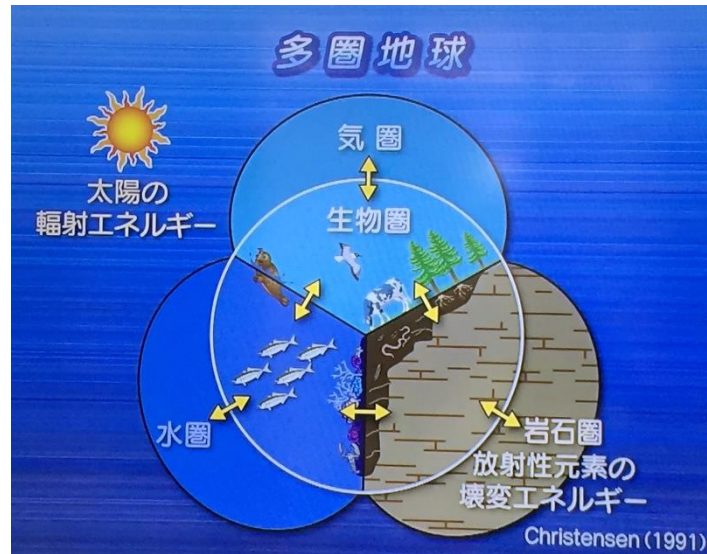


エネルギーのこと、理科で考えてみませんか？



平成29年12月9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, PMP

講演の論点

◆人間の幸せ ◆自然に**学び**、自然を**真似る**

I. エネルギー問題の**原点** *原点=思考停止の源*

- (1) エネルギーと**人間の幸せ**はどう関係するのか
- (2) エネルギーの**源**は何か
- (3) **火山・地震**はどこでも生まれるのか
- (4) 石炭を利用する**以前はどんな環境**だったのか

II. **エネルギー選択に影響する環境問題の原点**

- (1) 地球大気中の**CO₂濃度**はなぜ変化したのか／石炭火力の**CO₂**はどこから来たのか／最終的に地球環境は、どうなるのか
- (2) **誰のため**の環境問題なのか

III. **エネルギー選択に影響する経済性の原点**

IV. エネルギー問題で**何が**必要か

V. まとめ

I. エネルギー問題の原点

原点=思考停止の源

(1) エネルギーと人間の幸せの関係

資源(エネルギー, 地下)の枯渇/資源可採年数

資源量がGDP(幸せ?)と相関/西暦2100年の世界GDP予測

(2) エネルギーの源は何か

太陽光発電の正体は何か

地熱の熱源は何か

(3) 火山・地震はどこでも生まれるのか

放射性廃棄物の地層処分は日本ではできないのか

火山が生まれるしくみ/火山フロント

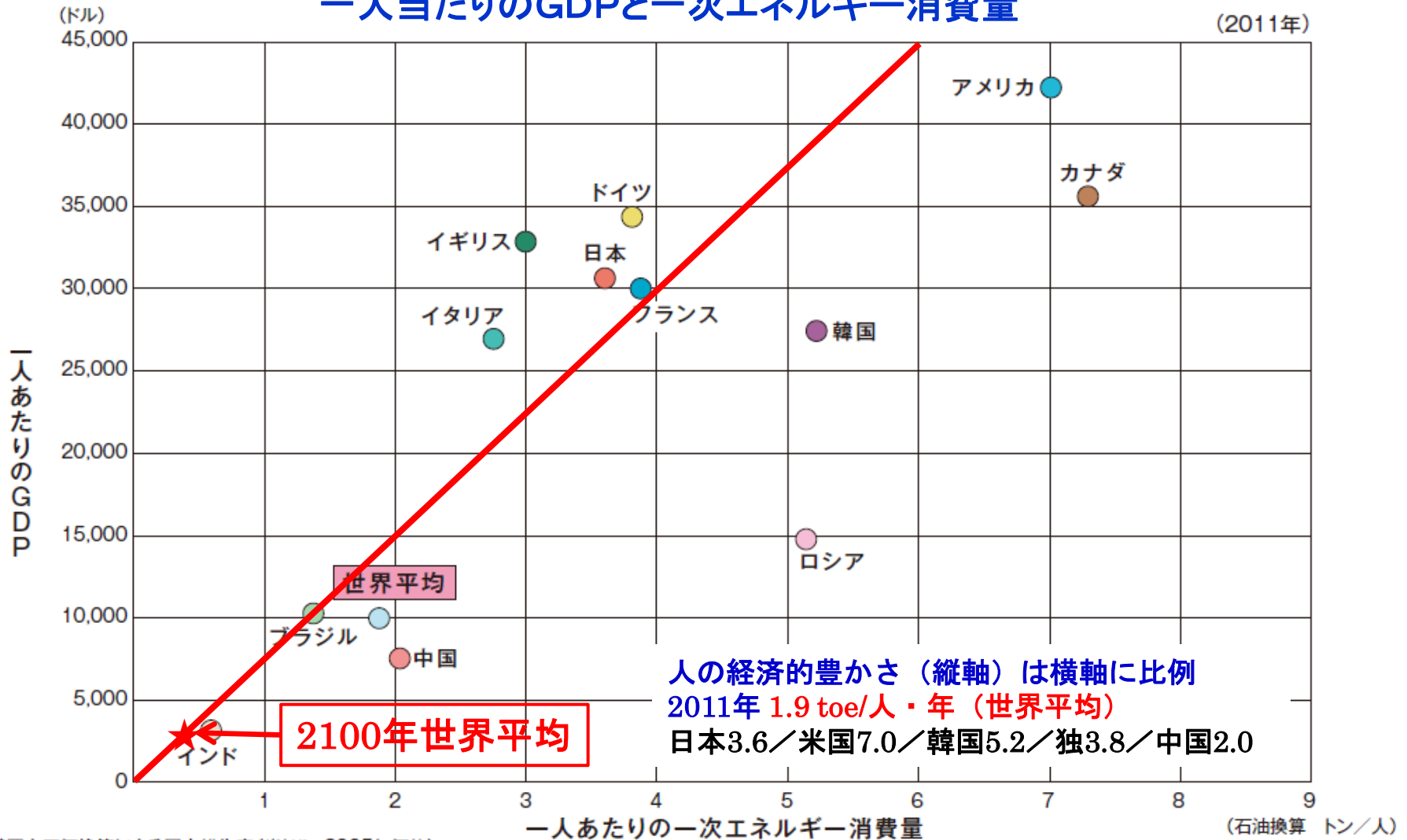
放射性物質はどこにでもある(タバコ, 人体など)

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

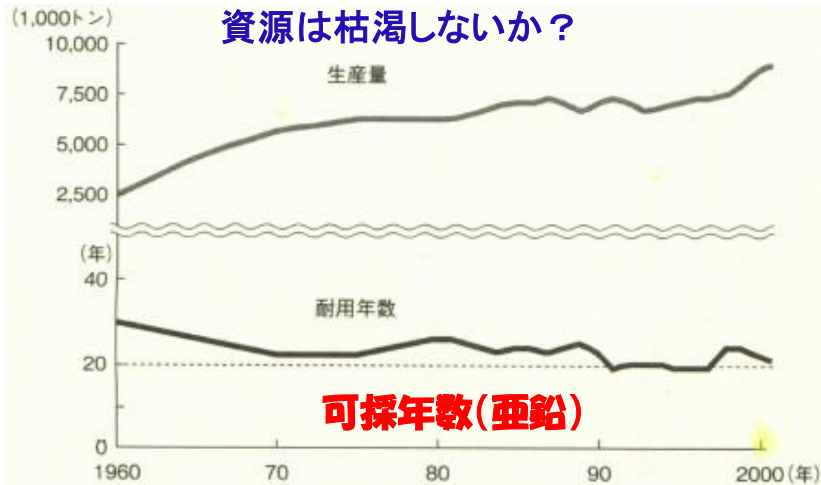
一人当たりのGDPと一次エネルギー消費量



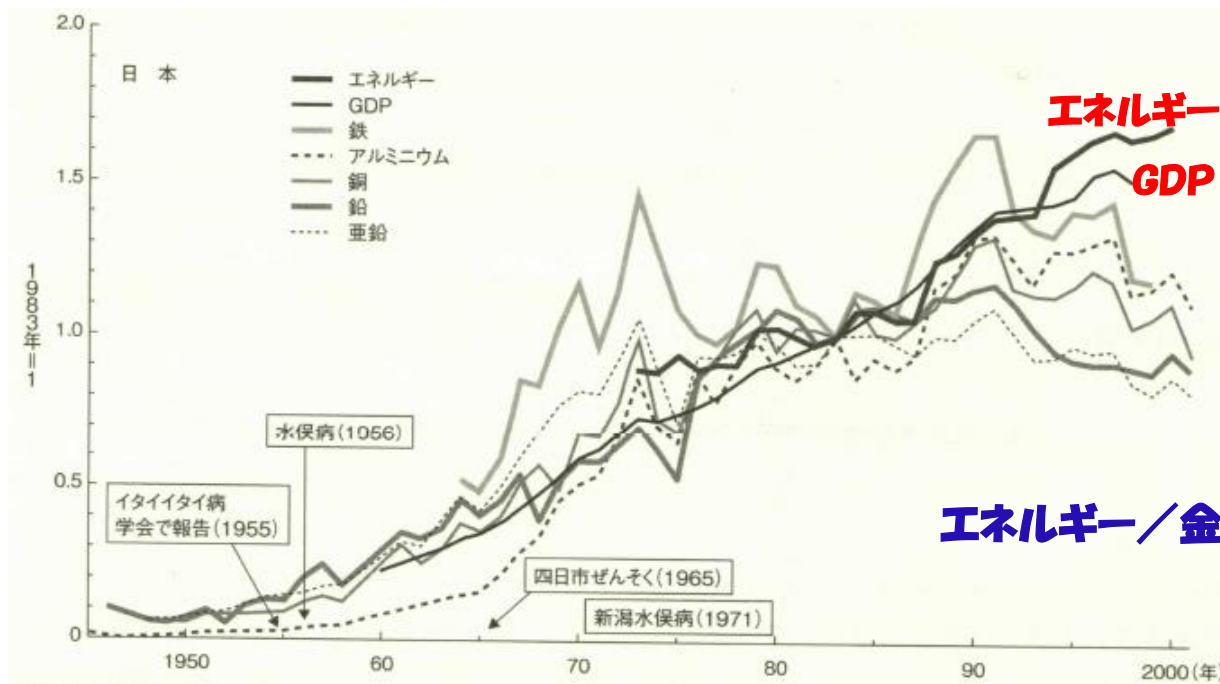
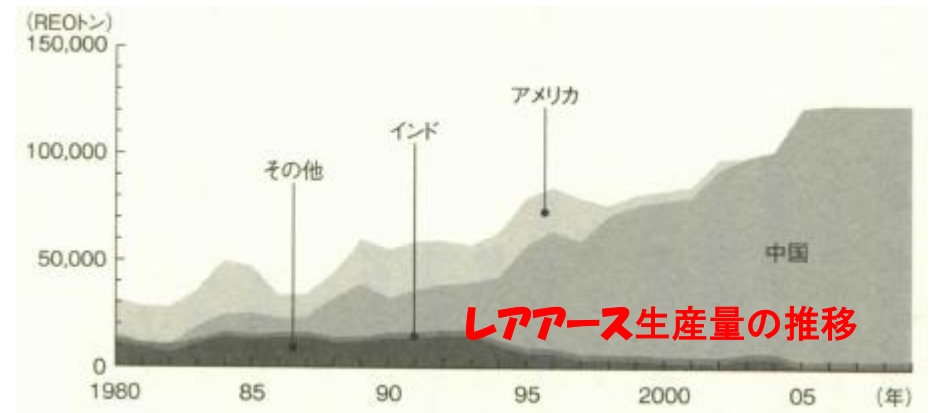
人間の幸せとは色々だが、一人当たりのGDPとすれば・・・化石燃料が枯渇する時代の国民の生活は

地下資源の枯渇

資源量がGDPと相関



資源はナショナリズム 中国はいかにして独占となったか

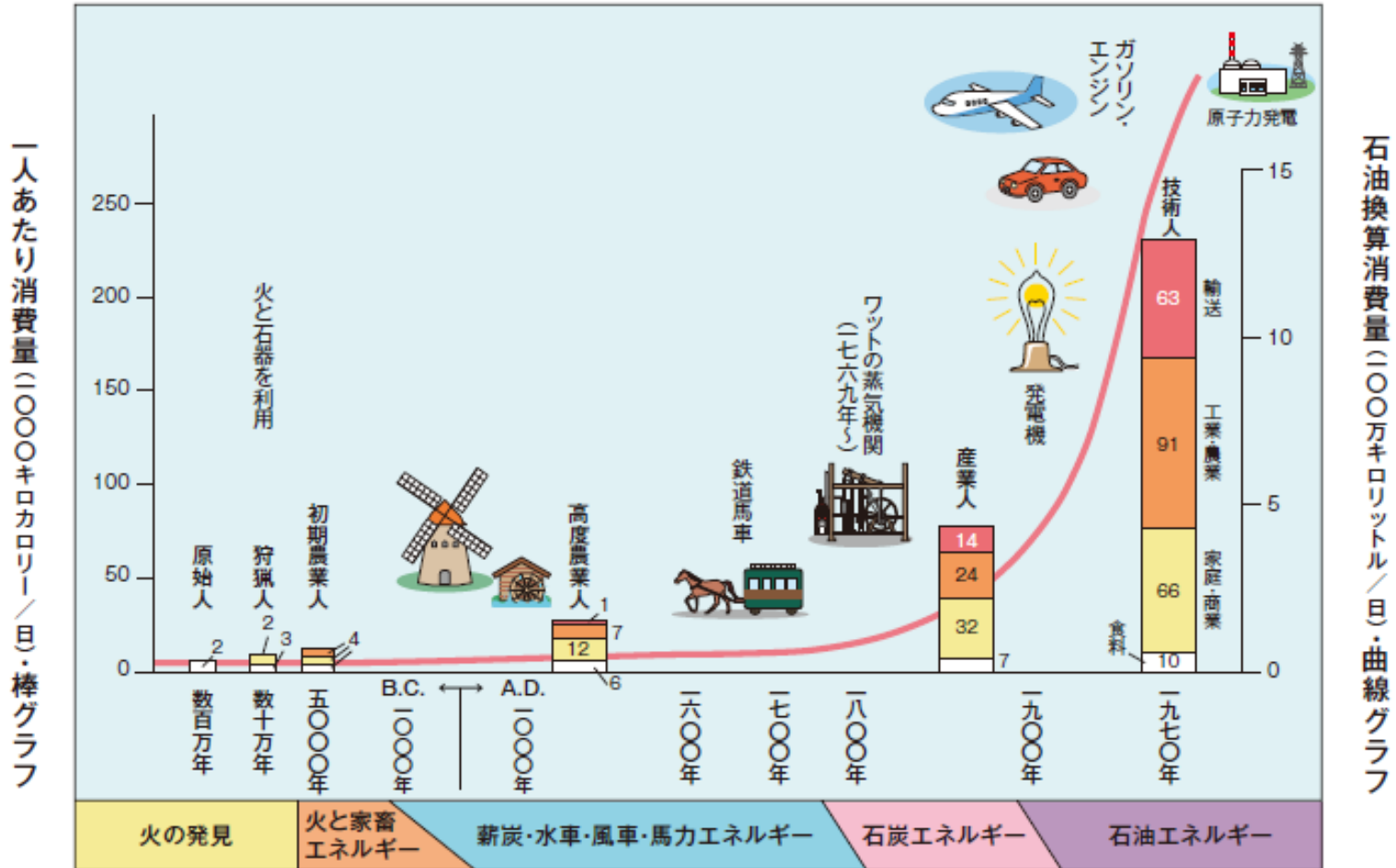


主要金属消費量とエネルギー消費量、GDPの成長 (日本、1983年=1)

出典: ベースメタル枯渇、西山

エネルギーと文明

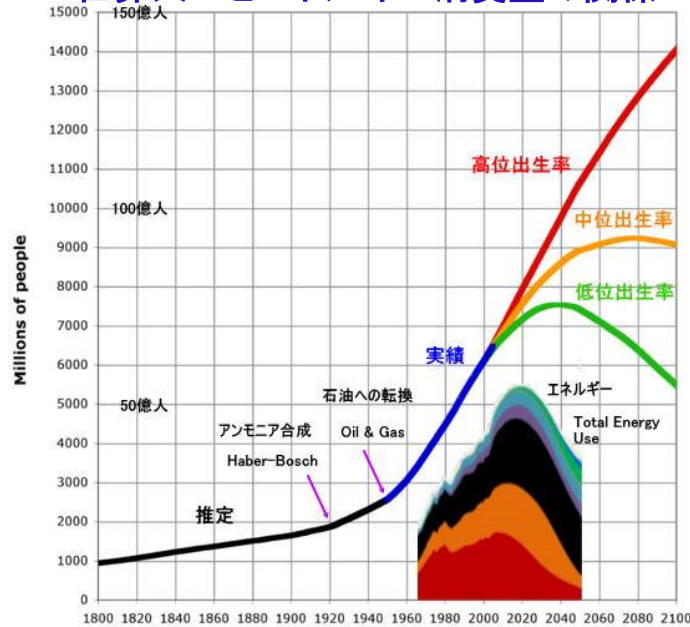
エネルギーの高密度化が人口増をもたらした



薪炭/水車/風車/馬力は再エネ 薪炭は森林乱伐の源で、乱伐を石炭が救った
 エネルギーの歴史は低密度から高密度へ 高密度化が人口増の源

2100年代の世界予測 エネルギー消費量

世界人口とエネルギー消費量の関係



人口増加は化石燃料に依存した一過性のもの
2030年代は化石燃料の貢献が残り、真の問題が顕在化していない

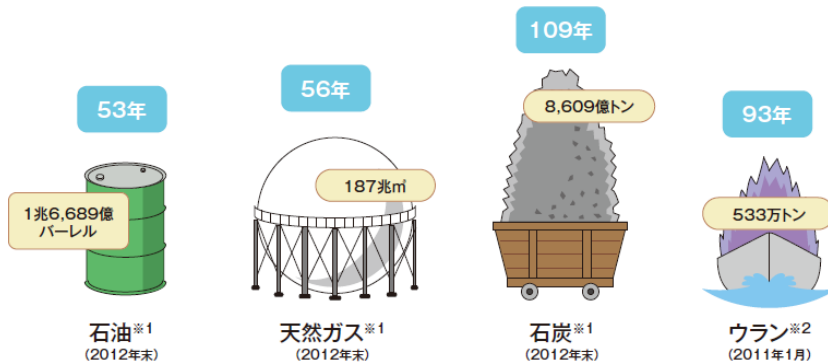
一人あたりエネルギー消費量(世界平均)は
 2020年をピークに年平均1%で下降

2009年 1.8 toe/人・年
 2050年 0.9 toe/人・年

化石燃料 2050年 全体の61% → 2110年 0%
 世界人口 2050年以降横ばい(仮定)

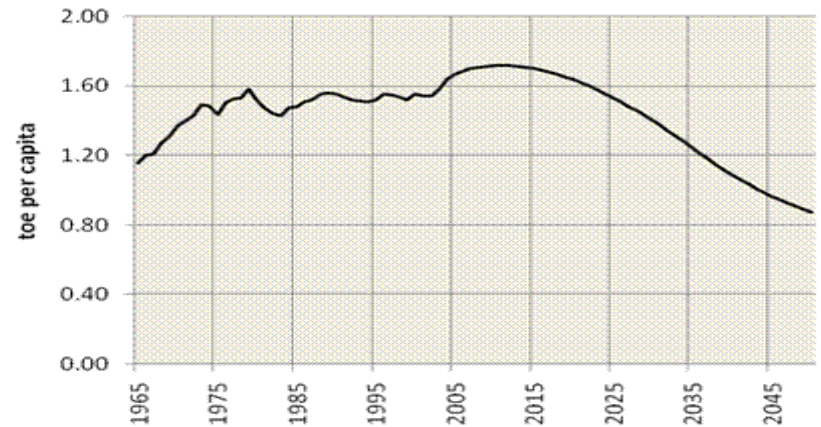
2100年 約0.35 toe/人・年 (0.9 × 0.39)
 ※2009年 インド(0.6 toe/人・年)の6割

↑今日の繁栄は化石燃料によってもたらされた証拠



石炭 2000→2009年 可採年数 227→122年

世界の一人あたりエネルギー消費量の実績と予測



出典: Paul Chefurka "World Energy to 2050" / 小美野晃HP

高速増殖炉(FBR)と軽水炉の違い

FBRがウラン燃料の可採年数を飛躍的に伸ばす

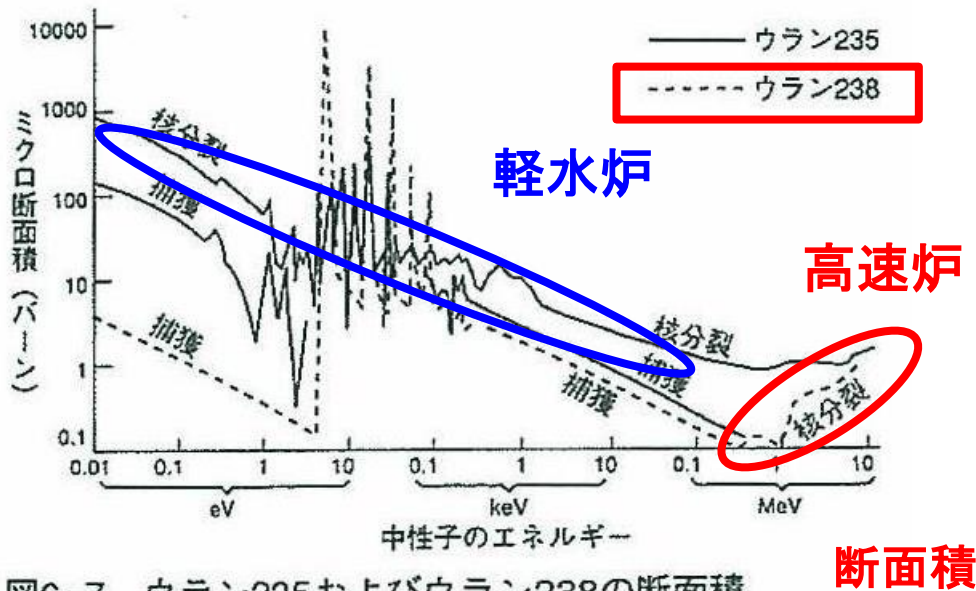


図6-7 ウラン235およびウラン238の断面積

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

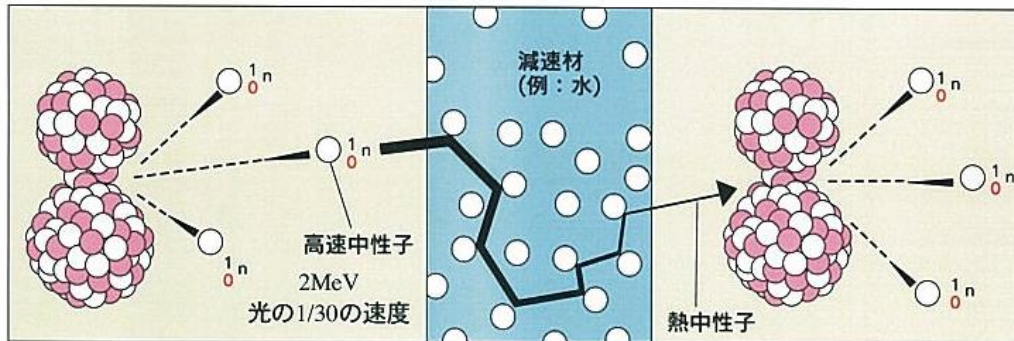
高速炉の方が中性子を
有効利用

廃棄物核変換に利用可

半減期を短くする

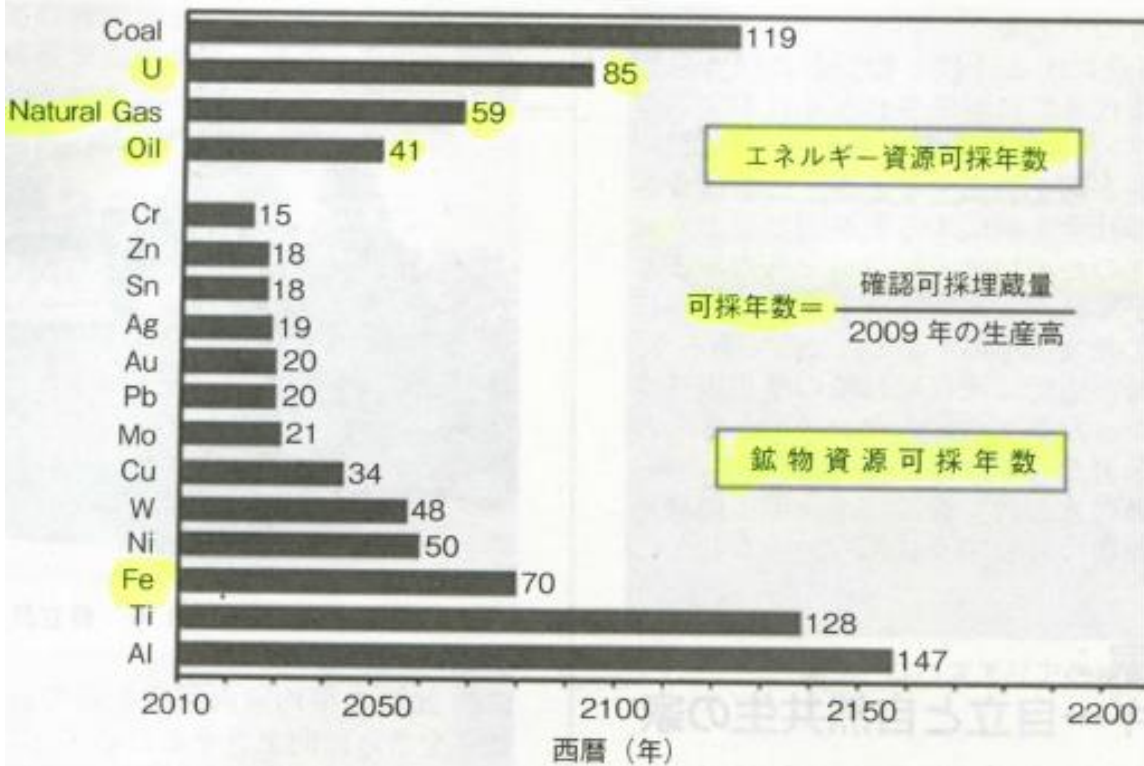
高速中性子

熱中性子



0.03eV 秒速1.5km
ライフルの弾程度

地下資源の枯渇 資源可採年数

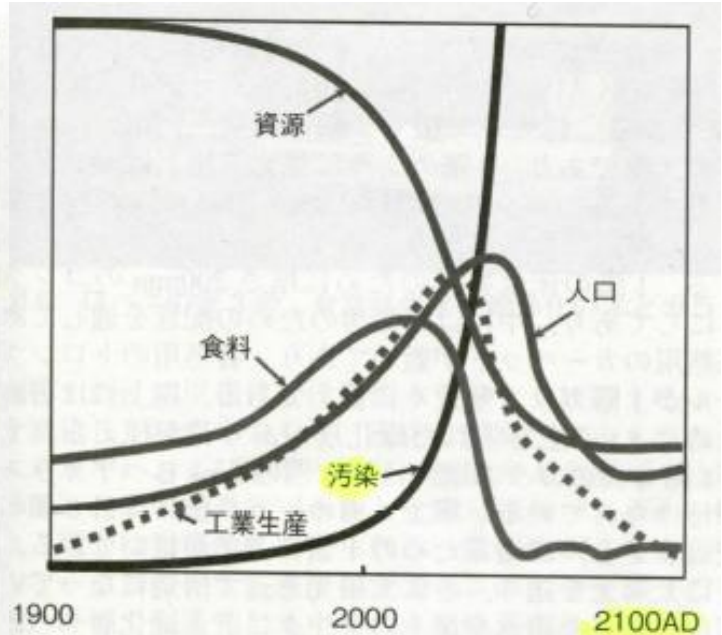


資源可採埋蔵量の可採年数の予測 (環境省の平成 23 年版 環境・循環型社会・生物多様性白書⁽¹⁾ および BP Statistical Review of World Energy June 2011⁽²⁾ をもとに作成)

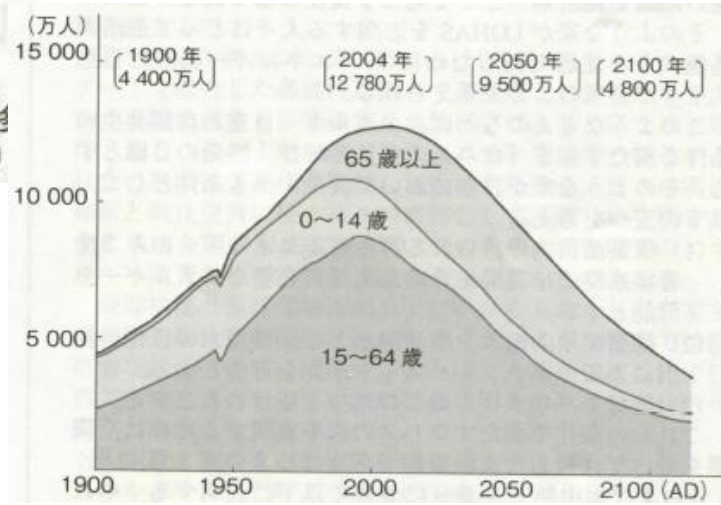
資源の可採年数の予測

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)



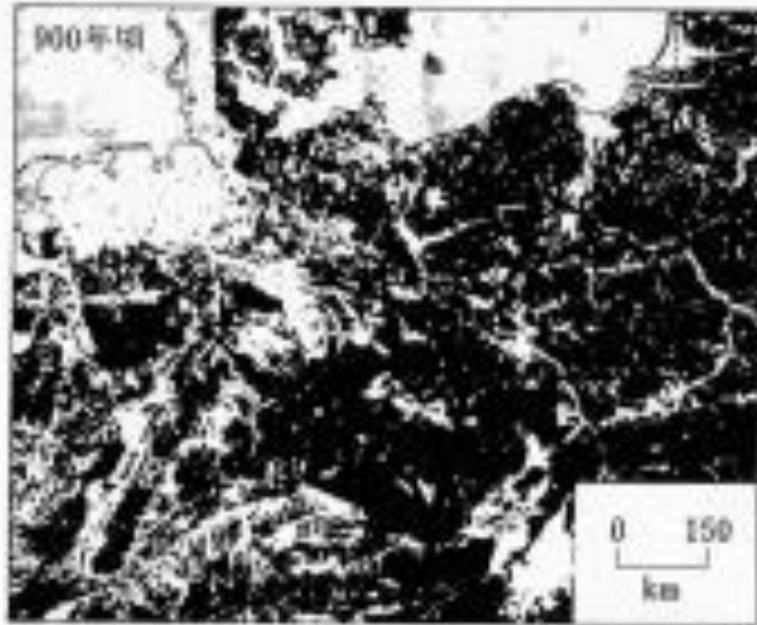
日本の人口 (社会保障・人口問題研究所資料)

石炭(薪炭より高密度)が森林破壊から救った(欧州)

現在の欧州に原生林はない

900年頃の欧州

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

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

石炭(薪炭より高密度)が森林破壊から救った(欧州)

江戸時代より現代日本の方が森林が多い？



森林面積

1891(明治24)年	1700万ha
現在	2500万ha



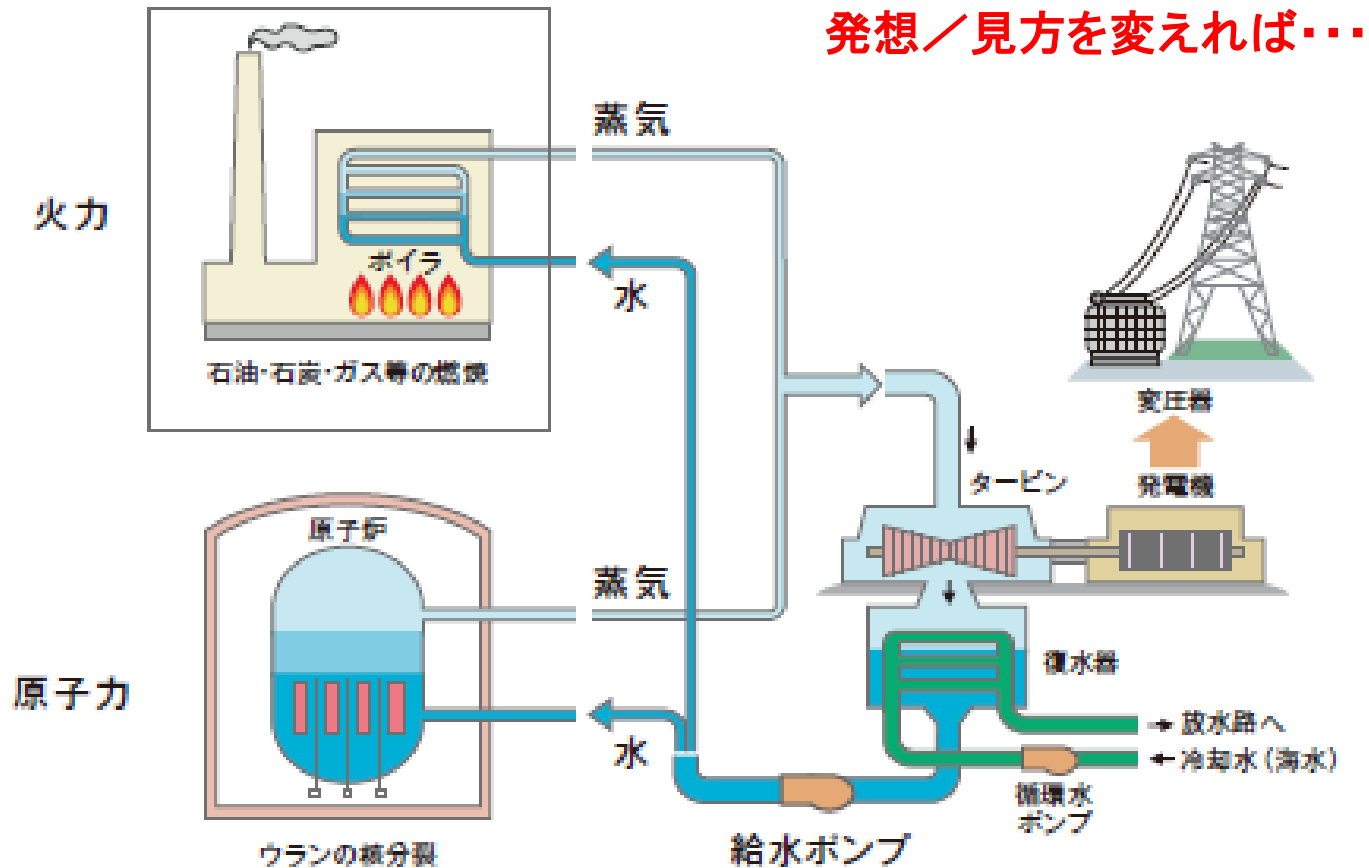
火／薪炭(※)

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

出典:エネルギー環境歴, 田中紀夫/木材・石炭・シェールガス, 石井彰

太陽光発電の正体は原子力発電？



太陽光パネル＝エネルギー変換装置 ⇒ 火力の「蒸気タービン」と同じ

太陽光＝エネルギー伝達手段 ⇒ 火力の「配管中の蒸気」と同じ

エネルギー発生源＝太陽＝核融合炉(原子力) ⇒ 太陽光発電の正体は原子力発電

エネルギーの源泉 資源の源泉と由来

宇宙エネルギーは質量に貯蔵 → エネルギーの源は質量変換(原子力)
 現在の幸せは過去の太陽蓄積資源(化石燃料)の利用による一過性のもの

エネルギー資源の源泉と由来

源泉	1次エネルギー源	エネルギー発生原理	資源	エネルギー資源の蓄積時点と由来			発電活用方法(形態)
				過去		現在(近将来を含む)	
				創生時	小過去		
地球以外の保有資源	太陽光	核融合	石炭		○(億年単位で蓄積)	(百年単位で消費)	火力発電(化学熱)
			石油		○(億年単位で蓄積)	(百年単位で消費)	火力発電(化学熱)
			天然ガス		○(億年単位で蓄積)	(百年単位で消費)	火力発電(化学熱)
			水			○	水力発電(位置)
			風			○(低密度)	風力発電(速度)
			太陽光			○(低密度)	太陽光発電(光電) 太陽熱発電(熱)
地球保有資源	原始放射性物質	核分裂	ウラン	○		(百年単位で消費)	軽水炉発電(質量熱/核分裂)
			Pu(ウラン)	△(ウラン)		○Pu(千年単位で消費)	高速炉発電(質量熱/核分裂)
		放射性崩壊	ウラン238など	○			地熱発電(崩壊熱)
	資源物質	核融合	水素	○			核融合炉発電(質量熱)
		化学反応	水素	○		(低密度)	燃料電池(化学電)

化学熱: 化学反応時の発熱 位置: 位置エネルギー 質量熱: 質量エネルギー変換時の発熱

○: 主 △: 従

 太陽光発電の正体は原子力発電

宇宙のエネルギーはダークが支配的

暗黒物質(DM)とは

宇宙が何でできているかを調べてみると、既知の陽子や中性子など目に見える(観測されている)物質は全体の約4%にすぎませんでした。そして、その5~6倍は未知の物質(ダークマター)が占めていることが明らかになってきました。残りはダークエネルギーと呼ばれている正体不明のものです(図1)。ダークマターは、1933年に銀河団の観測結果(図2)により、初めてその存在を示唆されました。ダークマターは肉眼では見えず、電磁波での観測でも見ることができないため、“ダーク(暗黒)”という呼び名がついていますが、私たちの周りにもあると思われています。

しかし、未だに私たちはダークマターの正体を知りません。これまでの観測事実からその性質が推測されています。(1)電荷を持たず、(2)宇宙をゆっくり動きまわり、(3)安定的で、(4)しかし、原子分子を作っている素粒子ではありません。これらの性質は、現在我々が知っている素粒子では説明できず、新しい理論に基づく未発見の素粒子が必要となります。その候補の一つにニュートラリーノと呼ばれる素粒子があります。このように、暗黒物質の研究は素粒子理論の新しい展開の一つとなるため、天文学、宇宙物理学の分野にとどまらず、素粒子物理学にとっても非常に重要なテーマとなっています。

銀河の回転速度が内側も外縁部もほぼ同じ(図2)

→ 重力を及ぼす暗黒物質が満ちている

通常物質は宇宙のエネルギーの4~5%に過ぎない

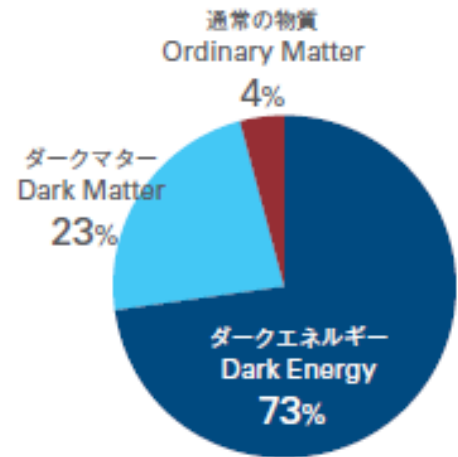


図1 宇宙の組成。観測できている物質は宇宙全体の約4%にしかすぎない。

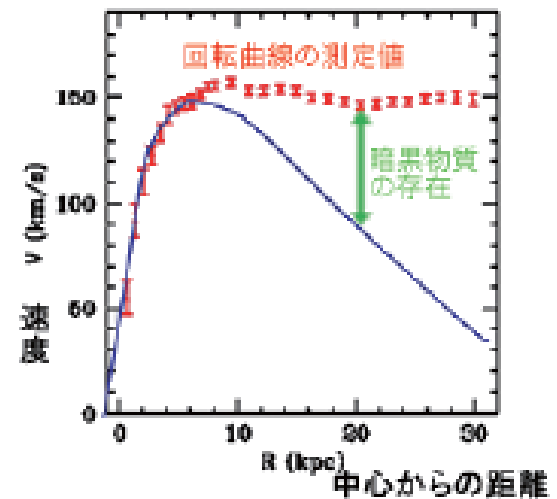


図2 銀河の回転速度を測定すると、目に見える物質から期待される速度分布と合わない。そこで、光では観測できない暗黒物質の存在が示された。

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

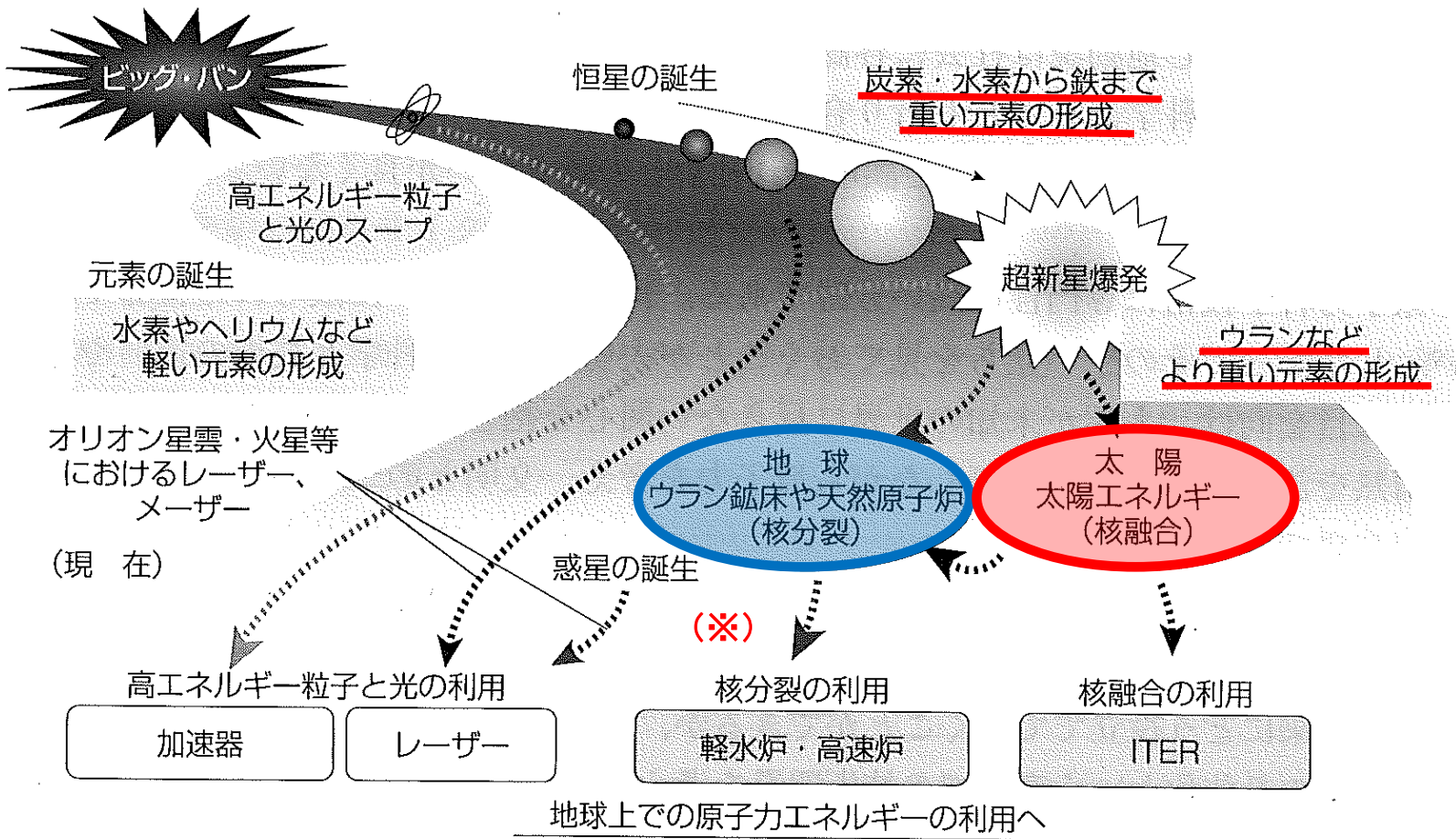
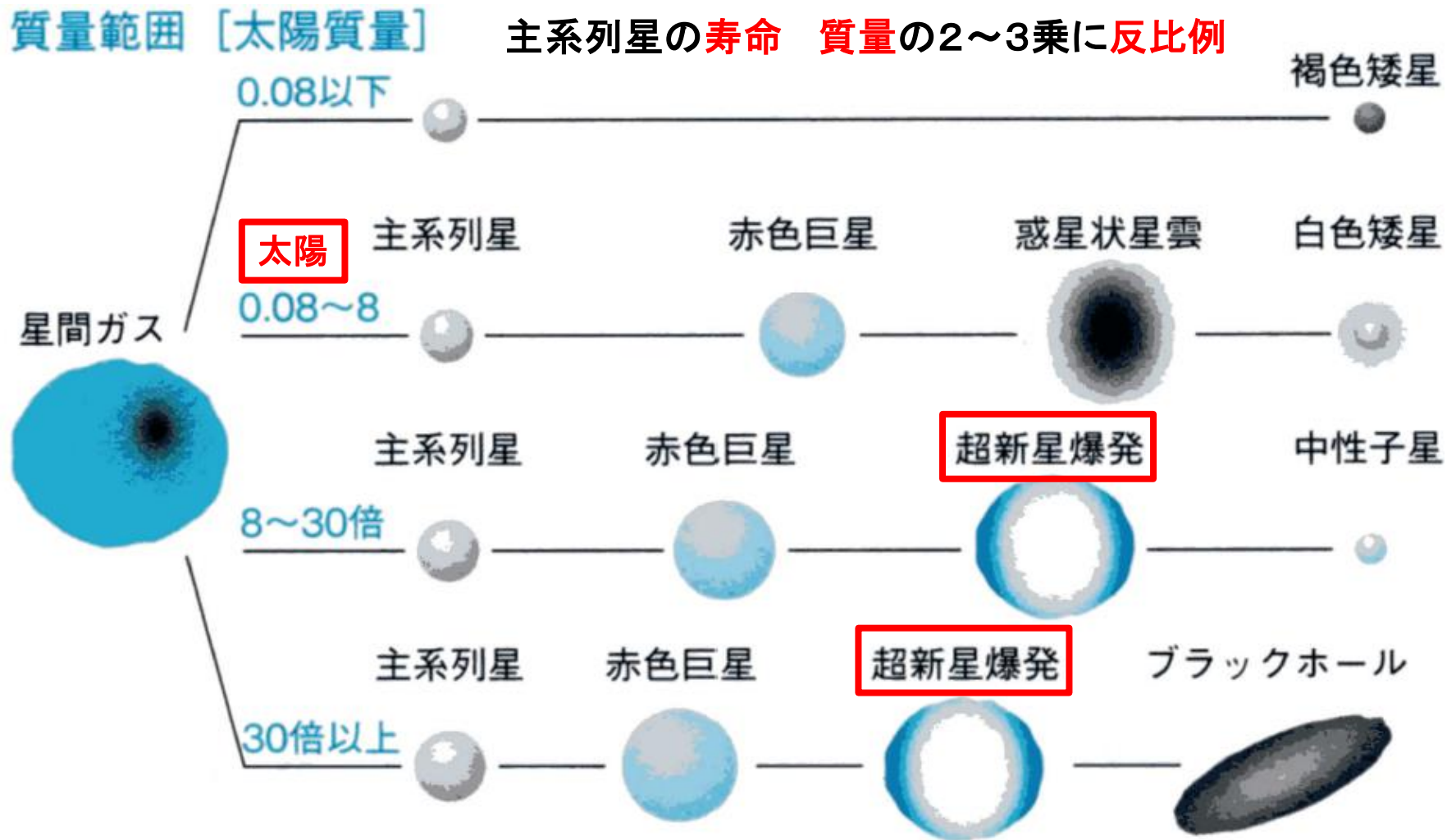


図1 宇宙誕生と原子力 -自然に学び、自然を真似るのが、科学の原点-

(※) ウラン等の崩壊熱(地熱の源) → 地熱発電

II-1 最終的に地球環境はどうなるのか 遠い将来の太陽

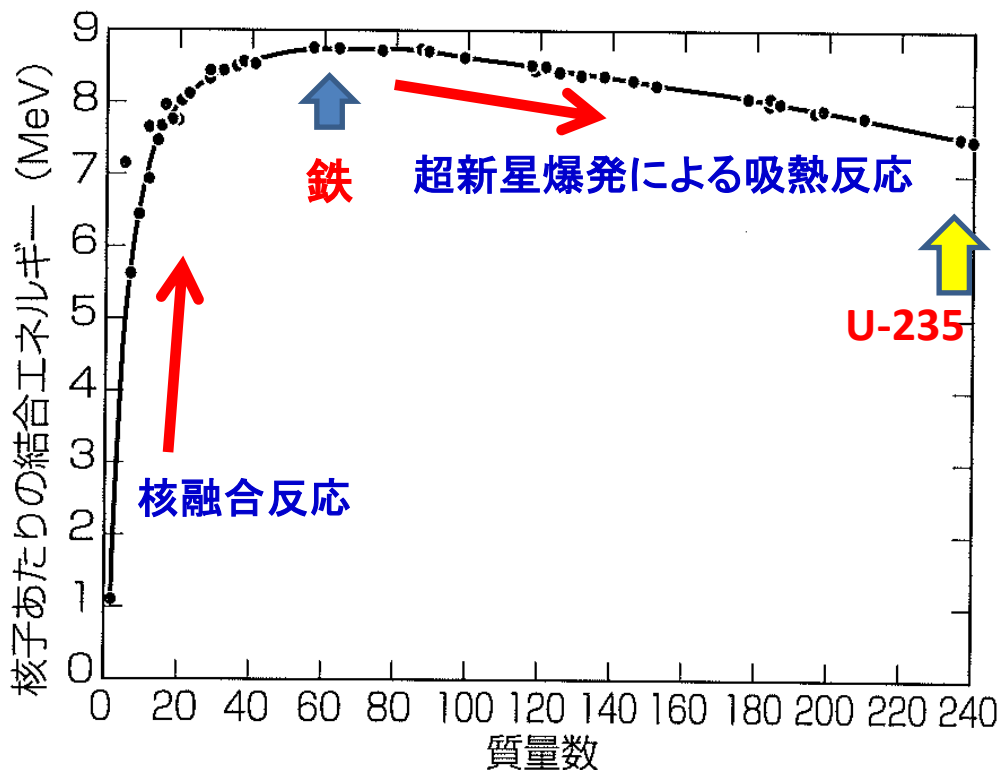


太陽 誕生後明るさを増す → 赤色巨星 → 脈動変光星 (膨張と収縮を繰り返す → 外層からガス放出) → 白色矮星 (核融合でできたヘリウム, 炭素, 酸素) 冷却 / 暗くなる **寿命 約100億年**

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))

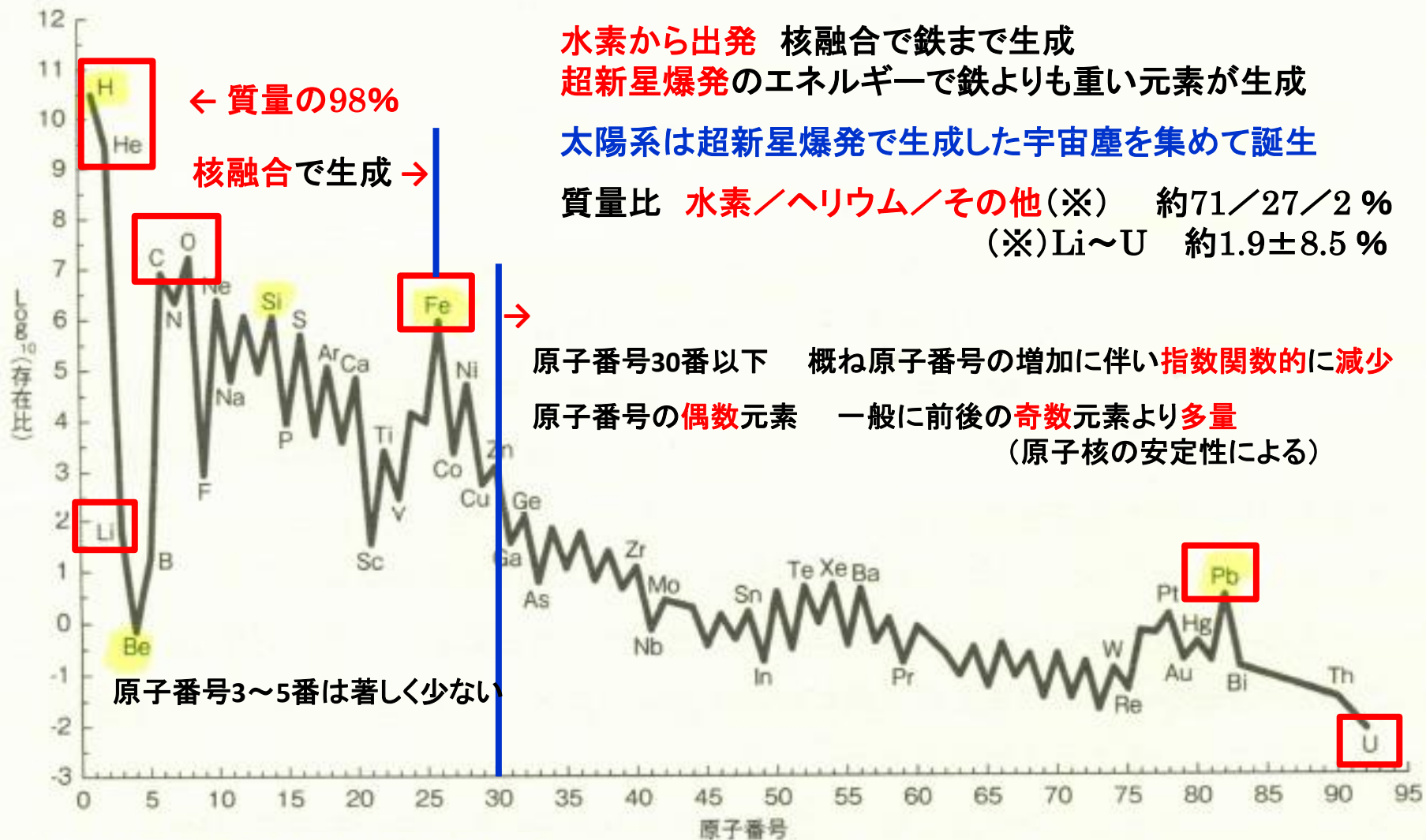
太陽系の物質 水素とヘリウムが主成分

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

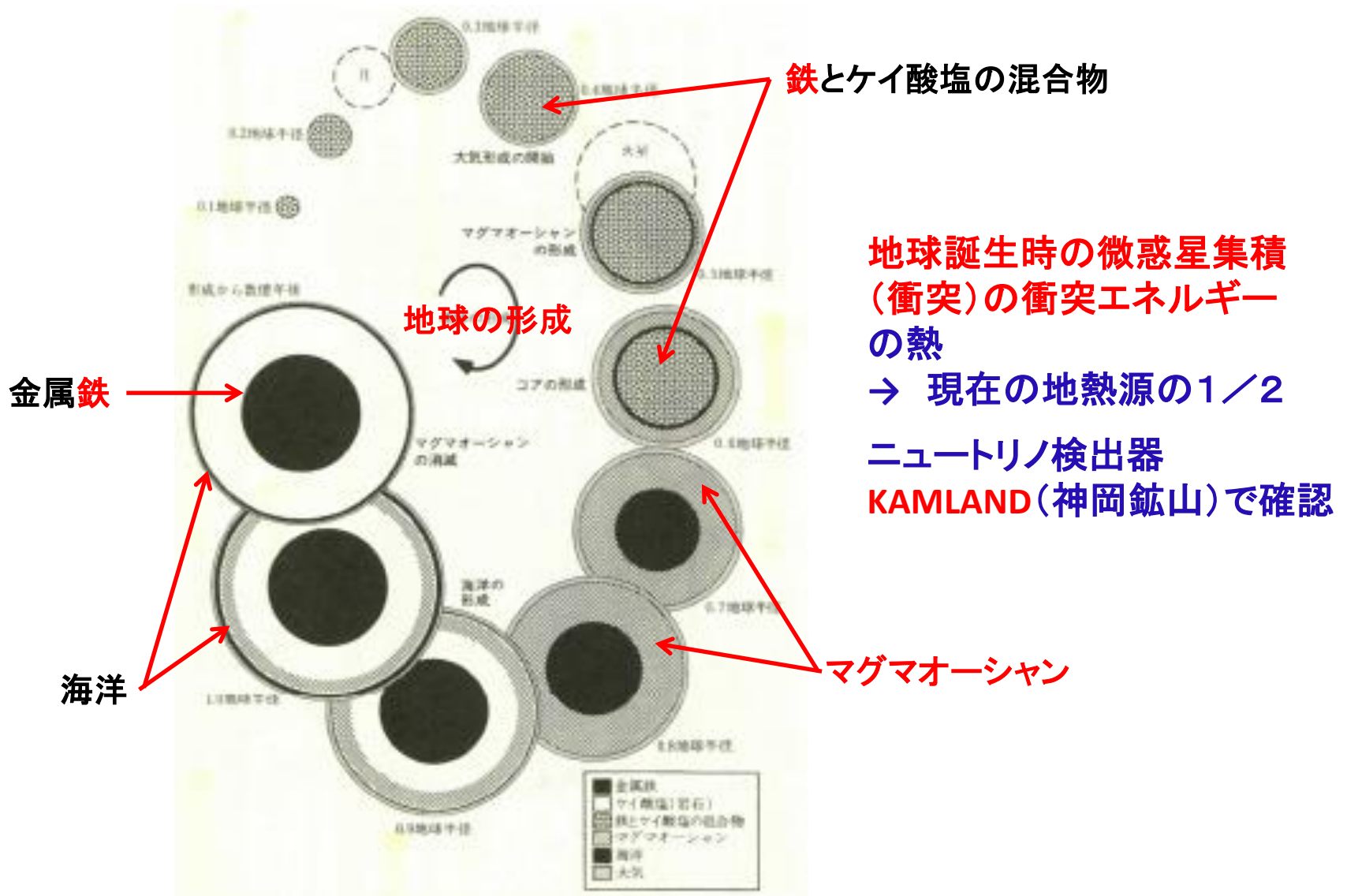
太陽系は超新星爆発で生成した宇宙塵を集めて誕生

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



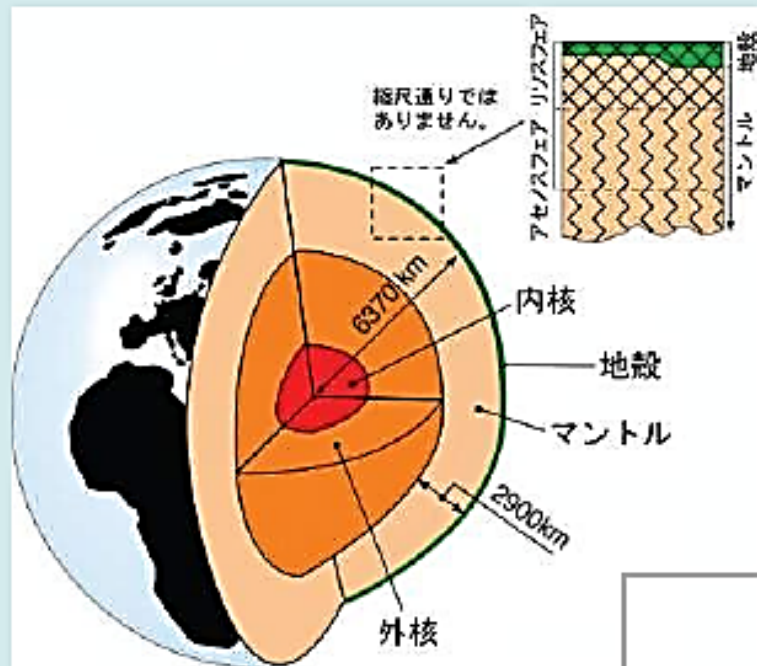
(注) シリコン存在量を 10^6 として正規化した

エネルギーの源泉 地熱の半分は衝突エネルギー



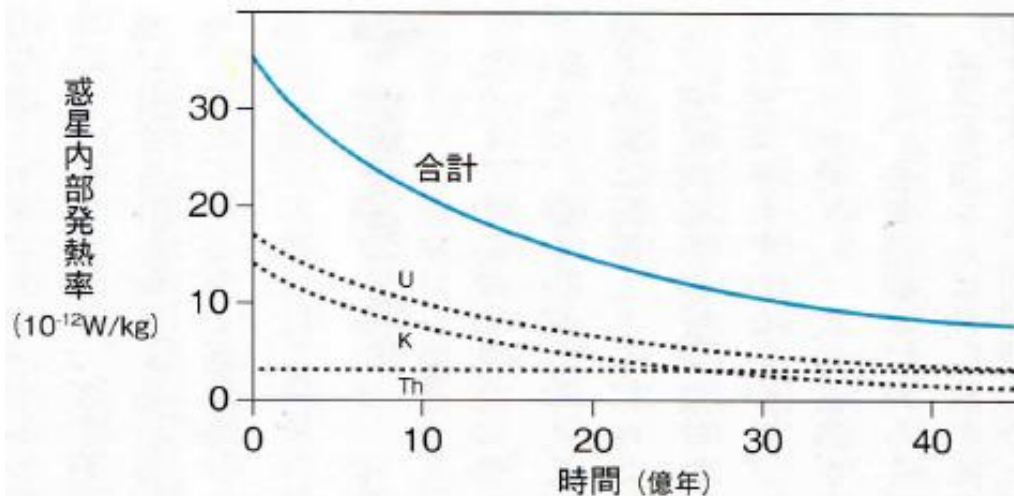
エネルギーの源泉 地熱の半分は原始放射性物質

放射性物質の崩壊と地温



	地球全体積に占める比率	熱放出量(ワット)	放射性物質の存在
核(コア)	16%	$1.7 \times 10^{12} \text{W}$	含有しない
マントル	82%	$32.3 \times 10^{12} \text{W}$ (注)	豊富
地殻	2%	$8 \times 10^{12} \text{W}$	豊富
地球全体	100%	$42 \times 10^{12} \text{W}$	
注	うち、放射性物質の崩壊熱 $22 \times 10^{12} \text{W}$		
日本地熱学会(2008)			1

原始放射性物質の減衰



地球内部の熱源となる放射性物質の発熱率

地球創生時(46億年前)は、現在の発熱量の4.8倍(長半減期核種で評価)

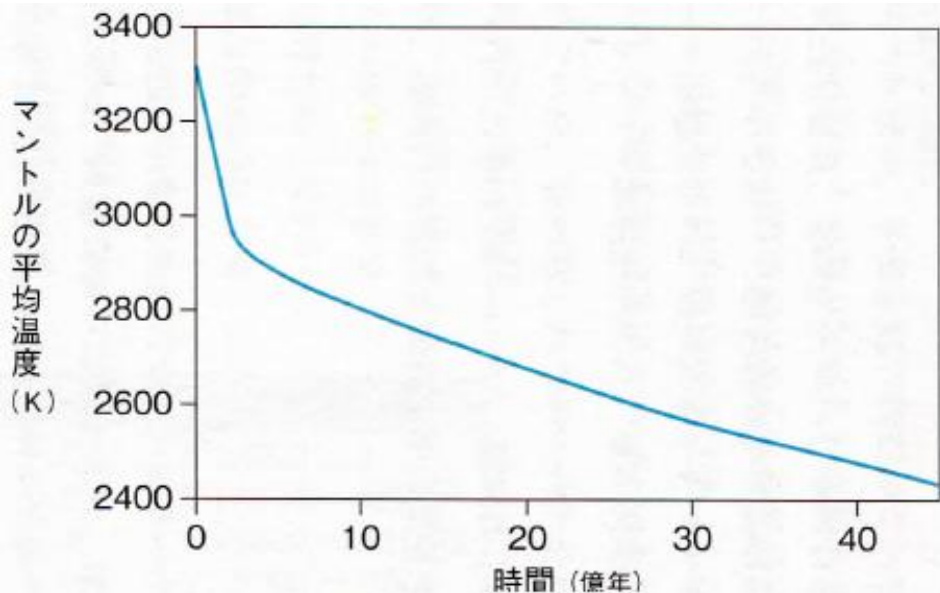
地熱の発熱密度 $0.1 W/m^2$ ← 太陽熱の1/10,000

地球内部の発熱 → マントル対流
→ プレート運動 → 地表付近で
マントル溶融/マグマ発生
→ 揮発性成分(CO_2 など)の脱ガス
→ 物質循環

【火山活動は地球が活着している証】

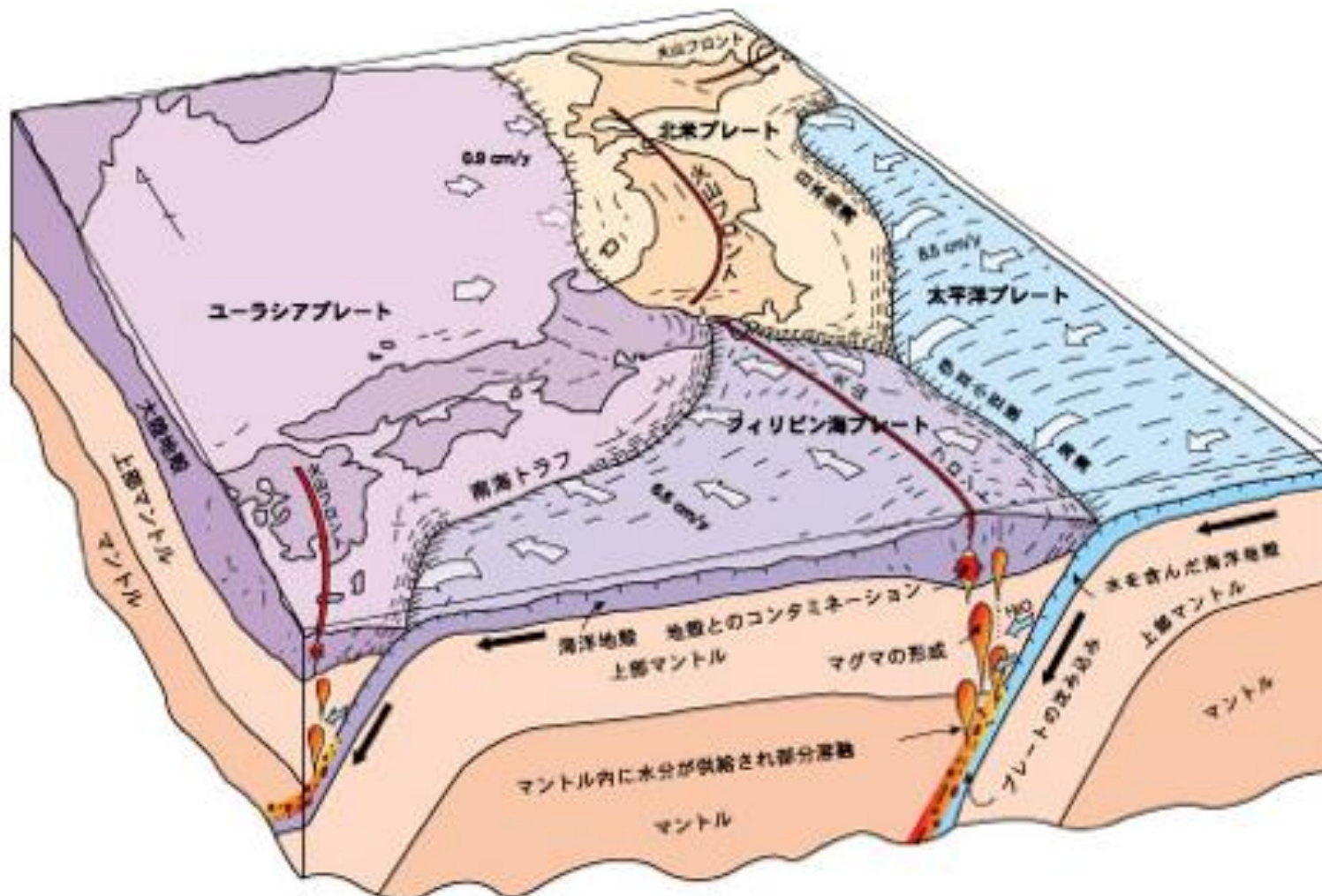
熱源である放射性物質は地球質量に比例/冷却は地球表面全体
→ 大きな地球ほど冷却までの寿命が長い。

【地球はまだ数十億年は火山活動】
太陽光度増大の影響の方が先



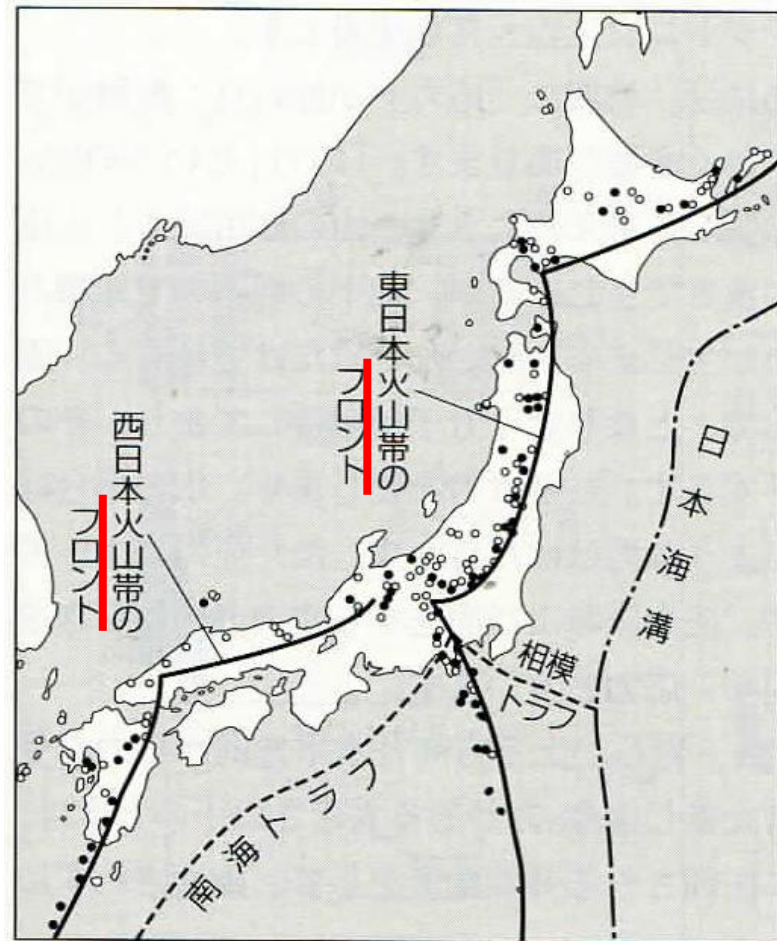
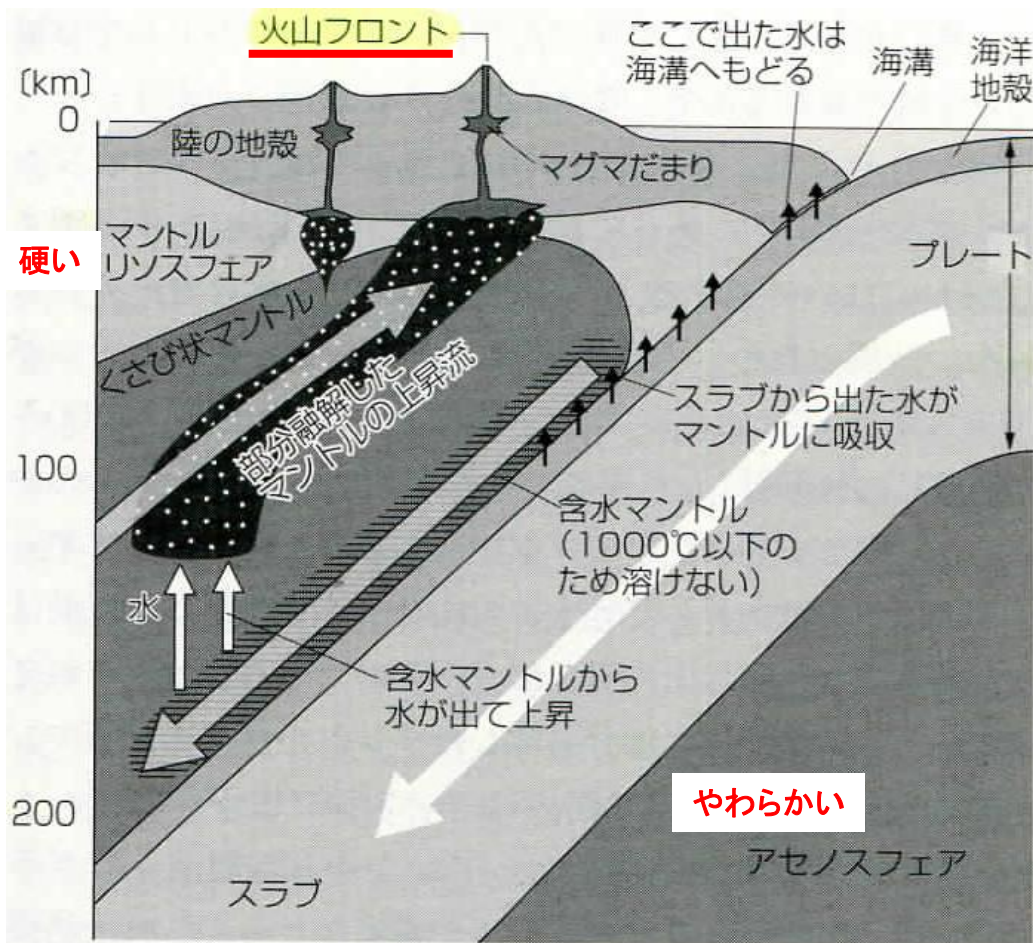
地球内部の平均温度の変化

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。

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

放射線を正しく知る 放射性物質の発癌リスク

■さまざまながんのリスク

安全は便益とのバランスで判断

相対リスク	全部位	特定部位
10.00 ~		C型肝炎感染者(肝臓:36) ピロリ菌感染既往者(胃:10)
2.50~ 9.99		大量飲酒(300g以上/週、食道:4.6) 喫煙者(肺:4.2~4.5) 600~1240mSv被曝(甲状腺:4.0) [1000mSv当たり3.2倍と推計]
1.50~ 2.49	1000~2000mSv被曝(1.8) [1000mSv当たり1.5倍と推計] 喫煙者(1.6) 大量飲酒(450g以上/週:1.6) 携帯電話	高塩分食品の毎日摂取(胃:2.5~3.5) 150~290mSv被曝 (甲状腺2.1) 運動不足(結腸、男性:1.7) 肥満(BMI>30)(大腸:1.5、閉経後乳がん:2.3)
1.30~ 1.49	500~1000mSv被曝(1.4) 大量飲酒(300~449g/週:1.4)	50~140mSvの被曝 (甲状腺1.4) 受動喫煙(非喫煙女性)(肺:1.3)
1.10~ 1.29	やせ(BMI<19)(1.29) 肥満(BMI≥30)(1.22) 200~500mSv被曝(1.19) 運動不足(1.15~1.19) 高塩分食品の毎日摂取(1.11~1.15)	
1.01~ 1.09	100~200mSv被曝(1.08) 野菜不足(1.06) 受動喫煙(非喫煙女性)(1.02~1.03)	

発癌の源となる「**活性酸素**」は、放射線、紫外線、電波、ストレス、生活習慣(酒、煙草、運動不足、肥満など)等より生まれる

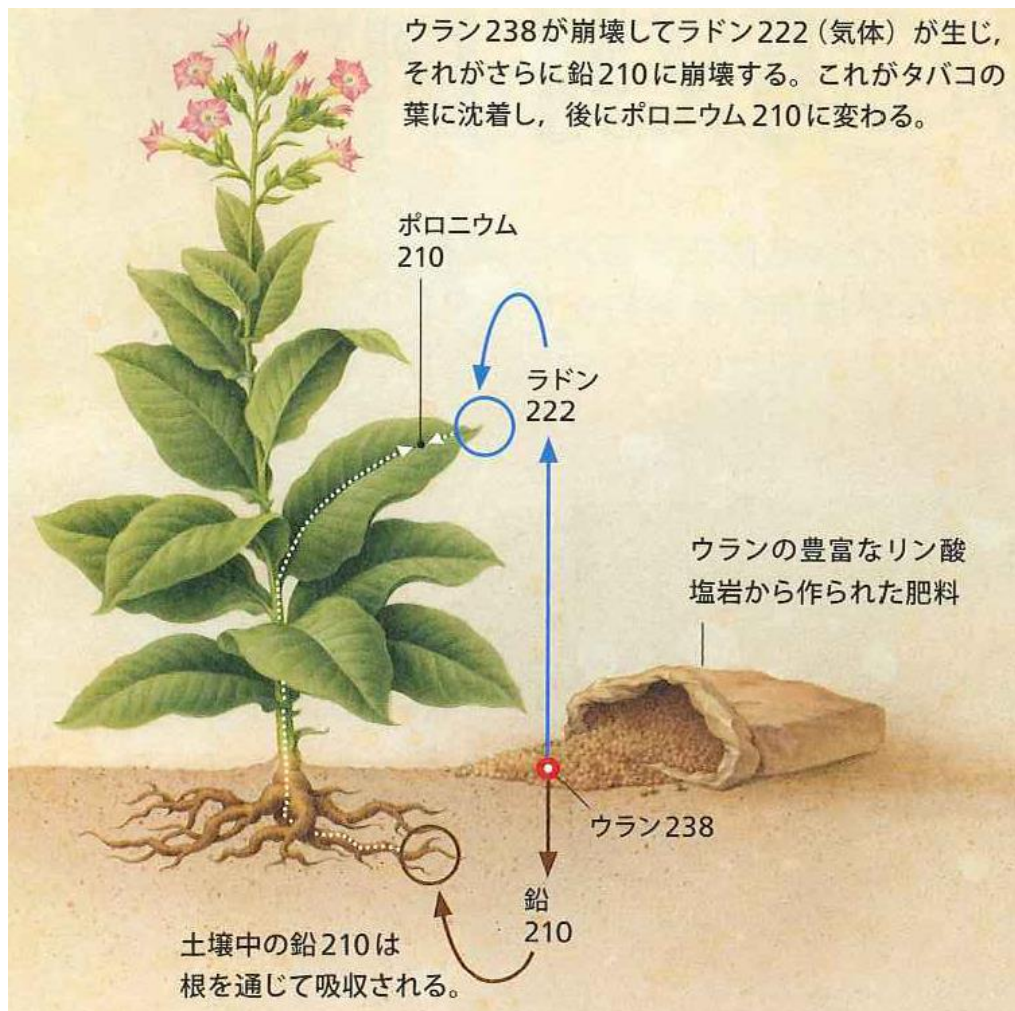
放射線の問題が「ガン死亡率」であるなら、「ガン死亡率」の影響因子を全て比較評価すべき ⇒ 携帯電話は喫煙並／1000mSv被曝より発がんリスクが高い。**携帯電話をやめられますか(対策:電話本体を耳から離せば良い／時間短縮)**

(注)全部位の固形がんは広島・長崎の原爆被爆者の約40年間の追跡調査から(寄与率を相対リスクに変換)。甲状腺がんはチェルノブイリ原発事故の被曝者(18歳以下、外部被曝と内部被曝)の10~15年後に行った甲状腺がんスクリーニングのデータから。生活習慣については日本の40~69歳の地域住民を約10~15年間追跡調査したデータから引用。飲酒についてはエタノール換算量を示す

(出所)国立がん研究センターの資料を基に本誌作成

放射線を正しく知る タバコに放射性物質

ポロニウム210はウラン238の崩壊生成物の一つ。肥料原料のリン酸塩岩は特に高濃度のウラン238(土壤中に自然に存在)を含んでいる。大気と根からタバコに蓄積する。



隠されてきた真実

- 植物のタバコには低濃度のポロニウム210が蓄積する。ポロニウム210は放射性があり、その大部分は肥料に含まれている天然の放射性元素から生じたものだ。
- 喫煙者が吸入したポロニウムは肺の“ホットスポット”に定着し、がんを引き起こす原因となりうる。この効果は、米国だけで年間に数千人の死につながっている可能性がある。
- 米国のタバコ業界はタバコの煙からポロニウムを実質的に完全除去する方法を何十年も前から知っていたが、その知識を秘密にし、何の行動も起こさなかった。
- 米国では新たな法律のもと、食品医薬品局(FDA)にタバコを規制する権限が与えられ、その権限によってタバコ製造会社にポロニウム成分を減らすよう義務づけることが可能になっている。

地球になぜウラン238があるのか
(後述)

放射線を正しく知る 人体内、食物中の自然放射性物質

●体内の放射性物質の量

(体重60 kilogramsの日本人の場合)

原始放射性物質 栄養素
(半減期12.5億年) →

ウラン238の娘核種 煙草にも
含有(人体に鉛がある?) →

カリウム40	4,000ベクレル
炭素14	2,500ベクレル
ルビジウム87	500ベクレル
鉛210・ポロニウム210	20ベクレル

ベクレル: 1秒間に原子核が壊変する数を表す放射能の単位

●食物中のカリウム40の放射性物質の量(日本)

(単位:ベクレル/キログラム)



人体内や食物中になぜウラン238があるのか(後述)

出典:原子力・エネルギー図面集2014

Ⅱ. エネルギー選択に影響する環境問題の原点

原点＝思考停止の源

(1) 二酸化炭素(CO₂)は循環する

地球大気中のCO₂濃度は、なぜ変化したのか
石炭火力のCO₂は、どこから来たのか
最終的に地球環境はどうなるか

(2) 誰のための環境問題なのか

気候変動は何に影響するのか

二酸化炭素(CO₂)は循環する 素朴な疑問

A. 石炭のCO₂はどこから来たか

- (1) 宇宙の塵(地球創生以前)にあった。
- (2) 地球創生後、地下で出来た。
- (3) 地球の大気中から来た。

B. 最終的に地球環境はどうなるのか

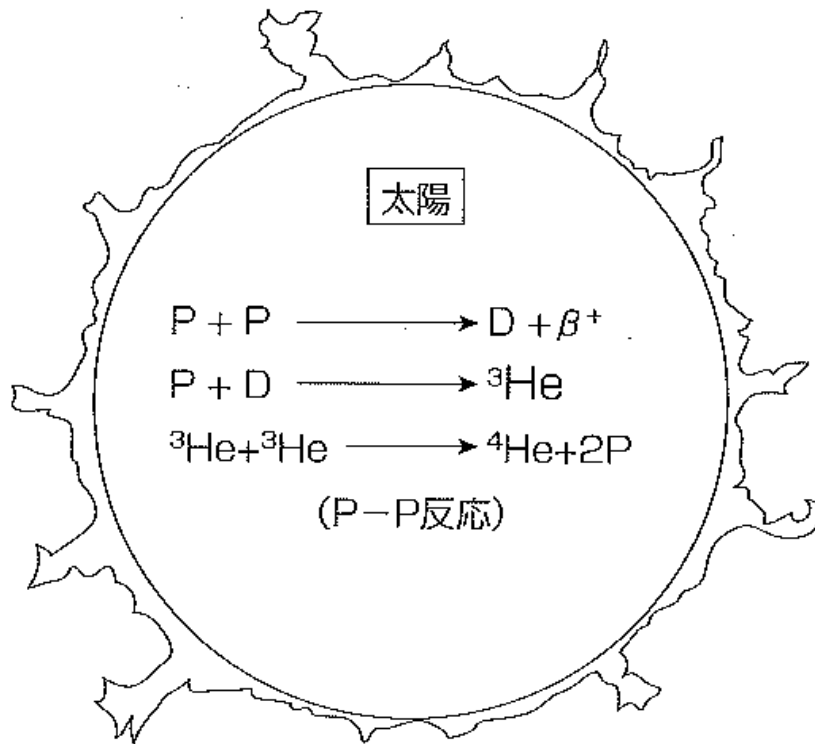
どのシナリオが先に来るか。

- (1) 地球が膨張する太陽に飲み込まれて消滅する。
- (2) 地表温度が上昇して生物が絶滅する。
- (3) CO₂濃度が低下して生物が絶滅する。

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/m³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

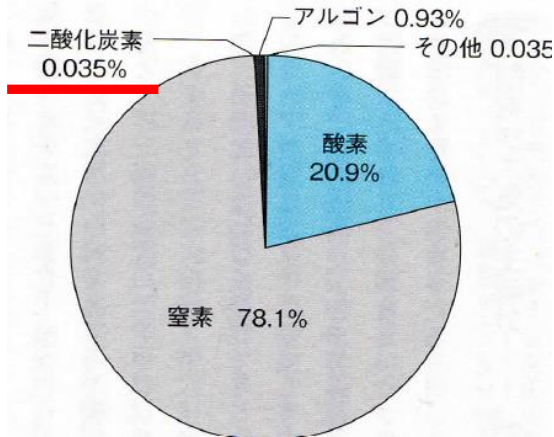
地熱, 原子力... 地球自らの貯蓄(ウラン)

再生可能エネルギー(地熱を除く)... 現在の太陽エネルギー

二酸化炭素(CO₂)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)

		金星	地球	火星
大気組成 (%)	窒素 N ₂	1.8	78.1	2.7
	酸素 O ₂	—	20.9	—
	アルゴン Ar	0.02	0.93	1.6
	二酸化炭素 CO ₂	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)



地球大気の組成(現在)

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 ₂ O)	—	7.8×10 ²²	4.1×10 ²¹	270(H ₂ O)	水(H ₂ O)
炭素(C)	5.8×10 ¹⁸	3.3×10 ¹⁸	1.0×10 ²²	80(CO ₂)	炭酸カルシウム(CaCO ₃) 有機物(CH ₂ O)
塩素(Cl)	—	7.6×10 ²⁰	7.6×10 ²⁰	10(HCl)	塩素イオン(Cl ⁻) 塩化ナトリウム(NaCl)
硫黄(S)	—	4.0×10 ¹⁹	3.5×10 ²⁰	5(SO ₂)	硫化カルシウム(CaSO ₄) 硫化鉄(Fe ₂ S) 硫酸イオン(SO ₄ ²⁻)
窒素(N)	2.9×10 ²⁰	—	1.4×10 ²⁰	1(N ₂)	窒素(N ₂) 有機物([—NH ₂])
アルゴン(Ar)	1.7×10 ¹⁸	—	—	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CO₂

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

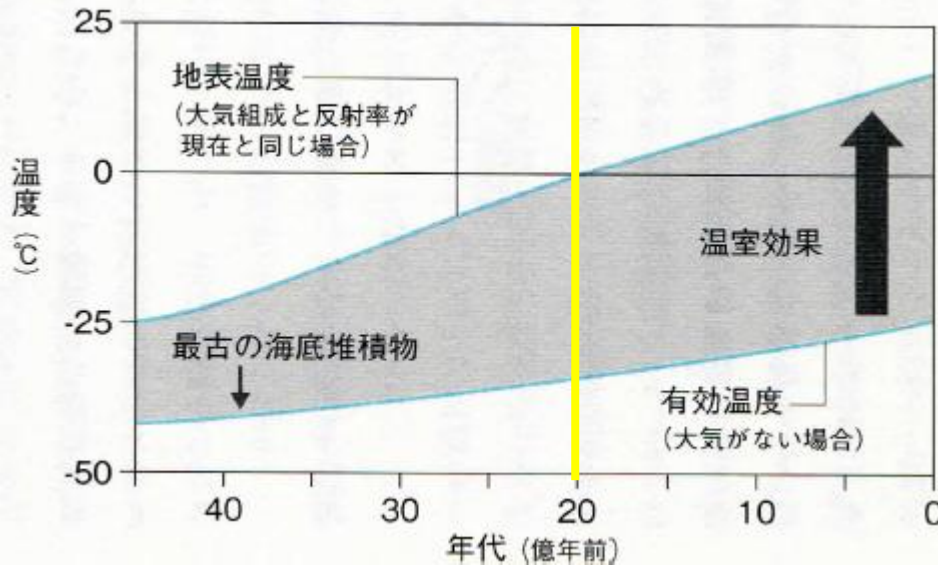
地表の岩石も同様。

海水成分 → 岩塩

CO₂ → 炭酸塩(石灰石)

40~90気圧相当量 = 金星大気

二酸化炭素(CO₂)は循環する 暗い太陽のパラドックス



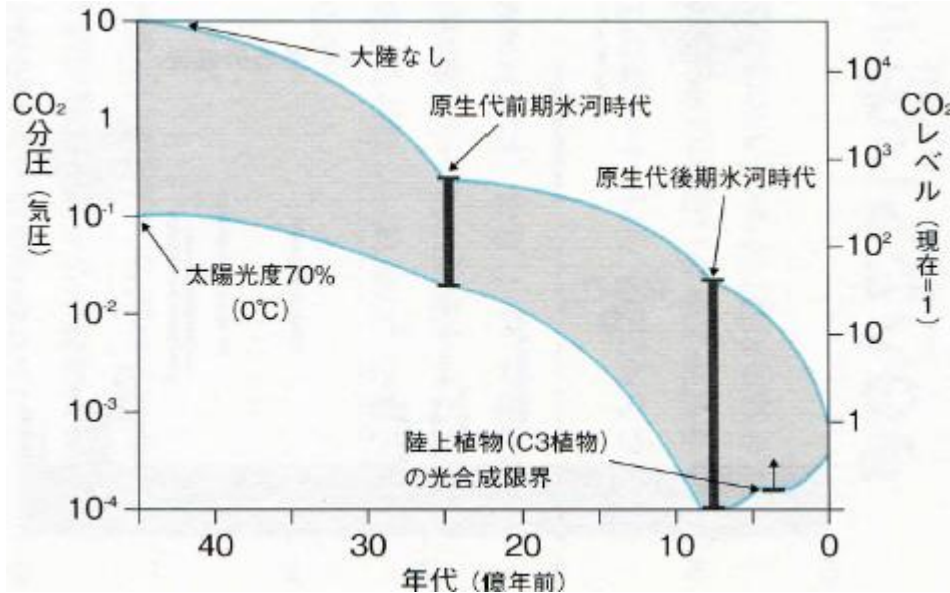
地球のアルベド(反射率)と温室効果ガスが現在と変わらなければ、**20億年前に全球凍結**

→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

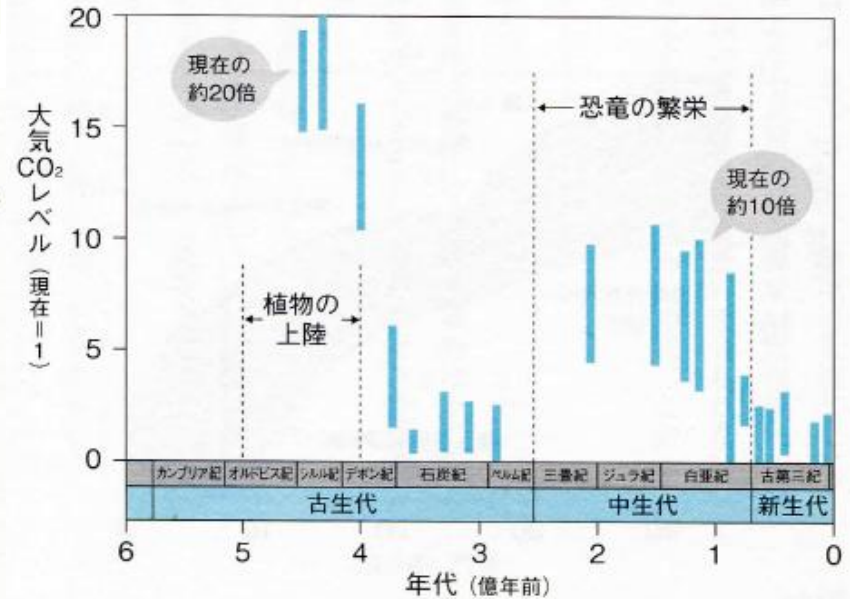
【地質学的証拠はない】=**パラドックス**

太陽が明るくなるにつれ、**CO₂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CO₂濃度の変動

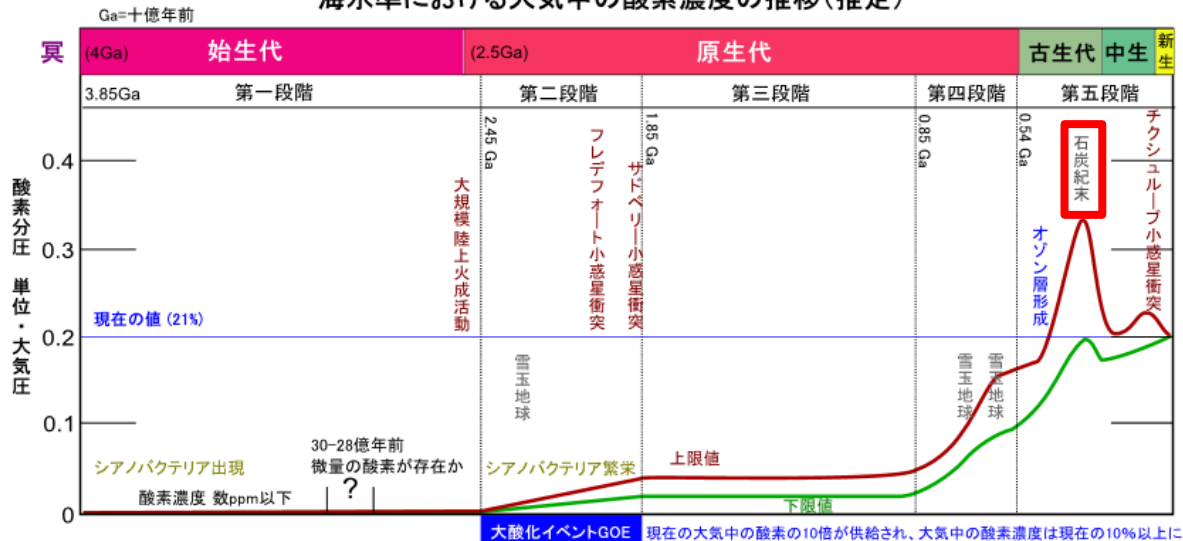


古生代以降のCO₂濃度の変動

出典: 大気の進化46億年、田近英一、2011

石炭生成と大気成分 石炭は大気CO₂の固定化

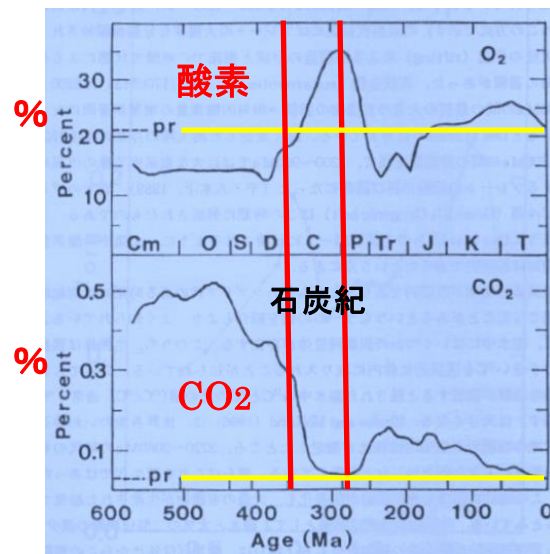
海水準における大気中の酸素濃度の推移(推定)



大酸化イベント



枯れて腐ればCO₂は元に戻る → 石炭化で固定

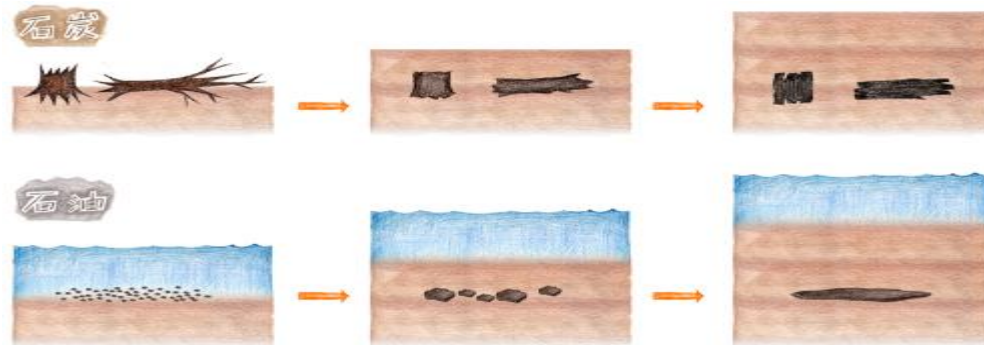


石炭紀は、**高温多湿**な環境の地域が多く、植物や昆虫は**巨大化**。高湿度の熱帯ではシダ植物が径2m×高さ40m、巨大トンボの羽は70cmにも達した。
酸素濃度が非常に高く、それが昆虫の巨大化につながったと考えられている。
 北極では氷河が形成され、石炭紀後期の**氷河期**(数百万年)によって、多くの生物が**絶滅**することになった。
 石炭紀の植物の巨大化は、大気中のCO₂量(栄養分)が多かったことを、大気中の酸素濃度の急増は、植物へのCO₂の固定化(石炭量)の急増/大気中CO₂の急減を裏付けるものと考えられる。
 →石炭は石炭紀以降の大気中CO₂を、太陽光で閉じ込めたもの。【報告者】

二酸化炭素(CO₂)は循環する 蓄えた時代と使う時代

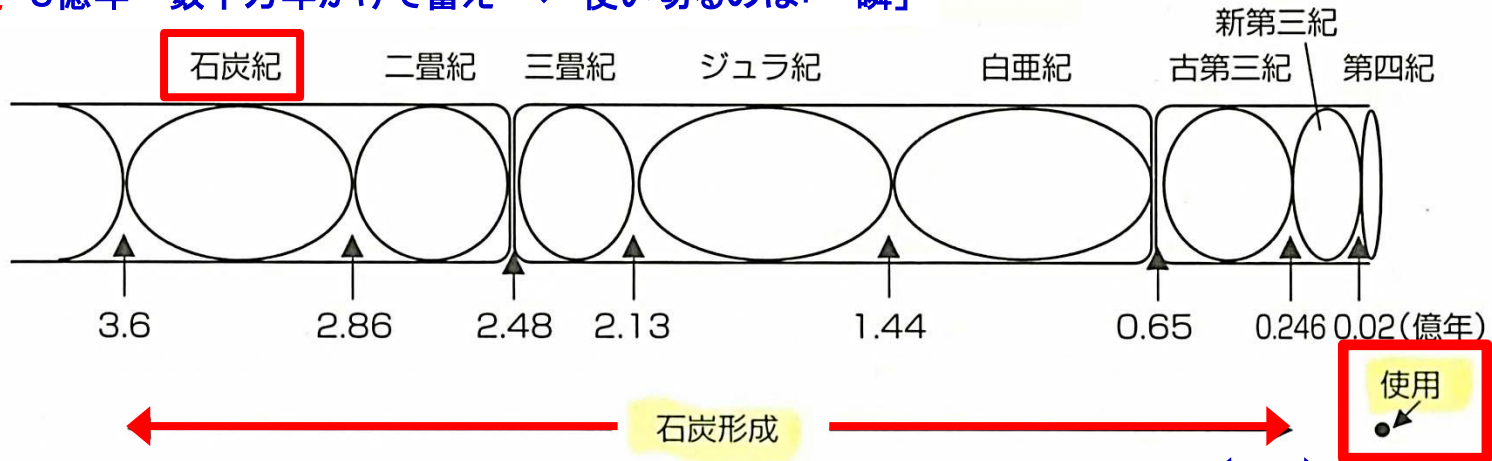
石炭の成り立ち

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」



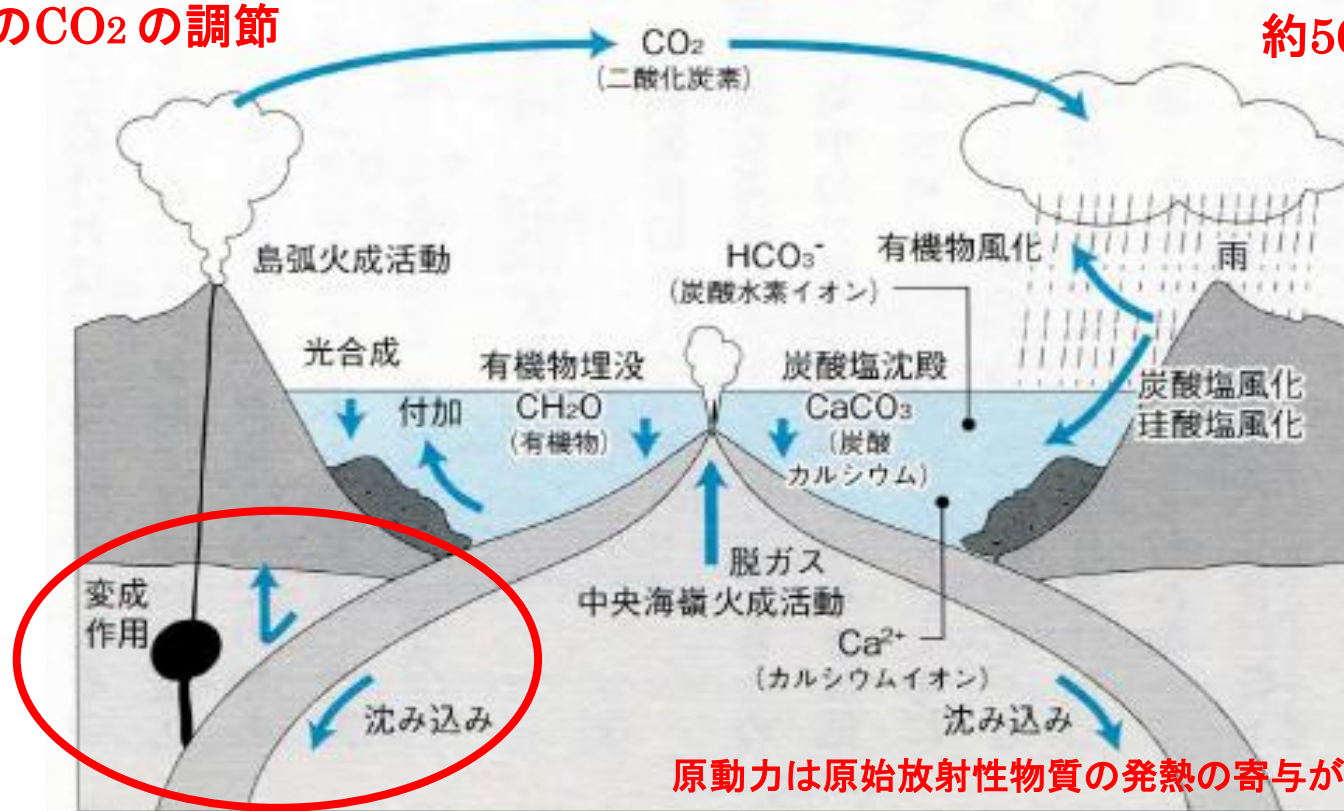
出典: 核燃料サイクル, 藤家, 石井

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

最終的に地球環境はどうか 炭素循環システム

大気中のCO₂の調節

約50万年周期



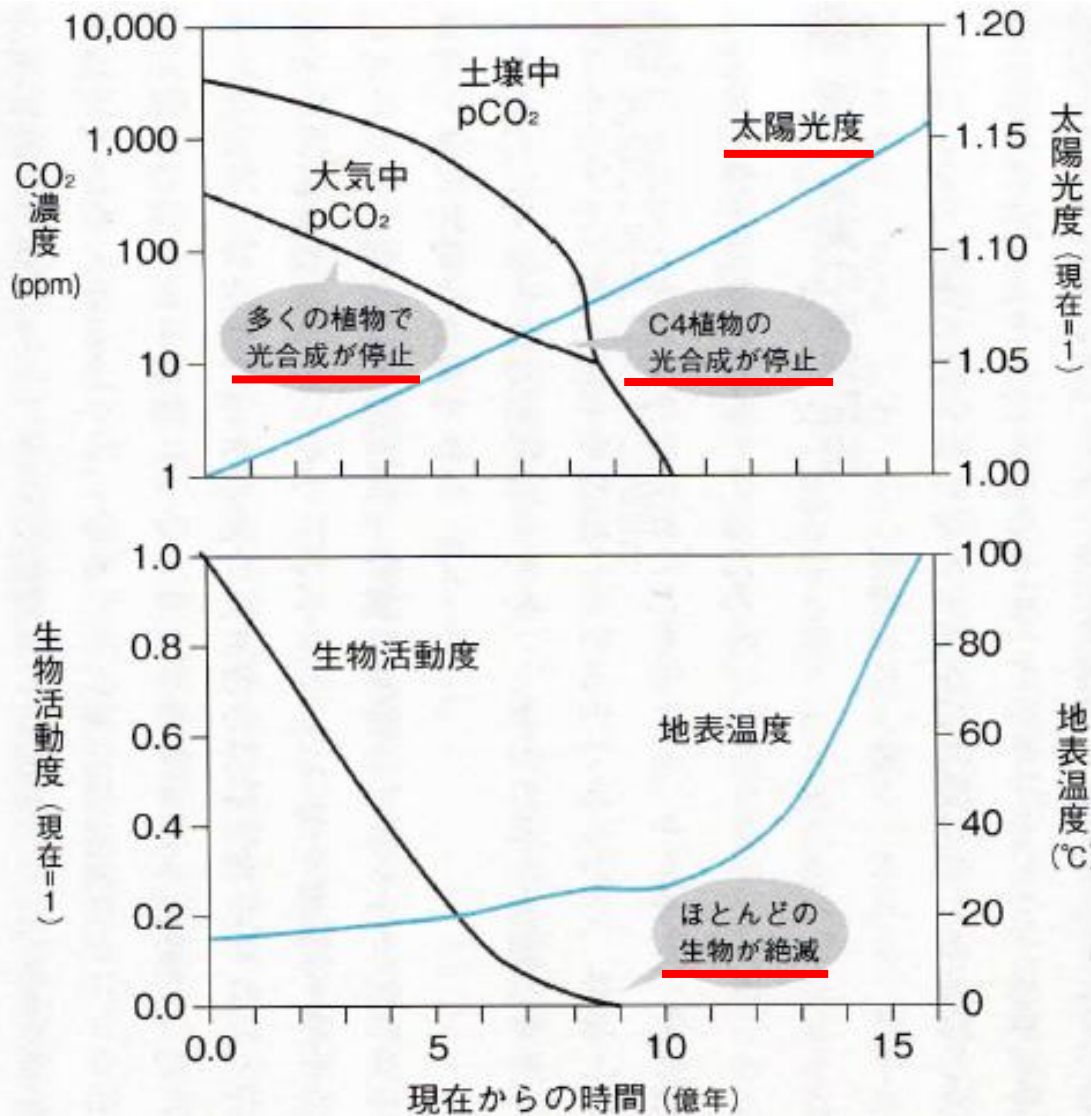
大気中のCO₂濃度は、どのようにして太陽が明るくなる影響を相殺するように低下してきたのか

火山ガス中のCO₂ → 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CO₂ → 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CO₂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 (1) 最終的に地球環境はどうか 遠い将来の地球環境



大気中のCO₂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】

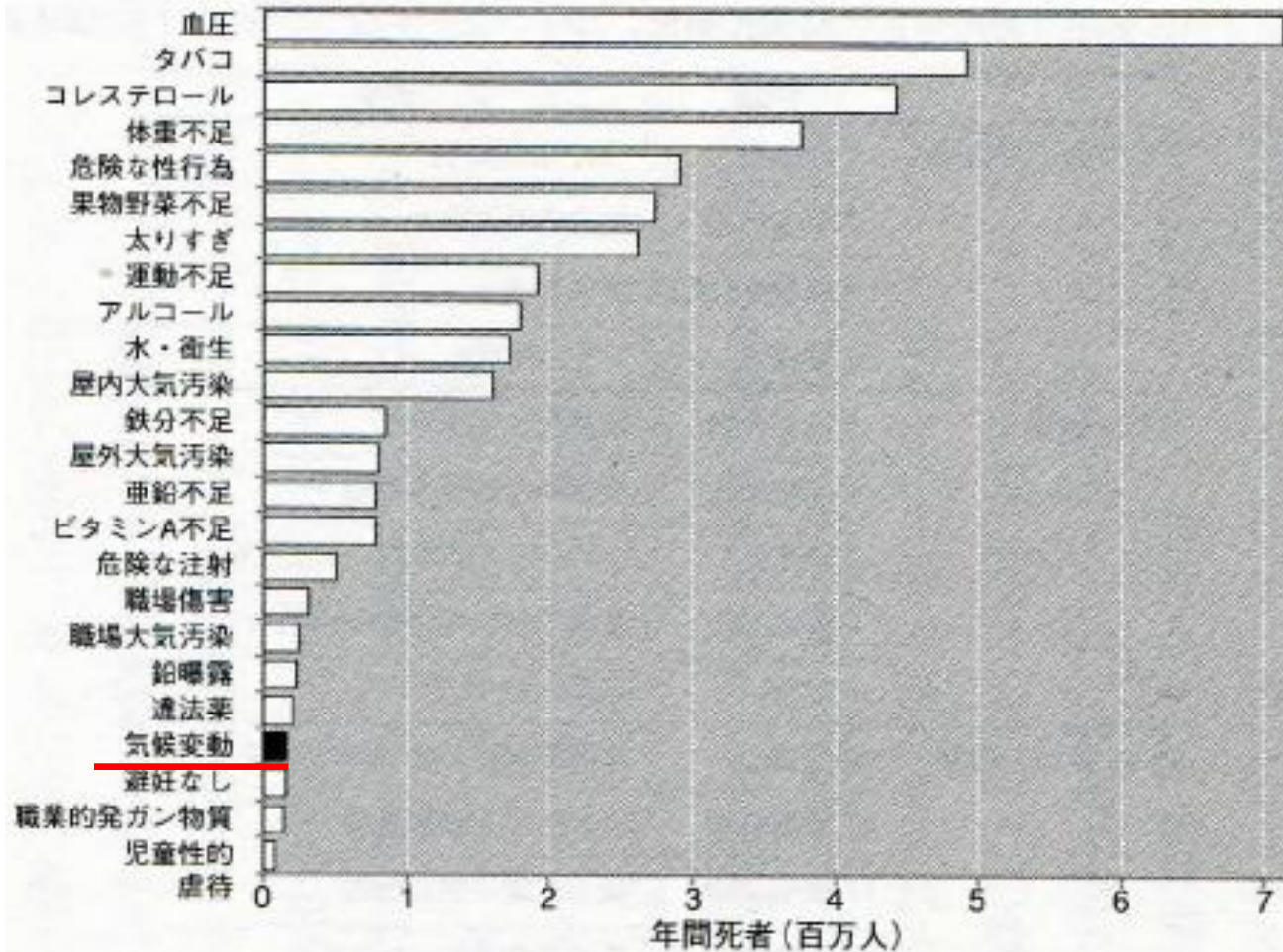
太陽の寿命は約100億年
残り約50億年 → 中年期

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

誰のための環境問題

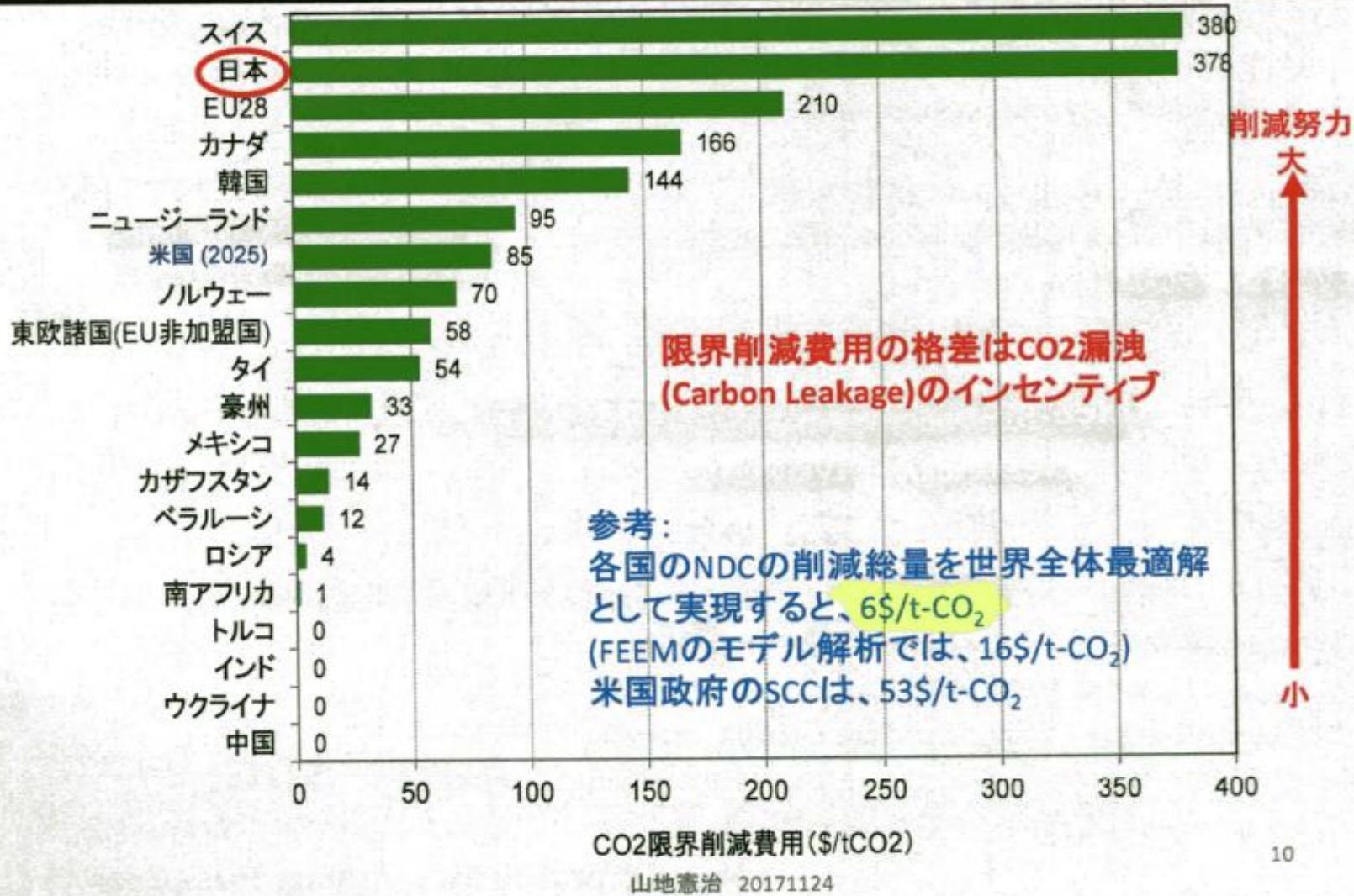
気候変動の影響



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。

2030年における約束草案のCO₂限界削減費用の国際比較



Ⅲ. エネルギー選択に影響する**経済性**の**原点**

原点＝思考停止の源

(1) エネルギーミックスの**経済性**

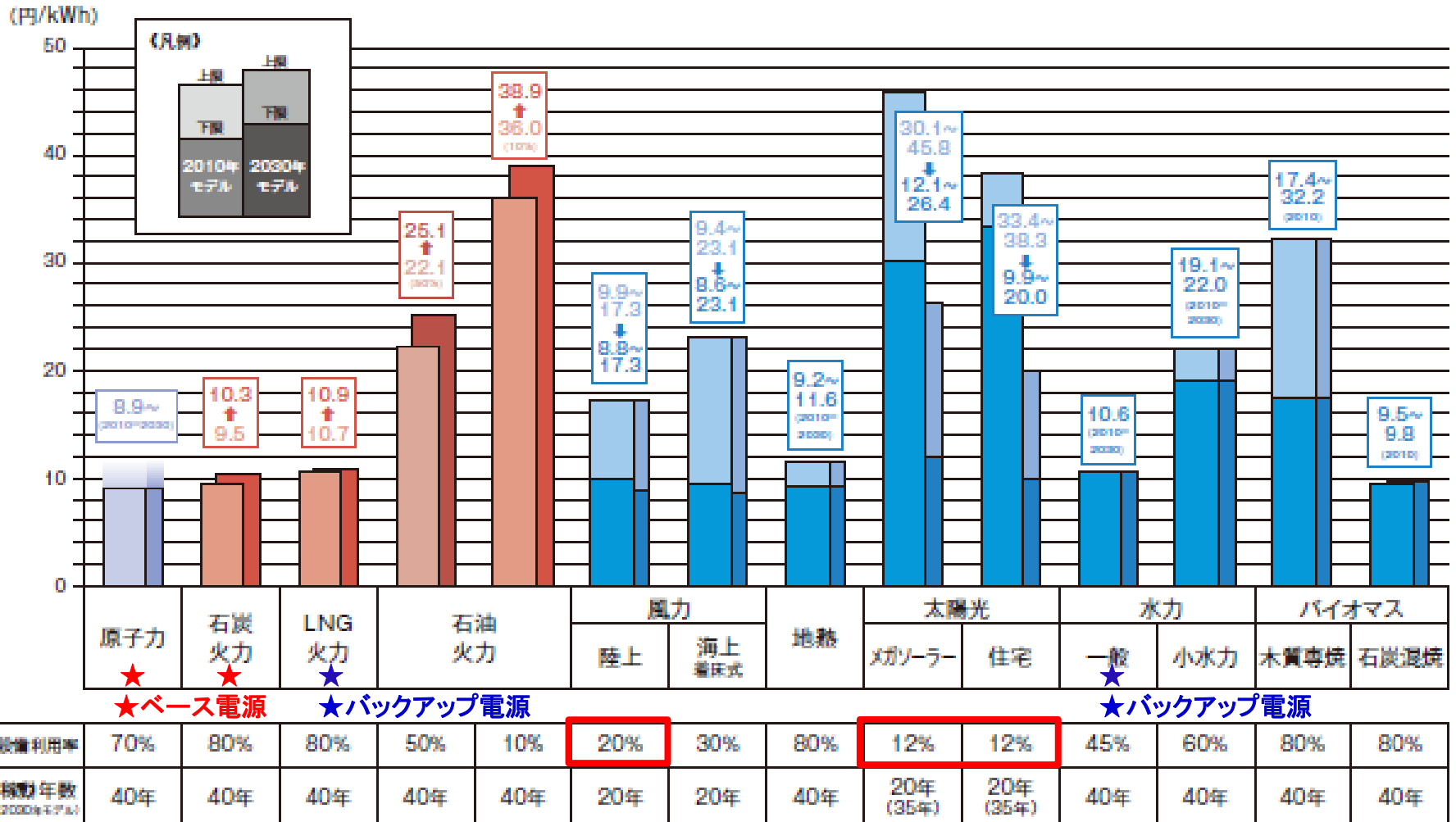
単独エネルギー源の**経済性**に意味があるか
エネルギー収支比(EPR)で比較する

(2) 補完エネルギーの**経済性**

変動電源(太陽光, 風力)を補完する火力発電の**経済性**の低下

(3) 電源安定化の**経済性**

エネルギーミックス 各電源の発電コスト



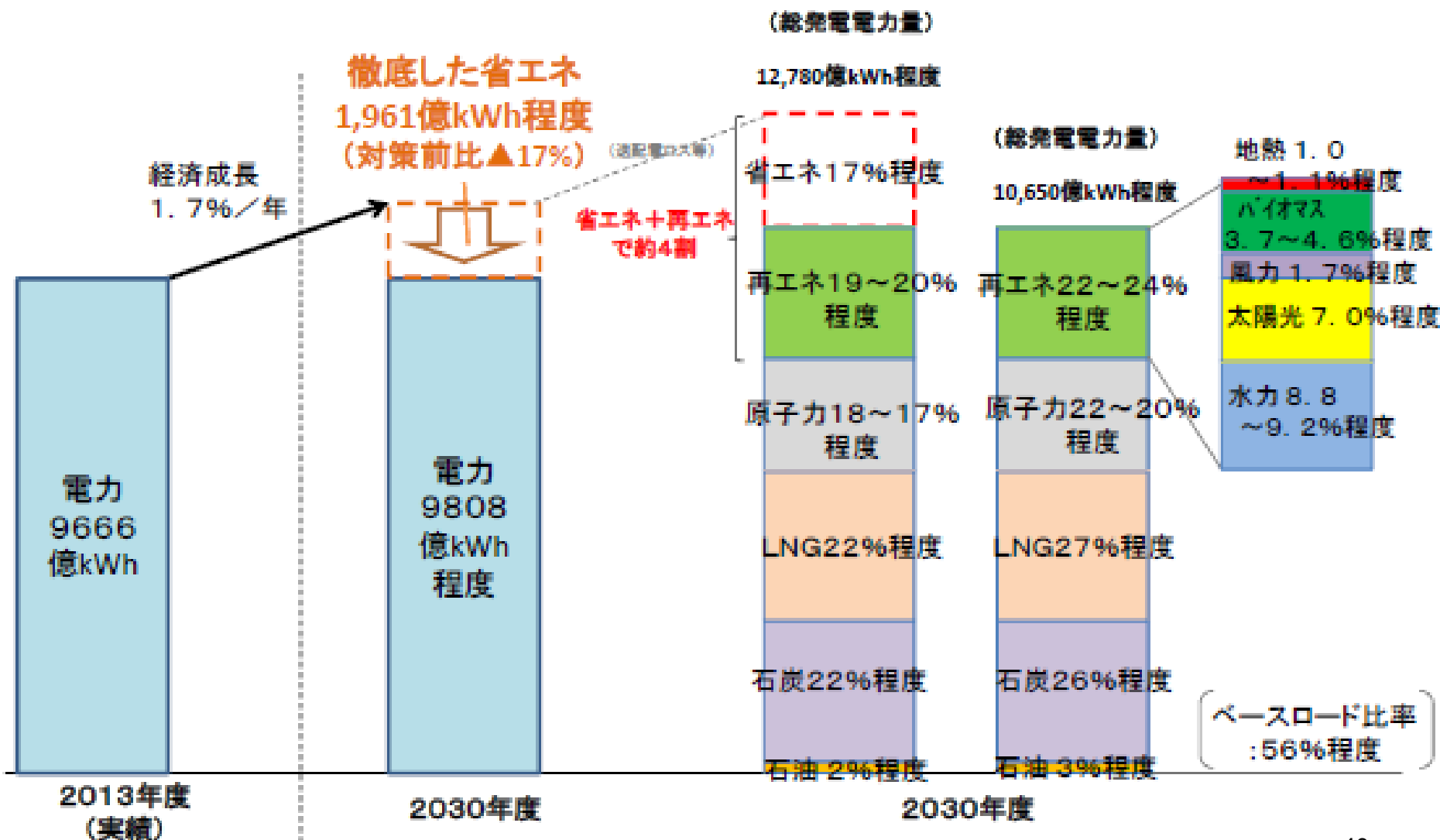
エネルギー基本計画方針の3E(安定供給、経済性、環境適合)を考慮した選択が必要。
 太陽光、風力は天候の影響を受ける(出力100~0%→太陽光平均12%)。
 化石燃料はいずれ枯渇する。ベストミックスは？

エネルギーミックス

電源需要・電源構成

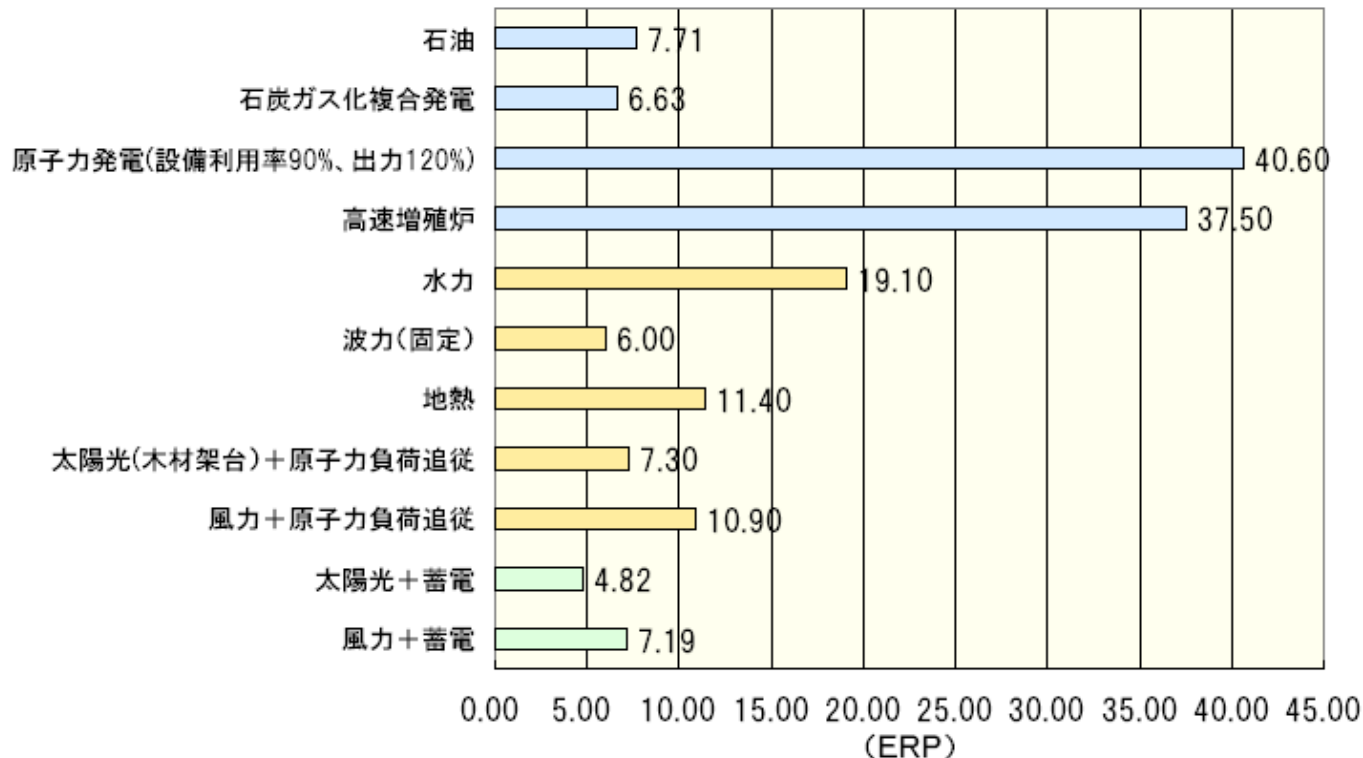
電力需要

電源構成



経済性 エネルギー収支比(EPR)

チャンピオンデータによるエネルギー収支比(評価例)



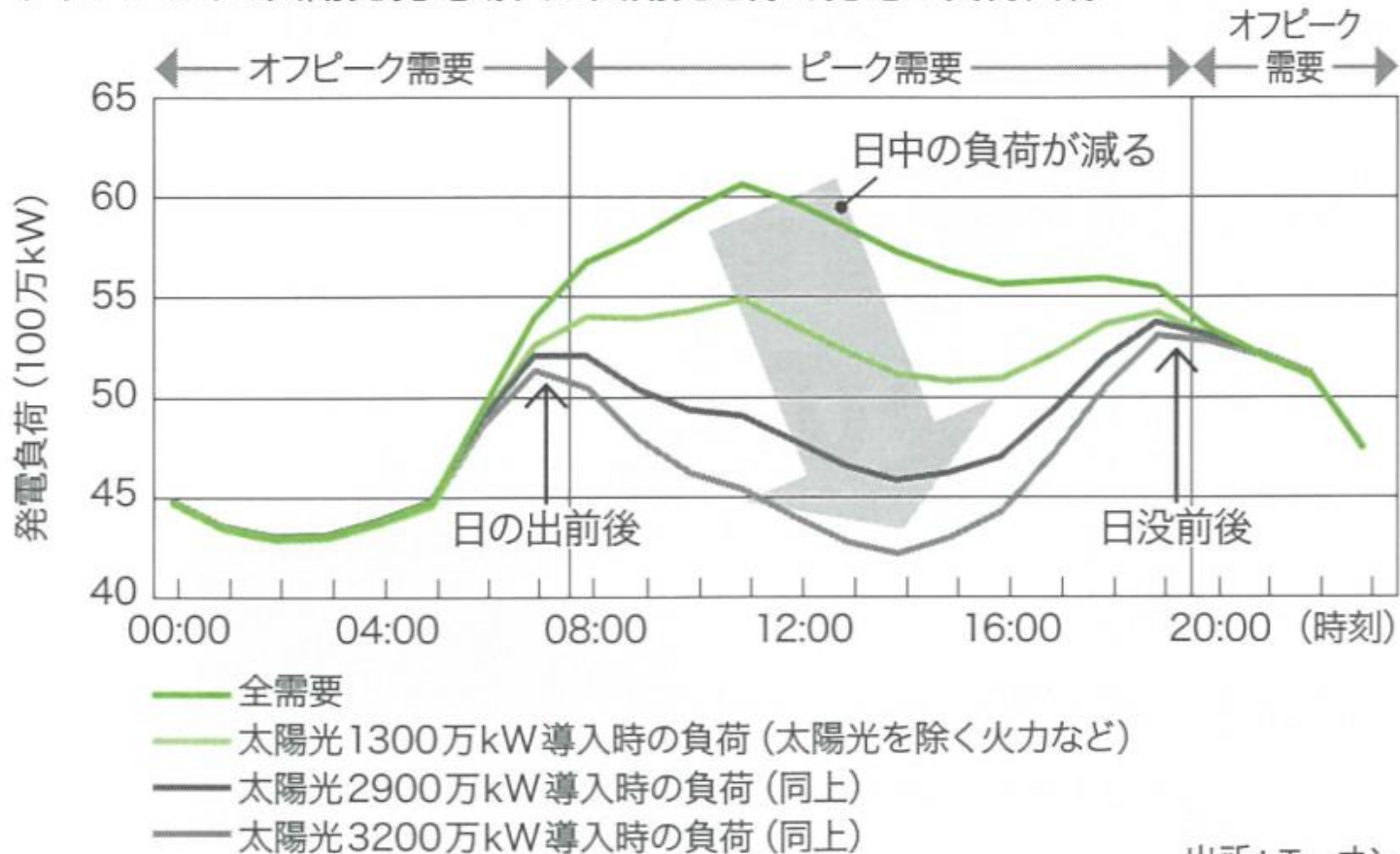
太陽光(木材架台)+原子力負荷追従: 太陽光の出力変動を原子力がフォローアップする。EPR評価では、太陽光(木材架台)のみ用いる。風力も同じ。
太陽光(木材架台)+蓄電池: 太陽光の出力を蓄電池に蓄える。EPRは太陽光(木材架台)と蓄電池のEPRの乗算となる。風力も同じ。

EPR値は試算条件により様々。前提や試算条件の確認が必要

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 **ダックカーブ**

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

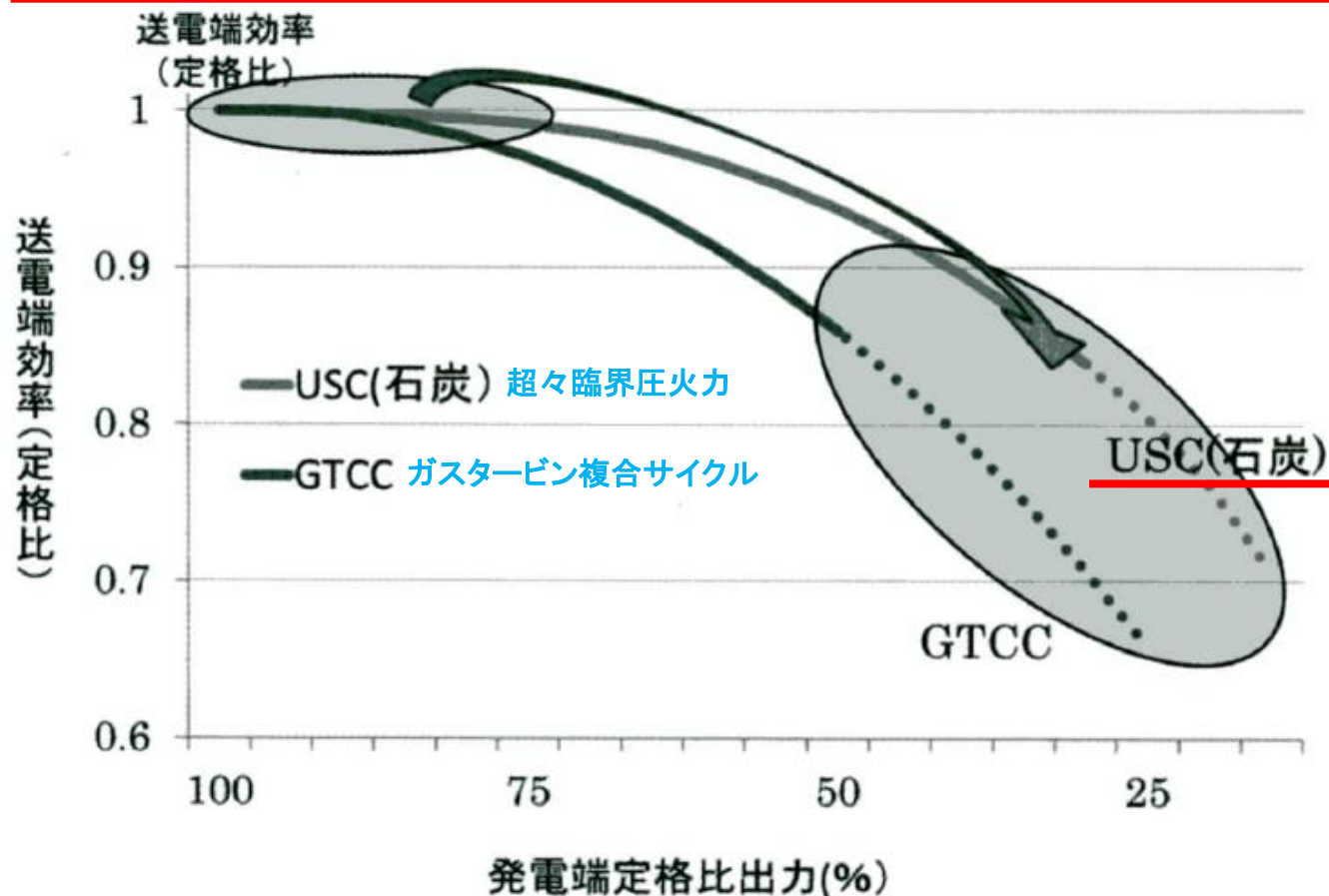


出所：エーオン

太陽光発電大量導入時代には火力の効率は低下

火力プラントの部分出力時の効率低下

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！



太陽光・風力の導入拡大 ⇒ 需給調整のため火力は部分出力運転 ⇒ 効率低下
※ 再エネ時代では、石炭火力でも魅力ある事業なのか疑問

需給バランス調整・周波数維持について

- 送配電事業者は「発電機の調整力」を利用して、時々刻々、需要と発電機出力のずれを一定範囲に抑えるように、需給バランス調整・周波数維持を行っている。
- 上記実現のため、先般の託送供給等約款（系統連系技術要件）改定において、発電機への調整機能の具備を求め、認可されたところ。

●変動周期

～数十秒程度（下図の微小変動分に相当）

～数分程度（下図の短周期成分に相当）

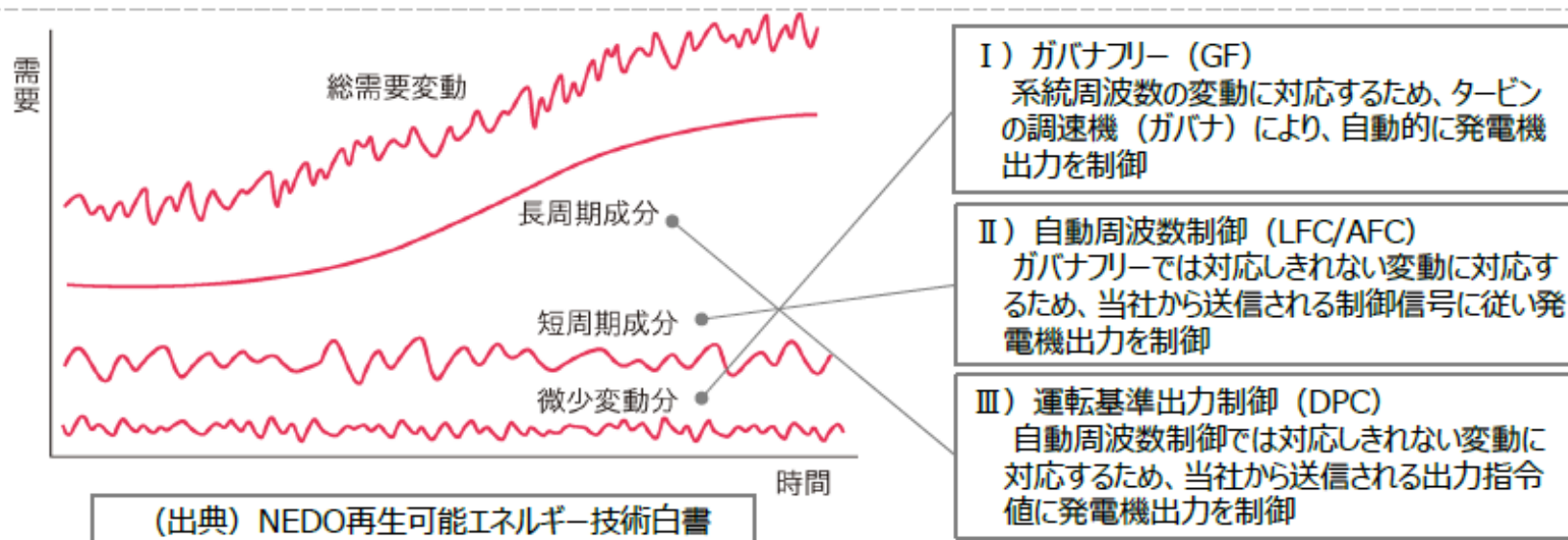
～数十分程度（下図の長周期成分に相当）

●対応する発電機調整機能

⇒ ガバナフリー（GF）

⇒ 自動周波数制御（LFC/AFC）

⇒ 運転基準出力制御（DPC）



IV. エネルギー問題で**何が必要か**を考える手法

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

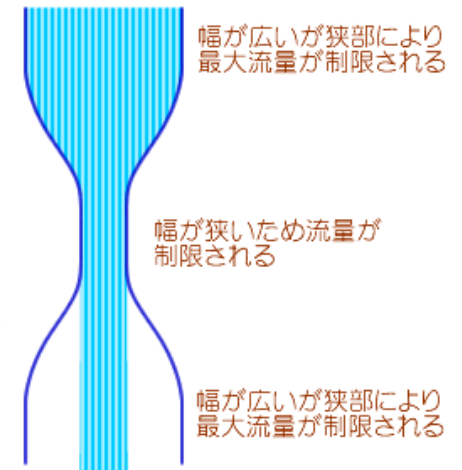


鎖の一番弱い部分によって、鎖全体の破断荷重は決定しているため、ボトルネック以外の部分をいくら強化しても破断荷重は大きくなりません。

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



V. まとめ (学生に奨めること)

1. 「変だな」と思う**能力**(一般教養, **理科**)を身につけよう。「**違和感**」を追究しよう。
2. 陥り易い「**思考の罫**」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(原点)・歴史の教訓**を知ろう。
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

エネルギーのこと、理科で考えてみませんか？

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」