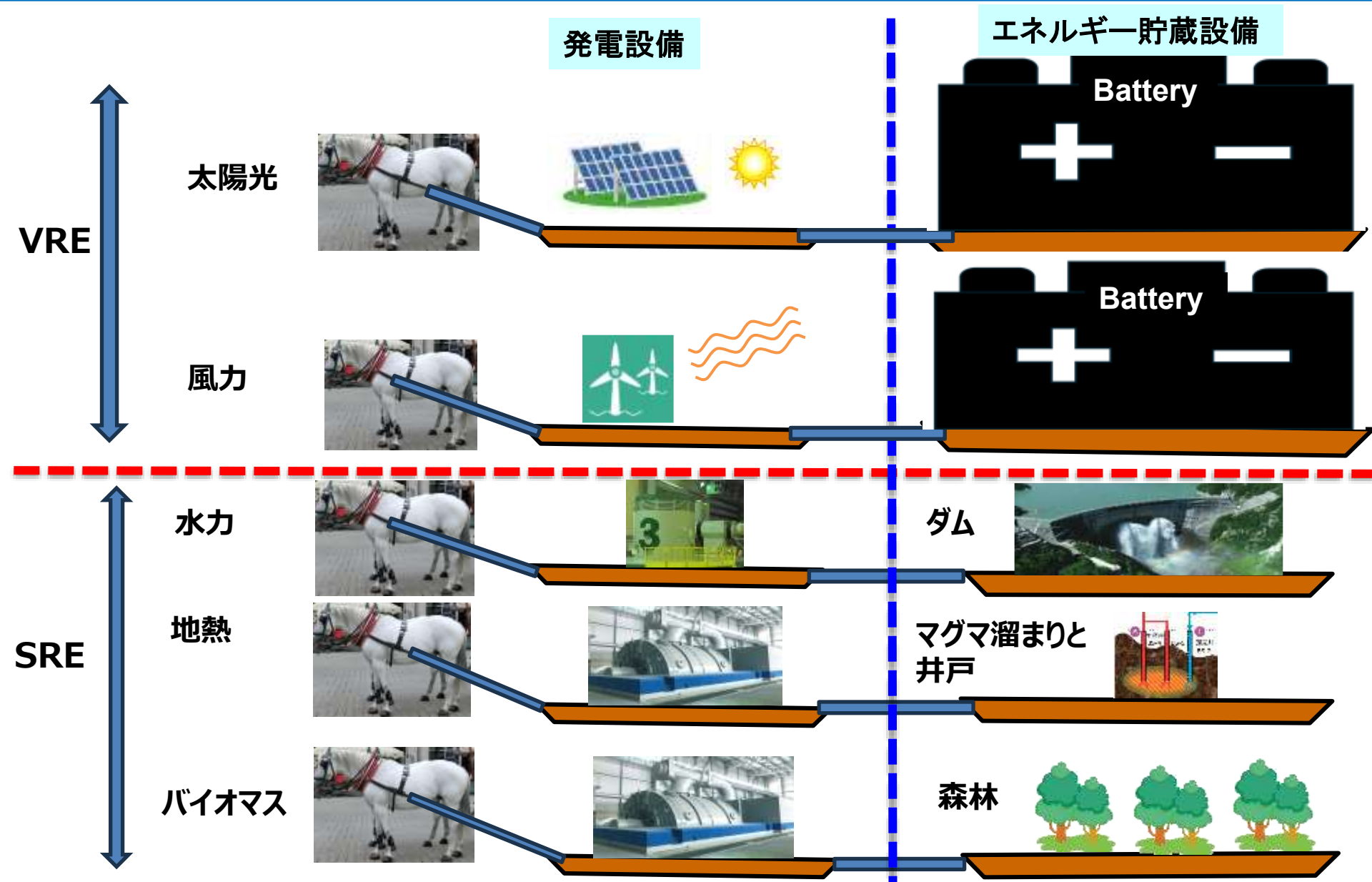
3倍！

地球表面からの放射 (288 K黒体放射) : 大部分を
CO₂ が吸収!

再エネ評価の問題点と正しい評価基準



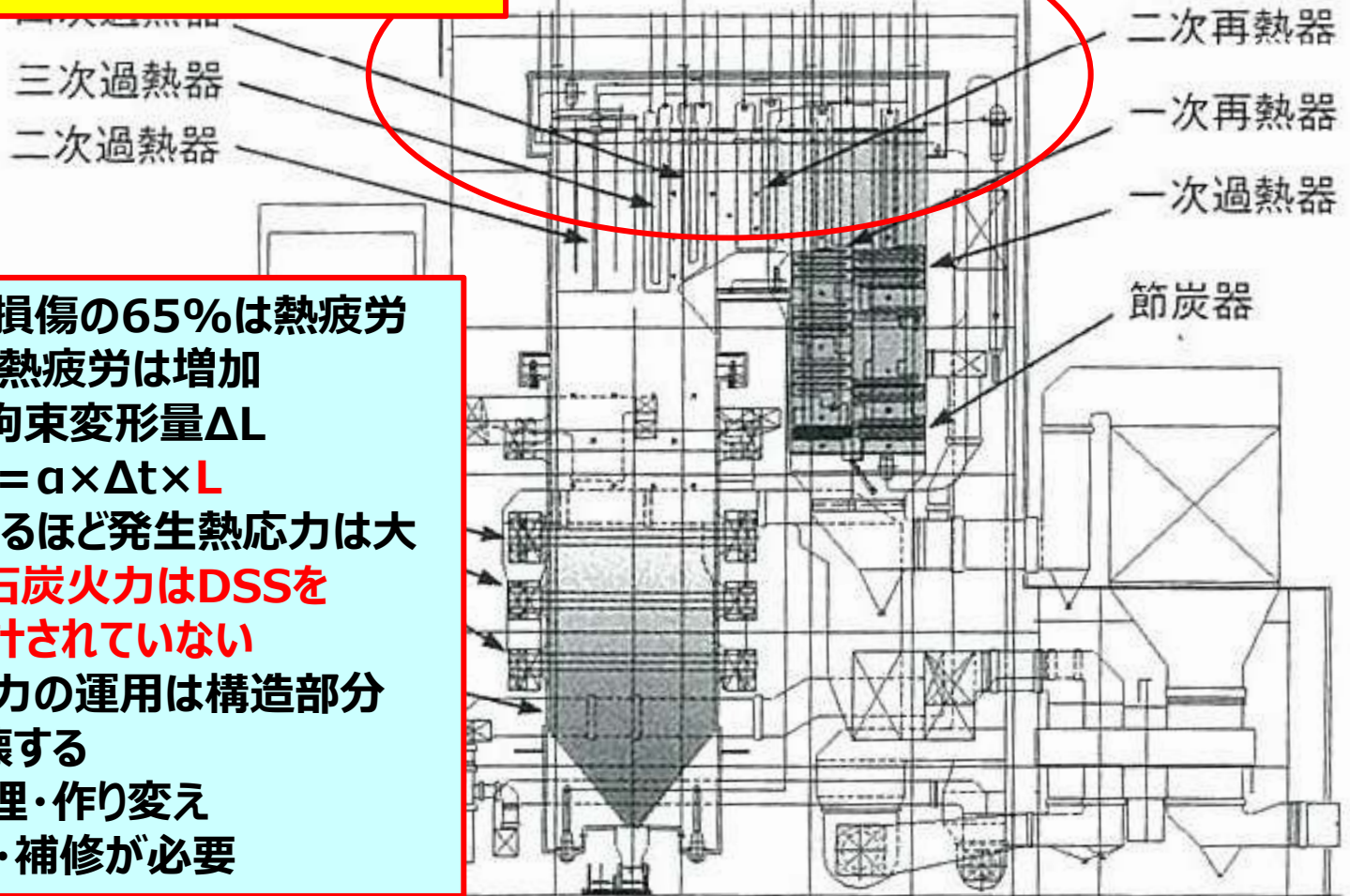
本当は安定化のために蓄電池が必要！



● 100万kWの石炭火力はDSSをやるようには設計されていない!

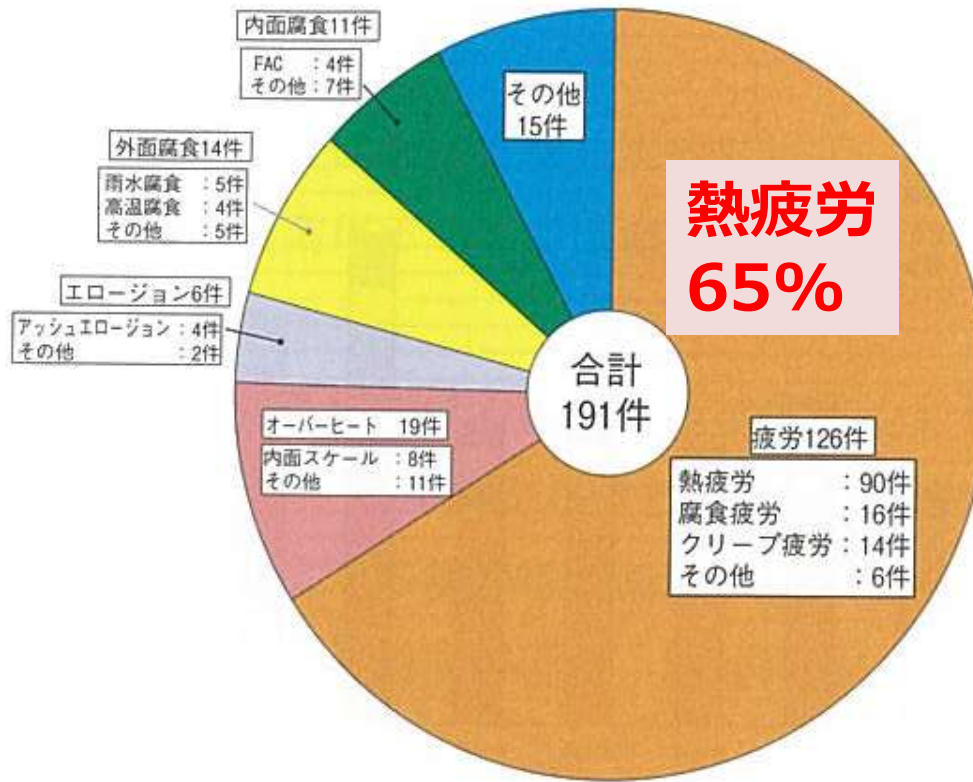
➤ 特に天井部分にしわ寄せがくる

熱伸び量 $\Delta L = \alpha \times \Delta t \times L$

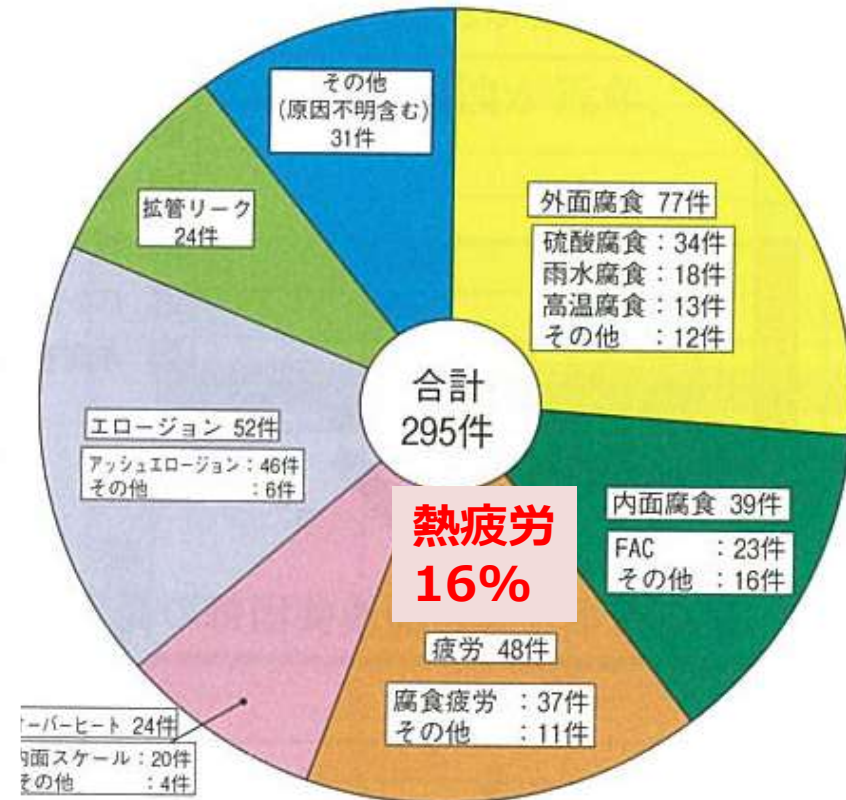


- 事業用火力の損傷の65%は熱疲労
- 大型になるほど熱疲労は増加
- 熱応力: $\sigma \propto$ 拘束変形量 ΔL
- 熱伸び量 $\Delta L = \alpha \times \Delta t \times L$
- 寸法が大きくなるほど発生熱応力は大
- 100万kWの石炭火力はDSSをやるようには設計されていない
- 過酷な石炭火力の運用は構造部分を徹底的に破壊する
- 数百か所の修理・作り変え
→ 数か月の停止・補修が必要

ボイラ耐圧部漏洩要因



事業用ボイラ



産業用ボイラ

大きいものほど熱疲労は厳しい!!

(出典 ; 「現場に密着した保守技術」 2007年12月号 No.615 Vol.58 , 火力原子力発電技術協会)

最適解：天下三分の計



1/3

再生可能
エネルギー

1/3

火力

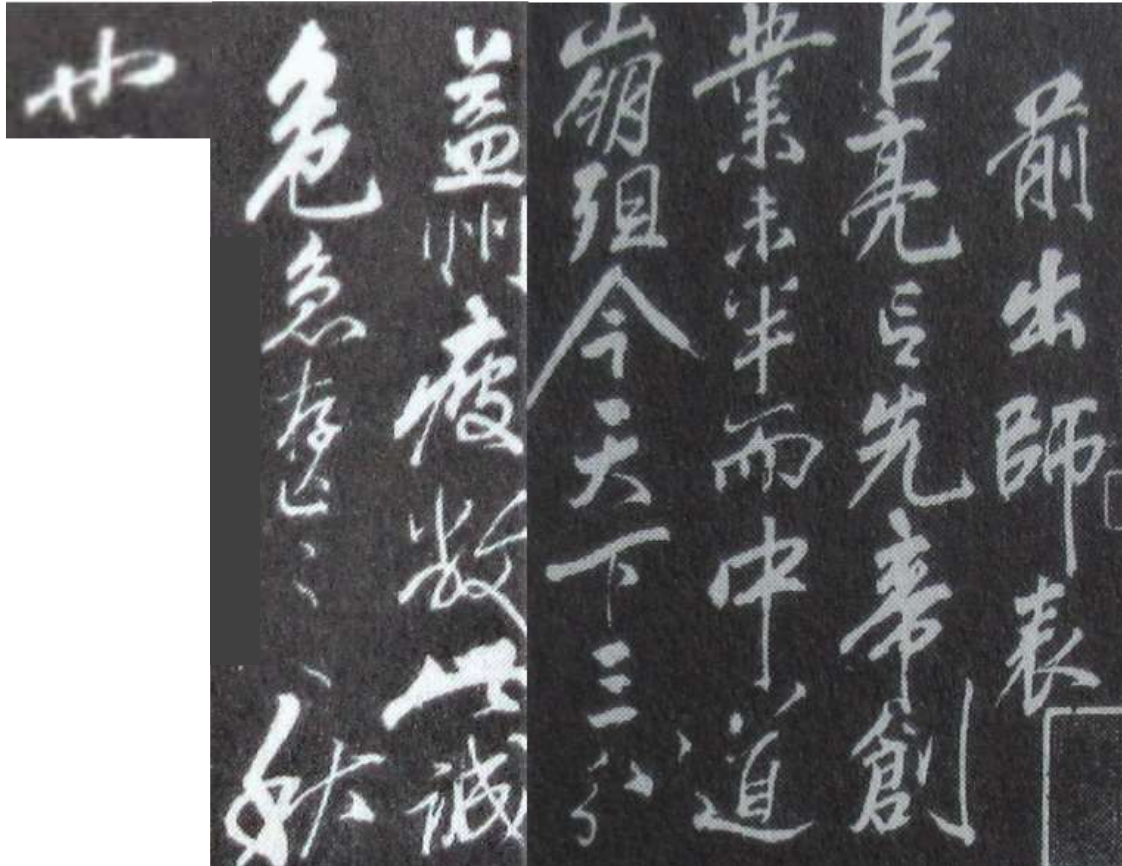
1/3

原子力

	再生可能エネルギー	火力	原子力
長所	・自然エネルギーの利用	・柔軟で自由な対応力	・圧倒的な濃縮度 ・安定した発電
短所	・超希薄なエネルギー源 ・変動性・予見不可能性 (お天気まかせ)	・化石燃料依存 ・CO2発生量	・安全性の要求

- 単独で百点満点のエネルギー源は存在しない!
- 長所・短所を補い合うことが重要

今、火力発電が危ない



今、天下三分、益州疲弊し、危急存亡の秋なり