

再生可能エネルギーで温暖化と化石燃料涸渇を防止し 全世界の豊かな発展のために

橋本功二* 熊谷直和 泉屋宏一

高野裕之 吉田哲也 四宮博之 佐々木祐介 切畠雄貴
加藤善大 幅崎浩樹 秋山英二

東北工業大学 日立造船株式会社
北海道大学大学院工学研究科 東北大学金属材料研究所

*東北大学名誉教授 東北工業大学名誉教授 koji@imr.tohoku.ac.jp

090-4049-1121

きらきら発電 April 30, 2018

私達の地球

太陽系で生物が存在できる唯一の星
大気があって循環する水があるお陰

温室効果ガスと温暖化

地球を暖めてくれるのは太陽

地球の温度は一定

地球に入って来た熱は地球外に出て行く

温室効果ガスは毛布

(水蒸気、二酸化炭素、メタンなど)

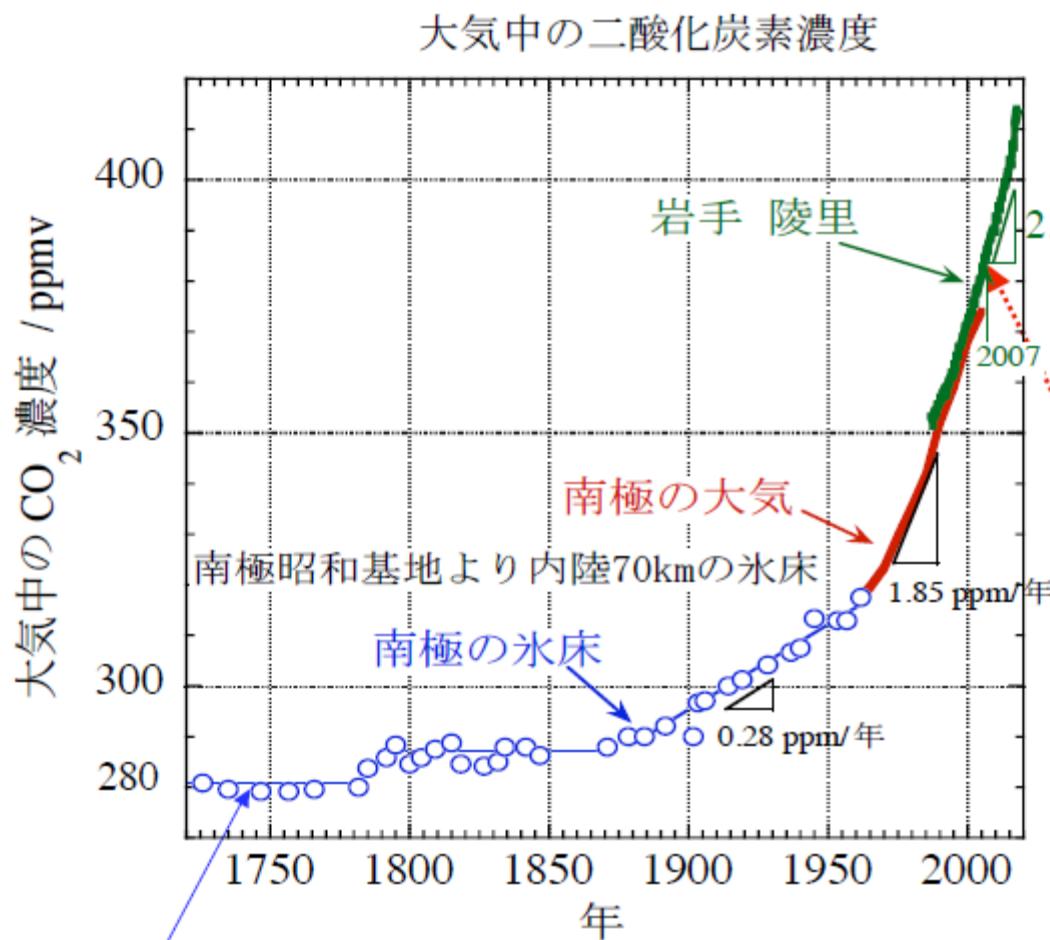
地球の平均気温

毛布がなければ -18°C

毛布があるので 14°C

自然の炭素循環で安定な二酸化炭素濃度維持

毛布が厚くなり過ぎれば温暖化

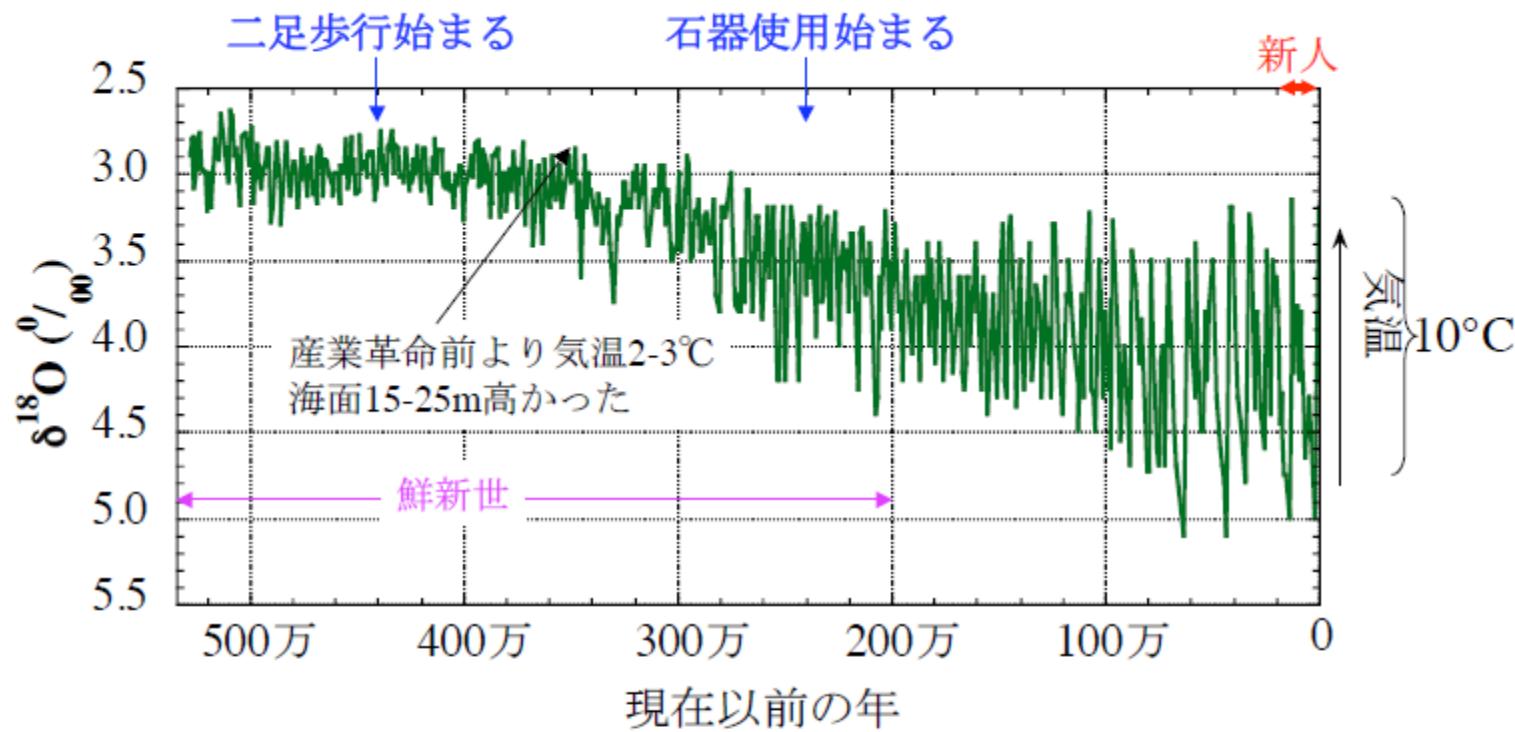


二酸化炭素濃度は産業革命の100年後から2つの世界大戦をへて先進国の高度成長期まで産業の振興と共に一定速度で増した。

1970年以降は大量に排出され地球が処理しきれない二酸化炭素が年々大気中に急速に蓄積され続けている

気候変動枠組み条約締約国会議2007年第4次評価報告書は、大気中の二酸化炭素濃度が350万年前の値に達したと伝えた

人類は有史以来280ppmの二酸化炭素を含む大気の中で生きてきた



350万年前にヒマラヤが最も高く隆起して、モンスーンが激しく大雨がヒマラヤを浸食、カルシウムが溶け出して、二酸化炭素と反応し炭酸カルシウムの固体を生成して大気の二酸化炭素を捕捉低減
地球が250万年かけて下してくれた二酸化炭素濃度を人間が下げる方法はない

二酸化炭素排出を控える以外の答えはない

Lorraine E. Lisiecki and Maureen E. Raymo, A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records, PALEOCEANOGRAPHY, VOL. 20, PA1003, doi:10.1029/2004PA001071, 2005

42万年前以降の現在との気温差

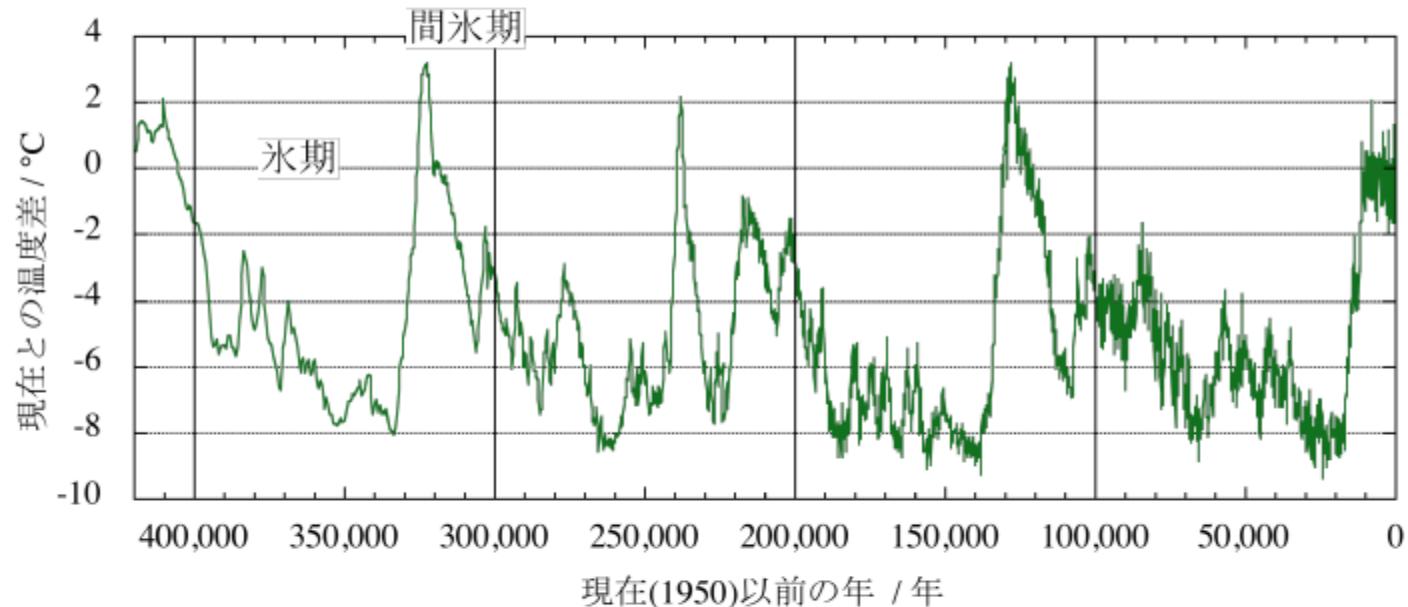
ミランコビッチ サイクル (Milutin Milanković) (1920年代)

太陽から届く光量の変化が気温を決める—太陽と地球の距離の変化

地球軌道の円と楕円の間の変化で太陽と地球の距離最大1,800万km変化 (10万年周期)

地球軌道に対する自転軸の傾きの変化(4.1万年周期) 自転軸の歳差運動(1.8-2.3万年周期)

南極大陸東の現在との温度差

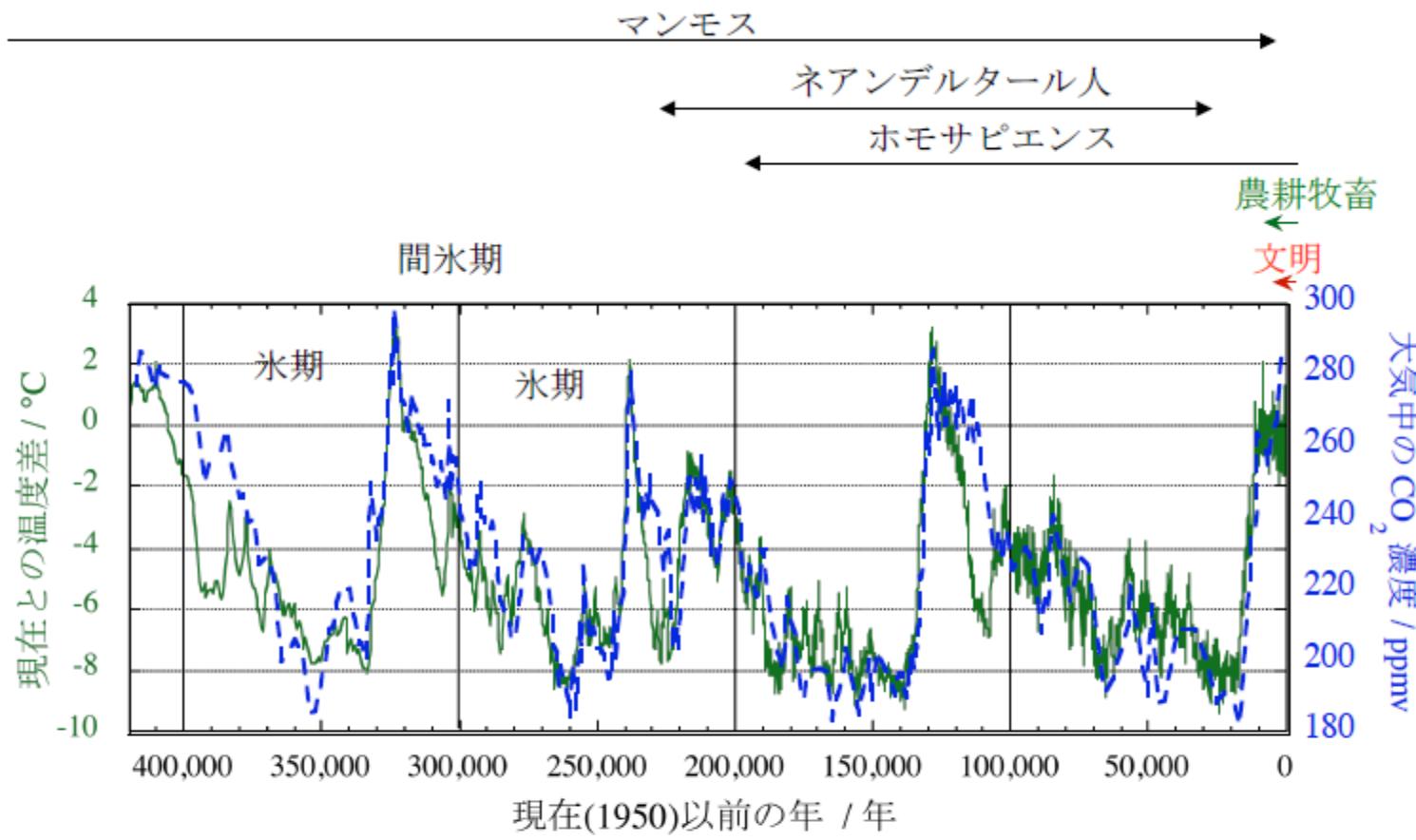


1998年1月 ロシア、アメリカ、フランスの共同チームが南極大陸東ロシアヴォストーク基地
の氷床を3,623 mまでボーリングし42万年前までの氷試料を採取分析

5

<http://www.grida.no/publications/vg/climate/page/3057.aspx>

J. R. Petit, et al., Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica, *Nature* 399, 429–436 (3 June 1999)

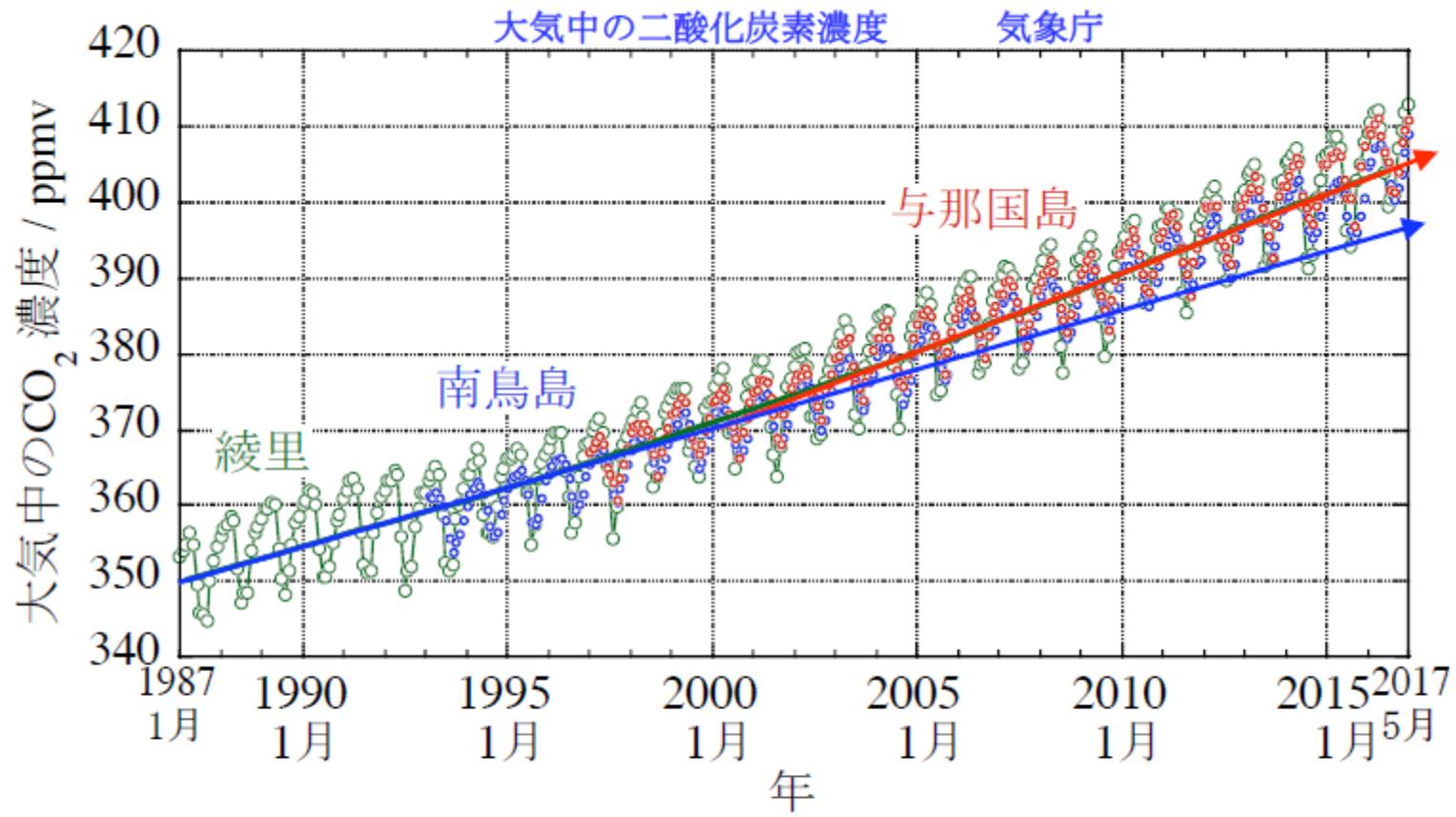


大気中の二酸化炭素濃度は、気温低下から1万年ほど遅れて下がり始めている

低温の海水程二酸化炭素の溶解度大→大気中の二酸化炭素濃度低下

気温が下がると二酸化炭素は海によけいに溶けるので

大気中の二酸化炭素濃度が下がる



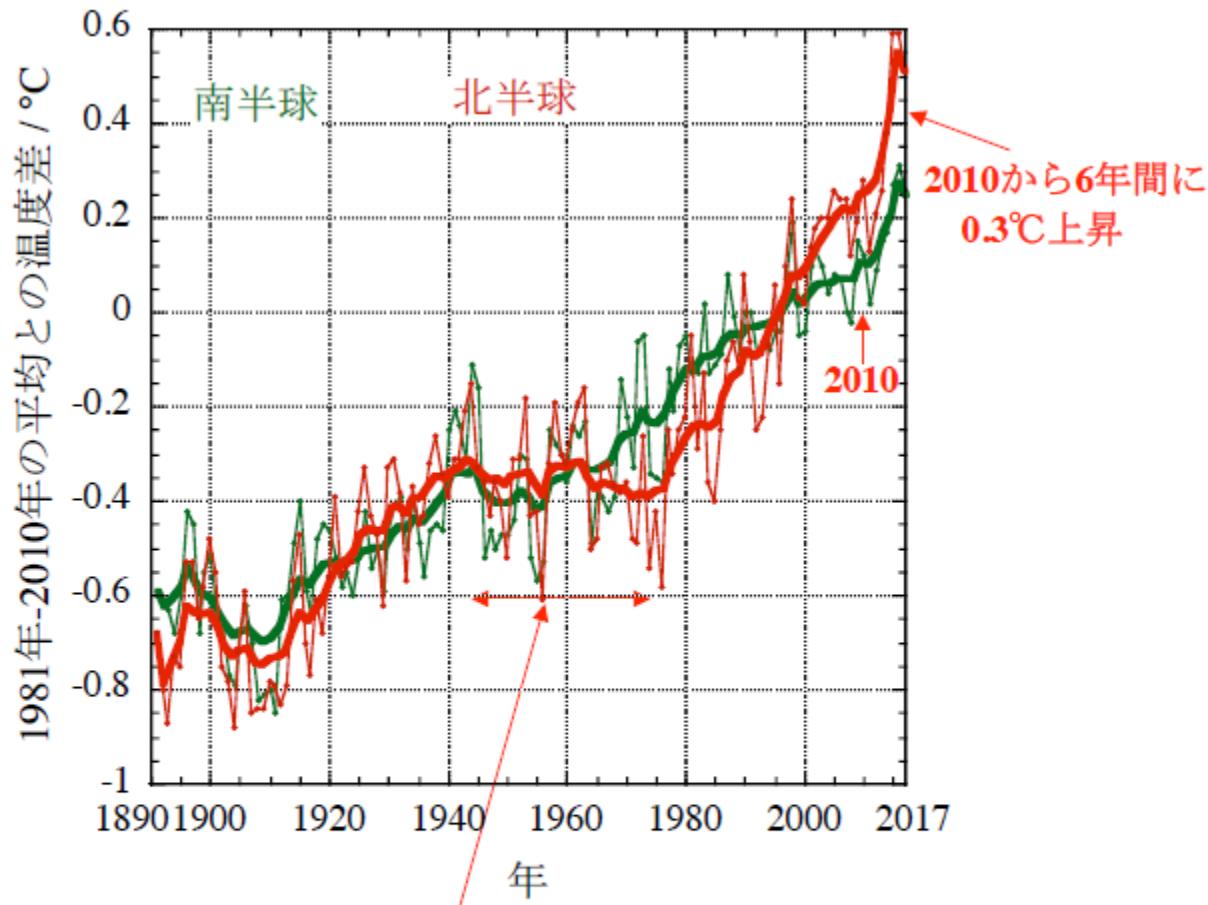
春から秋 光合成活発 二酸化炭素濃度減 10-15ppm 植物の能力
 秋から春 光合成不活発 二酸化炭素濃度増

気象庁温室効果ガス等観測地点

大船渡 綾里：高緯度で陸上植物の活動による季節変動大

南鳥島：日本の最東端 亜熱帯 同緯度 季節変動小

与那国島：日本の最西端

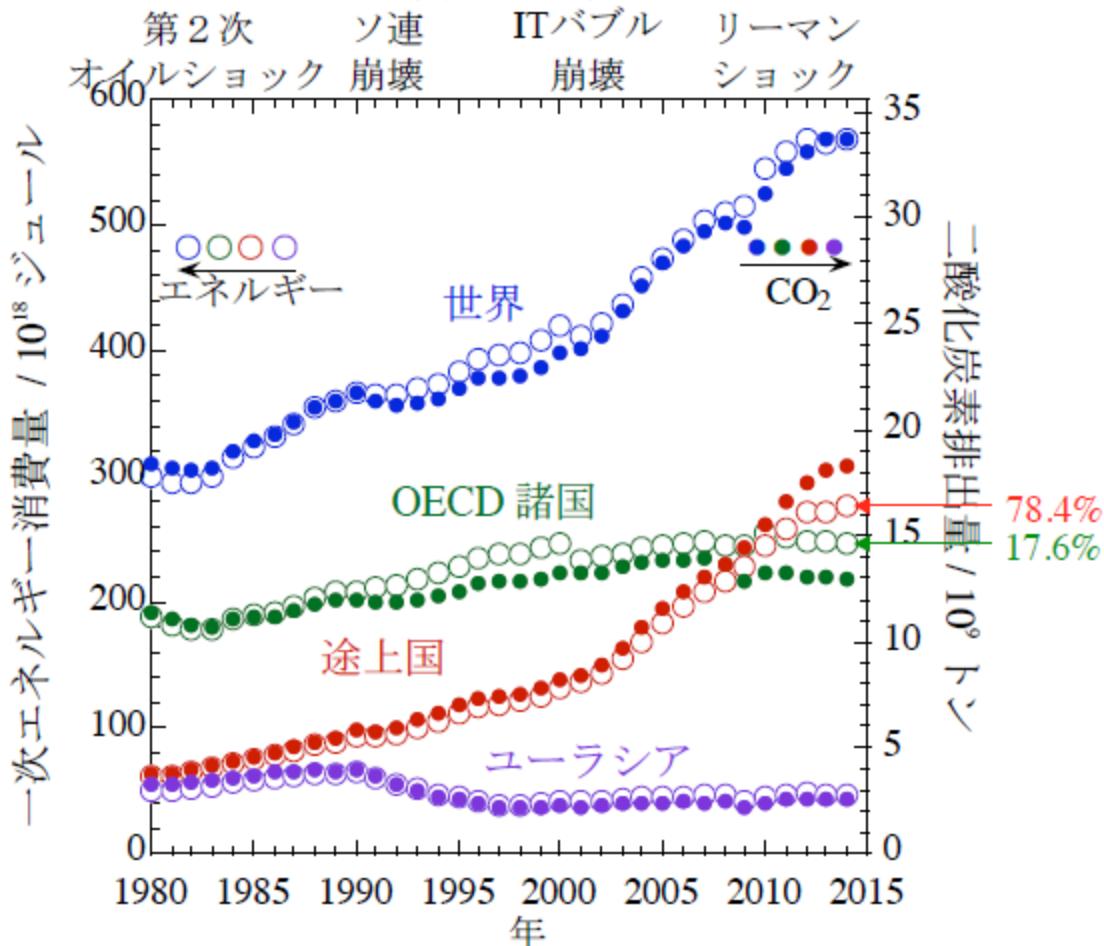


先進国はほとんど北半球にあって、先進国の高度経済成長による大気汚染で
太陽光遮蔽—寒冷化

1970年以降先進国の大気汚染が収まって

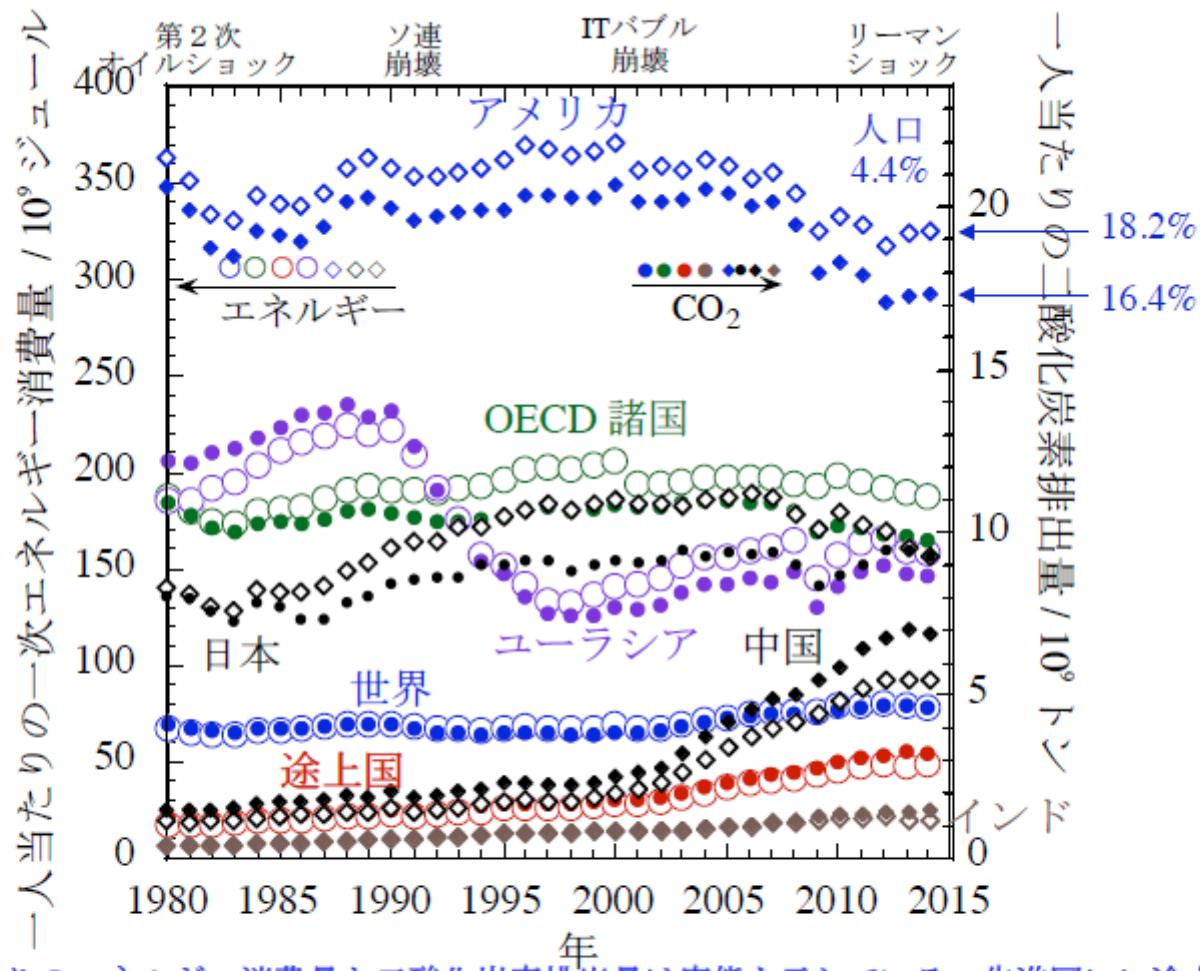
北半球で二酸化炭素濃度の増大による急速な気温上昇が見えるようになった 気象庁

世界のエネルギー消費と二酸化炭素排出の実態



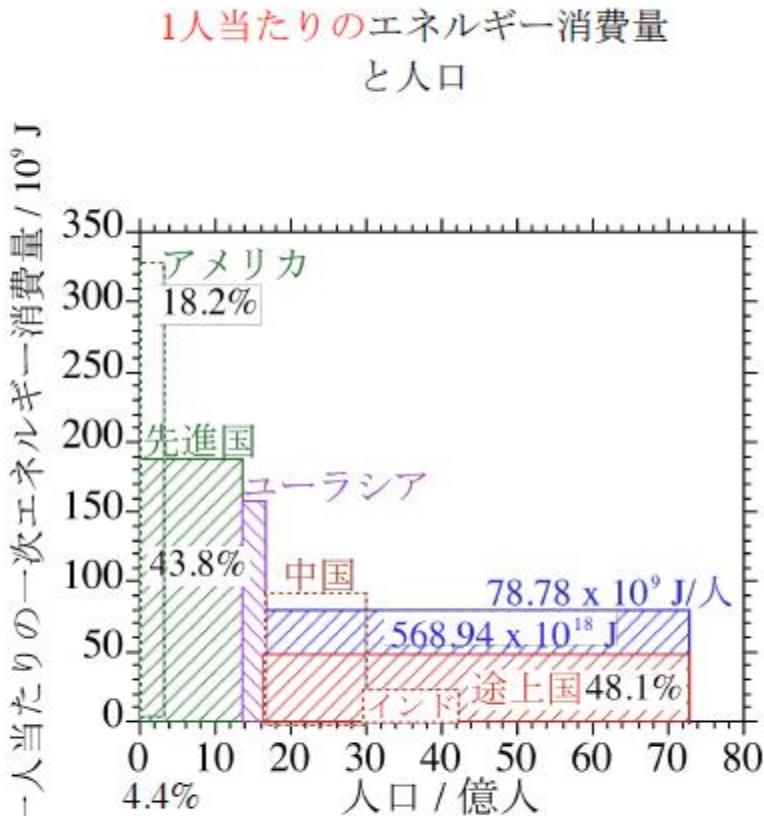
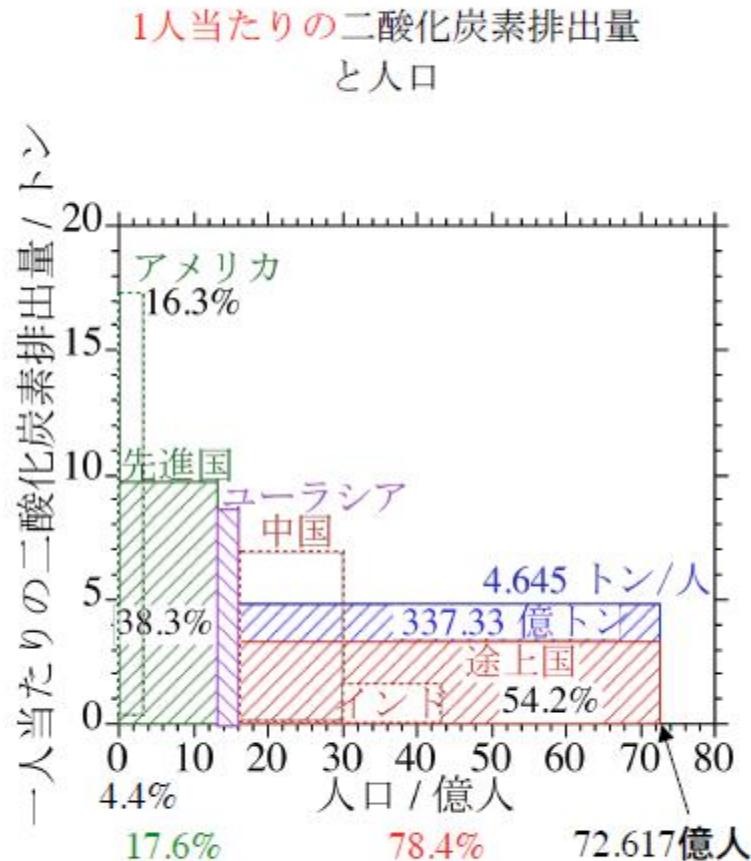
消費一次エネルギーの90%は化石燃料：エネルギー消費とともに二酸化炭素排出増大

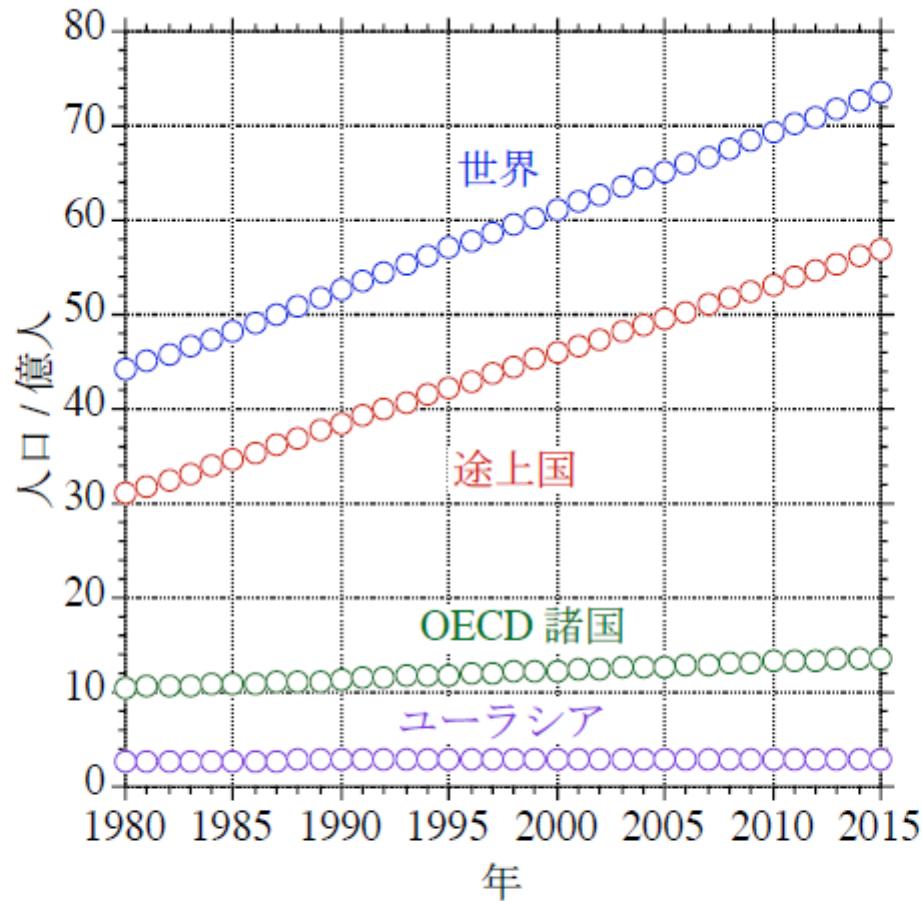
経済不況だけが一次エネルギー消費と二酸化炭素排出の増大を抑える



一人当たりのエネルギー消費量と二酸化炭素排出量は実態を示している 先進国>>途上国
 1997年京都議定書で先進国は二酸化炭素の排出を少し減らすことを決めたが、実績は全くない
 2015年パリ協定 産業革命以前の気温より上昇を2°C以内に留める、できれば1.5°Cに：生存には必須

2014年

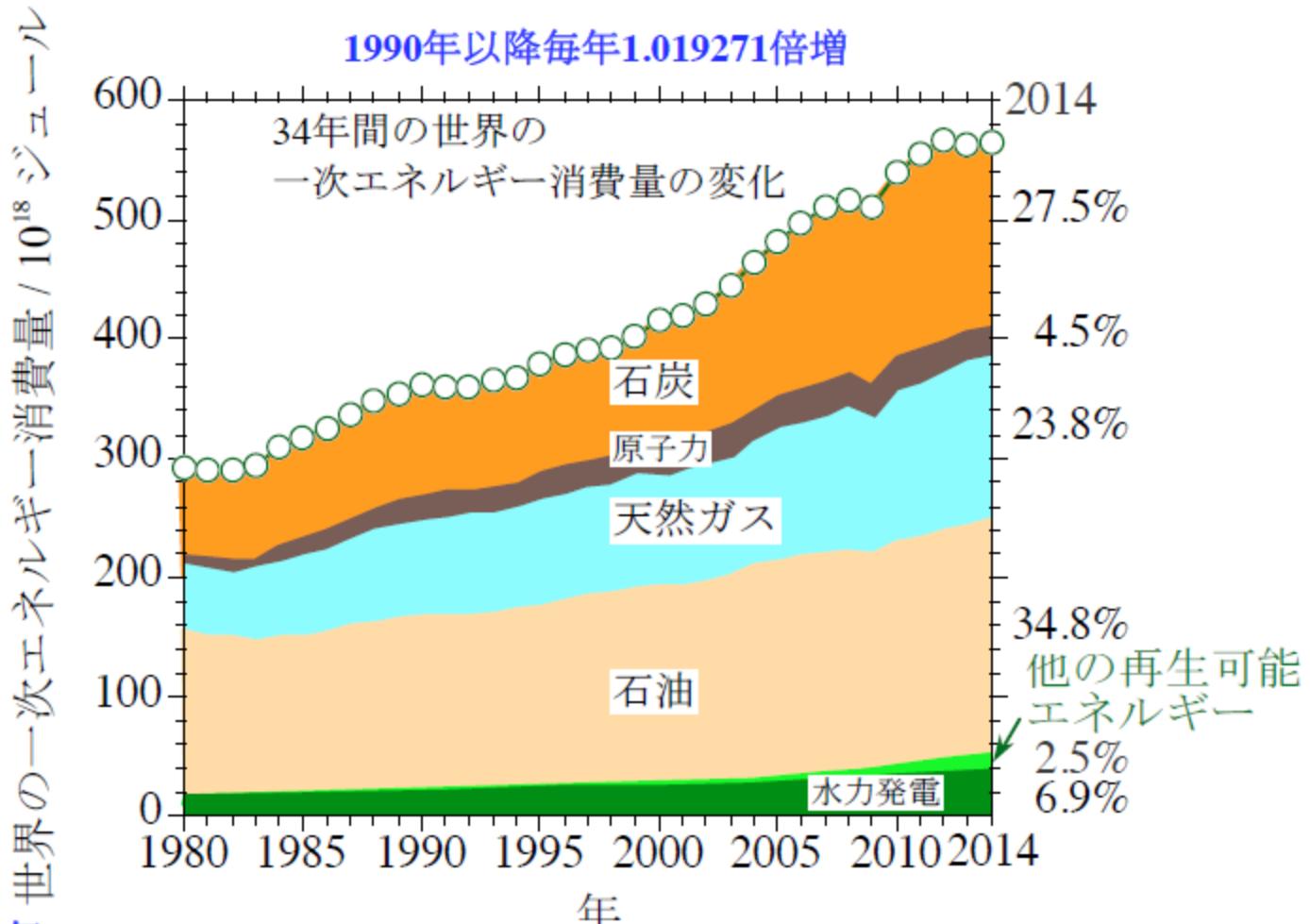




世界の人口は毎年8360万人ずつ増大している EIA & World Bank

世界のエネルギー消費量と二酸化炭素排出量は増大し続ける

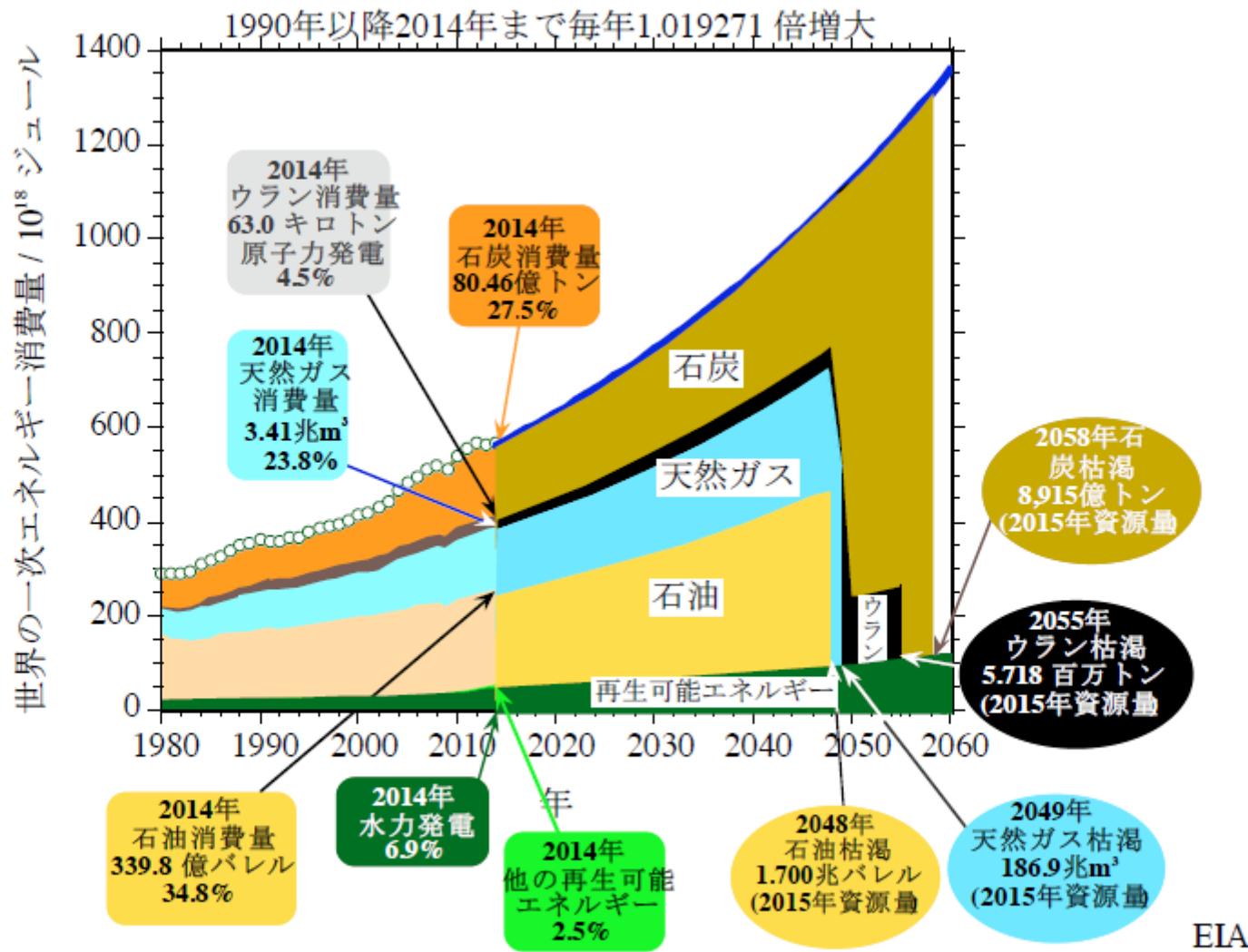
再生可能エネルギーだけをエネルギー源とし、化石燃料使用をやめる以外の答えはない



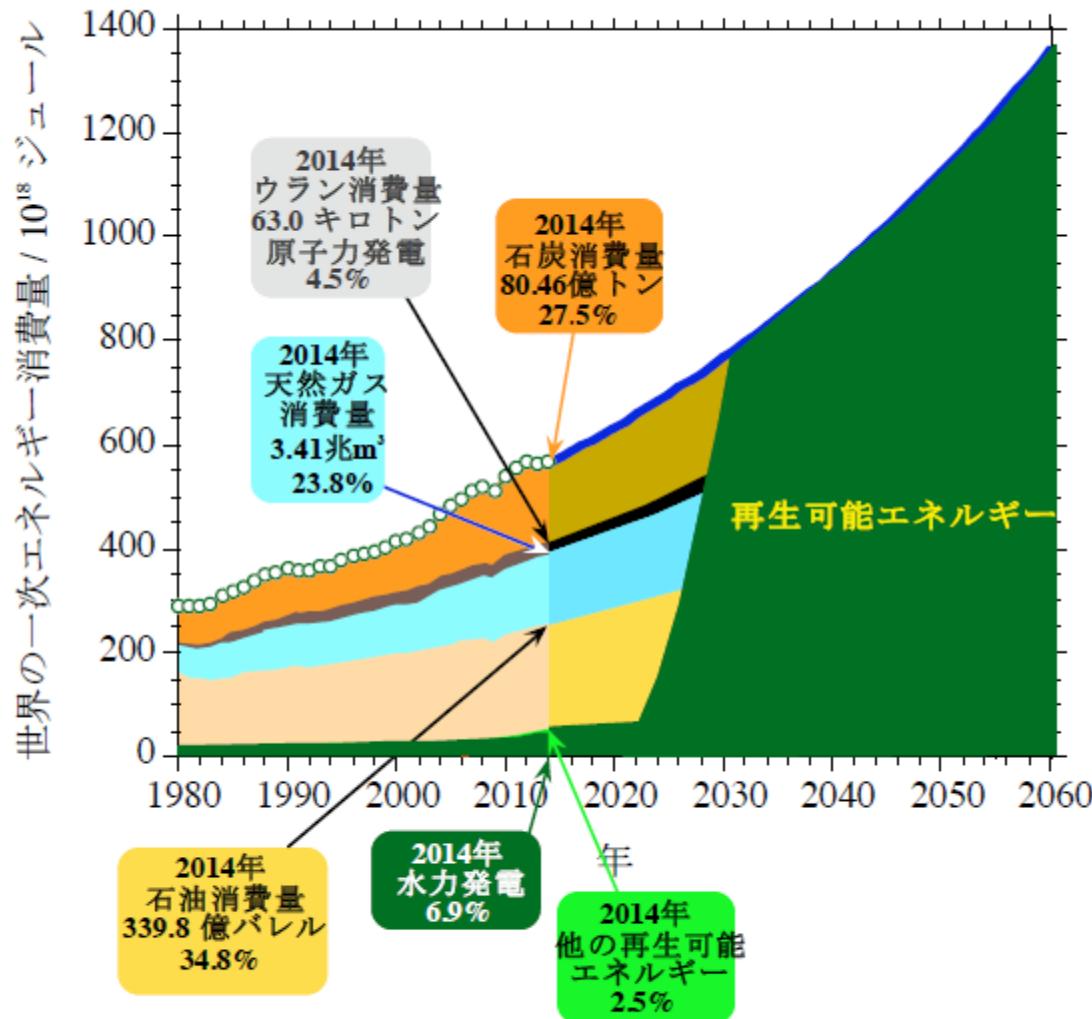
2014年

化石燃料86.1%、原子力エネルギーわずか4.5%、再生可能エネルギー9.4% 13

EIA



今世紀半ばまでに化石燃料もウランもなくなる。耐え難い温暖化



再生可能エネルギーだけで世界が生きる道を確立する

バイオで生きる？ 樹木の燃焼エネルギーと密度

赤檉 14.89キロジュール/g 0.74

赤ハンノキ 18.611キロジュール/g 0.4-0.7

三葉松 28.45キロジュール/g 0.67

仮定：樹木の燃焼エネルギー20キロジュール/g 密度0.7

2014年に一人ひとりが消費した一次エネルギー

1日分214,700キロジュールだけの木を育てる

直径20cmの木の幹の高さで一人毎日

世界平均 48.8cm

日本人 97.5cm

アメリカ人 202.2cm

バイオは補助的燃料！

全人類へ電力供給に必要な砂漠の面積

1000W/m²の太陽光日射時間：1日8時間

発電効率：20%

2014年の世界のエネルギー消費量

568.939×10^{18} ジュール

この量の電力を作るのに必要な砂漠の面積

$0.2706 \times 10^6 \text{ km}^2$

世界の主な砂漠の面積の1.19%

オーストラリアの主な砂漠の8.02%

地球の主な砂漠の面積： $22.69 \times 10^6 \text{ km}^2$

再生可能エネルギーは世界中が生きて行くのに十分過ぎる量がある

水素

1970年代の私達の夢

洋上での太陽電池発電の電力を利用して
海水の電気分解で水素を製造し世界に供給

輸送方法がない
燃焼装置がない

輸送と燃焼のインフラが普及していない
燃料は世界では使えない

水素

低エネルギー

2760 L 水素（気体） : 1 L ガソリン（液体）

爆発し易い

大気中に4%-75%水素: 爆発

輸送法なし (液化するとエネルギーを使い尽くす)

沸点: -252.6°C, 1kgの水素の液化は10-14kWh電力消費

1kgの水素の燃焼エネルギーの30-40%に相当

発電効率は40%であるのに

容器

水素燃料電池自動車

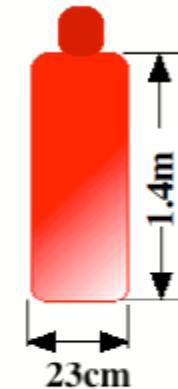
700 気圧

燃焼装置なし

水素ボンベ

54.6 kg

147気圧 7 m³



東北大学金属材料研究所 1980年代末

二酸化炭素と水素からメタンを造る高性能触媒の発見

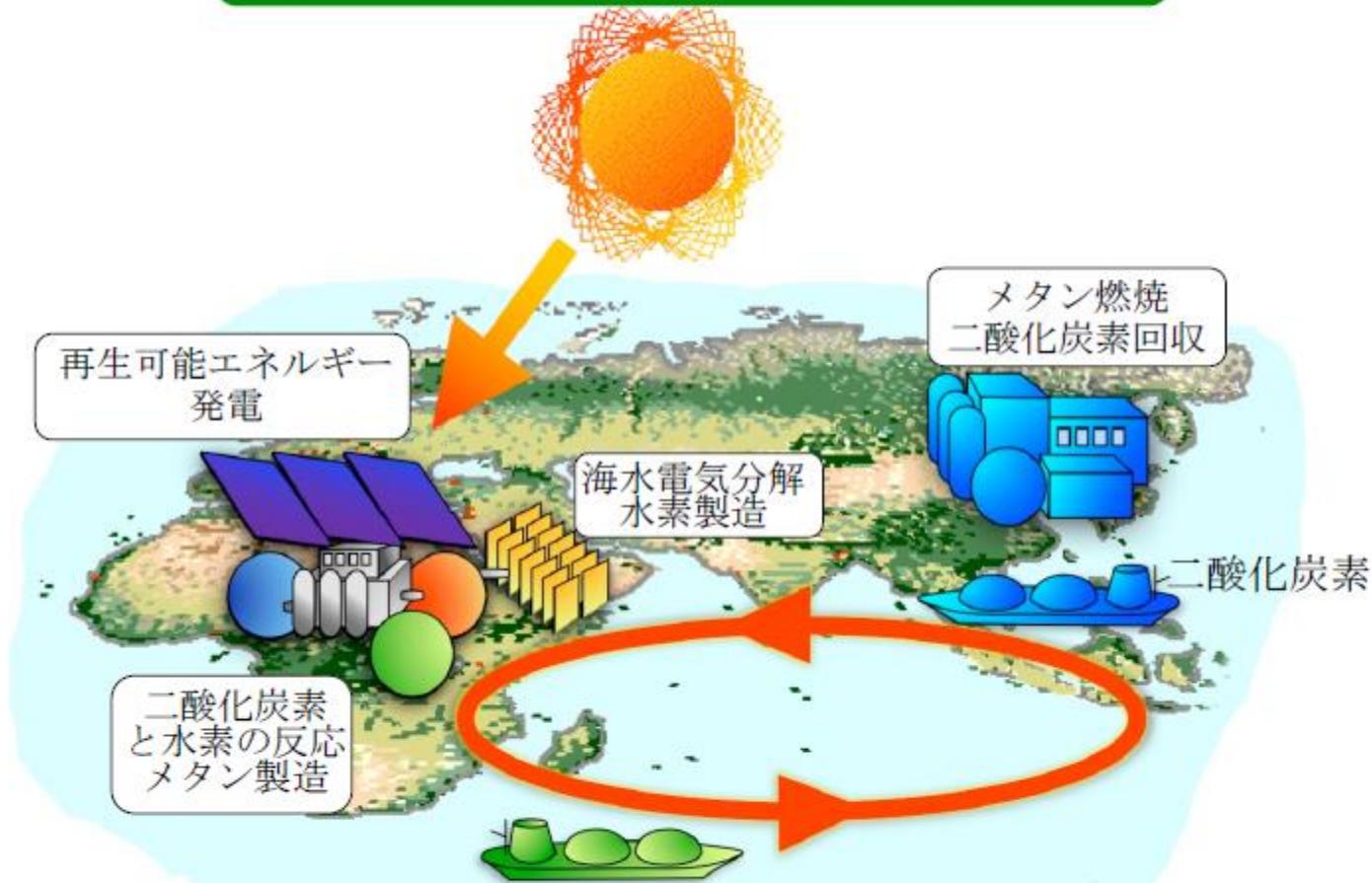
二酸化炭素 + 水素 → メタン + 水



天然ガスと同じ使い慣れた燃料

メタン

グローバル二酸化炭素リサイクル



二酸化炭素を排出せずに再生可能エネルギーだけで世界中が生きていける
水素製造とメタン製造の技術が産業になれば実現できる 21

グローバル二酸化炭素リサイクルの キーマテリアル

水素製造

水電解 陰極 水素 H_2 製造

陽極 酸素 O_2 製造

メタン製造

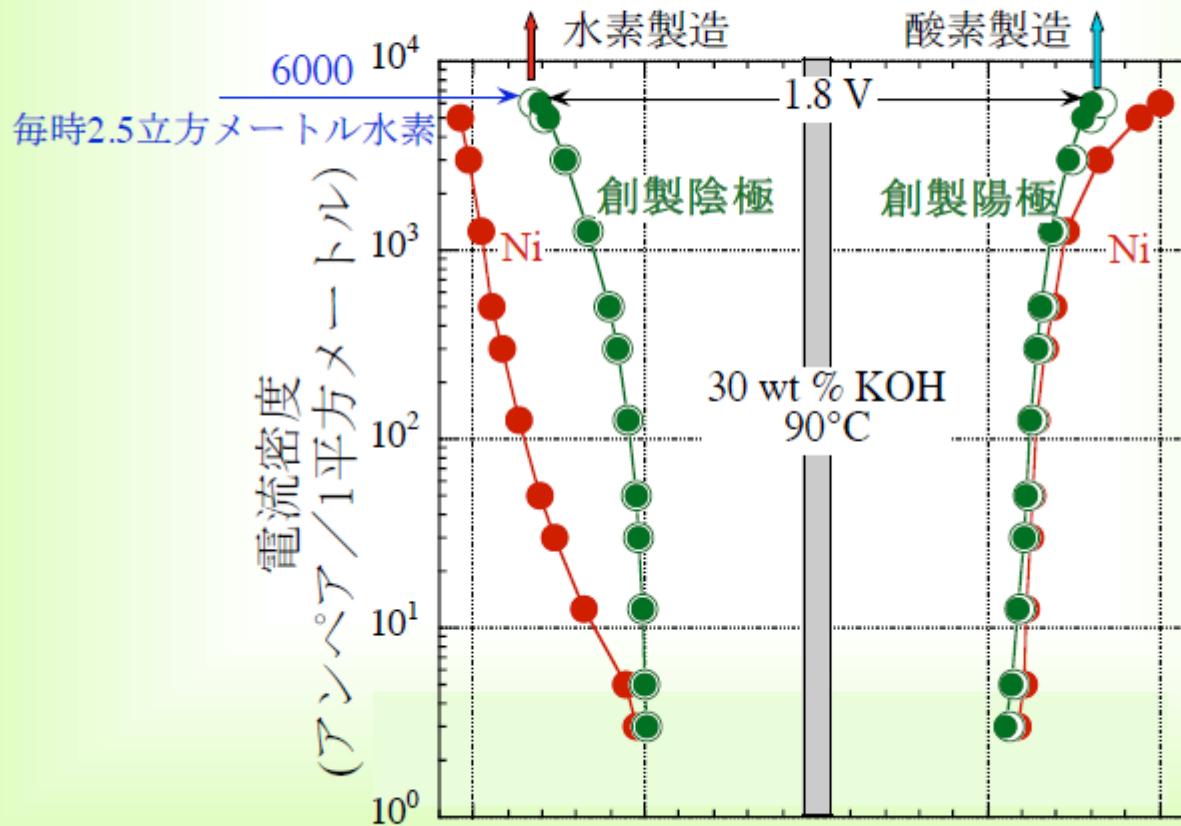
触媒

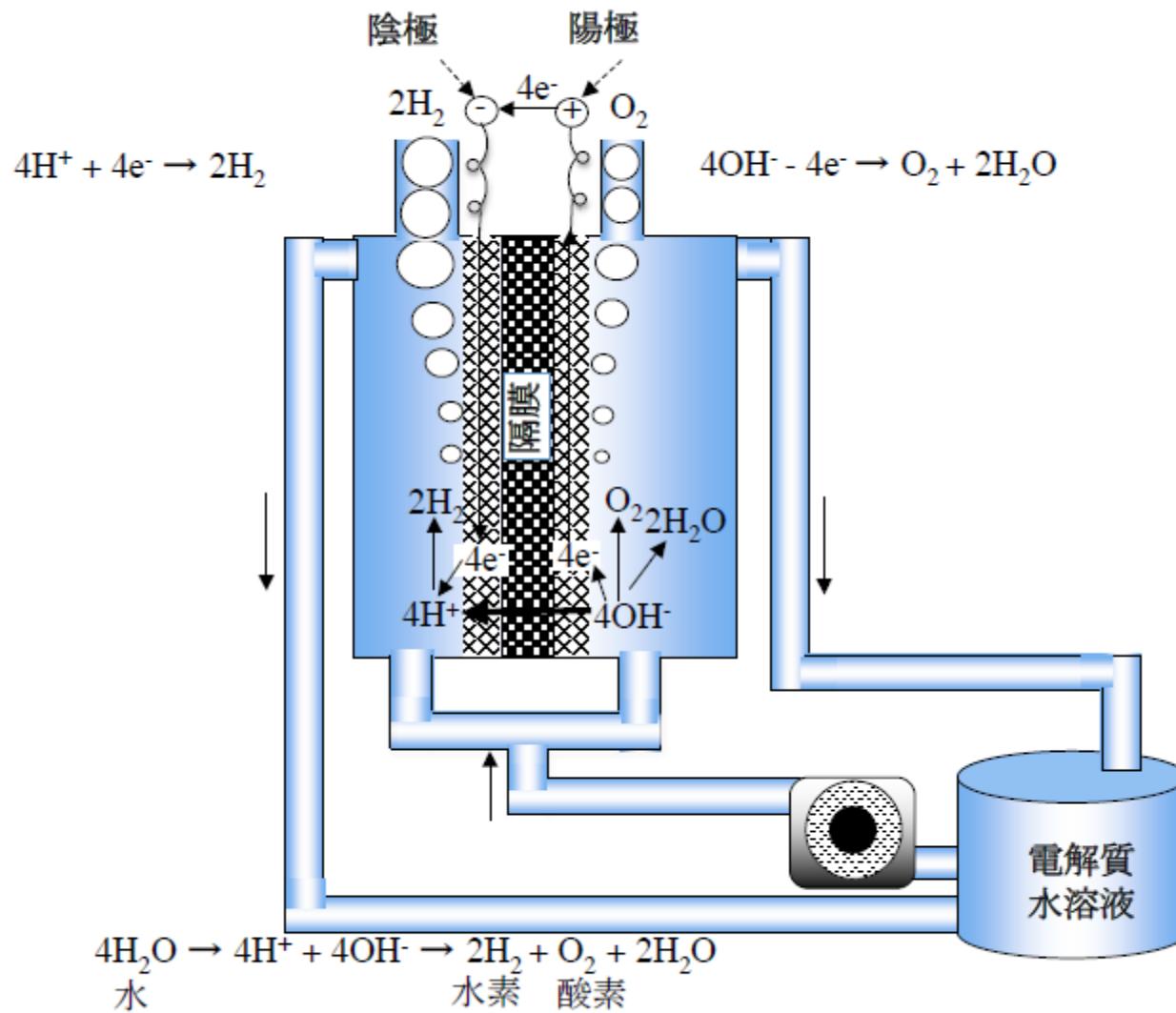
H_2 と CO_2 の反応によるメタン CH_4 製造

新陰極と新陽極: 産業用の高い水素製造速度で陰極と陽極の間の電圧をできる限り下げる
目標: 水素と酸素を分ける隔膜付きで1平方メートルの電極に6000アンペアで1.8V

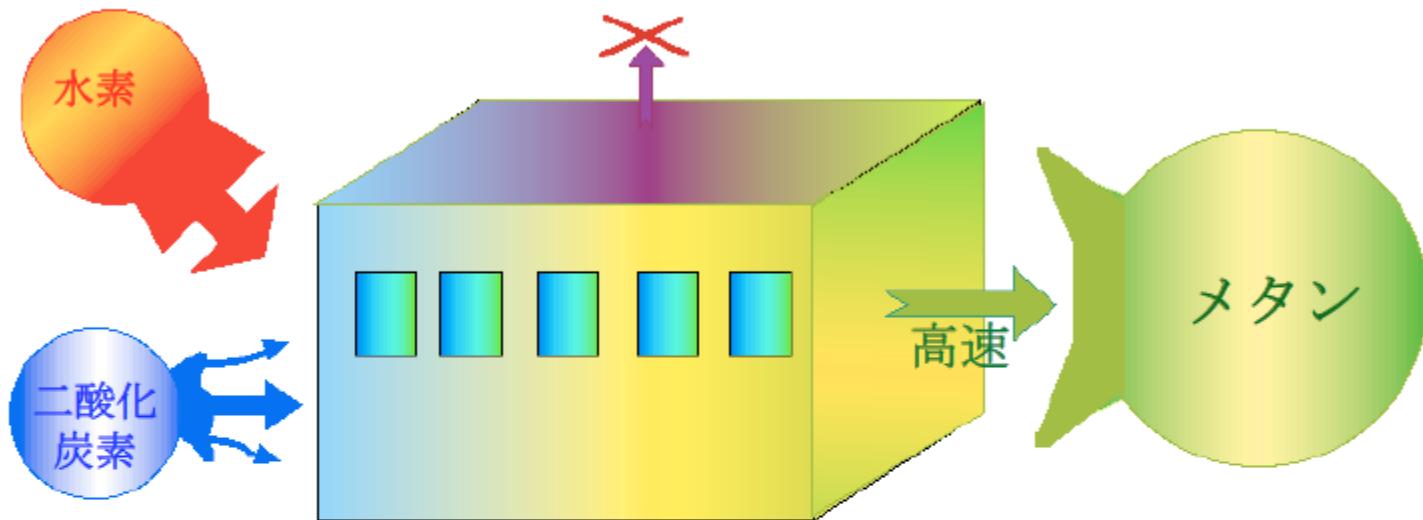
毎時4.3 キロワットで1立方メートル水素

毎時17.2 キロワットで1立方メートルメタン 達成

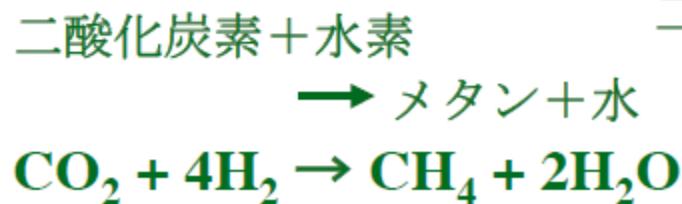




メタン製造

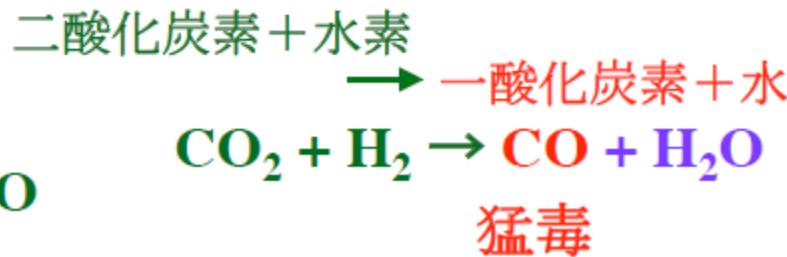


必要な反応

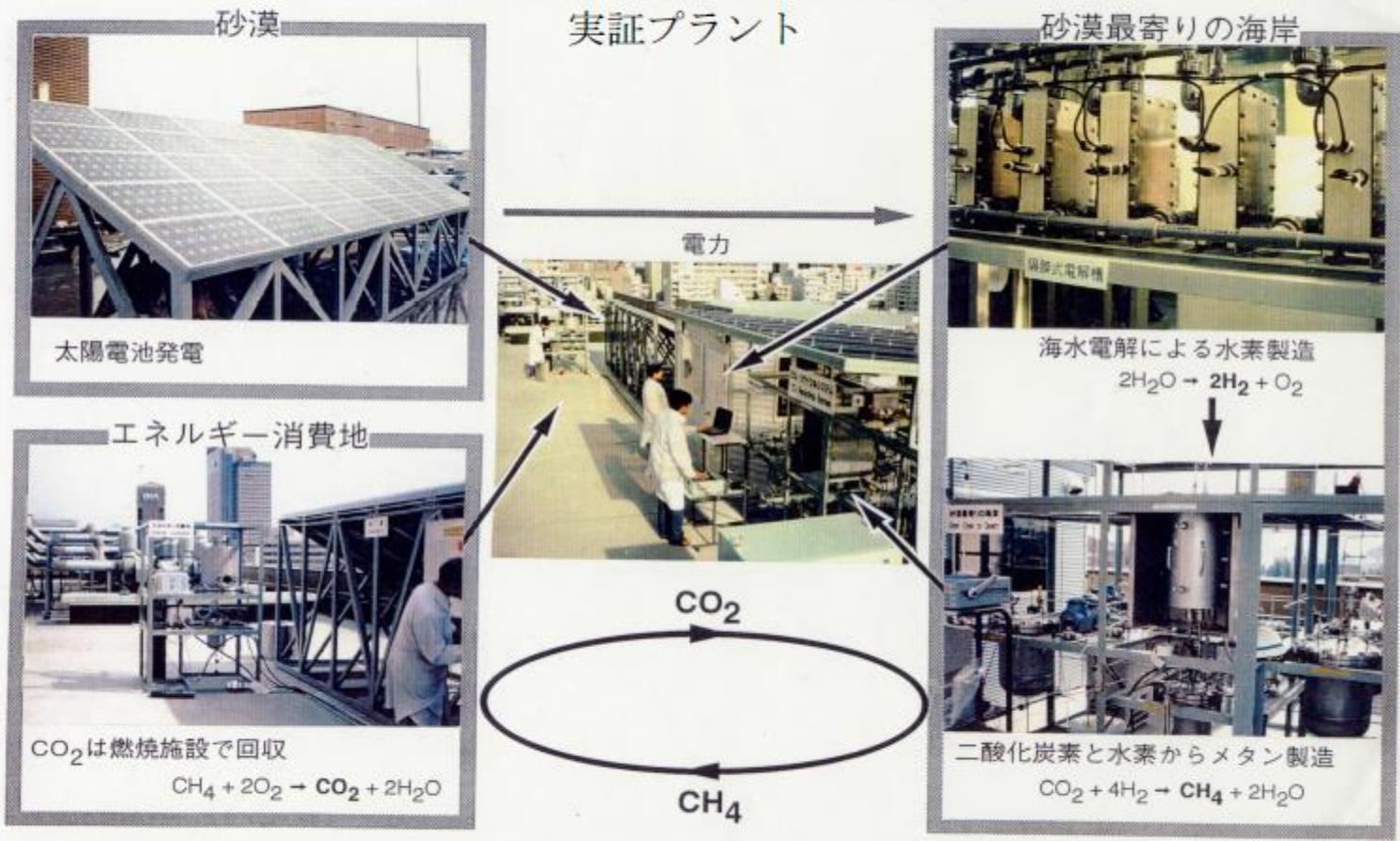


起ってはいけない反応

(普通の触媒使用)



CO₂リサイクルシステム



東北大学金属材料研究所 1995

パイロットプラント
東北工業大学

海水電解 ^{2003年} CO₂メタン化
 $4\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{H}_2 + 2\text{O}_2$ CO₂ + 4H₂ → CH₄ + 2H₂O



国際共同研究開発

日立造船株式会社

PTT Exploration and Production Public Co., Ltd.

天然ガス井：メタン+二酸化炭素

天然ガス精製：二酸化炭素排出：許されない

二酸化炭素のメタン化：世界が今必要としている技術

2012年1月-2015年3月

**1000 Nm³/h メタン製造プラントをCO₂を高濃度
に含む天然ガス井の脇に建造を企画**

以降、国内外の企業と共同して
産業化が進行中

ヨーロッパ諸国の努力

EU 再生可能エネルギー指示 2009/28/EC

2020 年までに

温室効果ガス排出 **20%** 削減

消費エネルギー **20%** 再生可能エネルギー

省エネルギー **20%**

輸送分野 **10%** 再生可能エネルギー

EU 政府議会合意 指示 2010/31/EU

2020年12月31日以降 新建造物は外部エネルギー供給ゼロ

2018年12月31日以降 政府使用政府所有新建造物は

外部エネルギー供給ゼロ

エネルギーと原子力発電に対するドイツの姿勢

1973年	オイルショック以降 国内炭と原子力発電
1980年代	温暖化の原因である二酸化炭素の排出を抑制するために 再生可能エネルギー利用が国の課題となり始めた
1986年	チェルノブイリ事故 牛乳に放射性物質が検出されるなど全土で恐怖感を あじわい全国民が原発について見解 社会民主党も原子力発電反対に
1987年	北海沿岸に初のウインドパーク 32種類の風力発電装置
1991年	電力供給法 再生可能エネルギーから生産した電力の買い取り義務
2002年	脱原発法 原発運転期間を運転開始後32年間とする

ハンブルグ電力網公社の誕生

1998年 電力自由化

以前：配電事業-自治体や地域会社

以後：配電事業-大手に集約進む

ハンブルグ市：人口180万、ドイツ第2の都市

大手電力会社-石油火力発電所の建設計画

再生可能エネルギー利用 国民的合意に反する温暖化誘起と反対運動・訴訟

2008年ハンブルク市承認 不買運動

ドイツコンセッション制度

配電網や水道管などのインフラを利用する権利

自治体が利用権を付与し利用料を取る、2014年更新時期

市民対案：大手電力会社から送電網利用権を取り戻す提案

市：25%市、75%大手の共同会社を提案、2011年

市民：100%市出資の住民投票、2013年

ハンブルグ電力網公社の誕生 市民が担い手で政策合意を形成

シェーナウ電力会社 市民電力のシンボル

シェーナウ市 人口2500人

1986年 チェルノブイリ事故

ラインフェルデン電力会社: 市と電力供給独占契約

市民 原発に頼らない電力供給
自然エネルギー電力買い取り価格引き上げ 電力会社拒否

原子力のない未来のための親の会が独自の電力会社設立を決断

2度の住民投票 大手電力会社の電力供給独占契約取り消し 1991年
シェーナウ電力会社電力供給認可 1996年

ドイツ全土から寄付を募って送電網買い取り

1997年、電力供給開始 現在ドイツ全土で顧客16万

世界中から原発がなくなること
早急な自然エネルギー社会への転換
世界中の人たちに電力が公平にいき渡ること

ドイツ連邦環境省 原子力安全放射線防衛庁報告

ドイツ西側41州の16原子力発電施設付近の5歳未満の乳幼児がんに関する疫学的調査結果
1983年1月1日から2003年12月31日(24年間) 乳幼児がん1592症例内白血病593症例を含む

$$\text{オッズ} = \frac{\text{発症例}}{\text{非発症例}}$$

$$\text{オッズ比} = \frac{\text{指定地域の発症例}}{\text{指定地域外の非発症例}}$$

オッズ比と信頼下限値が共に1以上は危険

原子力発電施設5km圏内の小児がん・白血病のオッズ比

	オッズ比	95%信頼範囲下限値	5 km 圏内発症例
全小児がん	1.61	1.26	77
全小児白血病	2.19	1.51	37



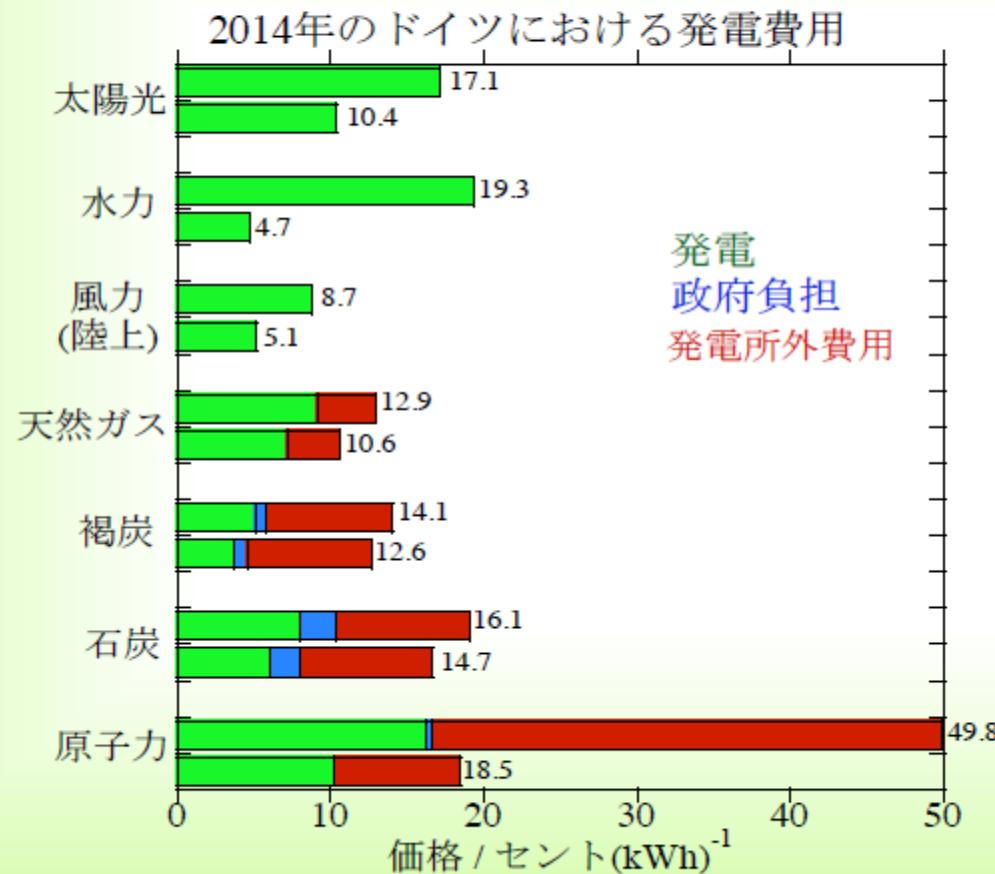
原子力発電施設5km, 10km圏内の小児白血病のオッズ比

		オッズ比	95%信頼範囲下限値	5 km, 10 km 圏内発症例
全小児白血病	5-km 圏内	2.19	1.51	37
	10-km 圏内	1.33	1.06	95
急性リンパ性白血病	5-km 圏内	1.98	1.33	30
	10-km 圏内	1.34	1.05	84
急性非リンパ性白血病	5-km 圏内	3.88	1.47	7
	10-km 圏内	1.30	0.66	10

Int. J. Cancer, 1220 (2008) 721-726

ドイツの環境シンクタンク (Forum Ökologisch-Soziale)

従来の発電方法に対する国の補助金や金銭的な優遇だけでなく、社会が負担する環境被害に関する費用や、放射性廃棄物の最終処分費用等の現在料金に含まれていない外部費用を含む



ドイツ政府：安全なエネルギー供給に関する倫理委員会招集 2011年4月4日
原子力エネルギーを用いる危険性を検討し、
将来のエネルギー供給について国民的合意を確立するため

倫理委員会答申 2011年5月28日

制御不能な事故の可能性があることは決定的な問題で、
原子力エネルギーの使用を制限し、10年以内に廃止すること

最悪な事故の結果は未知であり理解もできていないので、
実際の事故の経験から危険性は推察できない

利己的な目的で自然を破壊してはならず、環境を保全し、保護し、
有用性を高め、未来の生存条件を確実にすることが、自然に対する
人類の責務

倫理委員会の勧告にしたがって、ドイツは原子力エネルギー
の使用を2022年までに廃止する

台湾 2016年10月20日 閣議決定

2025年までに原子力エネルギー使用廃止
再生可能エネルギー電力20%

海に囲まれた島国で原子力発電所事故は国の存亡に関わる

原子力発電

- ・ 1951年から始まり高い科学技術水準の象徴という一面もあった
 - ・ 60年経ても世界の一次エネルギー消費量への寄与わずか4.5%
 - ・ この程度の消費量でも今世紀半ばにウラン資源枯渇
- 将来広がり発展する可能性がないまま今世紀半ばに途絶える技術

チェルノブイリと福島の事故

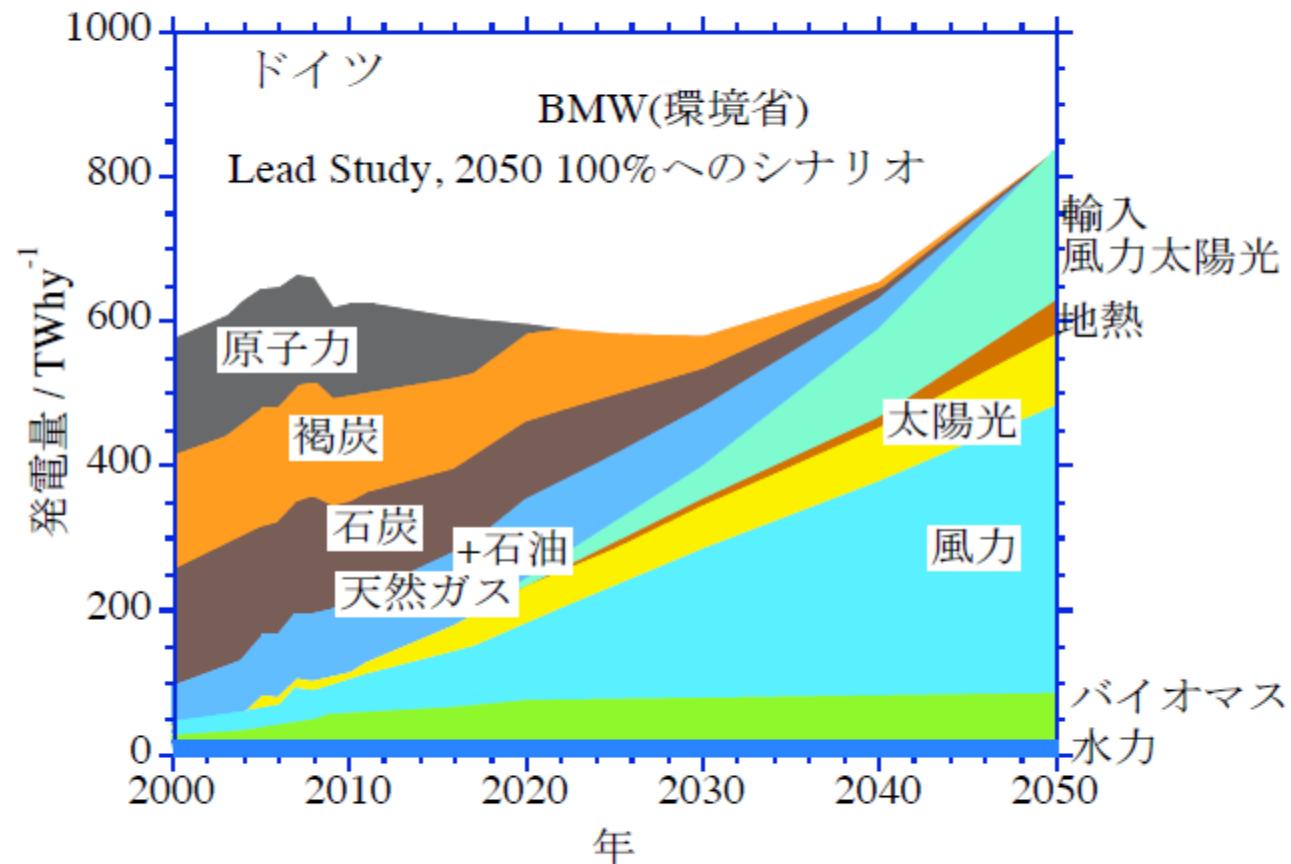
高科学技術水準の象徴という虚像は崩壊

電力会社、関連従事者・業者などの収入源以外の存続理由なし

- (1)一度事故が起こると数十万人以上が避難し、数十年住めない
産業として存在は許されない
- (2)被曝は死者だけでなく、世代を超えた疾病の原因になっている
- (3)正常運転でも、乳幼児がガンを発症するリスクが高い
- (4)核廃棄物処理や社会が負担している費用を換算すると
他の発電法に比べて高い
- (5)廃炉と核廃棄物処理以外の研究は役に立たない

2010年から始まったドイツのエネルギー大転換 Energiewende

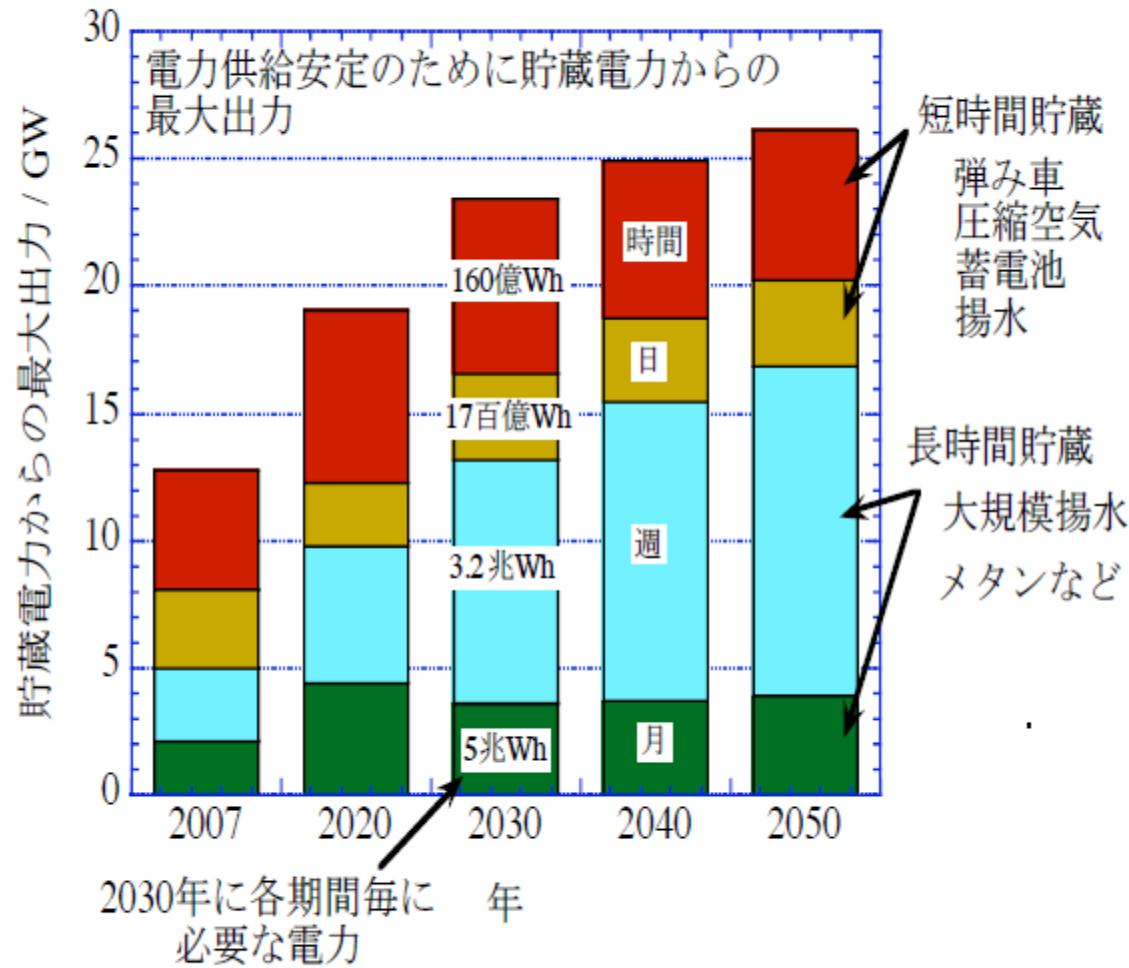
2050年までに、電力源100%再生可能エネルギーとし、CO₂排出80%減



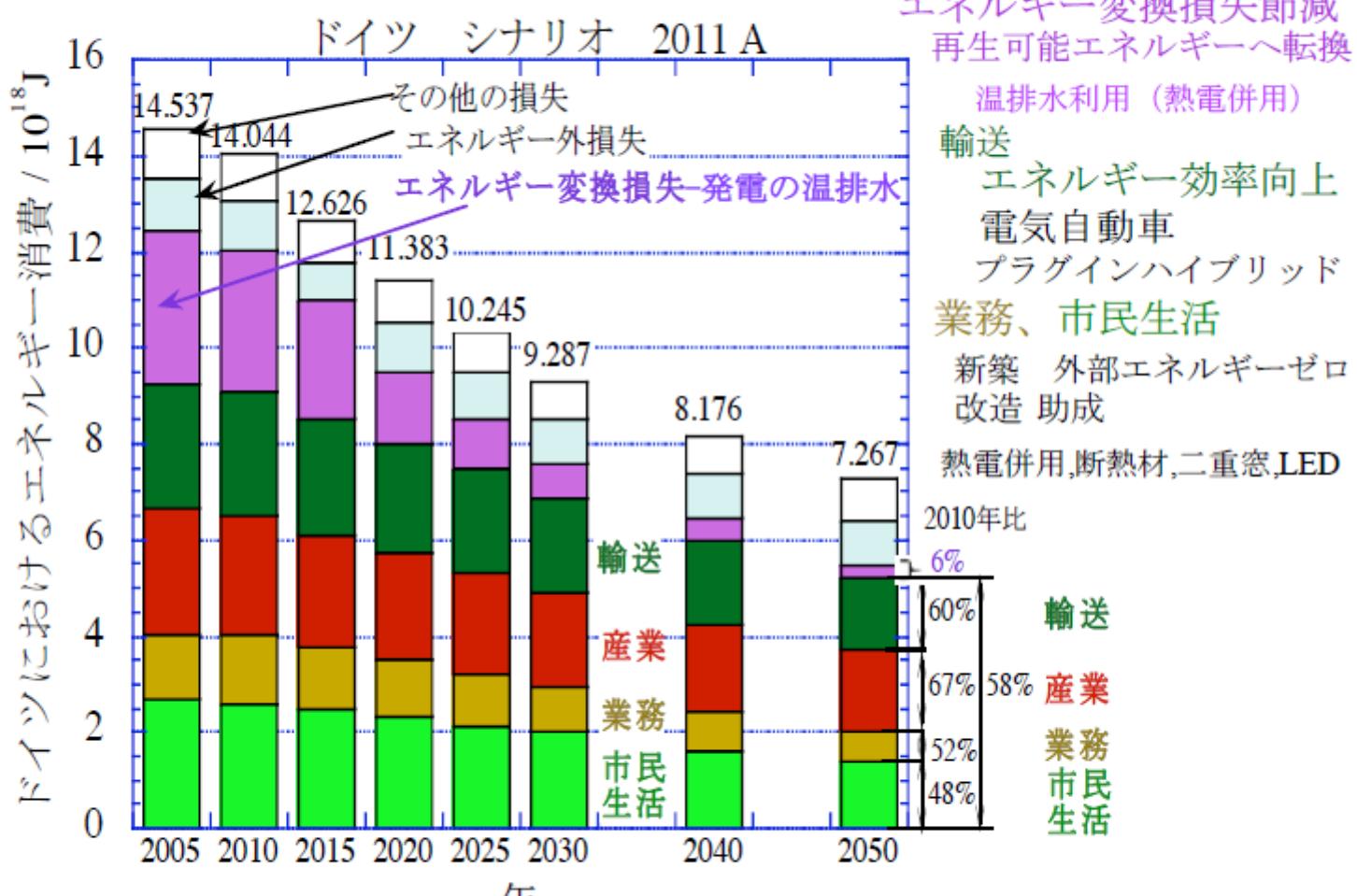
国際電気標準会議2011年白書

<http://www.iec.ch/whitepaper/pdf/iecWP-energystorage-LR-en.pdf>

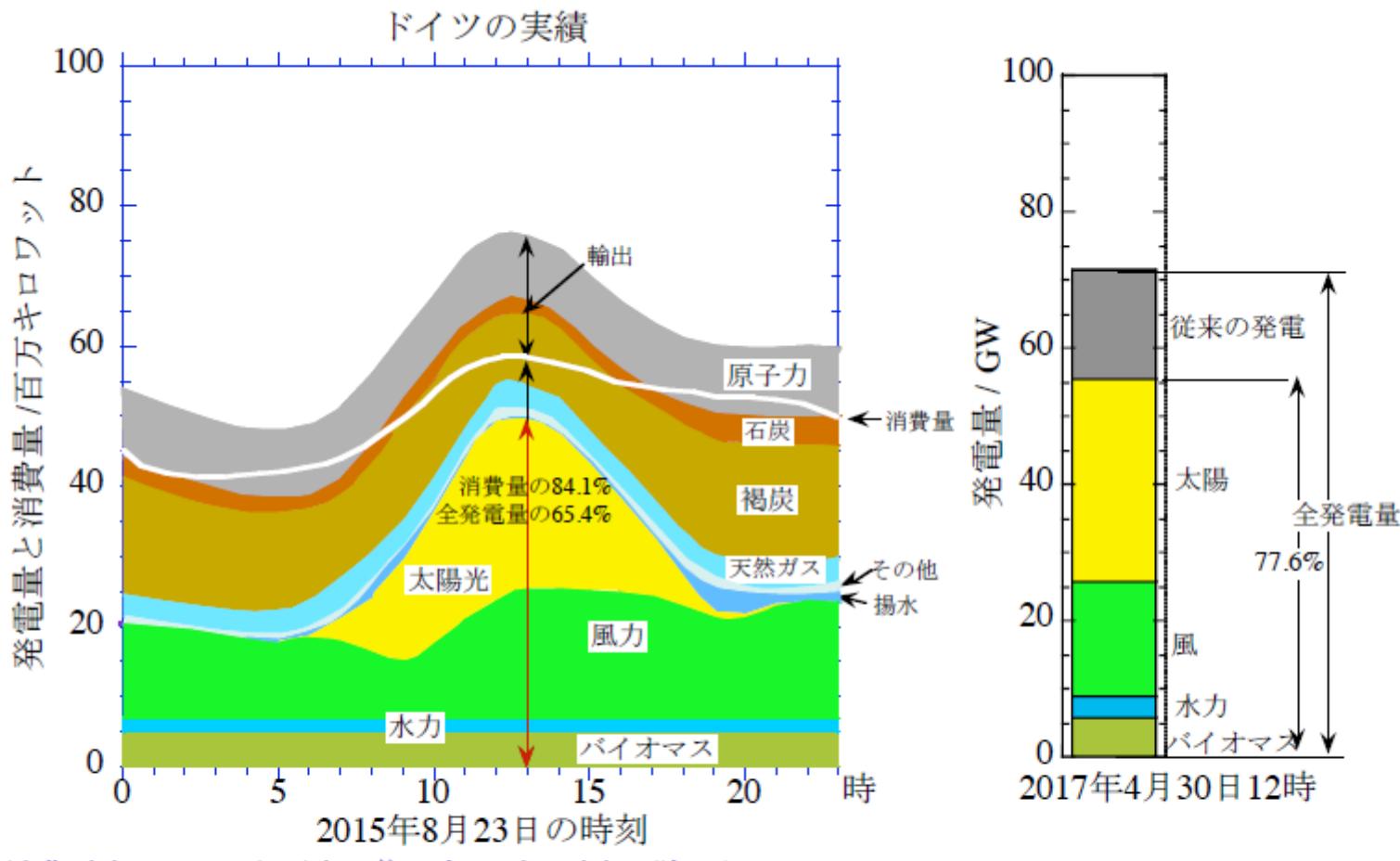
変動する再生可能エネルギー電力を貯蔵し再生する安定電力の必要量



エネルギー転換はエネルギー効率を上げないと成功しない



http://www.dlr.de/dlr/Portaldata/1/Resources/documents/2012_1/leitstudie2011_kurz_en_bf.pdf



全発電量の77.6%が再生可能エネルギー電力でも安定電力が供給できる
容易に止められない原子力発電や火力発電の電力はお金を付けても使ってもらう必要が出て来た
(Negative Priceという言葉が使われている)

2016年5月8日12:45、全発電量の90%以上が再生可能エネルギー電力 Negative Price, 1 MWh: -178€

水素燃料電池自動車

電極の白金の上で水素を酸化、酸素を還元して
水にする過程で電気を取り出す

電極の白金使用量 1台

小型車 32g 中型車 60g 大型車 150g

2015年世界の自動車保有数 12.614億台

2016年世界の自動車生産台数 9,497.7万台/年

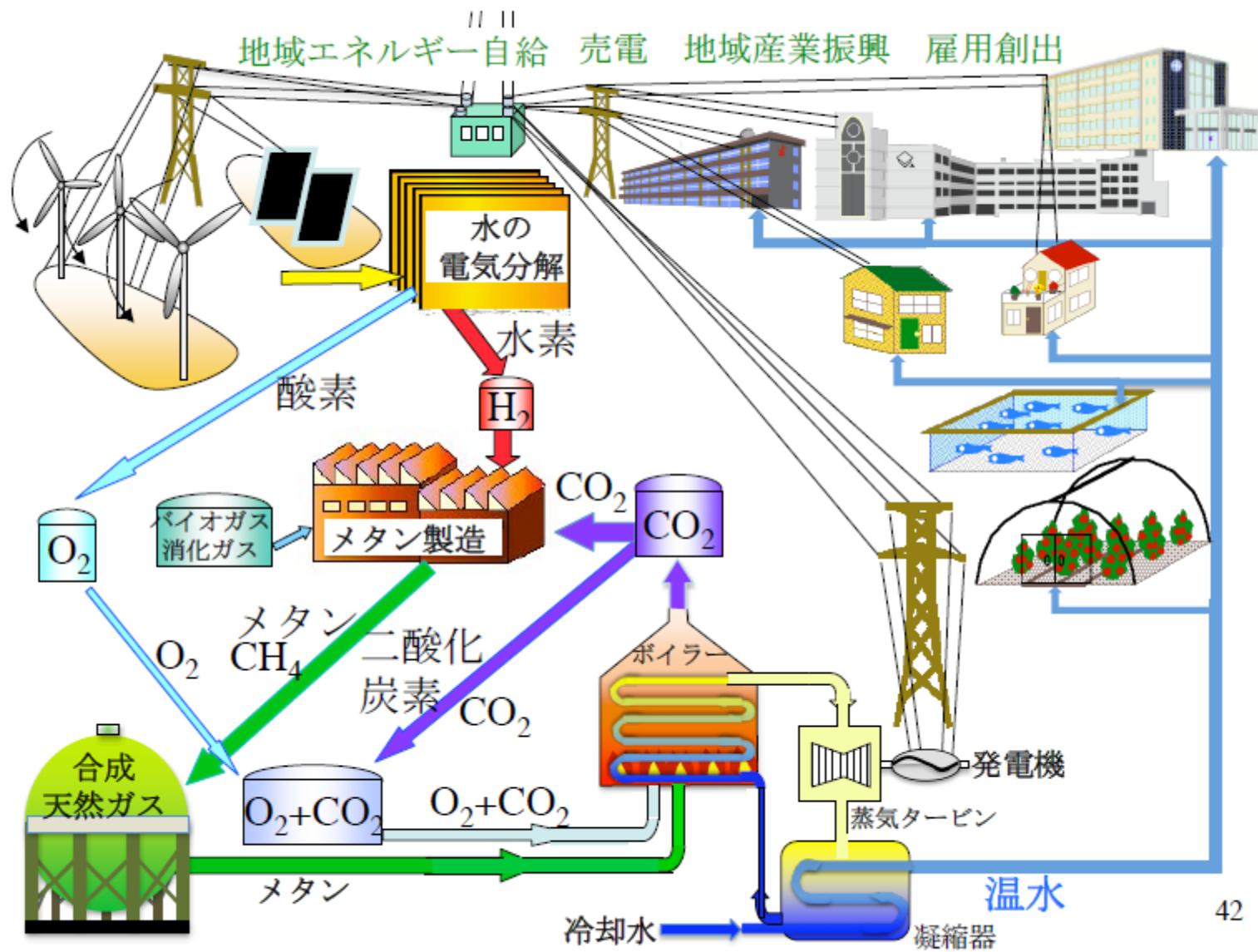
世界の白金埋蔵量 56,000 t

白金供給量 :2012 年 183 t, 2013 年 184 t, 2014 年 147t

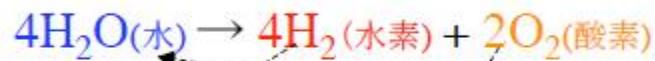
年18tとあり得ない量の白金を使うことを許されても
30gの白金を要する自動車の生産量は60万台のみ

世界の自動車生産量のわずか0.6%

燃料電池自動車普及不可能



水の電気分解



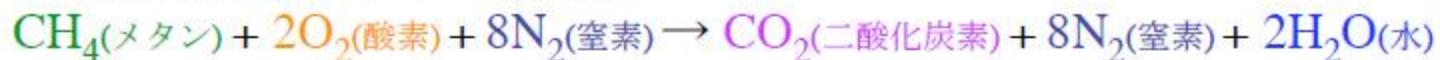
二酸化炭素のメタン化



メタンの燃焼



空気によるメタンの燃焼



$\text{CO}_2(\text{二酸化炭素})$ を $8\text{N}_2(\text{窒素})$ から分離回収困難

酸素によるメタンの燃焼



$\text{CO}_2(\text{二酸化炭素})$ 回収容易

地球温暖化

高上昇率

大気中の二酸化炭素濃度 2007年以降毎年2.5ppm上昇

地球の気温 2010年以降毎年 0.05°C 上昇

2007年の二酸化炭素濃度 350万年前の水準

世界が生き残るには再生可能エネルギーを使い化石燃料を燃やさないこと以外にない

地球には有り余る再生可能エネルギーがある

再生可能エネルギーだけで世界が持続的発展ができる技術はある

全世界が再生可能エネルギーだけで豊かな生活を楽しむことができる!!