

# エネルギー・環境問題のリテラシー



平成27年11月27日

松永 健一

技術士(機械、原子力・放射線、総合技術監理)

労働安全コンサルタント

# 講演の論点

## エネルギー問題をリテラシー(一般教養)で考えてみよう

### I. エネルギー問題のリテラシー(事前質問から)

- (1) エネルギーミックス(3E+S)の中の**再稼働**と**再エネ**  
エネルギー源は補完し合う(**再エネ**時代の火力、水素時代の原子力)
- (2) 環境問題(E)の思考停止と地球温暖化の実態
- (3) **FBR**と**軽水炉**の違いの本質／**燃料サイクル**・**FBR**が実現する技術
- (4) **廃棄物**の地層**処分**は日本ではできないのか  
人間は自然より**信頼**できるか

### II. エネルギーの**過去**・**現在**・**未来**

- (1) **低密度再エネ**の歴史(石炭が森林乱伐を救った)
- (2) 資源の**枯渇**／2100年代の世界**予測**

### III. エネルギーを考える時に**必要なもの**

### IV. まとめ

# I. エネルギー問題のリテラシー

- I -1 エネルギーミックス(3E+S)における**再稼働**と**再エネ**(再エネ時代の火力、水素時代の原子力)
- I -2 環境問題(E)の思考停止と地球温暖化の実態
- I -3 **FBR**と**軽水炉**の違いの本質／**燃料サイクル**・**FBR**が実現する技術
- I -4 **廃棄物の地層処分**は日本ではできないのか  
人間は自然より**信頼**できるか

# I-1. エネルギーミックス(3E+S)における 再稼働と再エネ

## (1) エネルギー基本計画

## (2) エネルギーミックス

再エネ設備導入量  
各電源の発電コスト

## (3) エネルギー源は補完

再エネ時代の火力の役割  
水素時代の原子力の役割

# I -1 (1) エネルギー基本計画

2002年6月制定「エネルギー政策基本法」

- 政府が総合資源エネルギー調査会の意見を聴いて「エネルギー基本計画」を策定
- 中長期(今後20年程度)のエネルギー需給構造を視野に定める
  - ・ 今後取り組むべき課題
  - ・ 長期的／総合的／計画的なエネルギー政策の方針
- 集中改革実施期間
  - ・ 電力システム改革など国内の制度改革が進展
  - ・ 北米からのLNG調達など国際的なエネルギー供給構造の変化が日本に具体的に及んでくる時期(2018～2020年)迄

2014年4月閣議決定「エネルギー基本計画」(第4次計画)

## エネルギー政策の基本的視点



### 第3章 講ずべき施策

- 第8節 安定供給と地球温暖化対策に貢献する水素等の新たな二次エネルギー構造の変革
- 3. 「水素社会」の実現に向けた取組の加速

### 第4章 戦略的な技術開発の推進

- 1. エネルギー関係技術開発のロードマップの策定

2014年6月「水素・燃料電池戦略ロードマップ」

2015年5月「高温ガス炉産学官協議会」23社・機関初会合

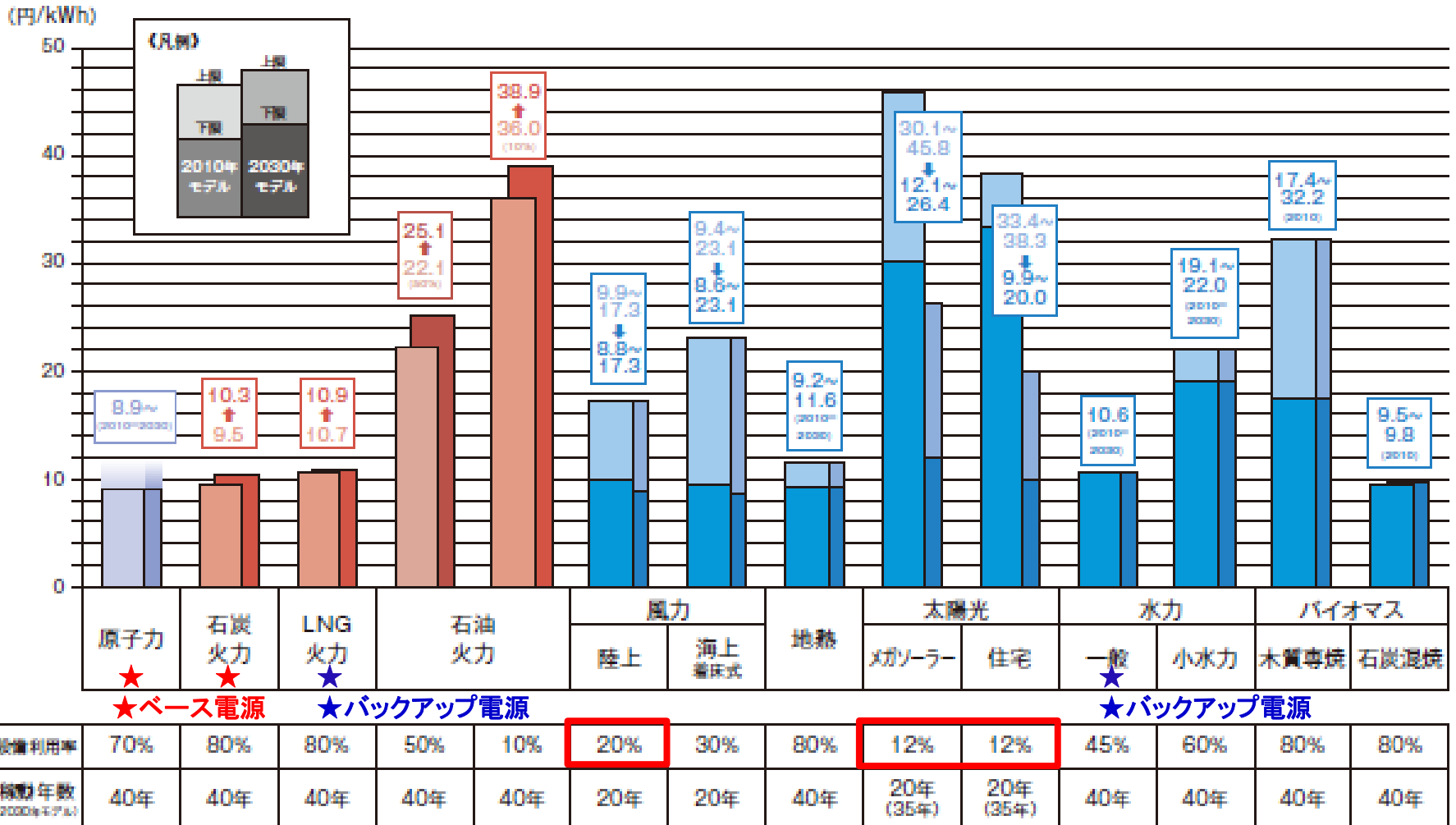
# I -1 (2) エネルギーミックス 再エネ設備導入量

再生可能エネルギー発電設備の導入状況(平成26年3月末現在)

設備導入量 (運転を開始したもの)				認定容量
再生可能エネルギー発電設備の種類	固定価格買取制度導入前	固定価格買取制度導入後		固定価格買取制度導入後
	平成24年6月末までの累積導入量	平成24年度の導入量(7月~3月末)	平成25年度の導入量	平成24年7月~平成26年3月末
太陽光(住宅)	約470万kW	96.9万kW	130.7万kW	268.8万kW
太陽光(非住宅)	約90万kW	70.4万kW	573.5万kW	6,303.8万kW
風力	約260万kW	6.3万kW	4.7万kW	104.0万kW
中小水力	約960万kW	0.2万kW	0.4万kW	29.8万kW
バイオマス	約230万kW	3.0万kW	9.2万kW	156.5万kW
地熱	約50万kW	0.1万kW	0万kW	1.4万kW
合計	約2,060万kW	176.9万kW	718.5万kW	6,864.2万kW (1,199,482件)
		895.4万kW (619,701件)		

**FIT(固定価格買取制度)**による再生可能エネルギー発電設備の導入は、太陽光(特に非住宅)発電主体。認定約6300万kWのうち導入約640万kWで**約90%が未稼働**。買取価格の高い時点で認定を受け、パネル価格の値下がりを待つ思惑か?5月末で144件を**認定取り消し**。九電など4電力で認定容量が**最大使用量超え**。太陽光が地熱などの導入の支障に。**見直し中**。

# I-1 (2) エネルギーミックス 各電源の発電コスト



エネルギー基本計画方針の3E(安定供給、経済性、環境適合)を考慮した選択が必要。  
 太陽光、風力は天候の影響を受ける(出力100~0%→太陽光平均12%)。  
 化石燃料はいずれ枯渇する。ベストミックスは？



# I-1 (3) エネルギー源は補完 再エネ時代の火力の役割

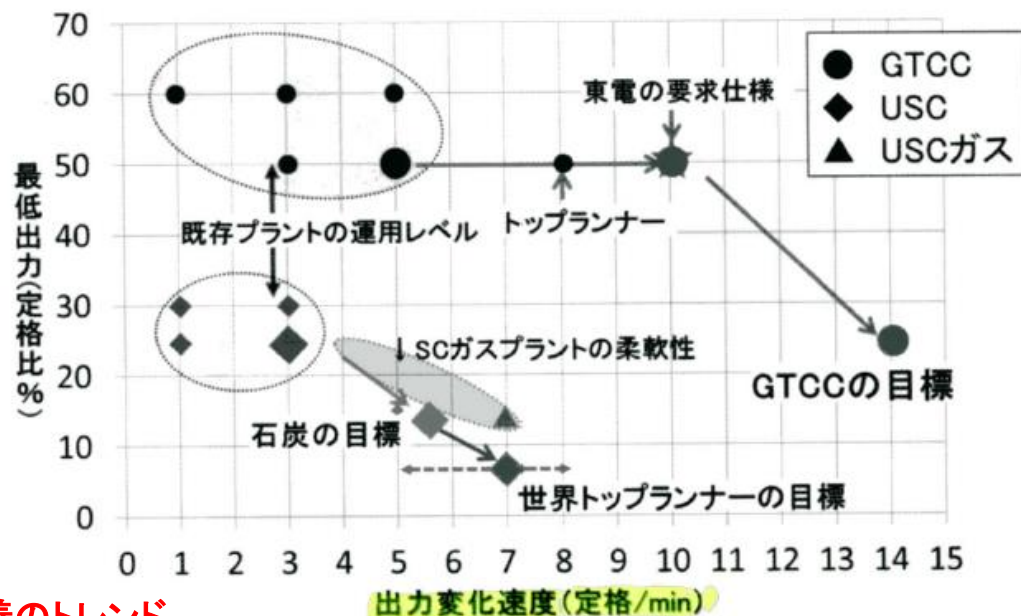
表1 火力プラントの柔軟性向上に向けた対策

最低出力の低減 (LFC運用帯の拡大)	熱疲労劣化対策
<ul style="list-style-type: none"> <li>・1ミルバーナ運用</li> <li>・小バーナの採用</li> <li>・ミルのインバータ制御採用</li> <li>・ピンシステムの採用, 等</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・適切なインターバルでの劣化診断</li> <li>・オンラインでの点検監視</li> <li>・余寿命診断の高度化</li> <li>・疲労しにくい設備構造, 等</li> </ul>
出力変化速度の向上 (LFC・DPC対応速度)	部分出力を含む効率改善
<ul style="list-style-type: none"> <li>・ST/GT昇速昇温速度の改善</li> <li>・各種制御性改善</li> <li>・給電指令とプラント制御の協調 (AFC/LFCとガバナフリーの協調), 等</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・補機類のインバータ制御</li> <li>・系統規模に適したプラント規模, 等</li> </ul>
起動時間の短縮	起動工程合理化, 運用の高度化
<ul style="list-style-type: none"> <li>・GT迅速起動 (昇速昇温最適化, ガスパージ省略)</li> <li>・ST迅速起動 (最適起動システム, HRSG余熱)</li> <li>・GTCCのGT先行起動 (クラッチシステム, 大容量ATTEMPERATOR設置)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ガスパージの合理化 (センサーでの代替等)</li> <li>・蒸気温度管理の合理化 (規制緩和)</li> <li>・ボイラクリンアップ等ボイラ起動の最適化</li> <li>・タービン起動の最適化</li> </ul>

表2 日本の火力プラント柔軟性の現状と目標

		貫流石炭ボイラ (1,000~600MW級)	GTCC (1軸, 多軸) 1,100~1500℃級
変化速度	現 状	1~3%	1~5%
	潜在能力	3~5%	8%
目 標	5% (低出力帯)		14% (中間負荷)
	8% (高出力帯)		
最低出力	現 状	30%程度	50~60%
	目 標	15%以下	25%
起動時間	現 状	1時間(ベリーホット)	40分(ホット)
	目 標	より短く	30分以下

火力プラントの柔軟性向上に向けた対策

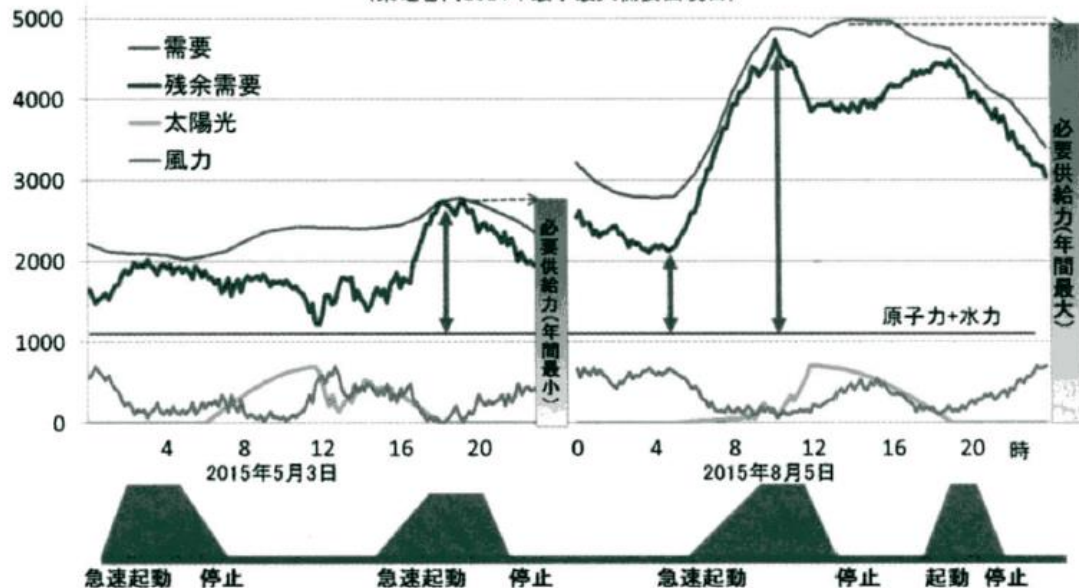


日本の火力プラント柔軟性の現状と改善のトレンド



# I-1 (3) エネルギー源は補完 再エネ時代の火力の役割

太陽光・風力各7GW導入ケースの需給バランスイメージ  
(東電管内2014年最小最大需要出現日)

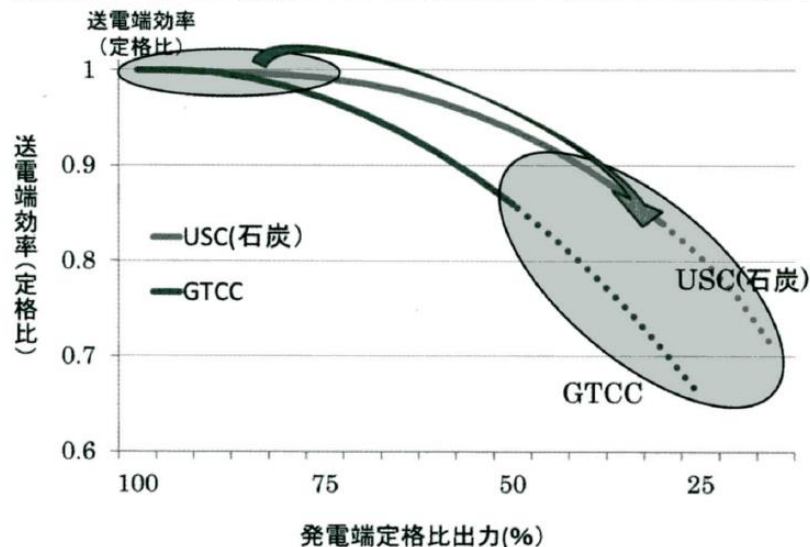


頻繁な起動停止、過酷な出力変化により、プラントの疲労劣化が進行

火力プラントの部分出力時の効率低下

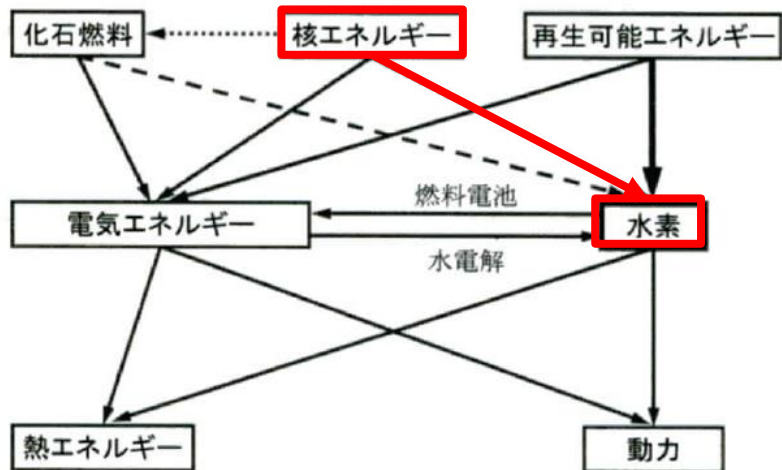
太陽光・風力各7GW導入ケースの需給バランス

需給調整に用いられる火力プラントは、効率が低い出力帯での運用が増加する！



# I-1 (3) エネルギー源は補完 水素エネルギーシステム

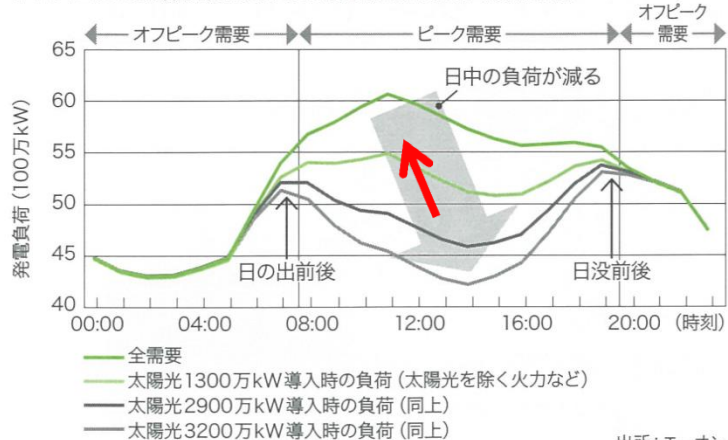
## 水素エネルギーシステム



## 太陽光発電導入量と太陽光を除く発電負荷

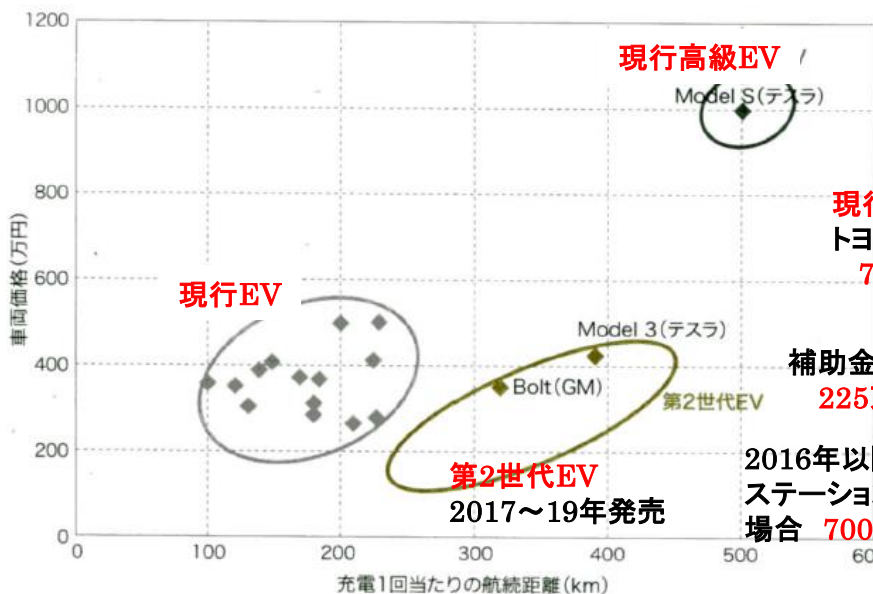
### 朝方と夕刻に負荷のピークがシフト 水素の活躍場所

ドイツにおける太陽光発電導入と太陽光を除く発電の負荷曲線



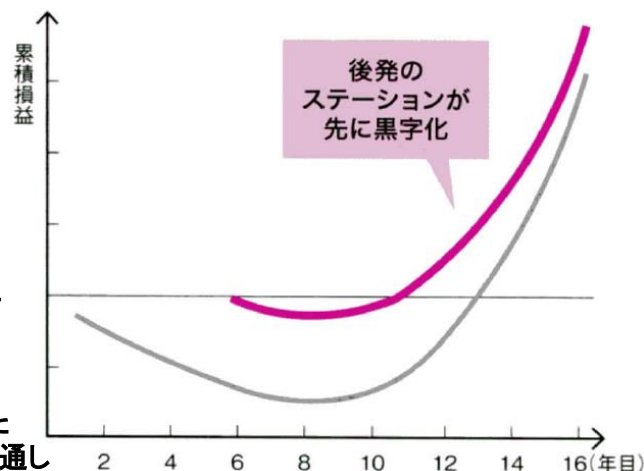
出所: エーオン

## 充電1回当たりの航続距離



## 水素ステーションの累積損益 (6年目からの設置が○)

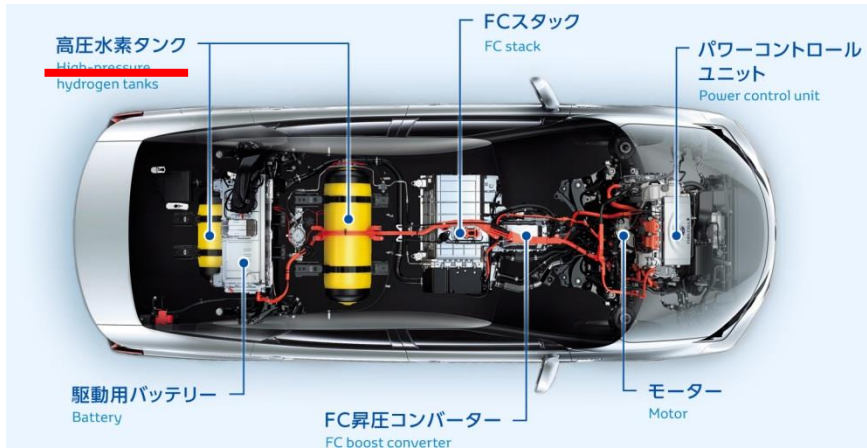
### 9月現在 81ステーション開所予定



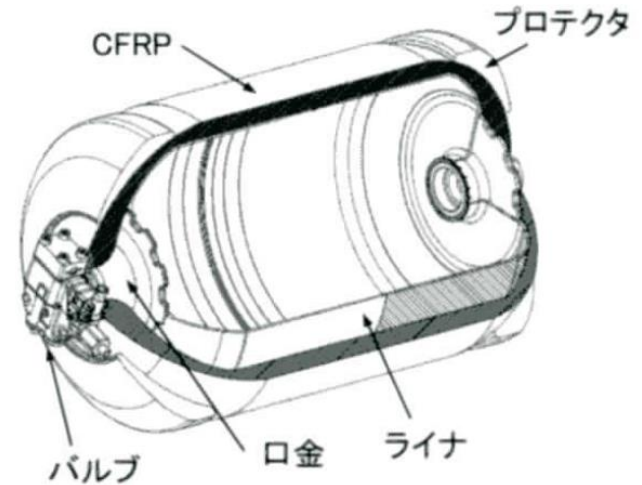
出典: 日経エネルギーNext2015.1, 2015.8, 2015.9

# I-1(3) エネルギー源は補完し合う 燃料電池自動車の現状技術

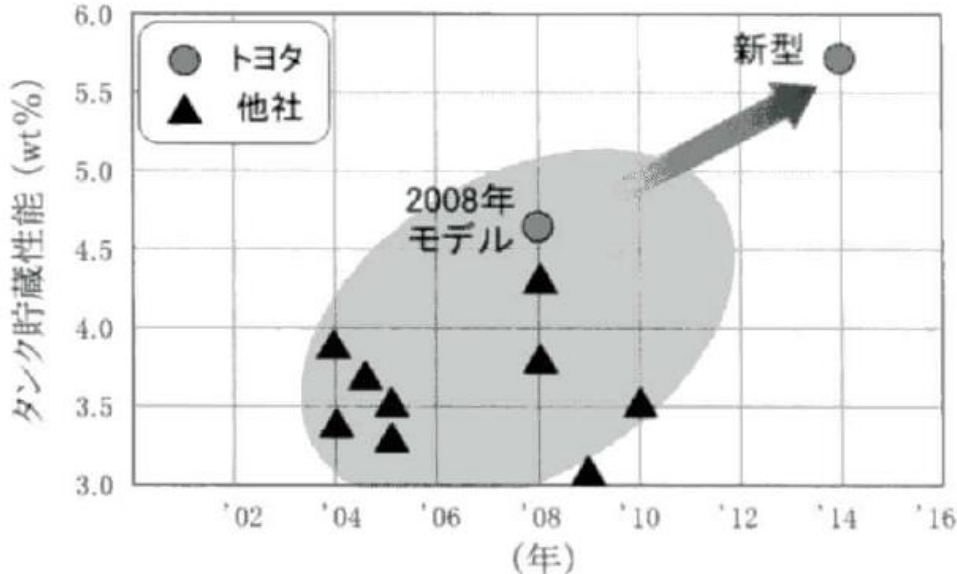
## 燃料電池自動車の 高圧水素タンク(MIRAI)



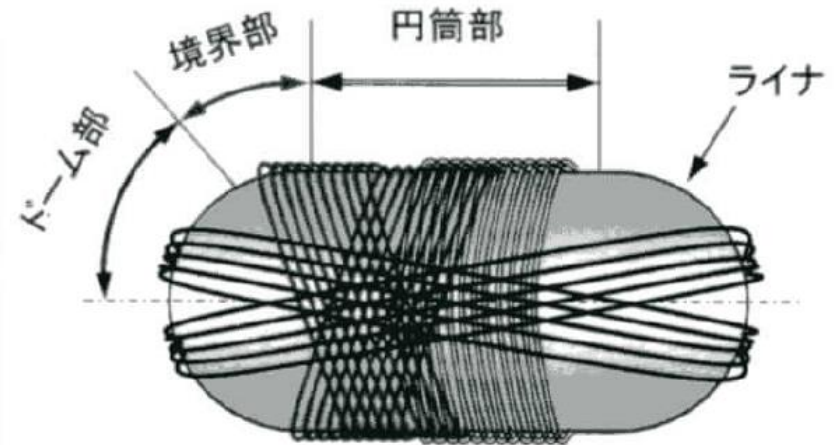
## 高圧水素タンクの構成(MIRAI)



## 高圧タンクの水素貯蔵性能比較 水素貯蔵量(kg) / タンク質量(kg)



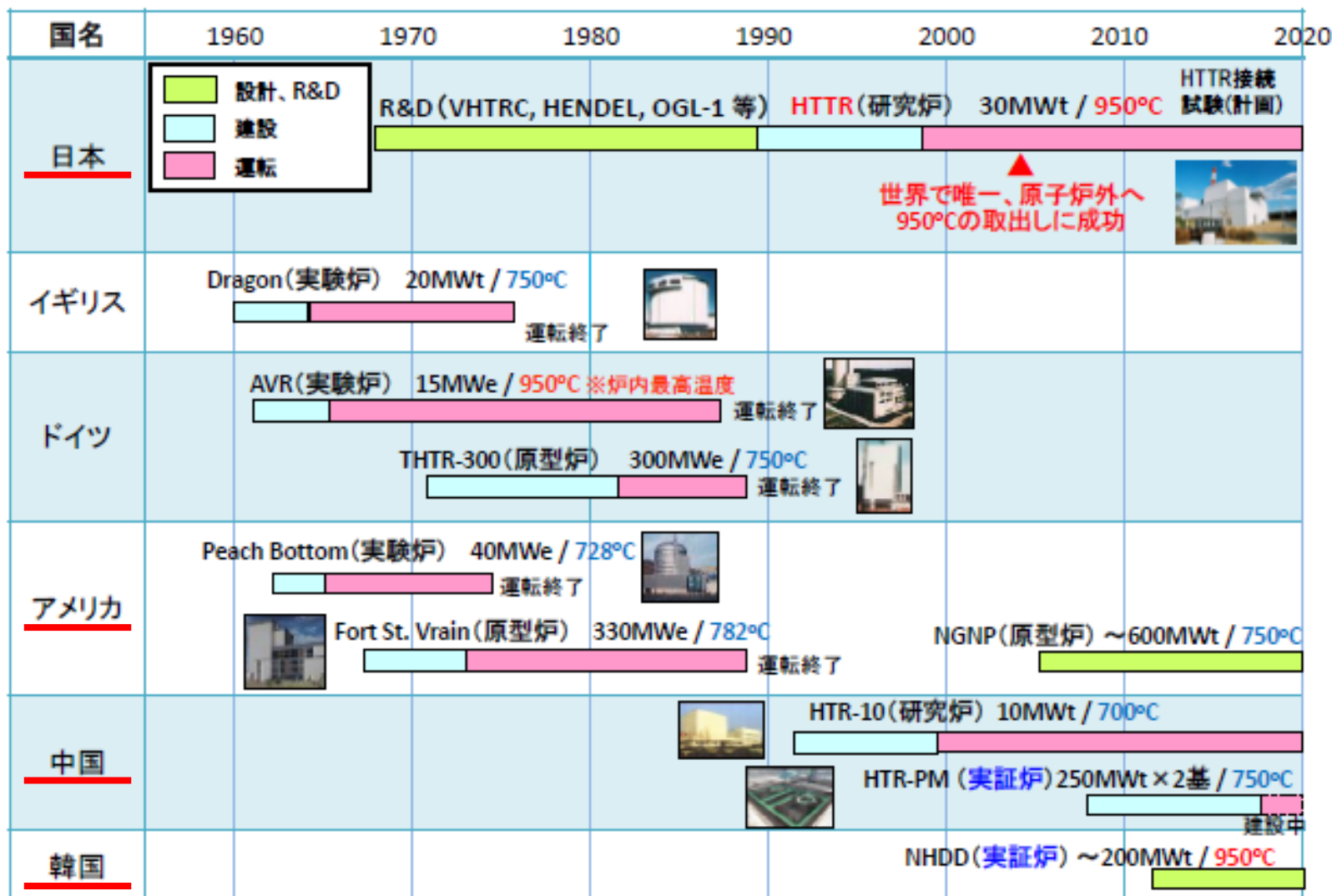
## 高圧水素タンクのCFRP積層パターン



新日鉄住金は 高圧水素用の高強度ステンレス鋼 **HRX19**を開発中

# I-1 (3) 水素時代の原子力 高温ガス炉による水素製造

## 高温ガス炉開発の歴史と将来展望



HTTR 試験研究炉

インドネシア: 小型試験・実証炉の設計を国際発注(ロシア企業受注)



# I-1 (3) 水素時代の原子力 世界の高温ガス炉の開発状況

**中国** 急ピッチで進む**実証炉** 国際会議開き世界リードをアピール



95年**ドイツ**から基本技術を導入 2000年**初臨界**  
2006年「**国家重大特別プロジェクト**」に位置づけ  
2014年10月「高温ガス炉技術国際会議」開催(山東半島先端の威海市)  
2017年12月の完成を目指し建設が進む

**インドネシア** 小型試験・研究炉の設計 国際発注 日本はロシア企業に敗れる

**日本** 98年**初臨界** 2010年**HTTR**が出口温度950℃で50日間**連続運転**  
**HTTR停止中** 東日本大震災後の新規規制基準の認可待ち  
**基礎技術でリードしながら、実用化で後塵**／原子炉～発電タービン**国産**

2015年5月「**高温ガス炉産学官協議会**」第1回会合

原子炉メーカー(東芝, 日立, 三菱重工, 富士電機)／自動車メーカー(**トヨタ**, 日産, ホンダ)／岩谷産業, 新日鉄住金, 日揮, 千代田化工, TEC, 日本原電, 大学, 文科省, 経産省, JAEAなど26社・機関

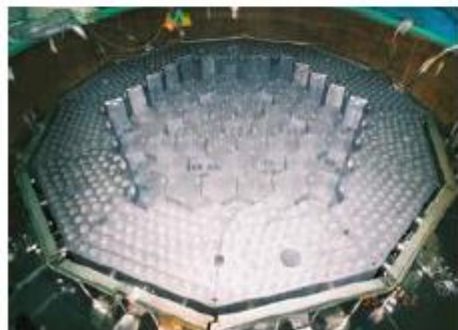
# I-1 (3) 高温ガス炉による水素製造 研究炉の概要

## 高温工学試験研究炉 (HTTR) の概要

- 我が国初の黒鉛減速ヘリウムガス冷却型原子炉  
(高温ガス炉) 熱出力30MW
- 原子炉出口冷却材の最高温度は950°C
  - ・平成10年11月 初臨界
  - ・平成13年12月 熱出力30MW、  
原子炉出口冷却材温度850°C達成
  - ・平成16年4月 原子炉出口冷却材温度950°C達成
  - ・平成22年3月 950°C、50日間高温連続運転を達成
- 設置場所:  
茨城県大洗町  
日本原子力研究開発機構 大洗研究開発センター



HTTRの外観および内部



炉心上部



炉心の中心部



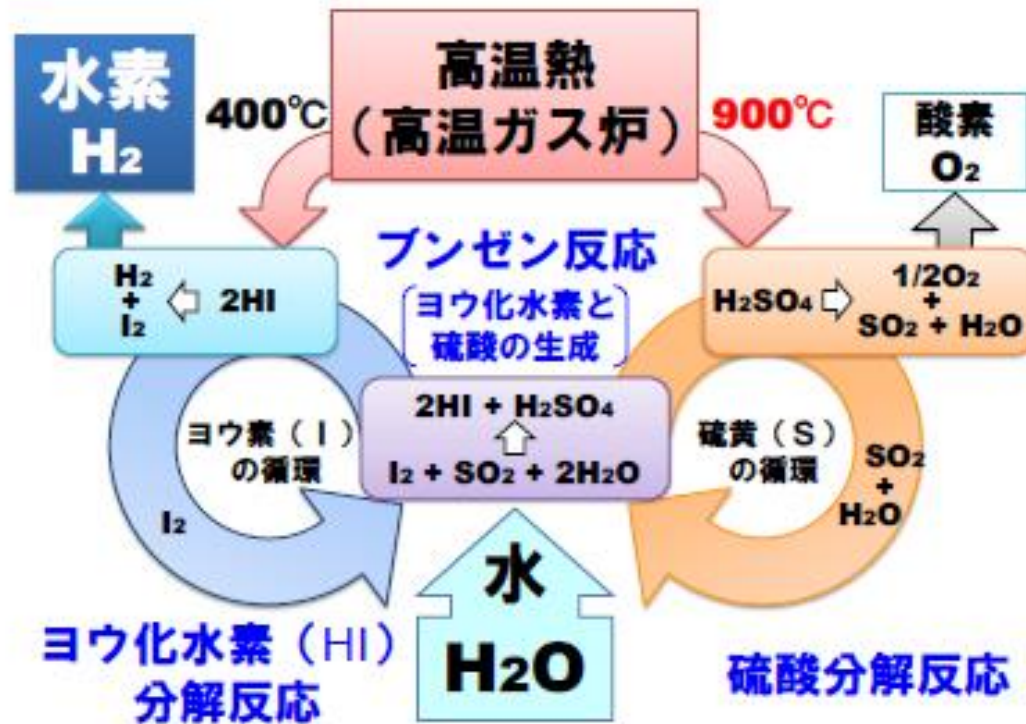
炉心の黒鉛ブロック



# I-1 (3) 高温ガス炉による水素製造 ISプロセス

## 水の熱分解による水素製造 (熱化学法ISプロセス)

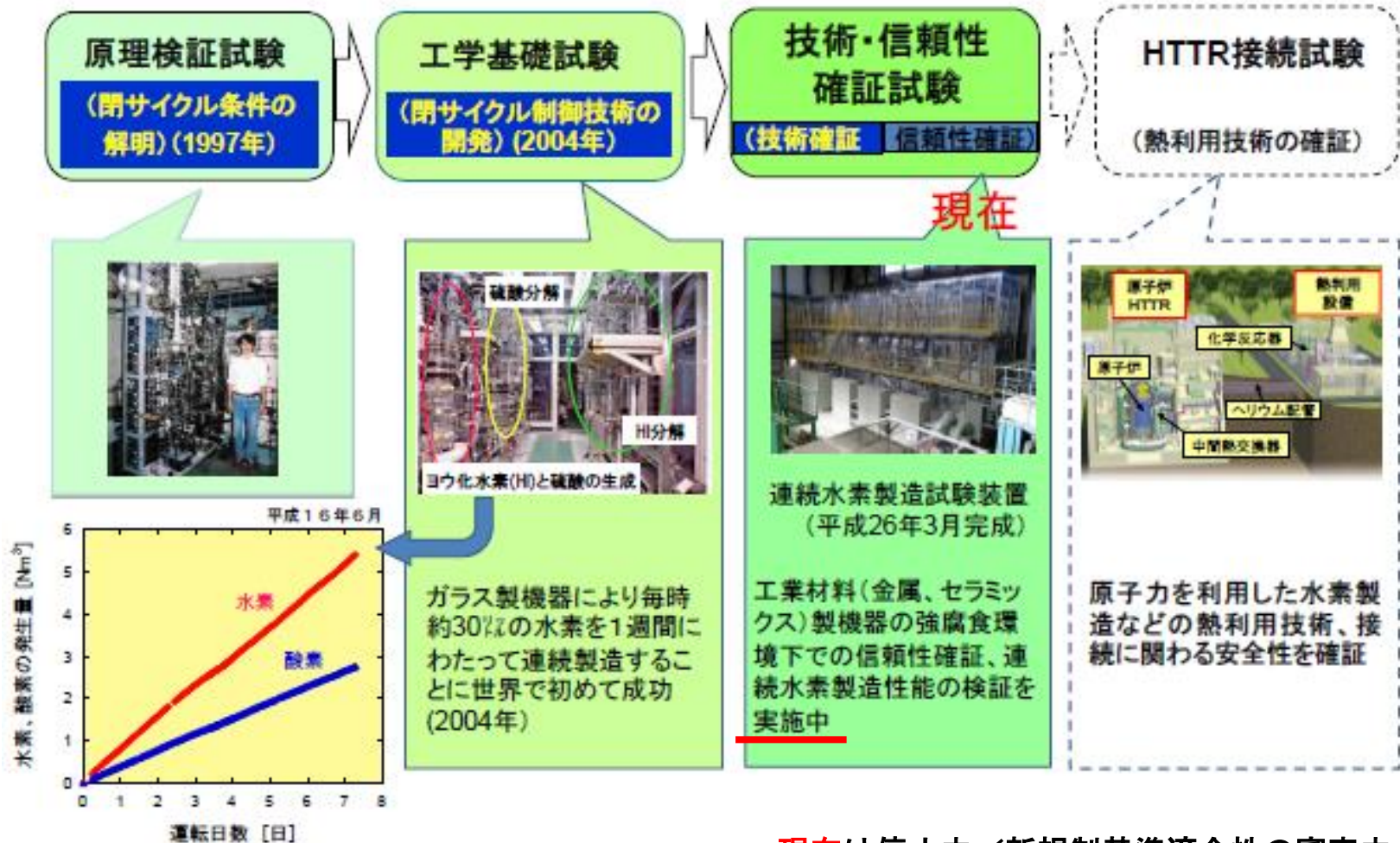
- 水の熱分解：4000°C以上の高温熱が必要
- ISプロセス：ヨウ素(I)と硫黄(S)を利用して 約900°Cの熱で水を熱分解  
ヨウ素と硫黄はプロセス内で循環 ⇒ 有害物質の排出なし  
高温ガス炉との組み合わせ ⇒ 炭酸ガスの排出なし





# I-1 (3) 高温ガス炉による水素製造 ISプロセスの歴史と現状

## 化学法ISプロセスの研究開発の歴史と現状



現在は停止中／新規制基準適合性の審査中

# I-1 (3) 高温ガス炉による水素製造 特徴と課題

## 高温ガス炉の特徴と課題

- **大型化が難しい** 熱出力で60万kW(電気出力で30万kW)が限度  
【JAEA】炉4基を1ユニット(電気出力120万kW)とする
- **経済性** 再処理コストが軽水炉よりかさむ点※がある  
＜※燃料被覆材(炭化ケイ素など)の除去など＞  
【JAEA】建設費、運転・維持費が安く、発電単価で軽水炉に十分太刀打ち可。  
**発電効率** 850℃熱利用の場合 46% (軽水炉33～34%)  
**ヘリウムガスタービン** 軽水炉(蒸気タービン)より**小型**／安全装置が簡素。  
ガス炉の発電コスト 5.8～6.4円/kWh  
**実証炉を造って経済性を証明**する必要がある。

出典:期待の次世代原子炉 中国に追い越される日本, 日経電子版2015.6.29

- HTTR 新規制基準への**適合性審査**(H26年11月申請)

- **研究開発** 燃料(製造技術、照射性能、破損機構など)／黒鉛(製造技術など)  
金属・高温機器(ハステロイXRの開発など)／安全基準・事故時安全性／  
使用済燃料・黒鉛廃棄物

出典:原子力科学技術委員会 高温ガス炉技術研究開発作業部会「今後の研究の進め方」(文科省), 2014.9

# I-1 (3) 「原子」として水素と「分子」としての水素

- 水素は**多様な側面**を持っている。水素がライバル**電気に勝る特性**は何か
- 原子核**として**の水素** **宇宙で最も豊富な元素**／諸元素の**出発元素**  
**核融合**(自然界では太陽)によって**膨大なエネルギー**生産
- 分子**として**の水素**  
分子状態の水素 **資源と認識できる規模で存在しない**  
=水や炭化水素などを原料として生産する**2次エネルギー**  
  
自然界から採取できる天然資源ではない  
利用のためには、**製造・変換** → **輸送・貯蔵** → **利用** の全体構築が必要  
全体が無ければ、**供給力**／**環境上のメリット**を正確に評価できない
- 原子**として**の水素**  
現実のエネルギー供給に大きな役割を果たす → 貢献度は増大
- 電気に勝る特性** **水素は物質の形をとる**化学エネルギー**【重要】**  
大規模な**輸送・貯蔵**が、技術・経済的に容易 → **瞬間需給バランス**必要なし  
液体(アンモニアなど)に変換して輸送・貯蔵もできる  
化学エネルギー間の**変換効率**が一般に高い  
**燃焼過程なく**電気に変換(燃料電池の電気化学反応)

# I -2. 環境問題(E)の思考停止と地球温暖化の実態

## (1) 二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)は循環する

石炭火力のCO<sub>2</sub>はどこから来たか  
宇宙史から知る物質の生成  
最終的に地球環境はどうなるか

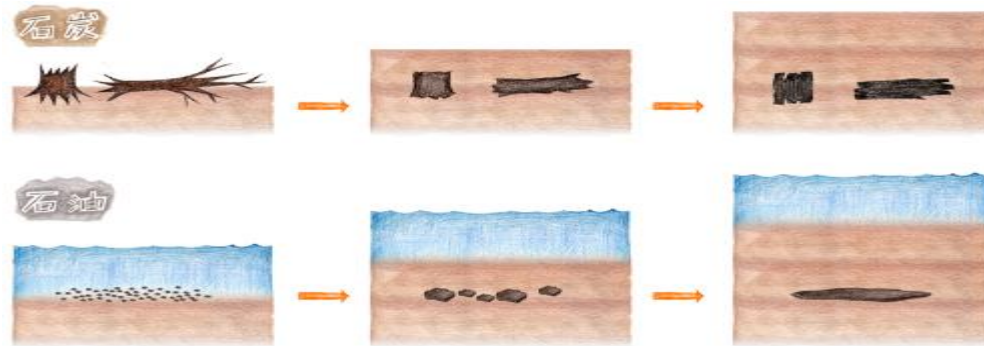
## (2) 誰のための環境問題

気候変動は何に影響するか

# I-2 (1) 二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)は循環する 蓄えた時代と使う時代

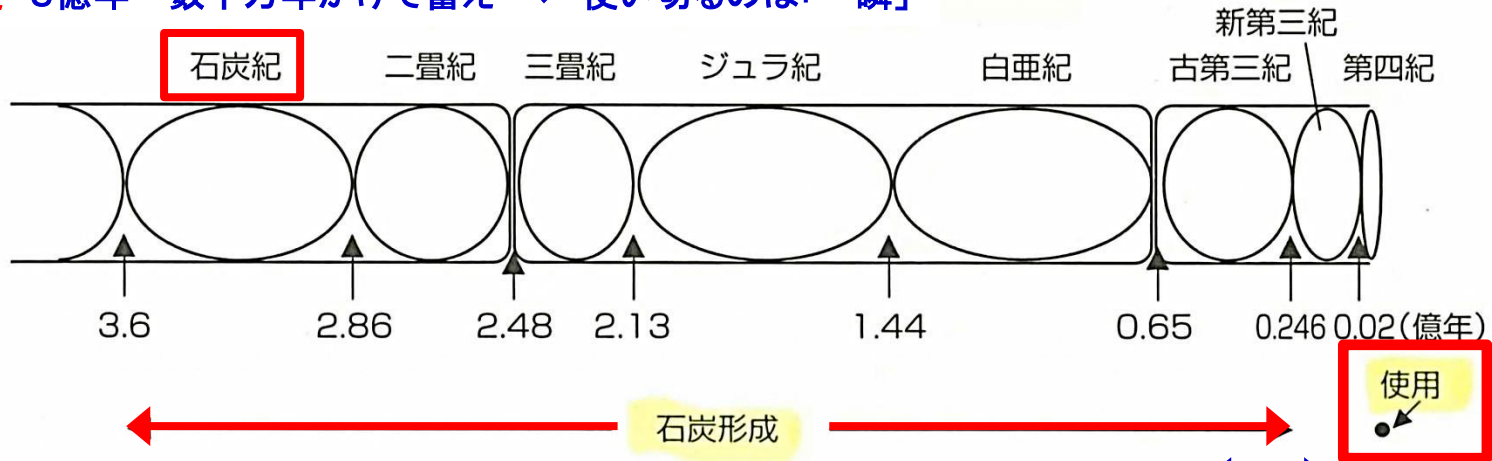
## 石炭の成り立ち

2000万年前の地層に  
一部石炭化した木が  
残っている。  
石油には諸説あり



—— 古生代 —— ———— 中生代 ———— ———— 新生代 ——

石炭 3億年～数千万年かけて蓄え ⇒ 使い切るのは「一瞬」

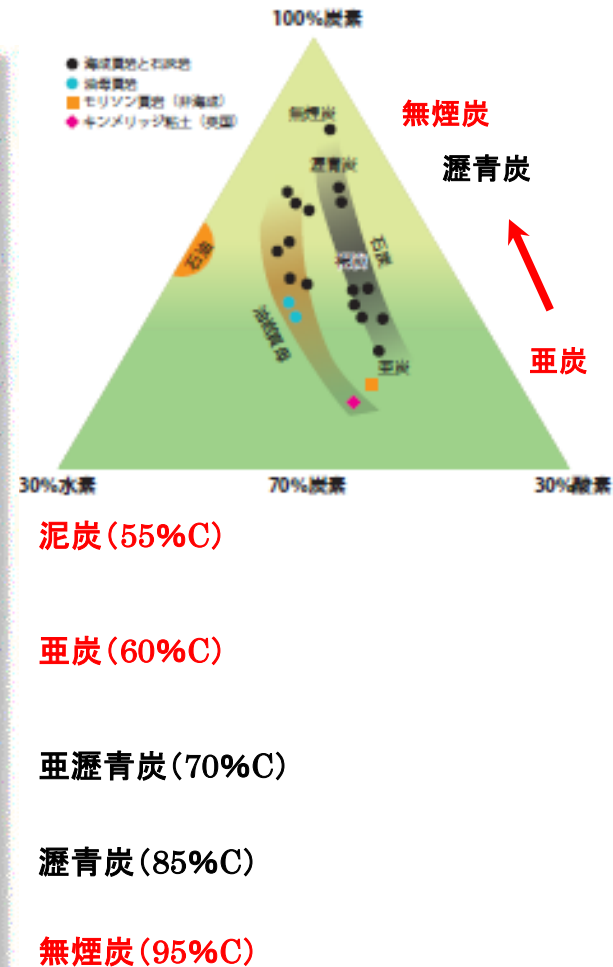
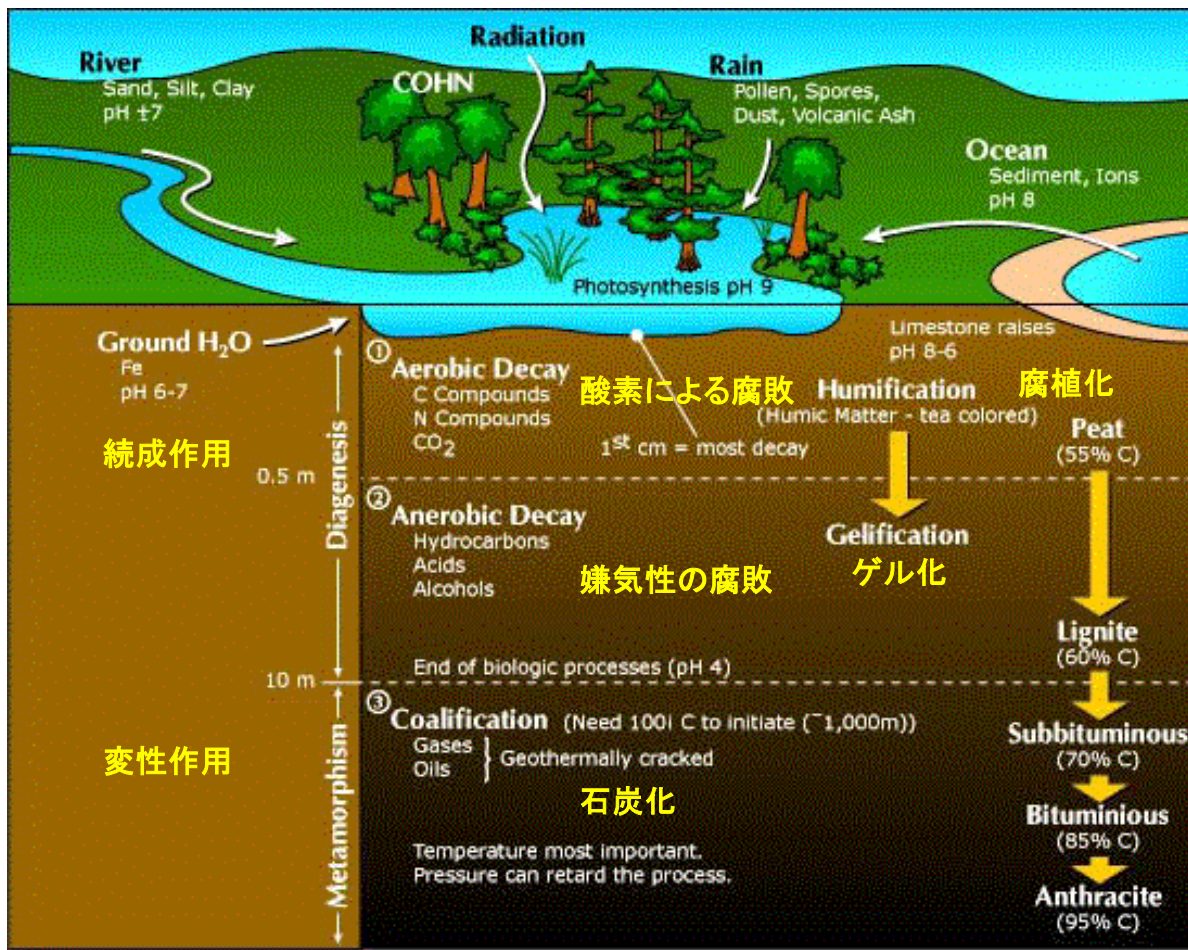


出典: 核燃料サイクル, 藤家, 石井

石炭ができるには、分解される前に地中埋設が必要。 現在: 倒木はシロアリ/菌類・微生物で分解。  
古生代: 分解者が出現していない又は少数派 → 分解前に埋没 → 湿地帯では少酸素の水中で分解が進まず堆積 → 分解されずに残った組織が泥炭となって堆積 → 地圧/地熱を受けて石炭化



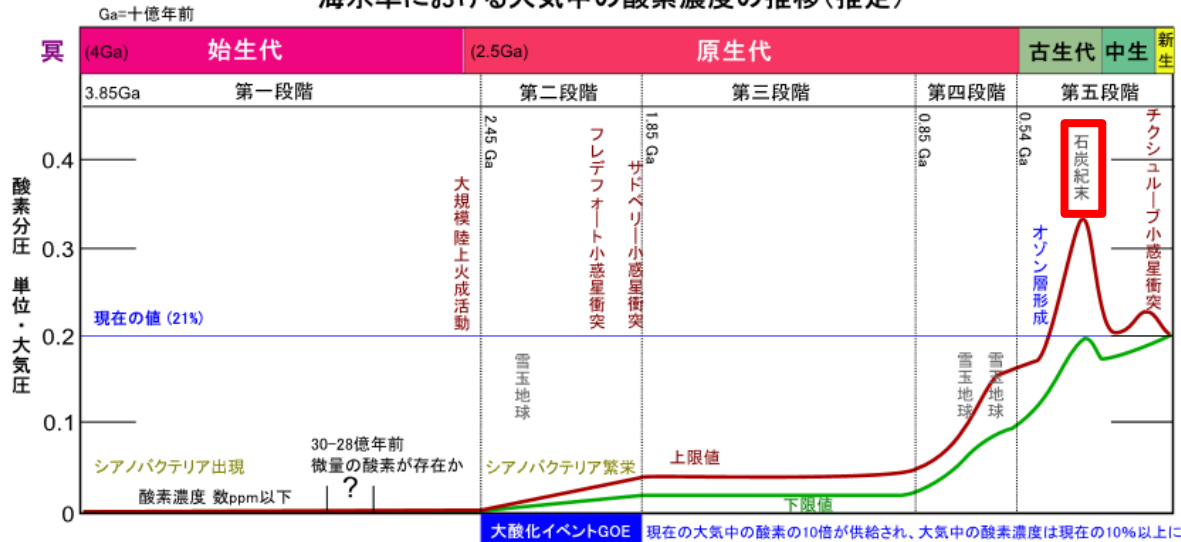
# I -2 (1) 石炭の生成過程 石炭化で水素減少



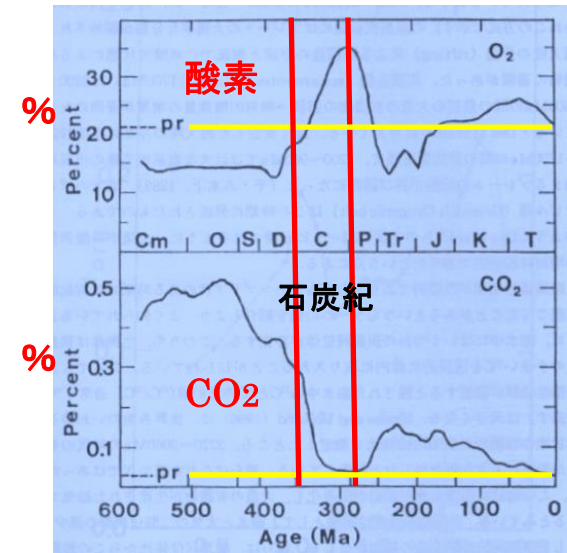
**The Anatomy of a Swamp** 石炭を生成する沼(水面下)の断面。左側は2つの主な生成過程、**続成作用** (バクテリアによる腐敗)と**変性作用**(熱, 圧力による変化)を、右側は、これらの過程の**生成物**(泥炭から無煙炭)を示す。上部の白い矢は、最終的に石炭の灰となる**不純物**が泥炭にどのように入るかを示す。

# I-2 (1) 石炭生成と大気成分 石炭は大気CO<sub>2</sub>の固定化

海水準における大気中の酸素濃度の推移(推定)



## 大酸化イベント



石炭紀は、**高温多湿**な環境の地域が多く、植物や昆虫は**巨大化**。高湿度の熱帯ではシダ植物が径2m×高さ40m、巨大トンボの羽は70cmにも達した。

**酸素濃度**が非常に高く、それが昆虫の巨大化につながったと考えられている。

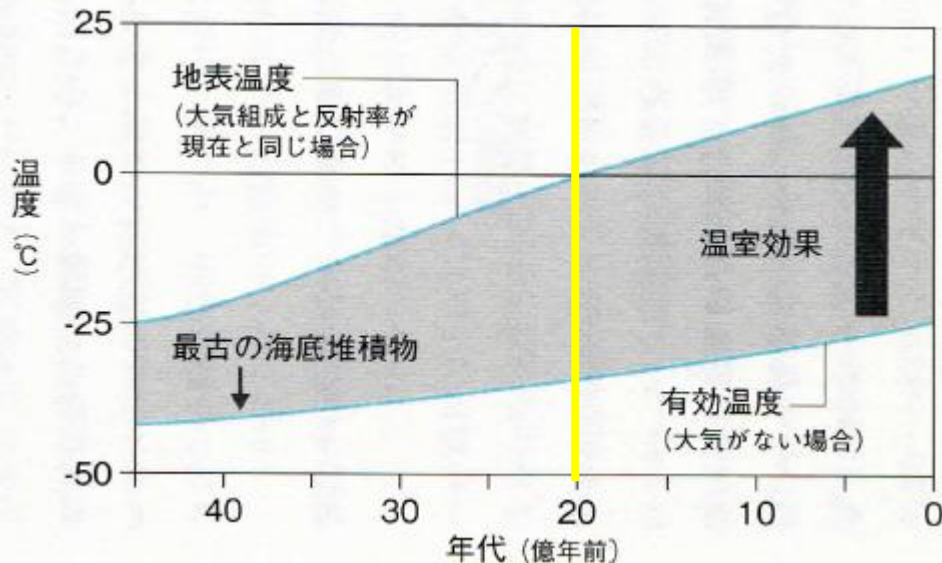
北極では氷河が形成され、石炭紀後期の**氷河期**(数百万年)によって、多くの生物が**絶滅**することになった。

石炭紀の植物の巨大化は、大気中のCO<sub>2</sub>量(栄養分)が多かったことを、大気中の酸素濃度の急増は、植物へのCO<sub>2</sub>の固定化(石炭量)の急増/大気中CO<sub>2</sub>の急減を裏付けるものと考えられる。

→石炭は石炭紀以降の大気中CO<sub>2</sub>を、太陽光で閉じ込めたもの。【報告者】



# I -2 (1) 二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)は循環する 暗い太陽のパラドックス



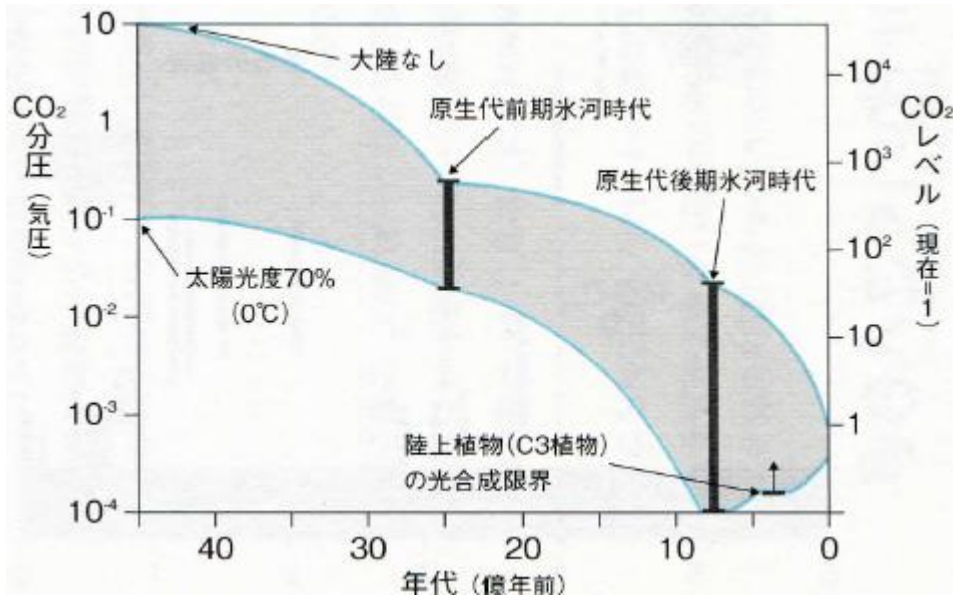
地球のアルベド(反射率)と温室効果ガスが現在と変わらなければ、**20億年前に全球凍結**

→全球凍結するとアルベドは大きくなる  
→全球凍結から抜け出せない

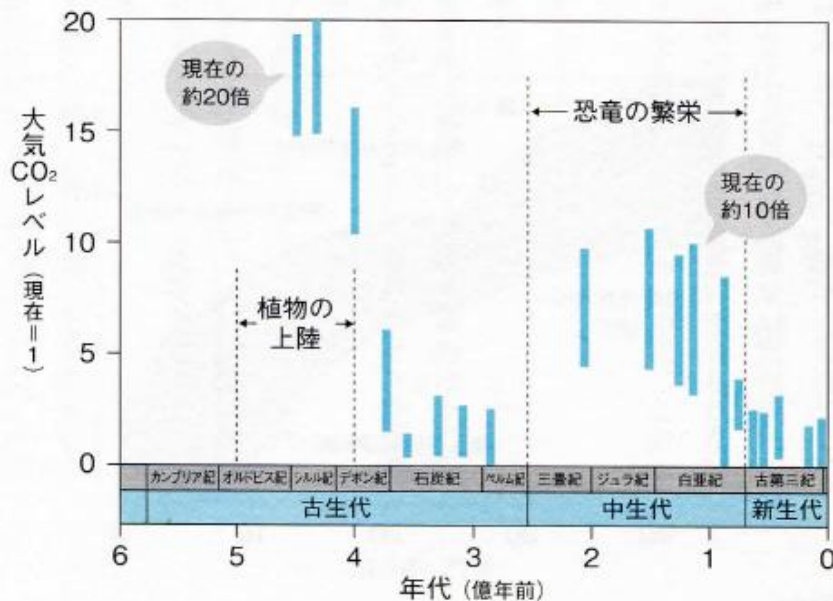
【地質学的証拠はない】=**パラドックス**

太陽が明るくなるにつれ、**CO<sub>2</sub>濃度は適度に低下してこなければならない**

**太陽光度以外を現在と同じとした場合の地表温度**



**地球46億年のCO<sub>2</sub>濃度の変動**

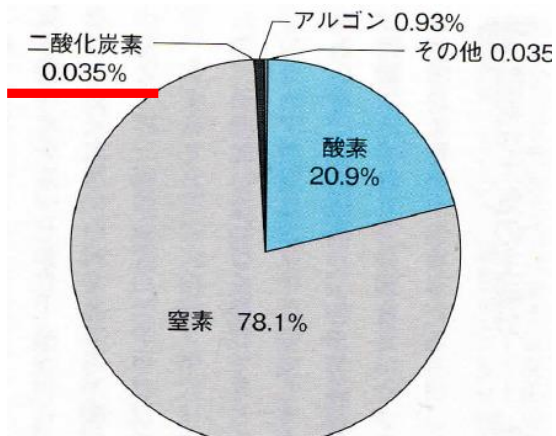


**古生代以降のCO<sub>2</sub>濃度の変動**

出典:大気の進化46億年、田近英一、2011

# I-2 (1) 二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)は循環する 暗い太陽のパラドックス

## 地球、金星、火星の環境比較(現在)



地球大気の組成(現在)

		金星	地球	火星
大気組成 (%)	窒素 N <sub>2</sub>	1.8	78.1	2.7
	酸素 O <sub>2</sub>	—	20.9	—
	アルゴン Ar	0.02	0.93	1.6
	二酸化炭素 CO <sub>2</sub>	98.1	0.035	95.3
大気圧		95 気圧	1 気圧	0.006 気圧
全球平均温度		460℃	15℃	-60℃
水の存在量		極微量	270 気圧相当	(不明)
水の存在形態		水蒸気	海洋	氷(極冠、永久凍土)

## 地球表層の揮発性成分の分布

成分	大気	海洋	地殻	総量	主な存在形態
水 (H <sub>2</sub> O)	—	7.8×10 <sup>22</sup>	4.1×10 <sup>21</sup>	270 (H <sub>2</sub> O)	水 (H <sub>2</sub> O)
炭素 (C)	5.8×10 <sup>18</sup>	3.3×10 <sup>18</sup>	1.0×10 <sup>22</sup>	80 (CO <sub>2</sub> )	炭酸カルシウム (CaCO <sub>3</sub> ) 有機物 (CH <sub>2</sub> O)
塩素 (Cl)	—	7.6×10 <sup>20</sup>	7.6×10 <sup>20</sup>	10 (HCl)	塩素イオン (Cl <sup>-</sup> ) 塩化ナトリウム (NaCl)
硫黄 (S)	—	4.0×10 <sup>19</sup>	3.5×10 <sup>20</sup>	5 (SO <sub>2</sub> )	硫化カルシウム (CaSO <sub>4</sub> ) 硫化鉄 (Fe <sub>2</sub> S) 硫酸イオン (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )
窒素 (N)	2.9×10 <sup>20</sup>	—	1.4×10 <sup>20</sup>	1 (N <sub>2</sub> )	窒素 (N <sub>2</sub> ) 有機物 ([-NH <sub>2</sub> ])
アルゴン (Ar)	1.7×10 <sup>18</sup>	—	—	0.01 (Ar)	アルゴン (Ar)

単位(総量以外)はモル。総量は( )内の気体に換算した気圧

## 地球の隣の惑星の大気はCO<sub>2</sub>

現在大気を構成している成分は  
**たまたま気体**として存在している

地表の岩石も同様。

海水成分 → 岩塩

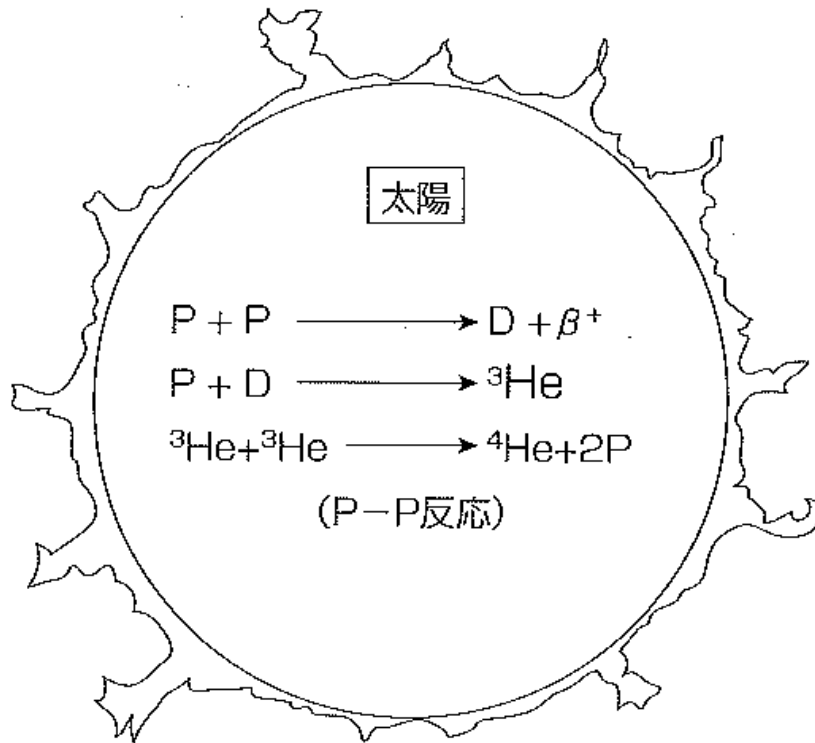
CO<sub>2</sub> → 炭酸塩(石灰石)

40~90気圧相当量 = 金星大気

# I-2 (1) 暗い太陽のパラドックス 太陽は熱くなる

太陽での核融合＝水素燃焼反応(陽子4つからHe-4をつくる)

水素連鎖反応(P-P反応※)と炭素・窒素循環反応(CNO反応)の、2つの道筋がある



(※)

- ① 陽子と陽子が融合 → 重水素 140億年に1回
- ② 重水素と陽子が融合 → He-3
- ③ He-3とHe-3が融合 → He-4

重水素をつくる反応①は非常にゆっくり  
出力密度は平均1kW/m<sup>3</sup>以下で低い

太陽でゆっくりとした核融合反応が可能なのは、太陽が大きく、重力でプラズマの閉じ込めが自然にできるから。

反応は太陽中心部(全体の1割程度)。  
約50億年燃え続けてきて、寿命半ば。

あと50億年で中心部が燃え尽きたら、外側に燃え広がり太陽の膨張が起こり、地球ほかの惑星は、それに飲み込まれると予想される(太陽の終末)。

石炭, 石油, 天然ガス... 過去の太陽エネルギー起源

地熱, 原子力... 地球自らの貯蓄(ウラン)

再生可能エネルギー(地熱を除く)... 現在の太陽エネルギー



# I-2 (1) 宇宙史から知る 水素は出発物質

ビッグバン前は物質はなく電磁波(放射線)が溢れる → **いかにして太陽や地球は誕生したか**  
**いかにしてヒトは自然を学び, 自然を真似たか**

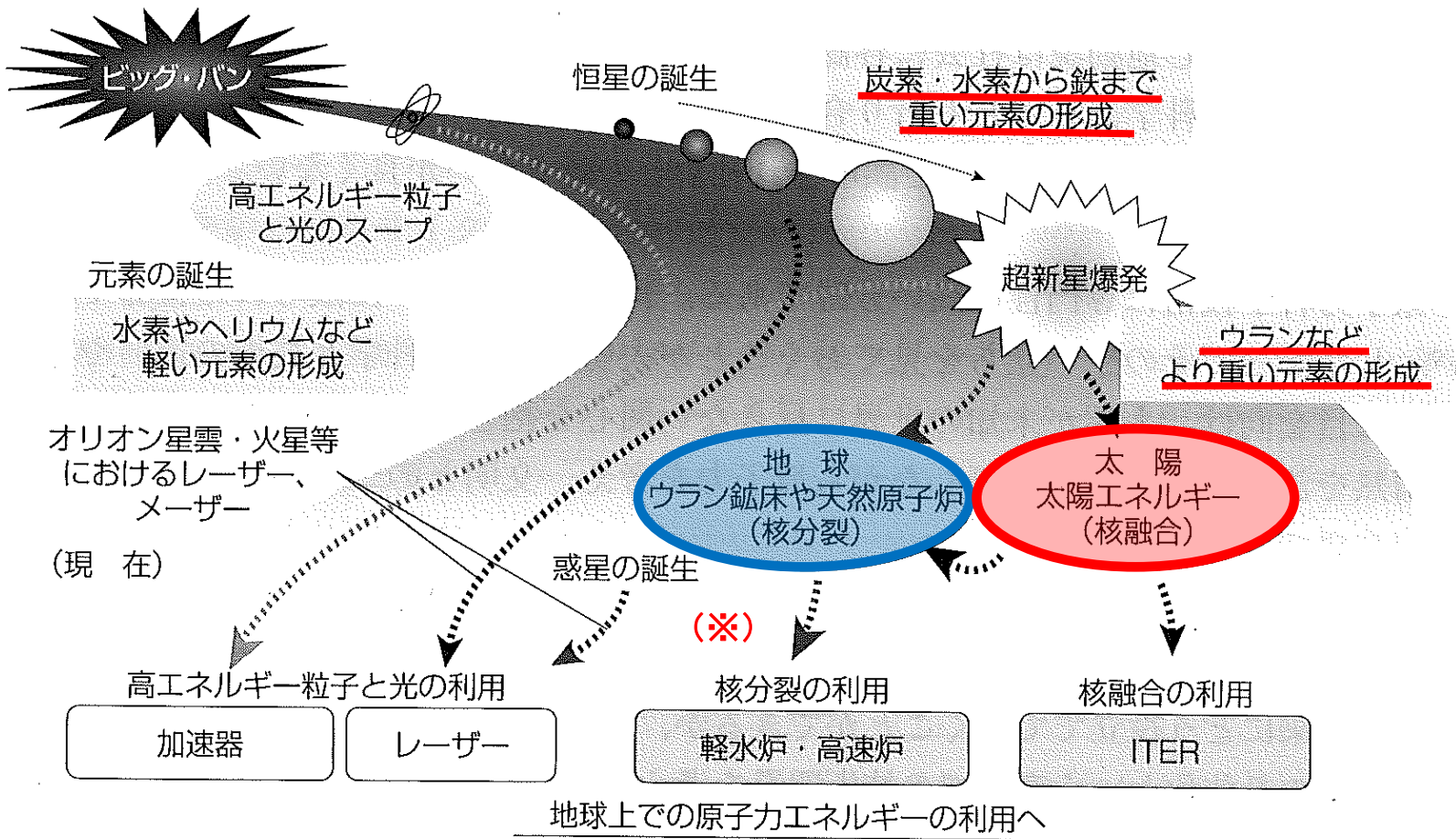


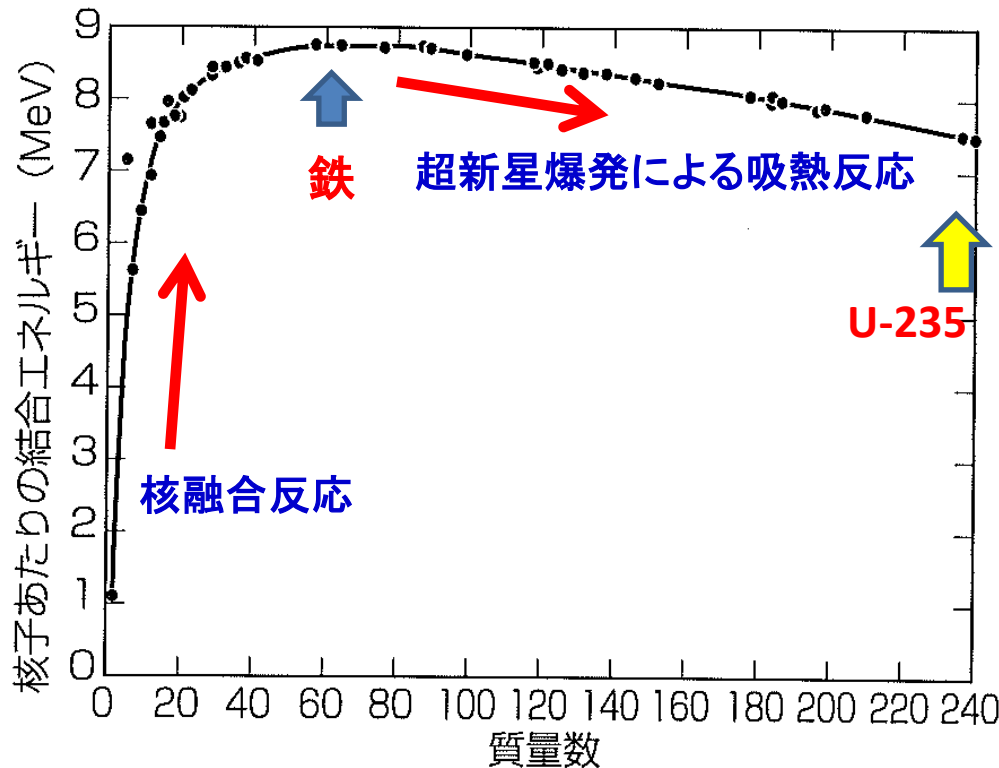
図1 宇宙誕生と原子力 -自然に学び、自然を真似るのが、科学の原点-

(※) **ウラン等の崩壊熱(地熱の源) → 地熱発電**

# I-2 (1) 宇宙史から知る 水素からの物質生成

元素の中で核子の結合エネルギーが最も大きく安定している鉄が作られるとエネルギー生成のプロセスは止まってしまう

鉄よりも重い元素は普通にはできず、吸熱反応が起こる大きなエネルギー(超新星爆発)が必要



超新星爆発エネルギーで中性子吸収・過剰  
⇒β崩壊(電子放出)  
⇒中性子が陽子へ変わる  
(原子番号が一つ増)

超新星爆発という莫大なエネルギーを「質量」という形で貯蔵  
⇒「核分裂」はそれを解放するもの

図1-7 質量数に対する核子あたりの平均結合エネルギー

(出典：ジェームスJ. ドゥデルスタット、ルイスJ. ハミルトン(著)、成田正邦、藤田文行(訳)、「原子炉の理論と解析(上)」、現代工学社(2001))

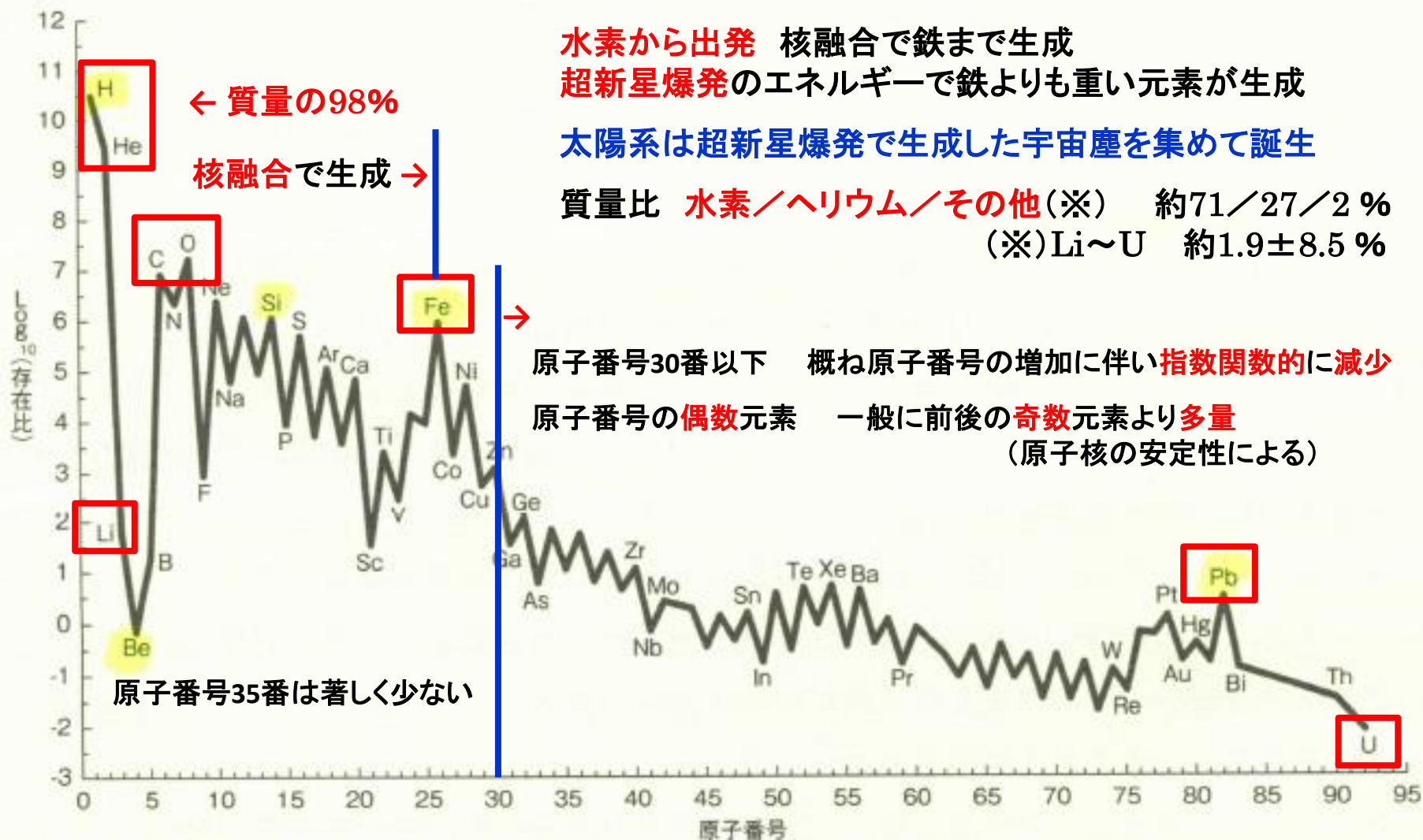
# I-2 (1) 太陽系の物質 水素とヘリウムが主成分

## 太陽系の原子存在比

水素から出発 核融合で鉄まで生成  
超新星爆発のエネルギーで鉄よりも重い元素が生成

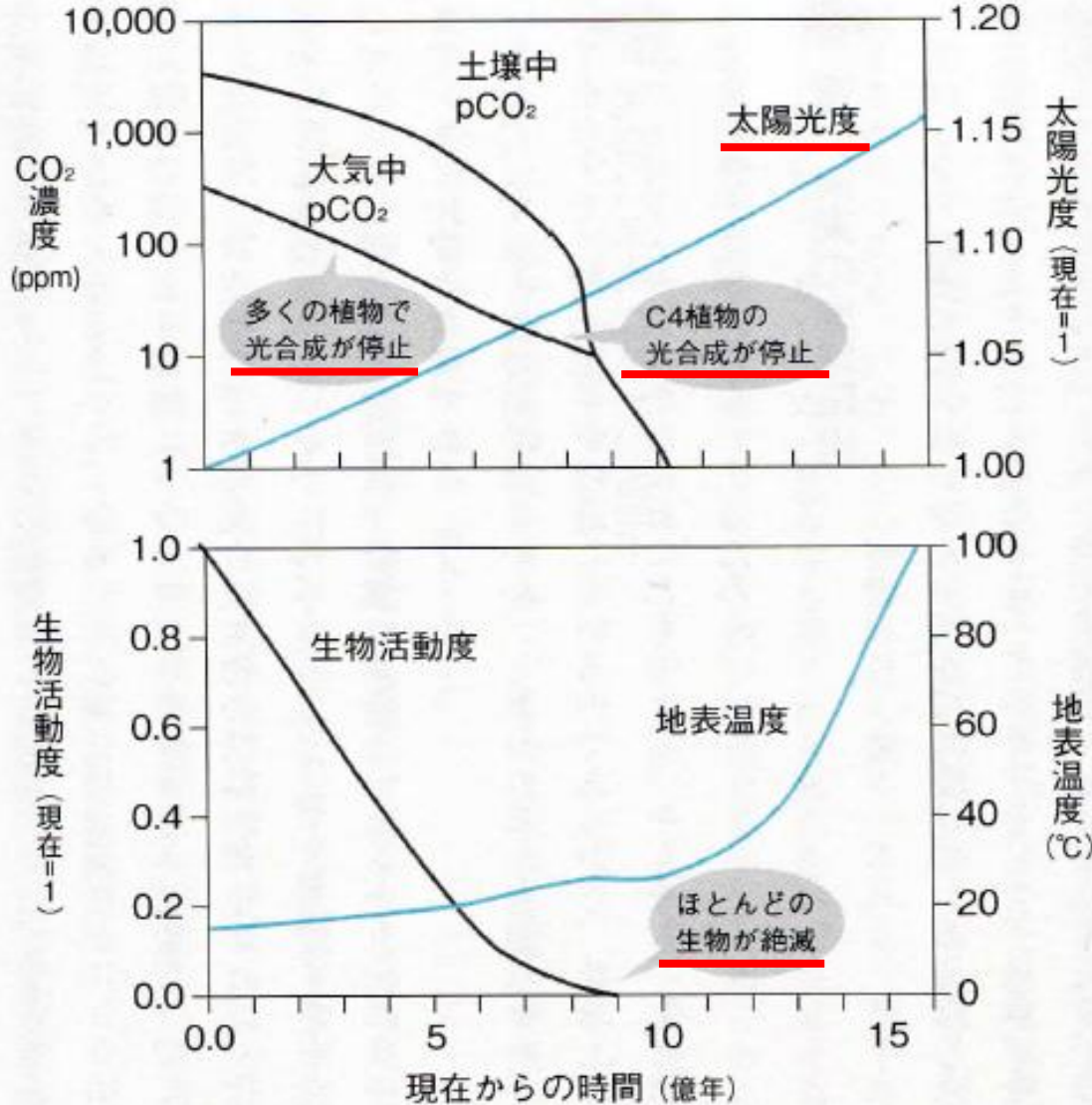
太陽系は超新星爆発で生成した宇宙塵を集めて誕生

質量比 水素／ヘリウム／その他(※) 約71／27／2 %  
(※) Li~U 約1.9±8.5 %



(注) シリコン存在量を $10^6$ として正規化した

# I-2 (1) 最終的に地球環境はどうなるのか 遠い将来の地球環境



大気中のCO<sub>2</sub>濃度は、短期的には増加するものの、**長期的には低下**

**150ppm以下**で多くの植物(**C3植物**)が光合成を停止<現在、約400ppm>

**10ppm以下**で**C4植物**(トウモロコシ、サトウキビなど)の光合成も停止  
【約10億年後】

太陽光度が現在の1.1倍になる → 成層圏の**水蒸気量**が急増／太陽からの紫外線で分解 → **水素**が地球から逃げ出す → **海洋**が無くなる  
【約15億年後迄】

**太陽の寿命**は約100億年  
残り約50億年 → 中年期

**遠い将来の地球の運命**

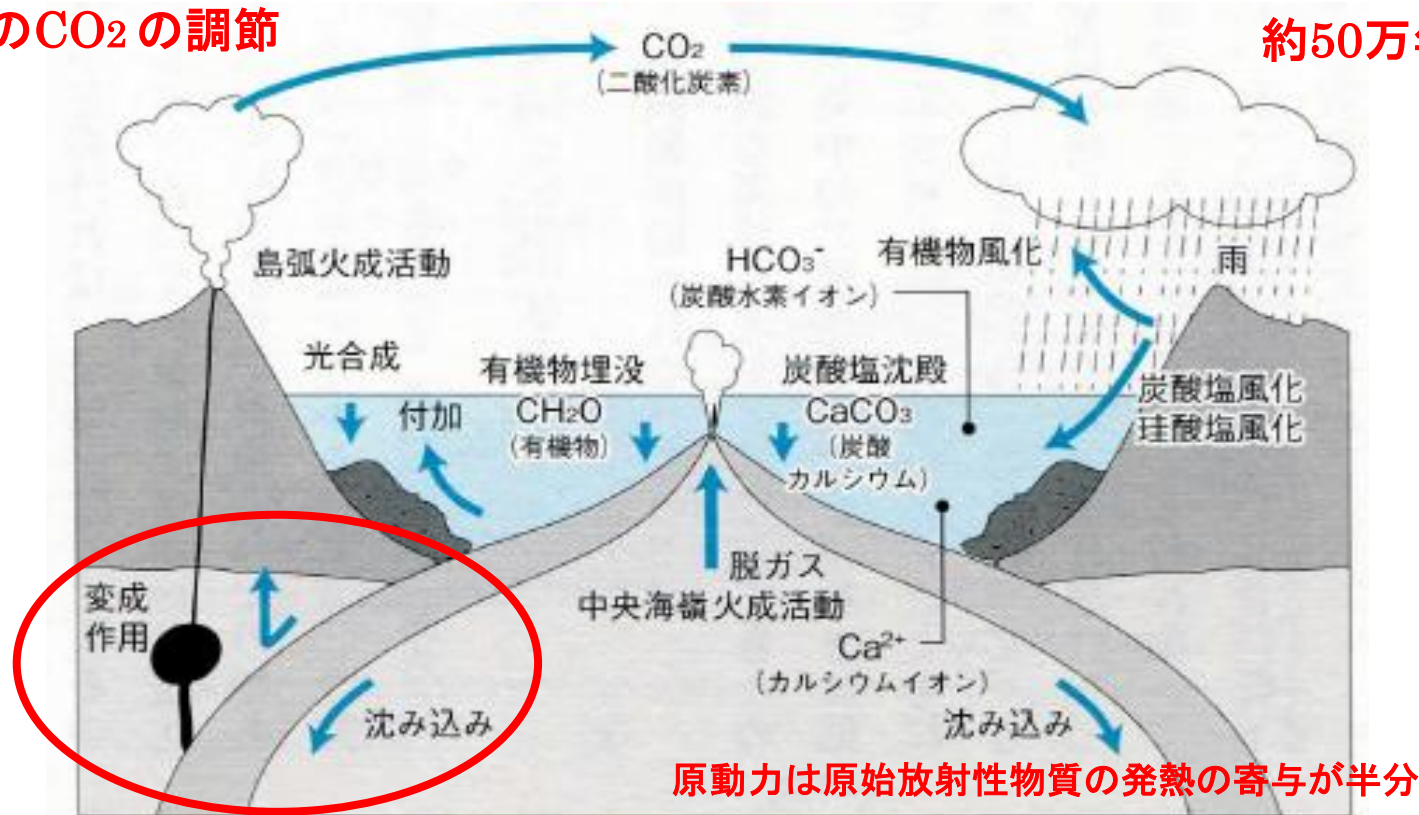
●環境問題とは**長期的な**幸せと**短期的な**幸せの選択



# I-2 (1) 最終的に地球環境はどうか 炭素循環システム

## 大気中のCO<sub>2</sub>の調節

約50万年周期



大気中のCO<sub>2</sub>濃度は、どのようにして太陽が明るくなる影響を相殺するように低下してきたのか

火山ガス中のCO<sub>2</sub> → 約1万年で現在の**大気**相当に、約50万年で現在の**海水**中に放出。

大気と海洋は数千年で混合 → 一体として扱う → 約50万年で動的平衡

大気／海水中CO<sub>2</sub> → 海底に堆積(炭酸塩鉱物、有機物) → 海洋プレートとともに大陸の下  
→ 熱で分解されCO<sub>2</sub>へ → 一部は火山から大気へ／残りは地球内部へ(いずれ大気放出?)

# I-2 (2) 誰のための環境問題

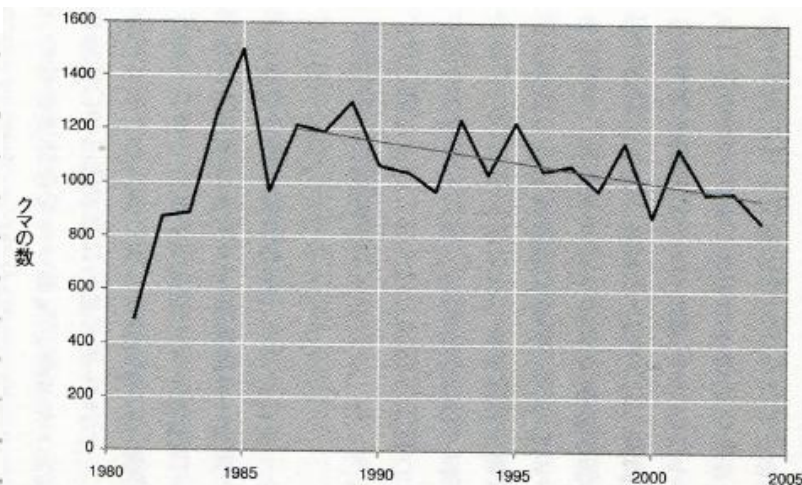
# 気温と死者数

## 京都議定書と賢い選択の費用と有効性

	いい気分 (京都議定書など)	いい成果
ホッキョクグマ	0.06頭救う	49頭救う
寒暖による死亡	84,000人の死者増大	何もなくても改善
洪水	4,500万ドルの被害減少	600億ドルの被害減少(費用50億ドル)
ハリケーン	0.6%の被害減少	250%の被害減少(費用50億ドル)
マラリア	7,000万人の感染防止	280億人の感染防止(費用30億ドル)
貧困	100万人減少	10億人減少
飢餓	200万人減少	2.29億人減少
水ストレス	8,400万人増大	何もなくても改善
HIV/AIDS		350万人の命を救済(費用70億ドル)
微量栄養素		10億人強の栄養失調改善(費用30億ドル)
自由貿易		毎年追加で2.4兆ドル
飲料水と衛生設備		30億人にアクセス提供(費用40億ドル)
気候への有効な対処		2ドル/トンの炭素税 低炭素エネルギーの研究開発(費用250億ドル)
お値段	1,800億ドル/年	520億ドル/年

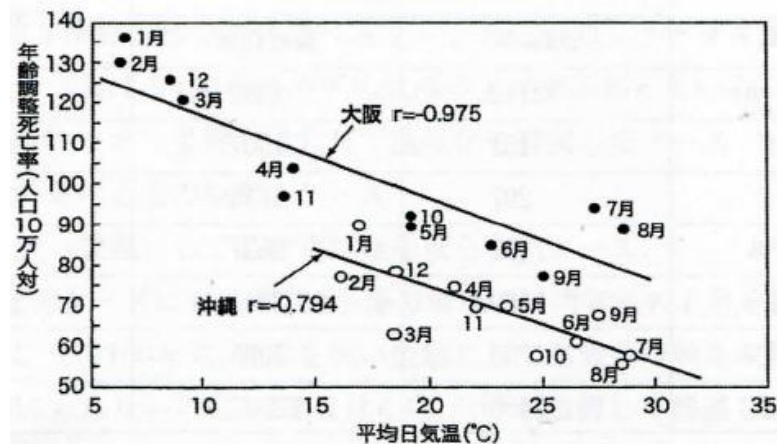
## 100万人当たりの暑さ・寒さ死者数(欧州)

	南フィンランド	オランダ	ロンドン	バーデン・ヴェルテンベルク	北イタリア	アテネ
夏の平均気温	14.5	16.1	16.9	17.7	20.7	24.1
最適気温(±1.5℃)	14.8	18.8	20.8	20.5	18.3	24.2
最適より暑い日数	46	18	5	22	89	63
最適より寒い日数	275	312	330	308	230	251
暑さによる年間死者	248	53	40	108	325	445
寒さによる年間死者	1,379	1,345	3,129	1,936	1,238	2,533



## 西ハドソン湾の北極グマ数

環境問題 年0.06頭減る程度  
人が射殺 年49頭

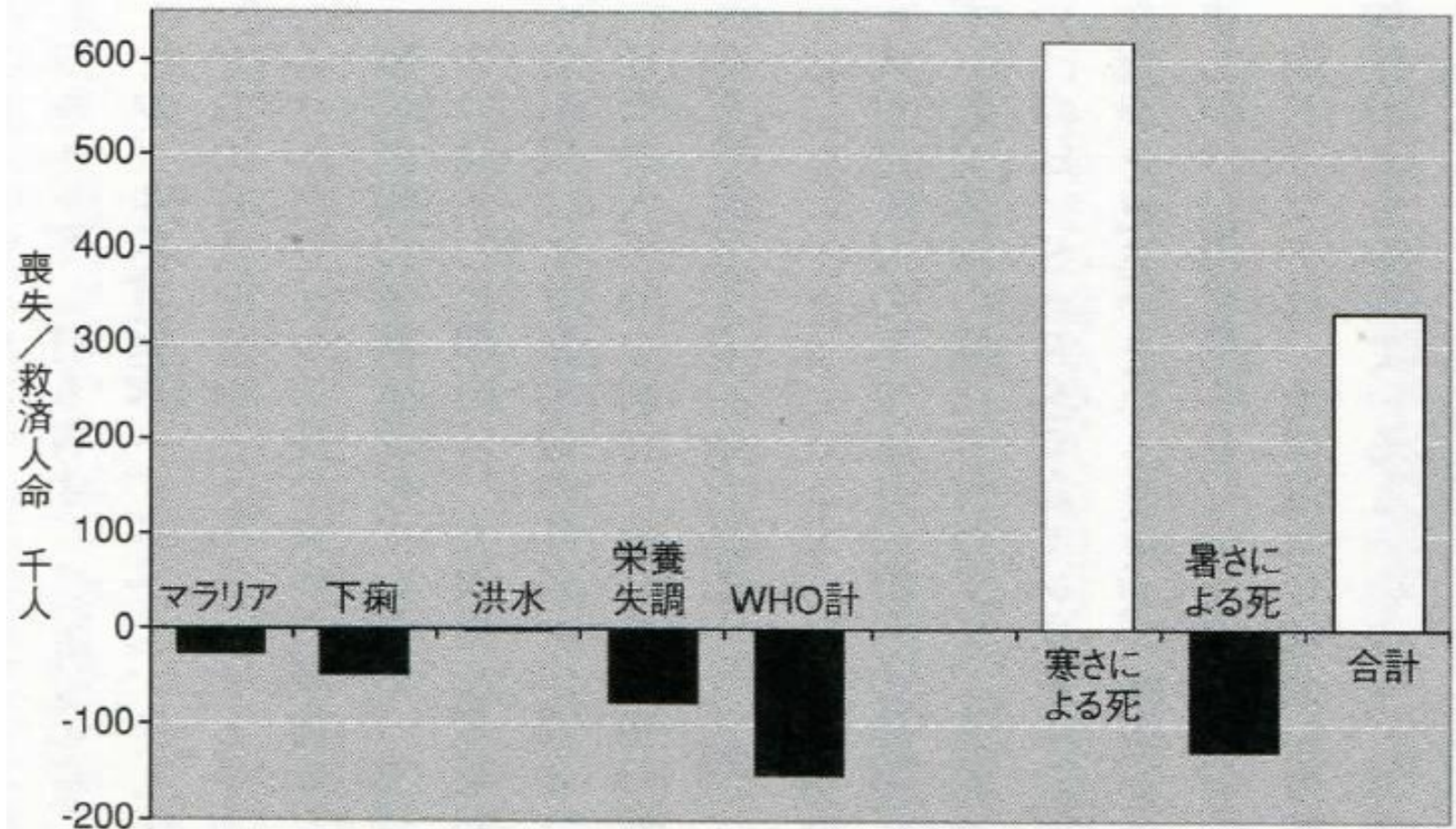


## 気温と死亡率の関係



## I-2 (2) 誰のための環境問題

## 気候変動の影響



気候変動がもたらすマラリア、下痢、洪水、栄養失調による年間死者数(WHO)

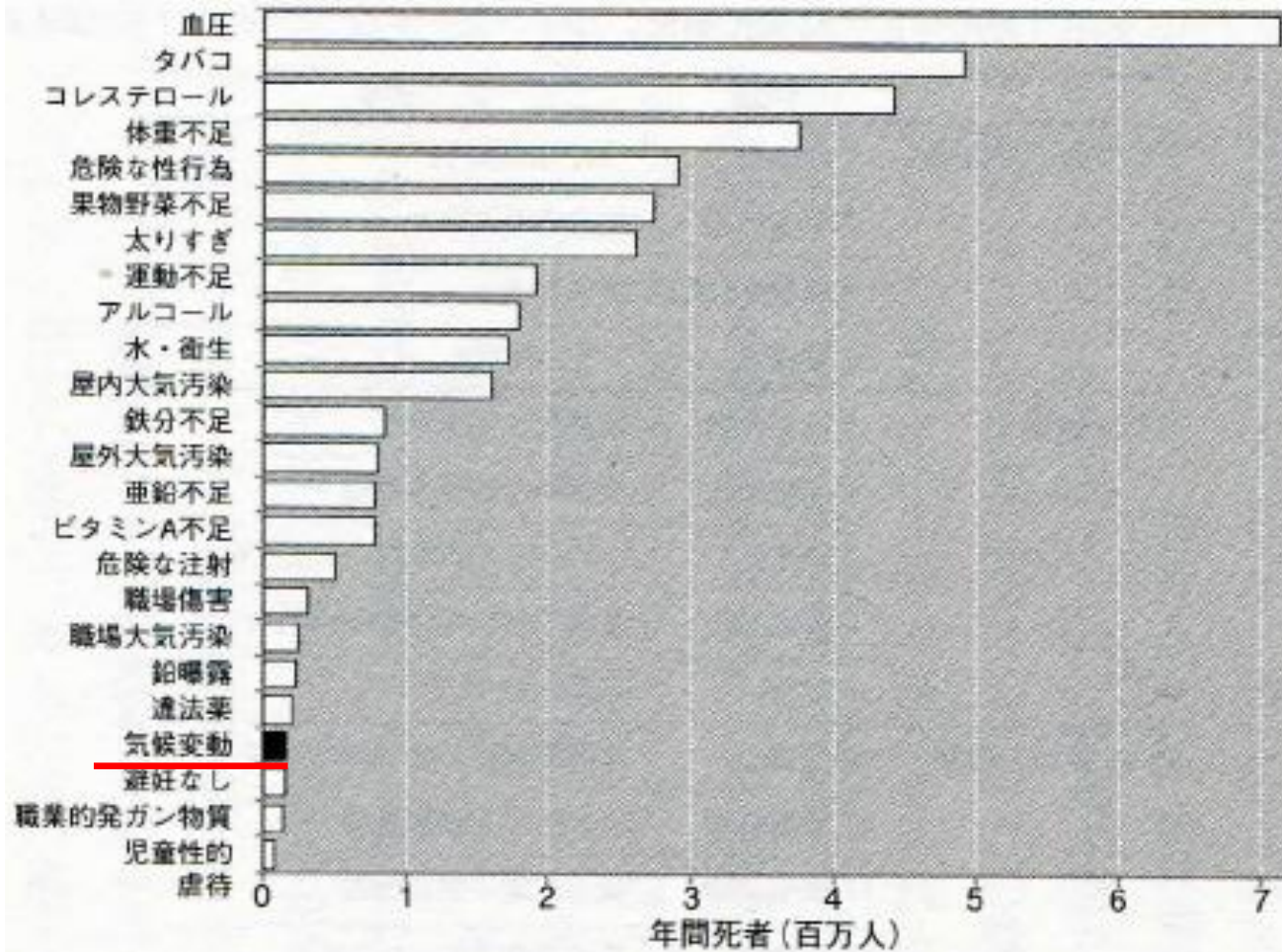
暑さと寒さによる死者数を右に示し、合計した結果、

地球温暖化で15万人が死ぬどころか、毎年20万人の命が救われるという結果となる。

但し、寒さによる死者は専ら老人なので、暑さ死ぬ人の方が失われる余命は大きい。

# I-2 (2) 誰のための環境問題

# 気候変動の影響



各種リスク要因からくる死者数(WHO 2000年) 気候変動は総死亡者の0.3%にしかない

(1)報道などが形成した地球温暖化に関する理解は、かなり歪んでいる。(2)要因の一つでしかないCO2削減にばかり血道。悪い部分だけでなく、良い部分も減らしてしまう。代替案がないか考えるべき。(3)対応すべき課題は、地球温暖化だけではない。何をしたいか考える必要がある。



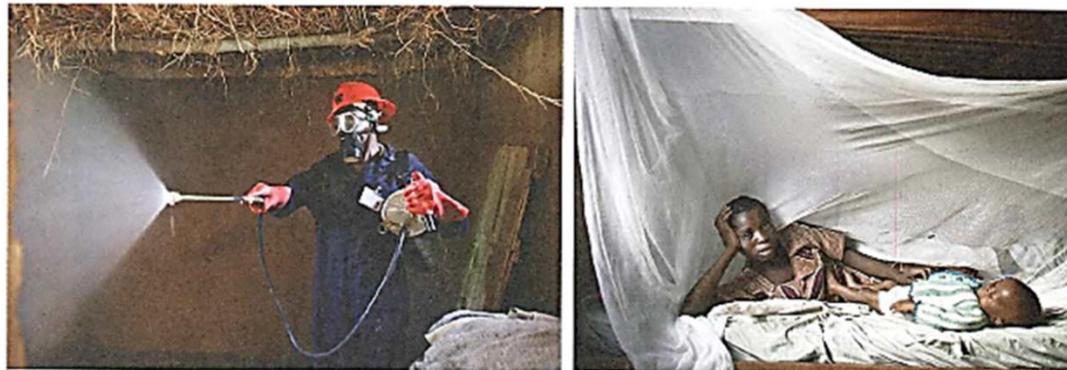
# I-2 (2) 誰のための環境問題 マラリアの例

DDTは環境保護の名の下に見境なく禁止 → 熱帯諸国民はマラリアを退治できず  
→ 死と病気という高い代償を払う

マラリアの高リスク地域(最も致死率が高い熱帯熱マラリアにかかりやすい地域)



マラリアによって毎年100万人が犠牲 ⇒ ワクチン開発に数十のプロジェクト  
資金の大半はゲイツ財団 1994年～45億ドル 今後10年間 100億ドルに増額



ワクチン以外の防御法 DDTが復活(室内)・蚊帳

# I-3 FBRと軽水炉の違いの本質

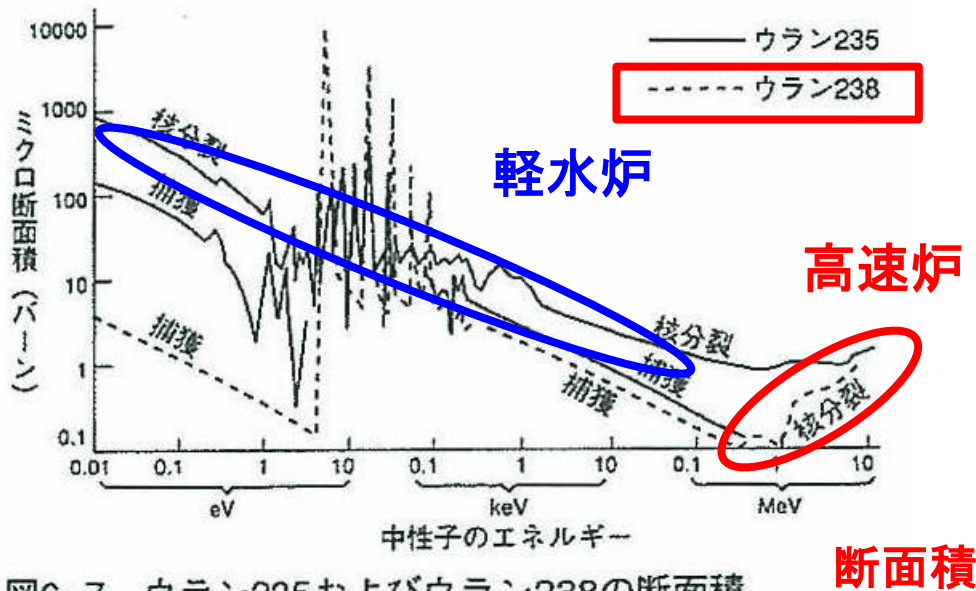


図6-7 ウラン235およびウラン238の断面積

**資源量が大幅増**

U-238 (天然存在比 99.7%)  
が核分裂

**中性子利用効率が向上**

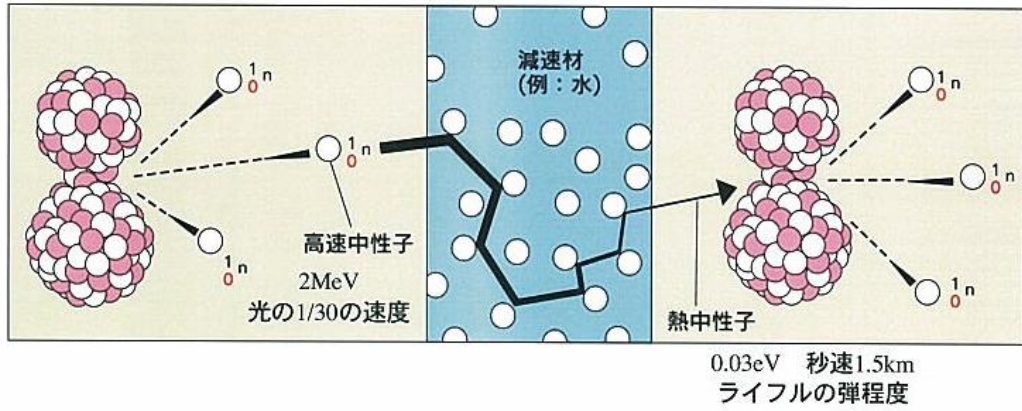
高速炉の方が中性子を  
有効利用

**廃棄物核変換に利用可**

半減期を短くする

**高速中性子**

**熱中性子**

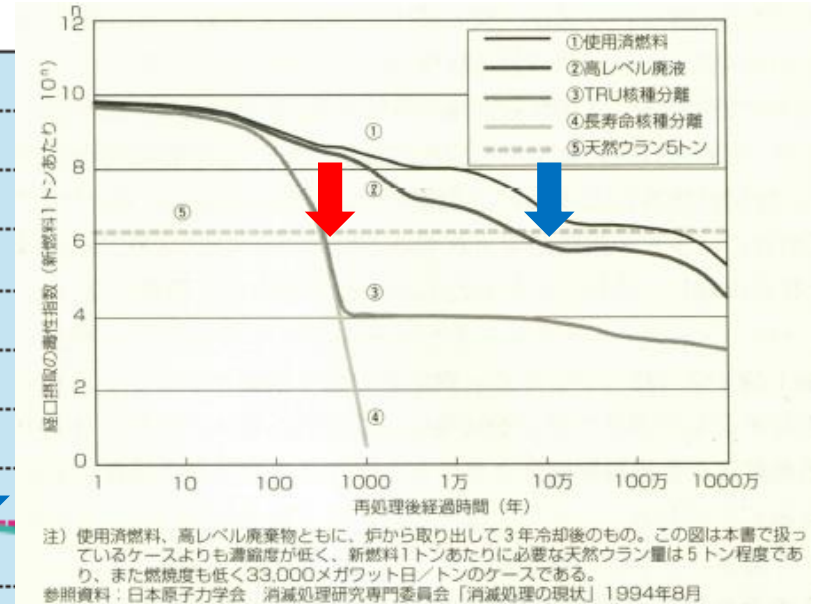
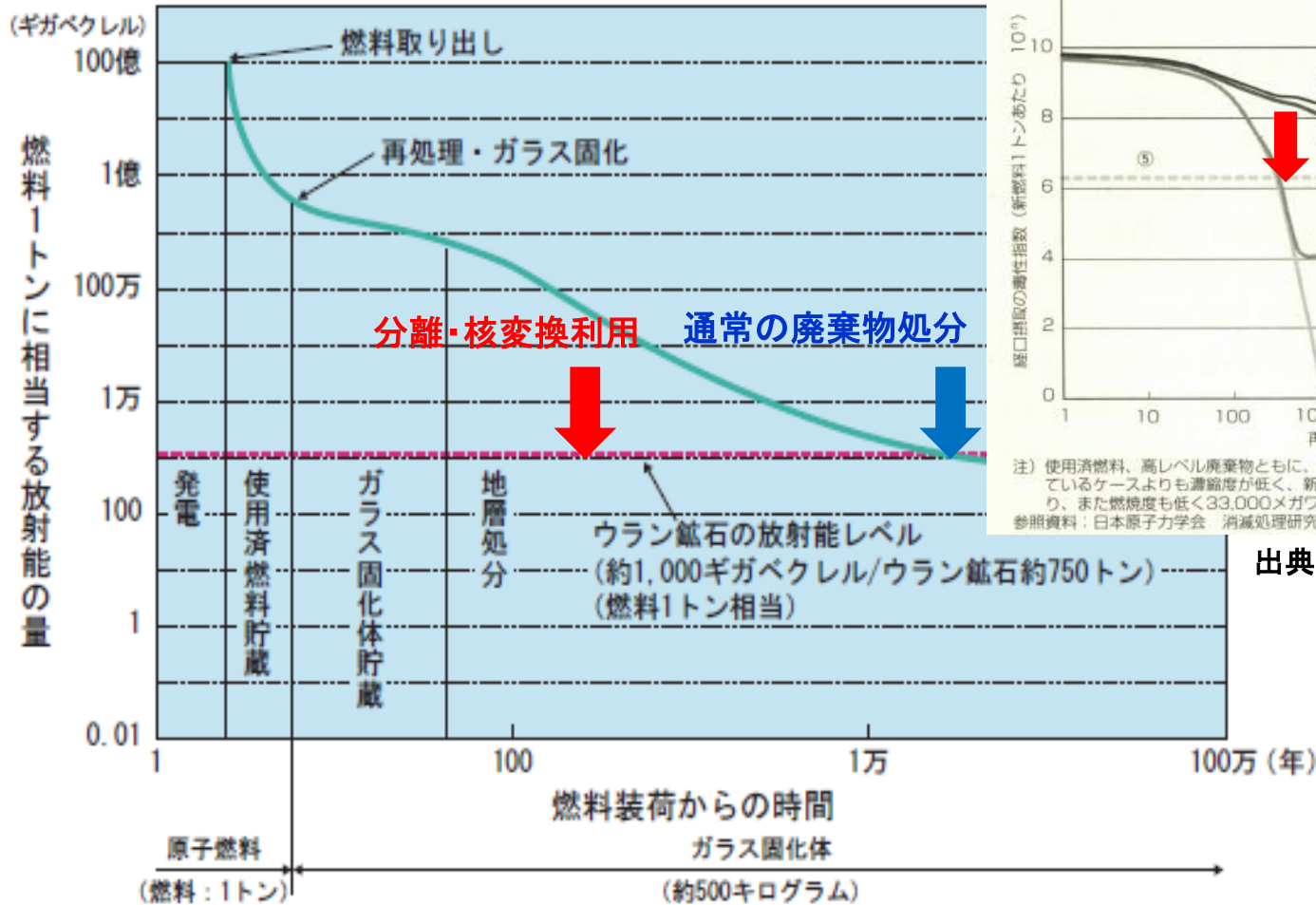


# I-3 燃料サイクル・FBRが実現する技術

## 廃棄物の短半減期化

分離・核変換技術 → 高レベル廃棄物の短半減期

分離 → 高レベル廃棄物からレアメタル等を回収



出典: 核燃料サイクル, 藤家, 石井



# I -4 地廃棄物の地層処分は日本ではできないのか

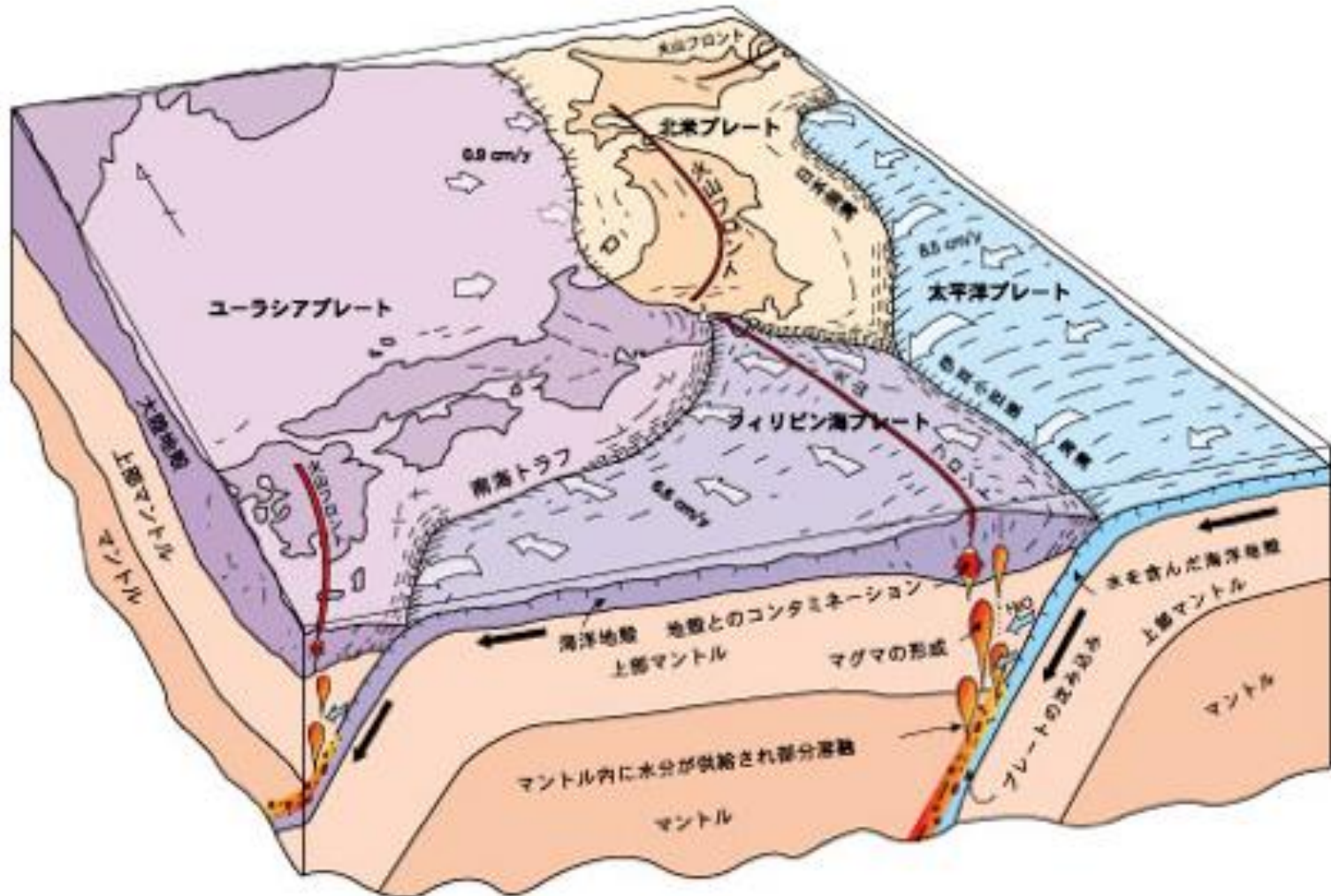
## (1) 火山ができるしくみ／地震はなぜ発生するか

日本付近のプレート／火山フロント／地震のメカニズム  
日本の主な活断層

## (2) 徳島県の地震・津波の歴史

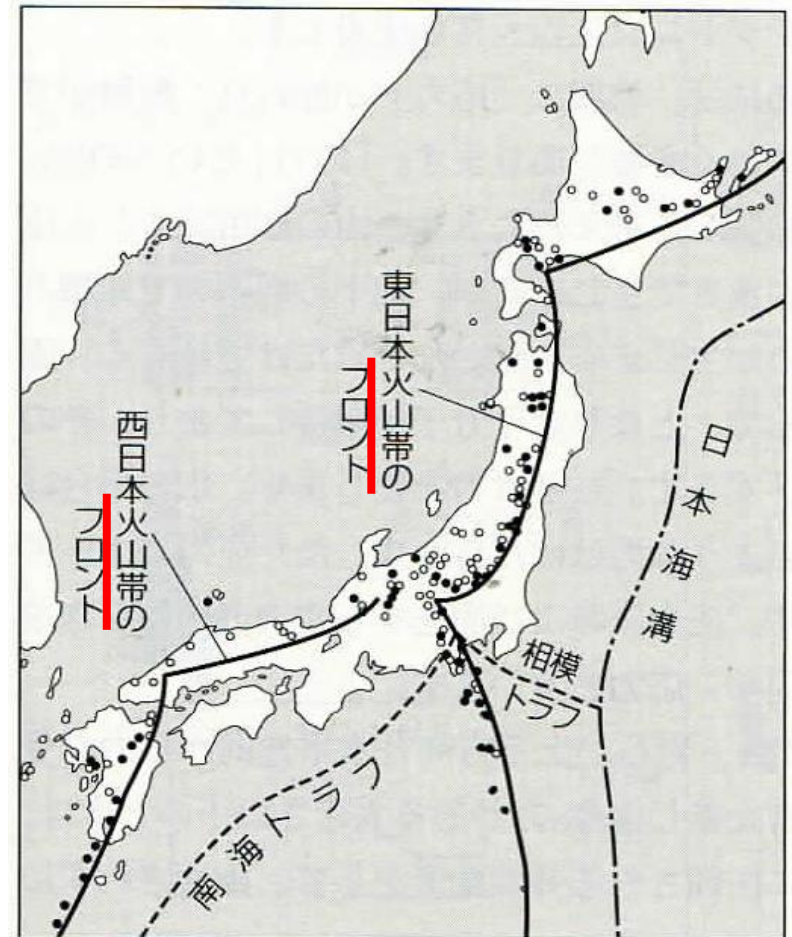
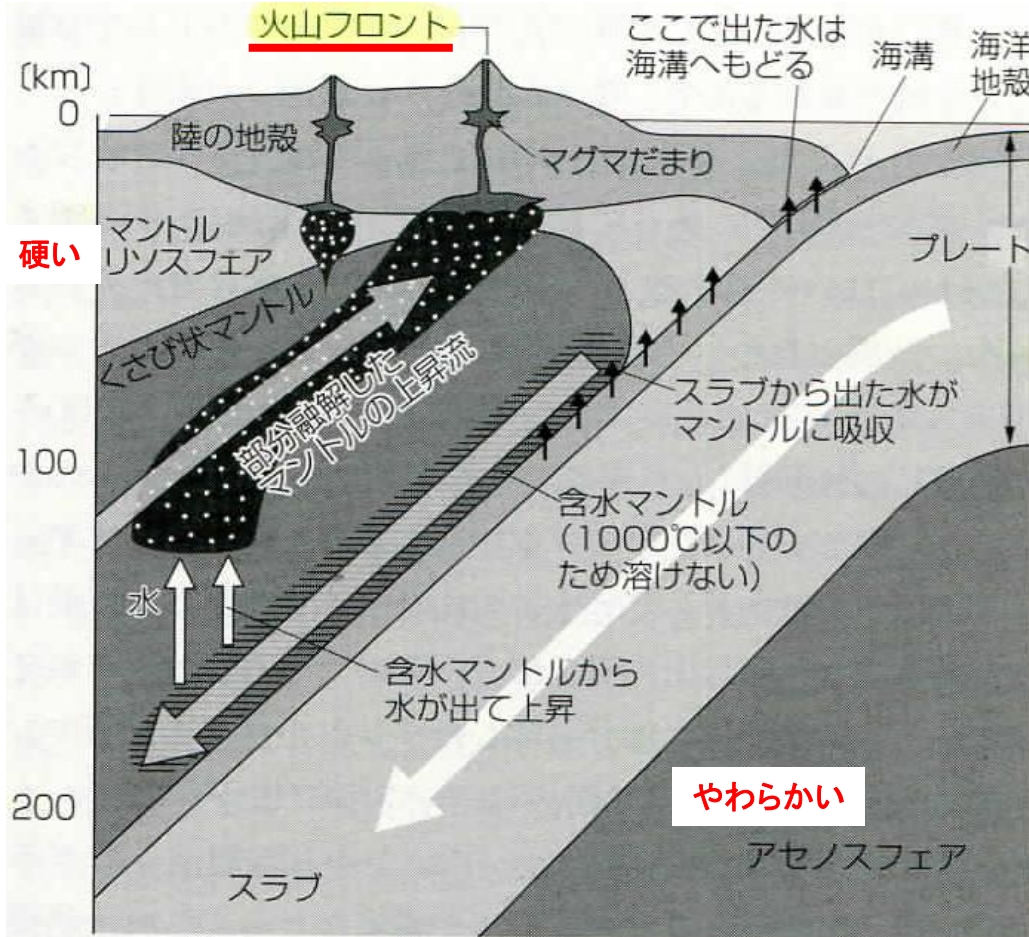
南海地震を知る／徳島県の津波碑

# I-4(1) 火山ができるしくみ 日本付近のプレート



**南海トラフ:** 海側のフィリピン海プレートが陸側のユーラシアプレートの下に沈み込むトラフ（舟底状の細長い海底凹地）で、供陸側のプレートの変形が限界に達し、境界面が破壊されるとき巨大地震が起きる。

# I-4 (1) 火山ができるしくみ 火山フロント



**沈み込み帯**でスラブから吐き出される水とマグマの生成

スラブから水が出るのは深さ数十km。水はくさび状マントル内の下降流に乗って深さ150kmに達すると、高圧のためマントルから吐き出される。この水が上昇し部分溶解したマントルの上昇流の中で上昇し、1000℃以上で**減圧溶解**。

日本列島の火山フロント ●活火山 ○それ以外

火山が海溝から一定の距離の線上に並んで現れることから、この線を**火山フロント**と呼ぶ。

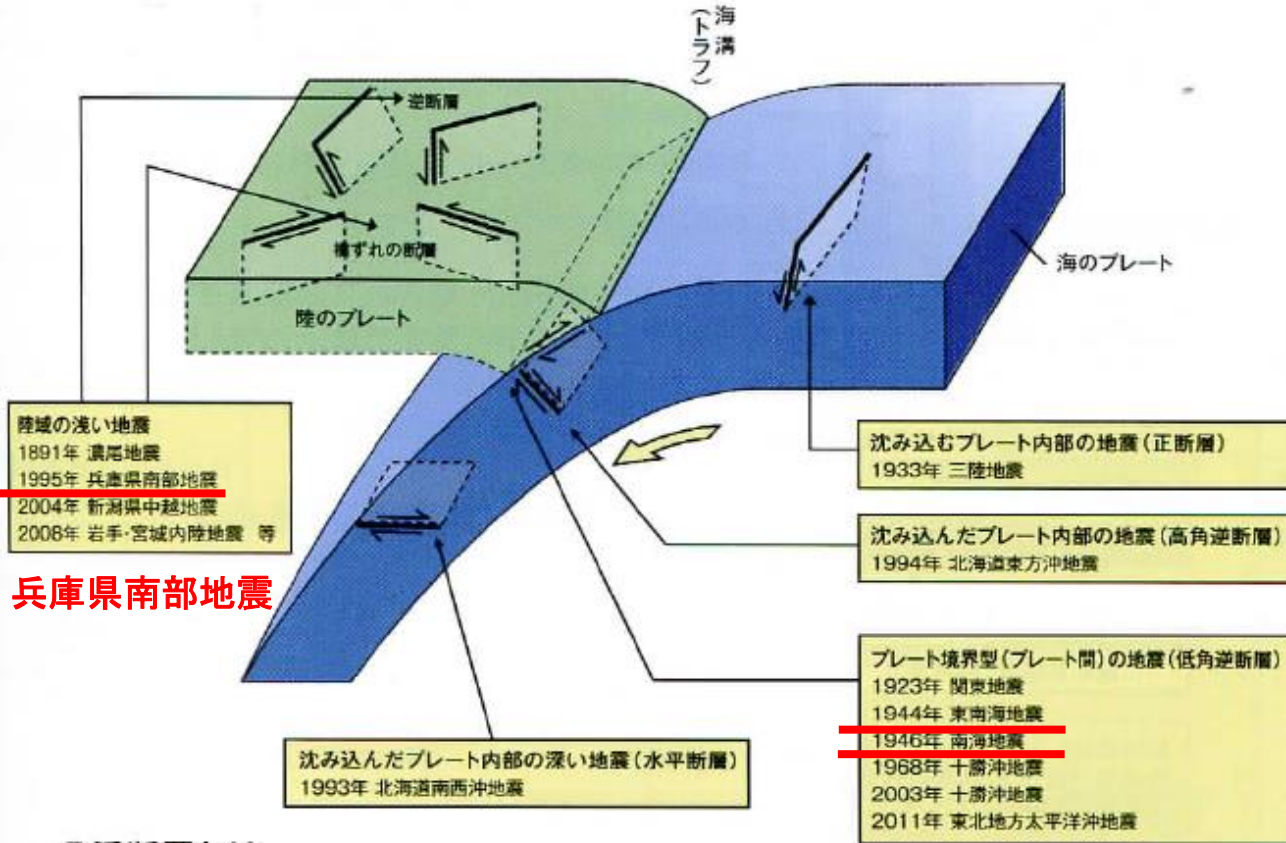
**南海地震／東南海地震はプレート境界型の地震**



# I-4 (1) 地震はなぜ発生するか 地震のメカニズム

## ◎地震のメカニズム

日本列島周辺には4つのプレートが存在しており、そのプレートは長い年月をかけて少しずつ移動し、その際に、プレート境界部やプレートの内部に大きな力が加わり、そこがずれるときに地震が発生するといわれている。



## ◎活断層とは

最近の地質時代に繰り返し活動し、将来も活動する可能性のある断層のこと。

**東南海地震／南海地震**

**南海地震、東南海地震はプレート境界型の地震**

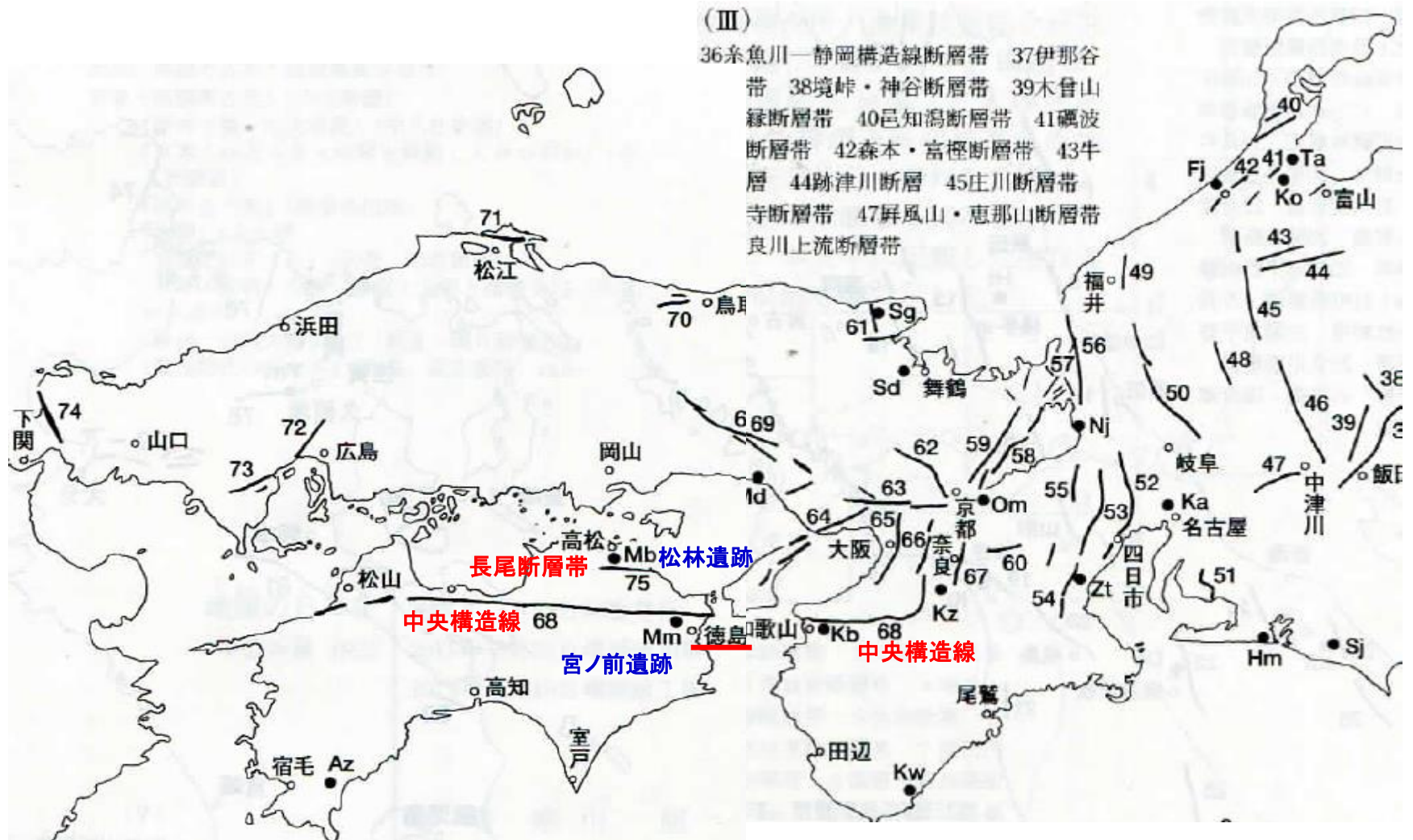
## ◎地震の大きさ

マグニチュード	マグニチュード(地震規模)とは、地震が放出したエネルギーの大きさを示す尺度。
ガル	ガルとは、加速度の単位 (cm/sec <sup>2</sup> ) で地震の揺れの強さを数値として表現したもの。一般にはガル数が大きいほど震度も大きくなる。
震度	震度とは、観測点における地震の揺れの強さを示す尺度で、0~7までの10段階に分かれている。気象庁等は全国の約4,200地点で観測している。

2011年東北地方太平洋沖地震は、マグニチュード9.0、断層の大きさは、長さ約450km、幅約200kmであった。



# I-4 (1) 地震はなぜ発生するか 日本の主な活断層



# I-4 (2) 徳島県の地震・津波の歴史 南海地震を知る

## 東海・東南海・南海地震

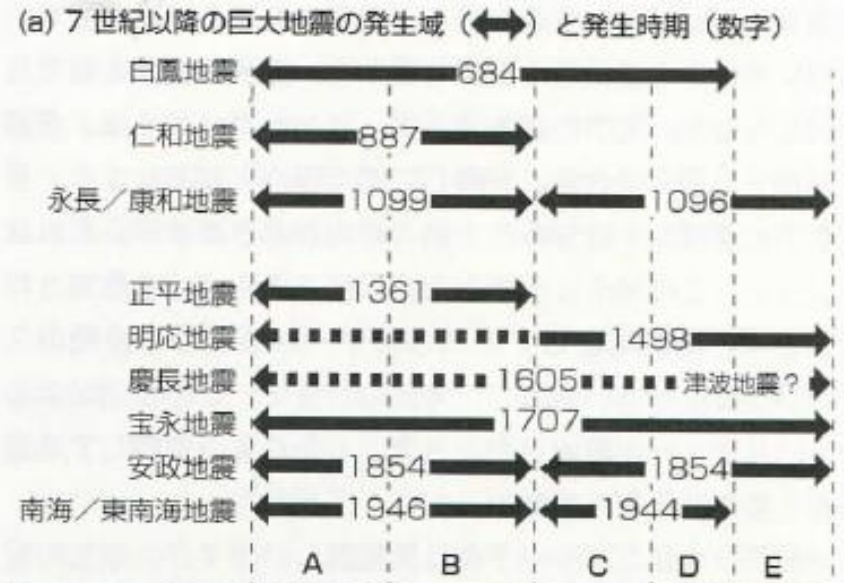


**南海地震**とは、紀伊半島潮岬沖から四国足摺岬沖を震源とする海溝型地震をいう。

海側のフィリピン海プレートが陸側のユーラシアプレートの下に沈み込み、プレートの沈み込みに伴う陸側のプレートの変形が限界に達し、境界面が破壊されるとき巨大地震が発生。

**東海・東南海・南海地震**は、歴史的にみて連動する特徴があり、約100～150年毎にM8クラスの地震が起きている。政府の地震調査研究推進本部によれば、発生確率は今後30年以内に50%、50年以内に80～90%。

## 過去の東海・東南海・南海地震





# I -4 (2) 徳島県の地震・津波の歴史 徳島県の津波碑

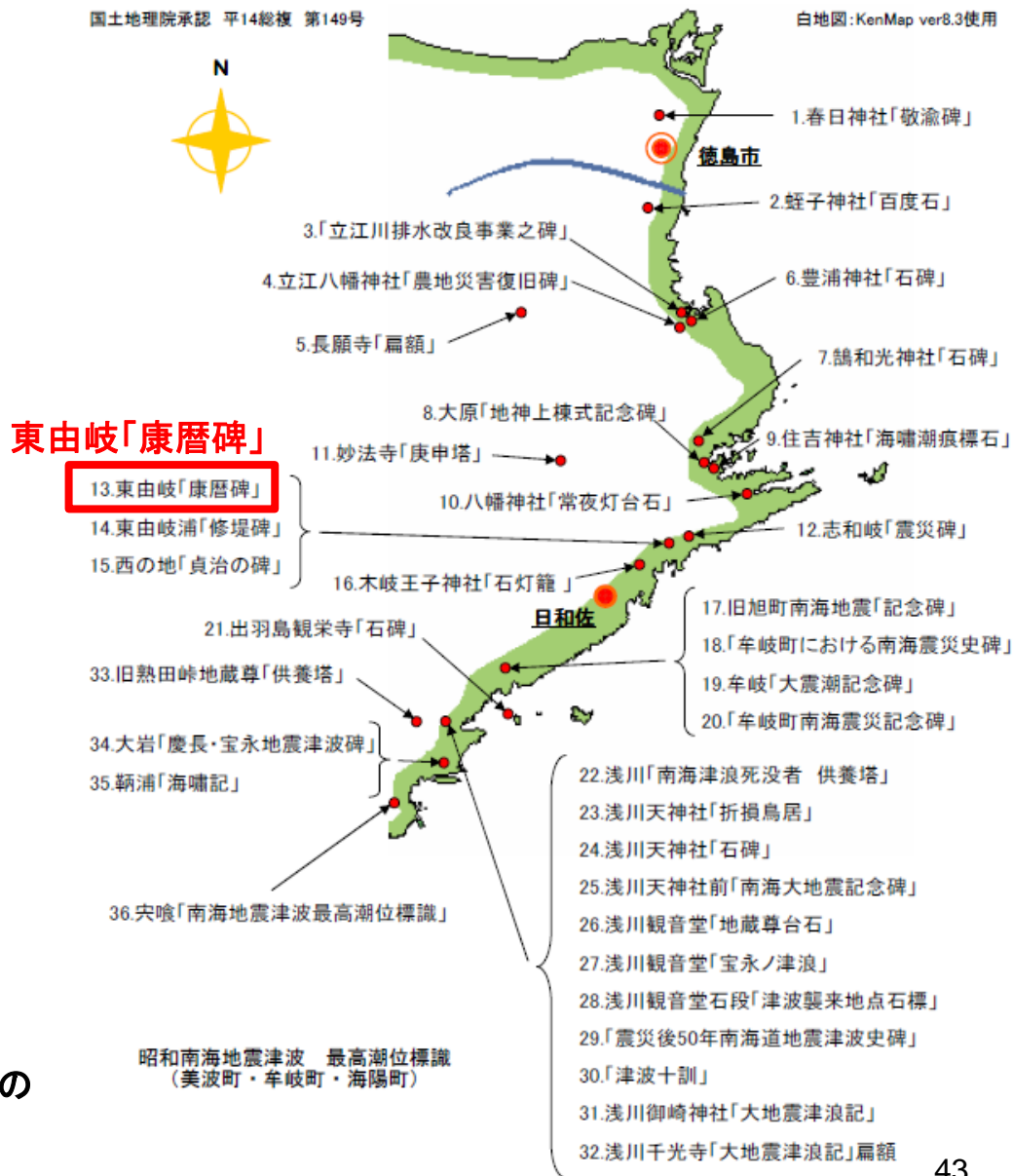
東由岐「康暦碑」  
こうりやくひ  
 (1361年正平南海地震) 日本最古の津波碑

建立 康暦2年(1380)11月



日本最古の津波碑: 1364年正平南海地震津波の  
 供養碑「康暦碑」徳島県海部郡美波町東由岐

出典: 南海地震を知る徳島県の地震・津波碑, 徳島県



## Ⅱ. エネルギーの過去・現在・未来

### Ⅱ-1 石炭を利用する以前の地球環境

エネルギーと文明  
森林破壊

### Ⅱ-2 資源の枯渇(エネルギー資源, 地下資源)

資源可採年数  
資源量がGDPと相関

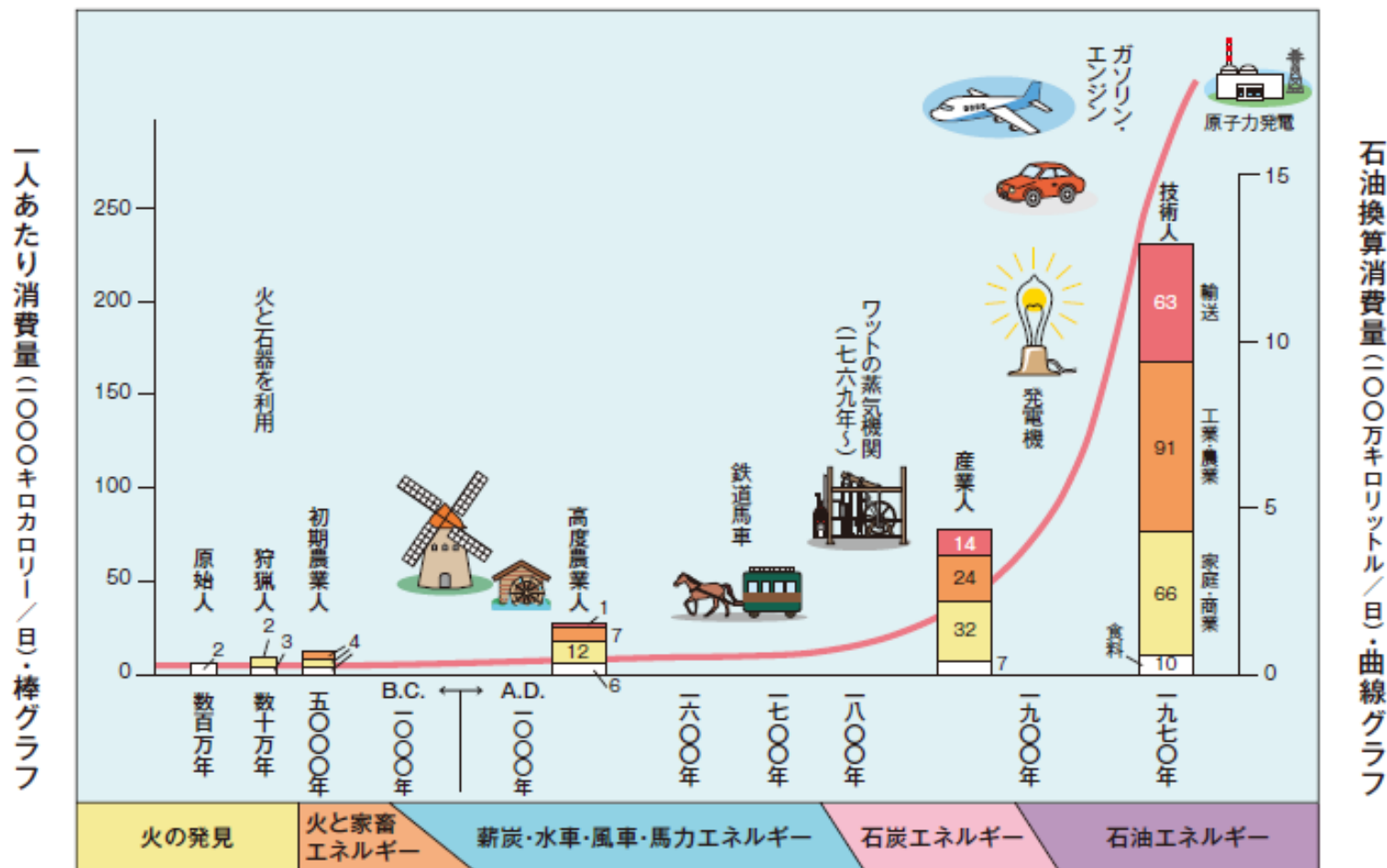
### Ⅱ-3 人間の幸せとは

2100年の世界GDP予測



# II-1 石炭を利用する以前の地球環境 エネルギーと文明

## 人類とエネルギーのかかわり



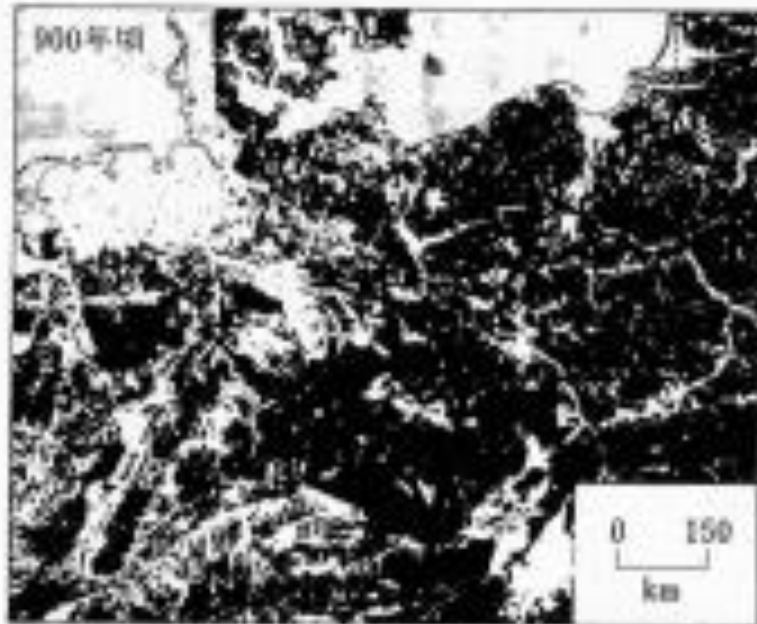
薪炭/水車/風車/馬力・・・全て再生可能エネルギーだった 薪炭は森林乱伐の源  
 エネルギーの歴史 低密度→高密度だった 現在の低密度は太陽光, 風力  
 →薪炭の二の舞いにならないか「過去の歴史教訓」からの検証が必要

# Ⅱ-1 石炭を利用する以前の地球環境 森林破壊

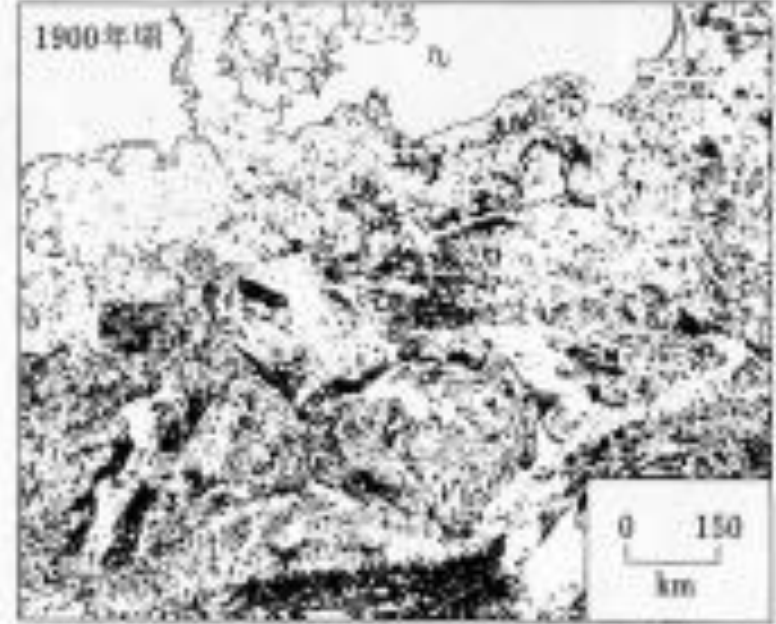
900年頃の欧州

現在の欧州に原生林はない

1900年頃の欧州



900年代のヨーロッパの森 (H.C.ダービーの作図)



1900年代のヨーロッパの森 (H.C.ダービーの作図)

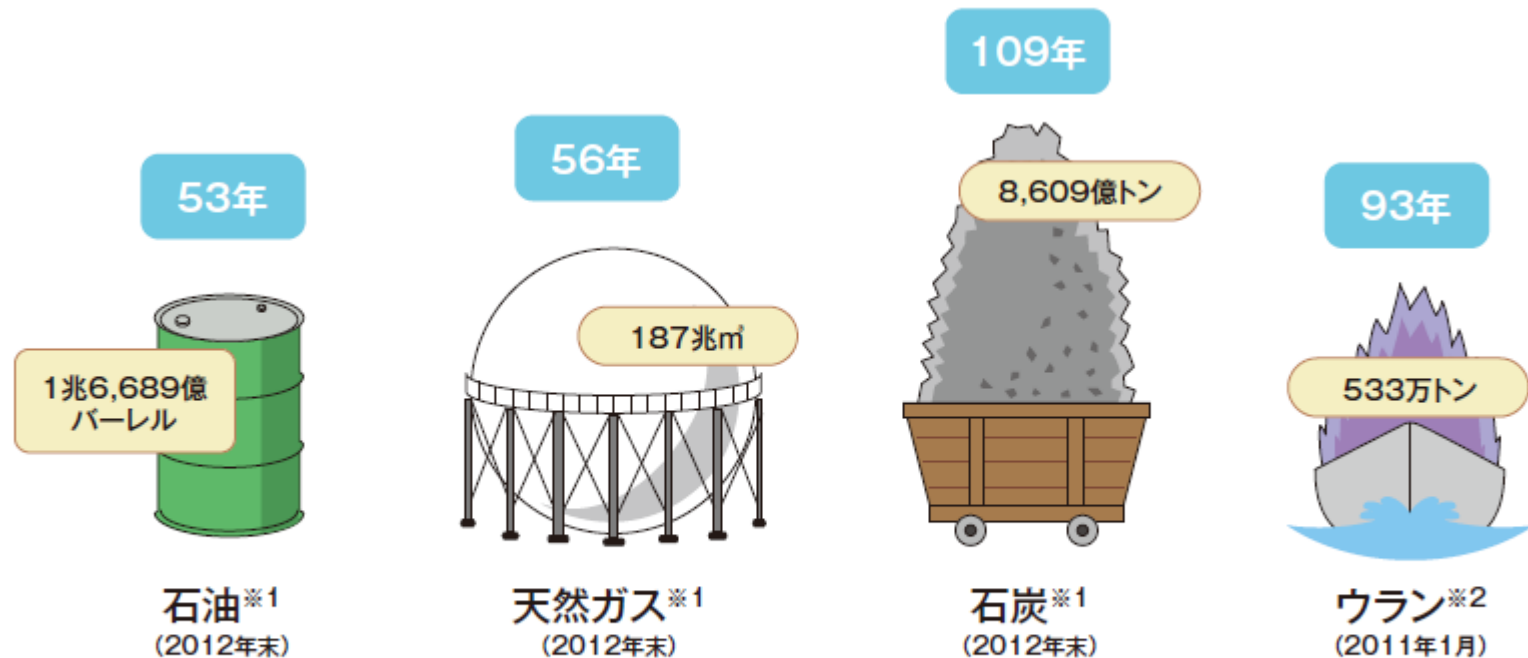
**火／薪炭(※)** 古代文明(エジプト, インダス, 黄河)／ギリシャ・ローマ文明も森林を乱伐・枯渇  
→ 文明崩壊

【日本】 奈良時代: 大仏づくり → 森林枯渇 → 遷都

江戸時代: 幕末の里山は壊滅状態 国土の1/4が荒地 浮世絵の禿山

**馬力(※)** 飼料用農地が森林破壊 馬1頭に土地2ha必要 × 180万頭(仏革命前)  
**石炭** 薪炭価格上昇／森林破壊から救った

## Ⅱ-2 エネルギー資源の枯渇 資源可採年数



出典：原子力エネルギー図面集2013

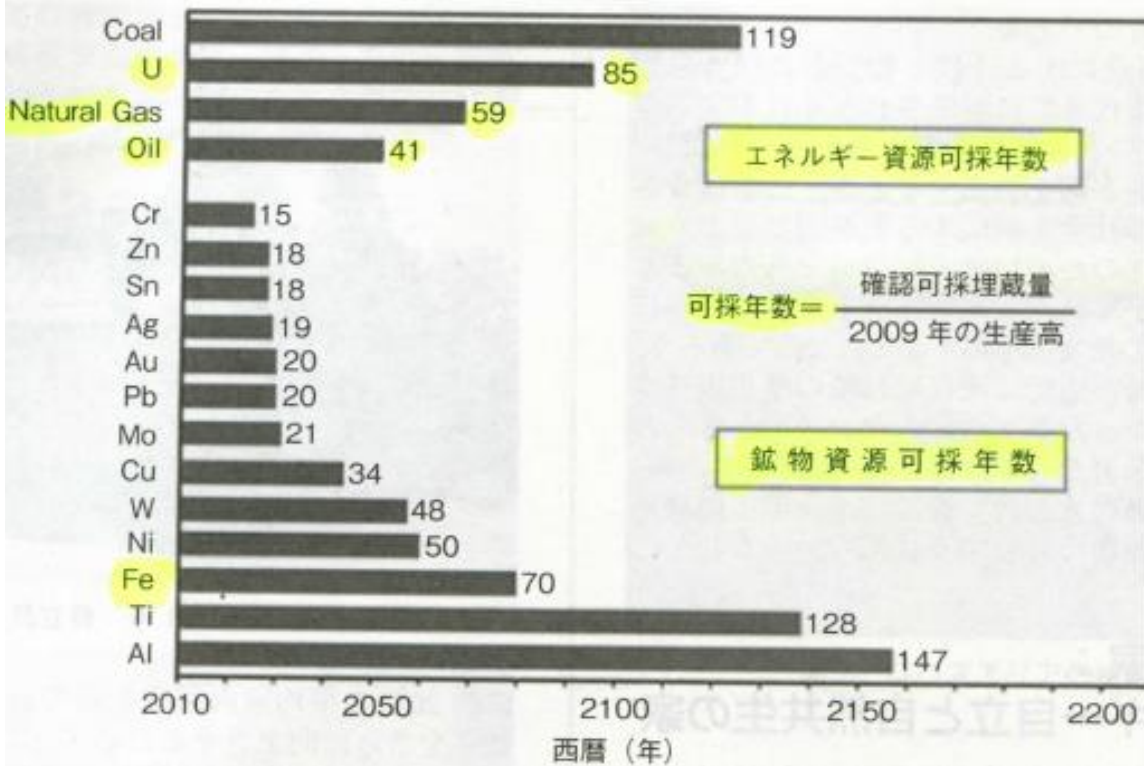
(注) 可採年数=確認可採埋蔵量/年間生産量  
ウランの確認可採埋蔵量は費用130ドル/kgU未満

	確認可採埋蔵量	可採年数
石油	1.7兆バレル	53年
天然ガス	187兆立方メートル	56年
石炭	8,609億トン	109年

(注) 確認可採埋蔵量：存在が確認され、経済的にも生産され得ると推定されるもの。  
可採年数：確認可採埋蔵量とその年の生産量で除したもの。

出典：BP統計を基に作成

# II-2 地下資源の枯渇 資源可採年数

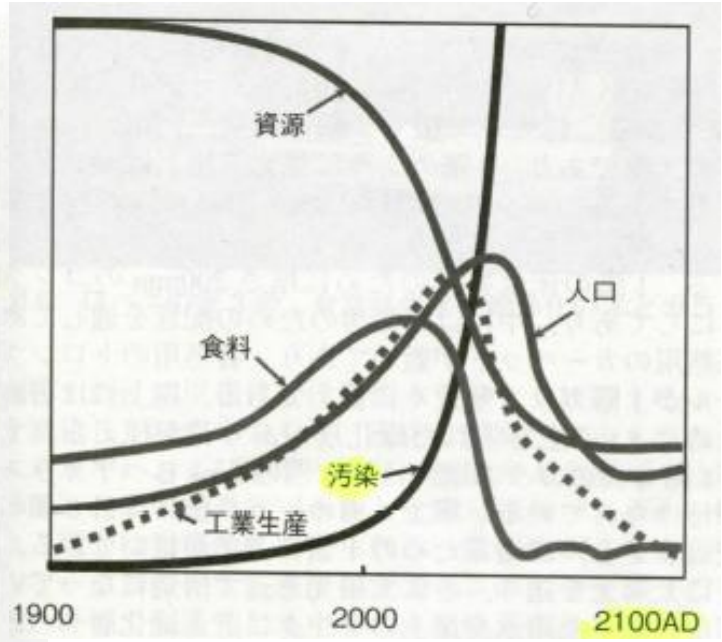


資源可採埋蔵量の可採年数の予測 (環境省の平成 23 年版 環境・循環型社会・生物多様性白書<sup>(1)</sup> および BP Statistical Review of World Energy June 2011<sup>(2)</sup> をもとに作成)

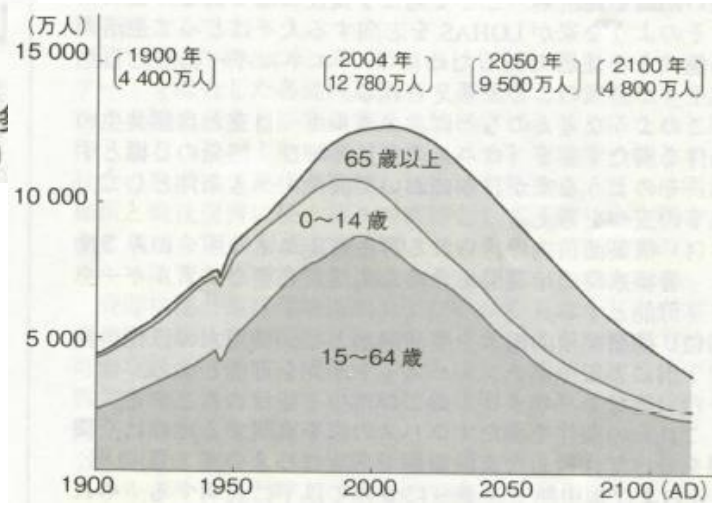
## 資源の可採年数の予測

可採年数 = 可採埋蔵量 / 2009年生産高  
 例. 石油は減らない, 石炭は減少

枯渇はエネルギー資源だけではない



成長の限界 (Meadowsら1972年の予測)



日本の人口 (社会保障・人口問題研究所資料)

出典: 機械学会誌2012年9月号, 加藤

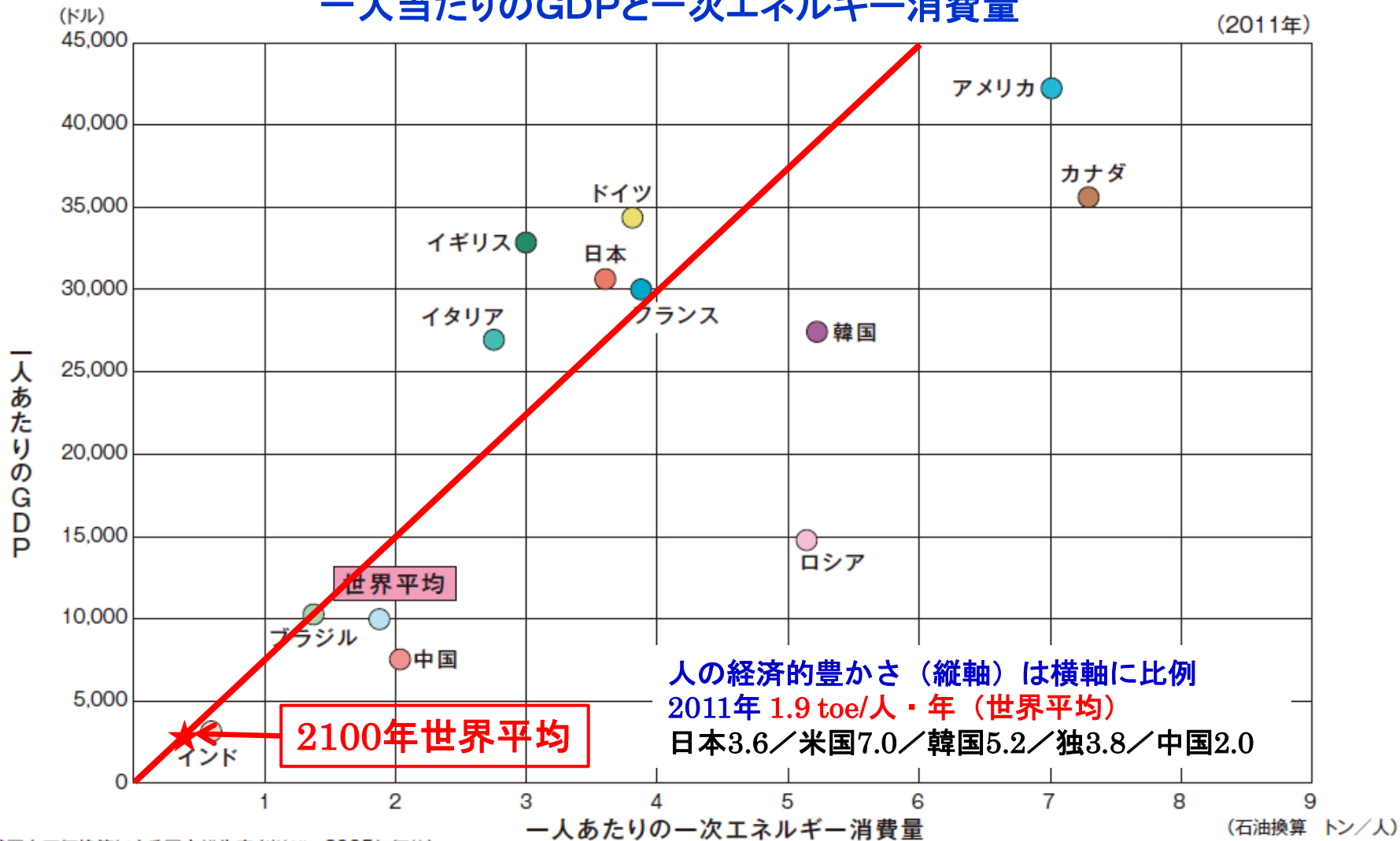


# Ⅱ-3 人間の幸せとは 2100年世界GDP予想

エネルギーの重要性

出典：原子力・エネルギー図面集2014

一人当たりのGDPと一次エネルギー消費量



人間の幸せとは様々だが、一人当たりのGDPとすれば・・・化石燃料が枯渇する時代の国民の生活は

# Ⅲ エネルギーを考えるときに**何が必要か** **考える手法**

## 立場／役割

**科学**: 知る(自然の謎を解明) ← **些細に拘る能力**

**工学**: 実現する ← **些細を切り捨てる能力**

例. 福島事故時の炉心冷却(工学)か再臨界か(科学)

## 陥り易い思考の罠

### 全体最適

「**部分最適**」は「**全体最適**」を**阻害**する

### 全体像を知る

### トレードオフ 相反問題

「あちら立てれば、こちらが立たず」が**自然**  
**プラス面**があれば必ず**マイナス面**がある

### ボトルネック 律速

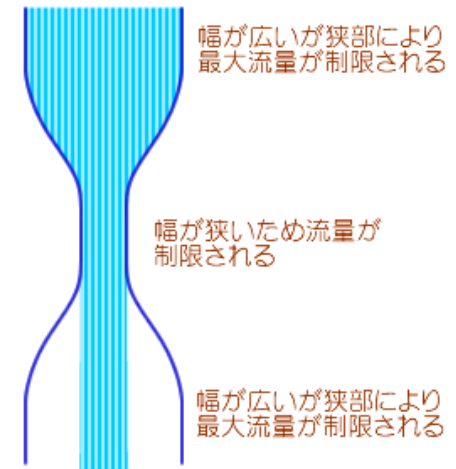


鎖の一番弱い部分によって、鎖全体の破断荷重は決定しているため、ボトルネック以外の部分をいくら強化しても破断荷重は大きくなりません。

**工程なら クリティカルパス**

### 正しい情報

**報道の顧客は大衆 → 大衆迎合**



## IV. まとめ

1. 「変だな」と思うリテラシー（一般教養，理科）を身につけよう。
2. 陥り易い「思考の罠」に注意しよう。  
全体最適／全体像を知る／トレードオフ（相反問題）  
ボトルネック（律速）／正しい情報
3. 物事の本質（源泉）・歴史の教訓を知ろう。  
報道・環境問題の本質／エネルギーの源泉  
宇宙史／地球史／生物史／人類史　／津波史の教訓

# エネルギー・環境問題のリテラシー

ご清聴ありがとうございました



独禁法順守・贈賄防止啓発活動ポスター  
「公正な競争は、企業の長期的な成長につながる」