

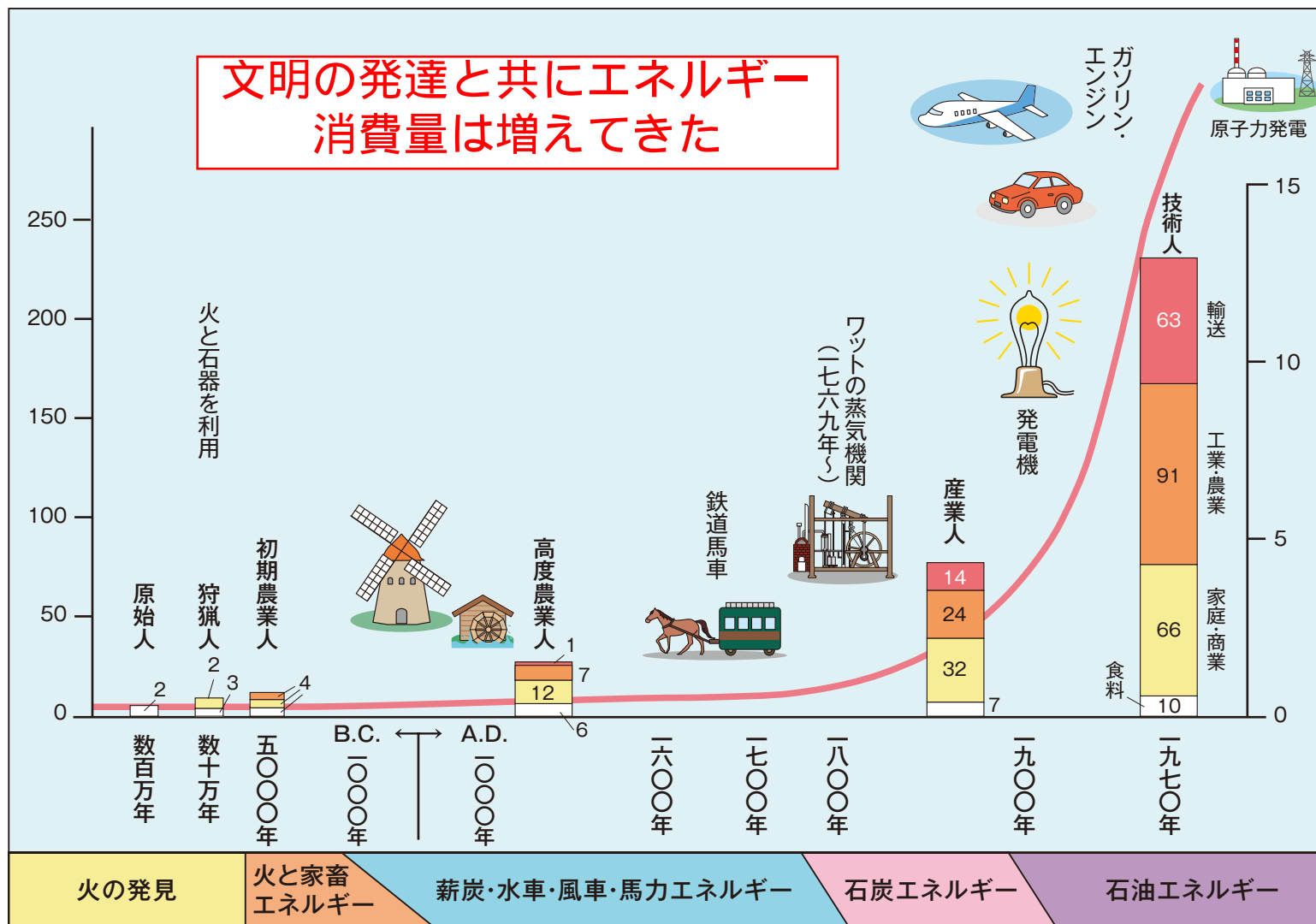
2017年 7月 6日  
初年次ゼミ講義

# 原子力エネルギーの利用

秋吉 優史

# 人類とエネルギーのかかわり

一人あたり消費量(二〇〇〇キロカロリー/日)・棒グラフ

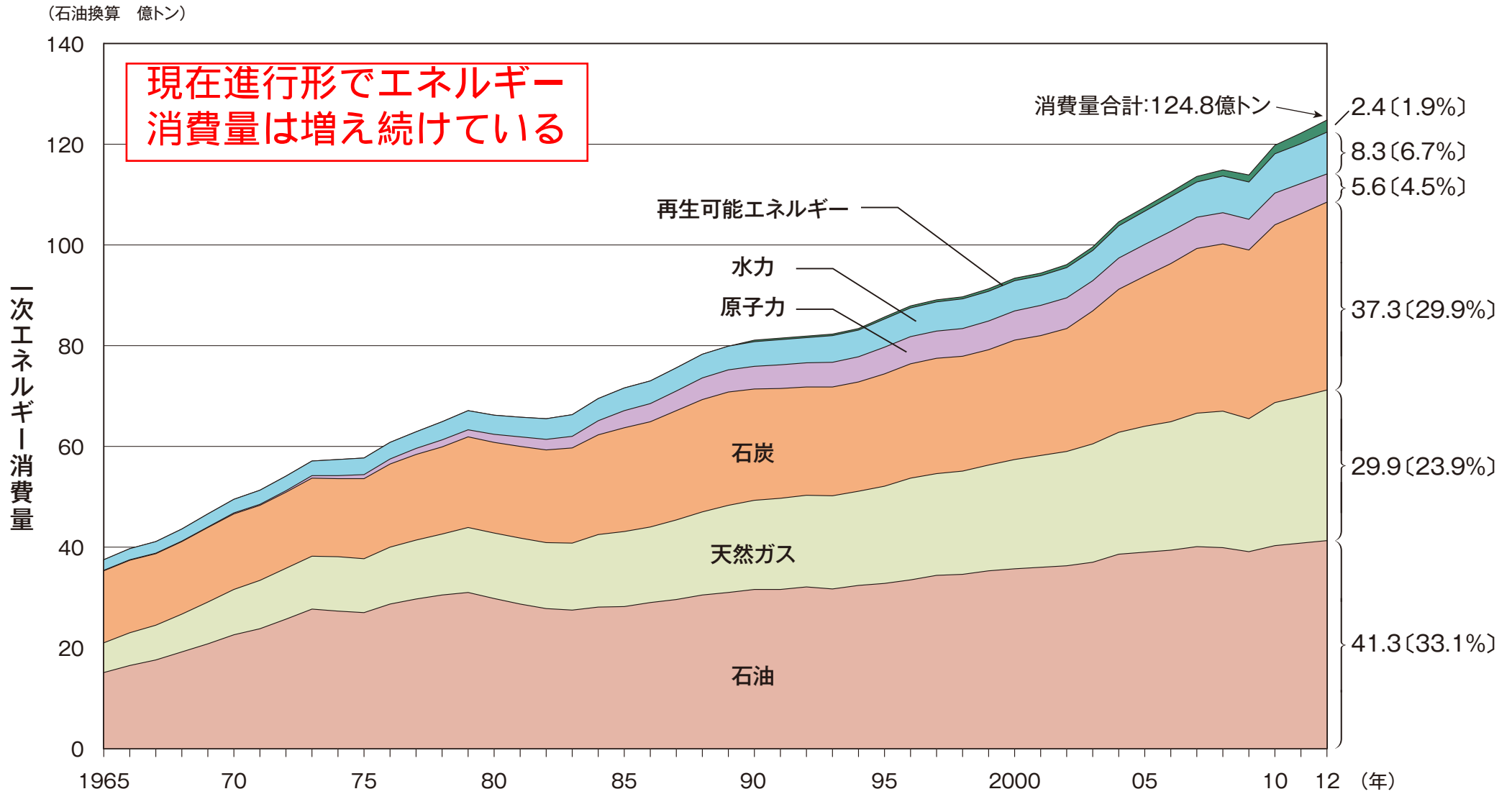


石油換算消費量(二〇〇万キロリットル/日)・曲線グラフ

原始人 百万年前の東アフリカ、食料のみ。  
 狩猟人 十万年前のヨーロッパ、暖房と料理に薪を燃やした。  
 初期農業人 B.C.5000年の肥沃三角州地帯、穀物を栽培し家畜のエネルギーを使った。

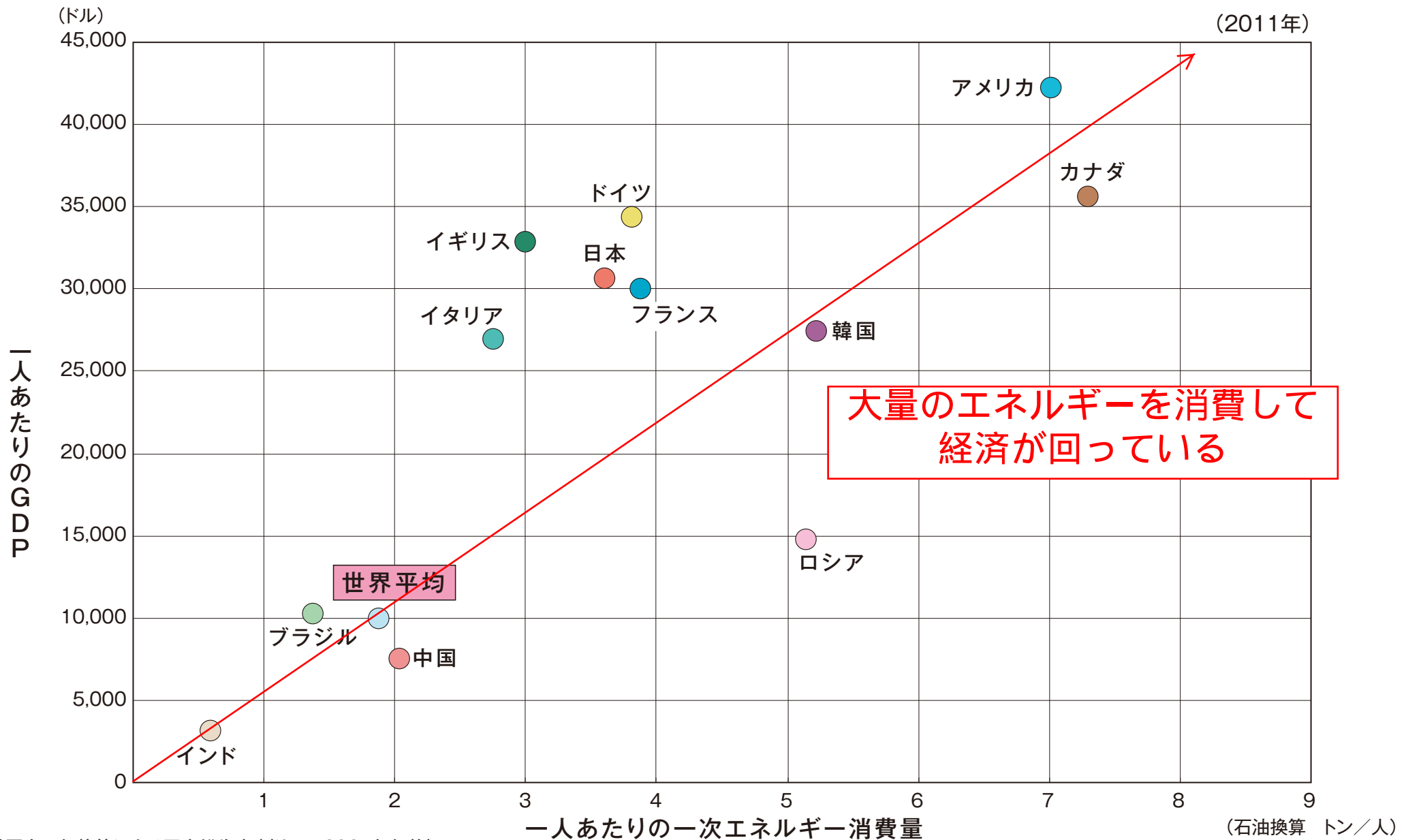
高度農業人 1400年の北西ヨーロッパ、暖房用石炭・水力・風力を使い、家畜を輸送に利用した。  
 産業人 1875年のイギリス、蒸気機関を使用していた。  
 技術人 1970年のアメリカ、電力を使用、食料は家畜用を含む。

# 世界の一次エネルギー消費量の推移



(注) 四捨五入の関係で合計値が合わない場合がある  
〔 〕内は全体に占める割合

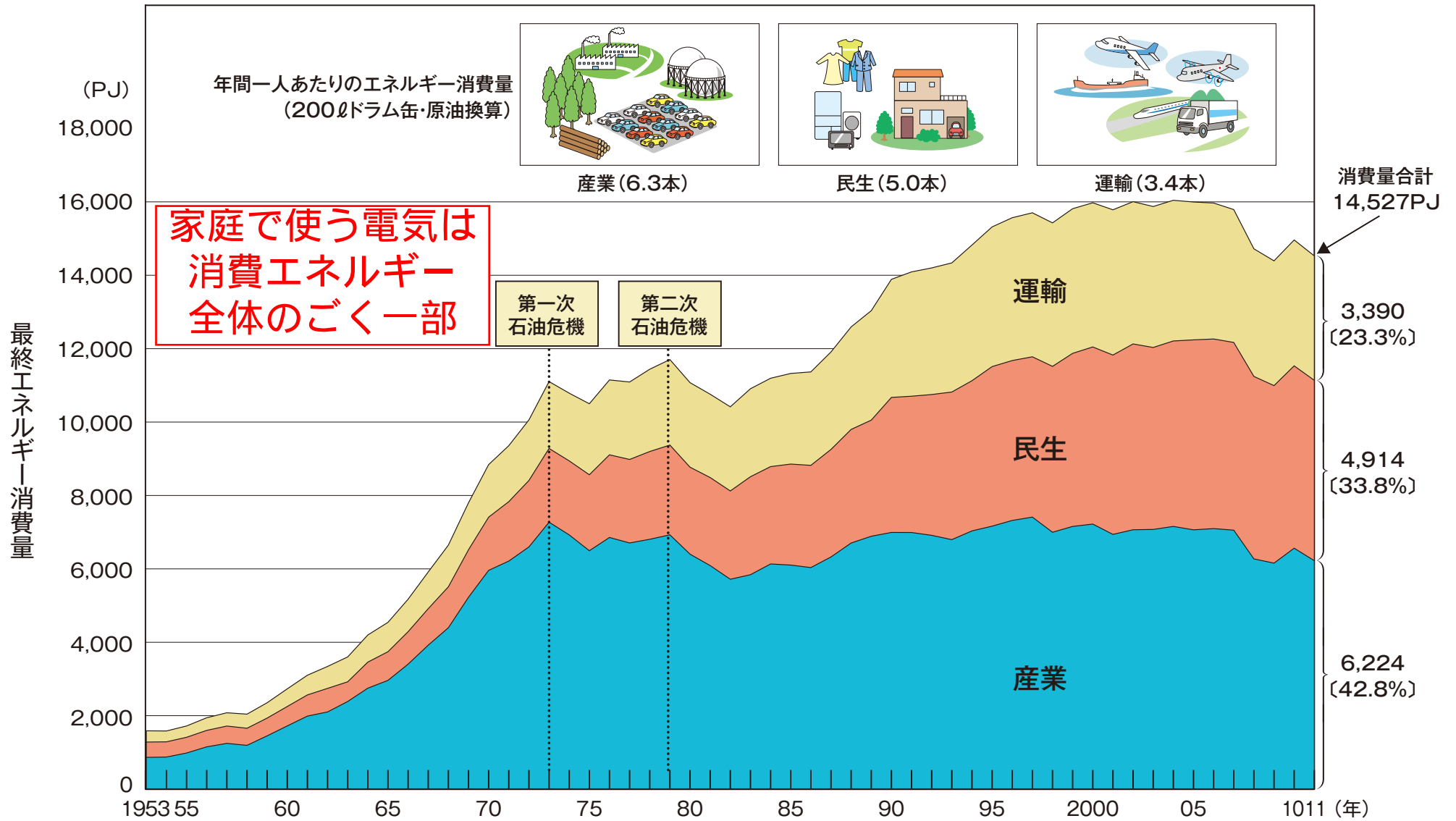
# 一人あたりのGDPと一次エネルギー消費量



(注) 購買力平価換算による国内総生産 (米ドル、2005年価格)

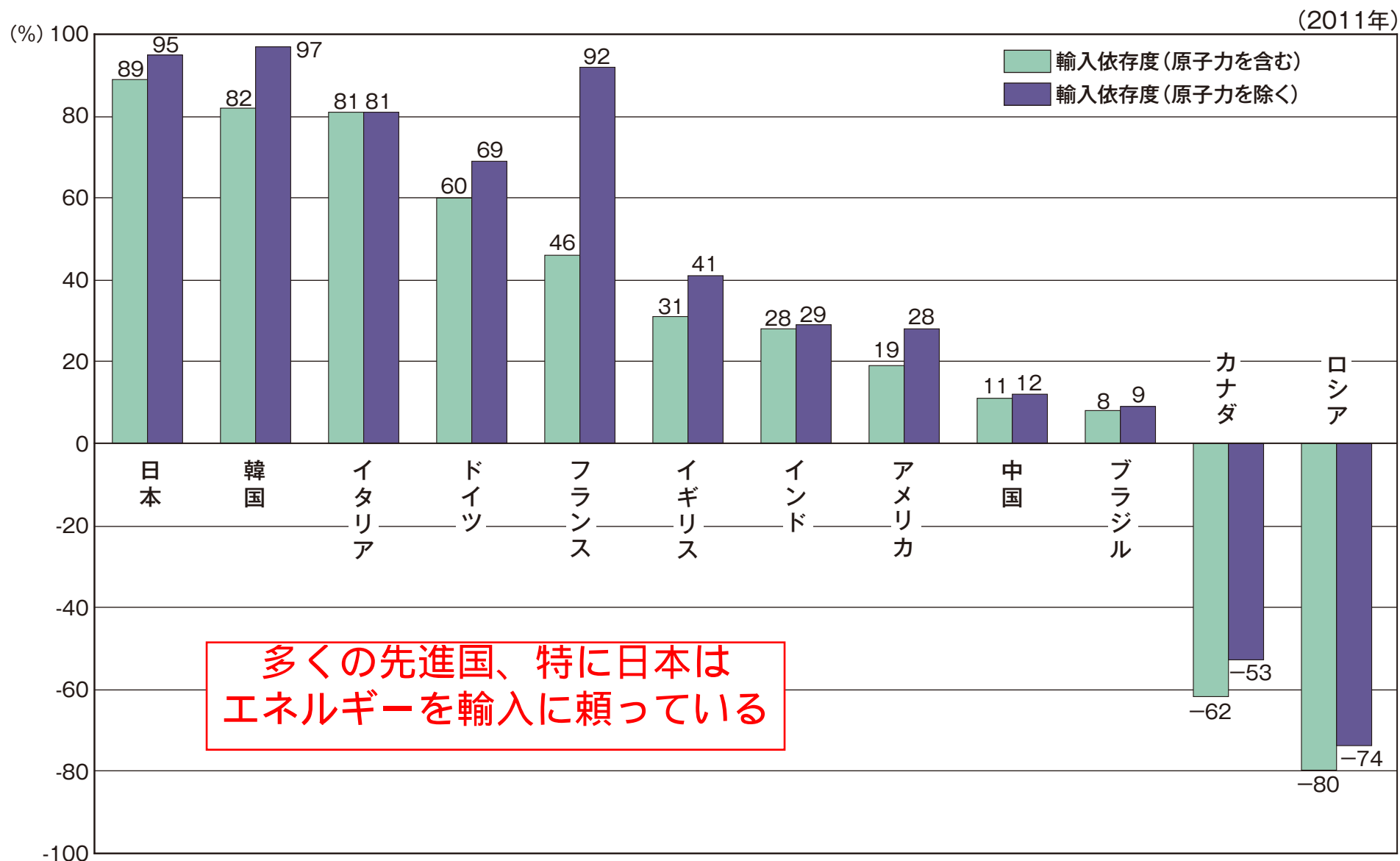


# エネルギーの使われ方



(注) 四捨五入の関係で合計値が合わない場合がある  
 1PJ(=10<sup>15</sup>J)は原油約25,800kℓの熱量に相当(PJ:ペタジュール)  
 [ ]内は全体に占める割合

# 主要国のエネルギー輸入依存度



(注) 下向きのグラフは輸出していることを表す

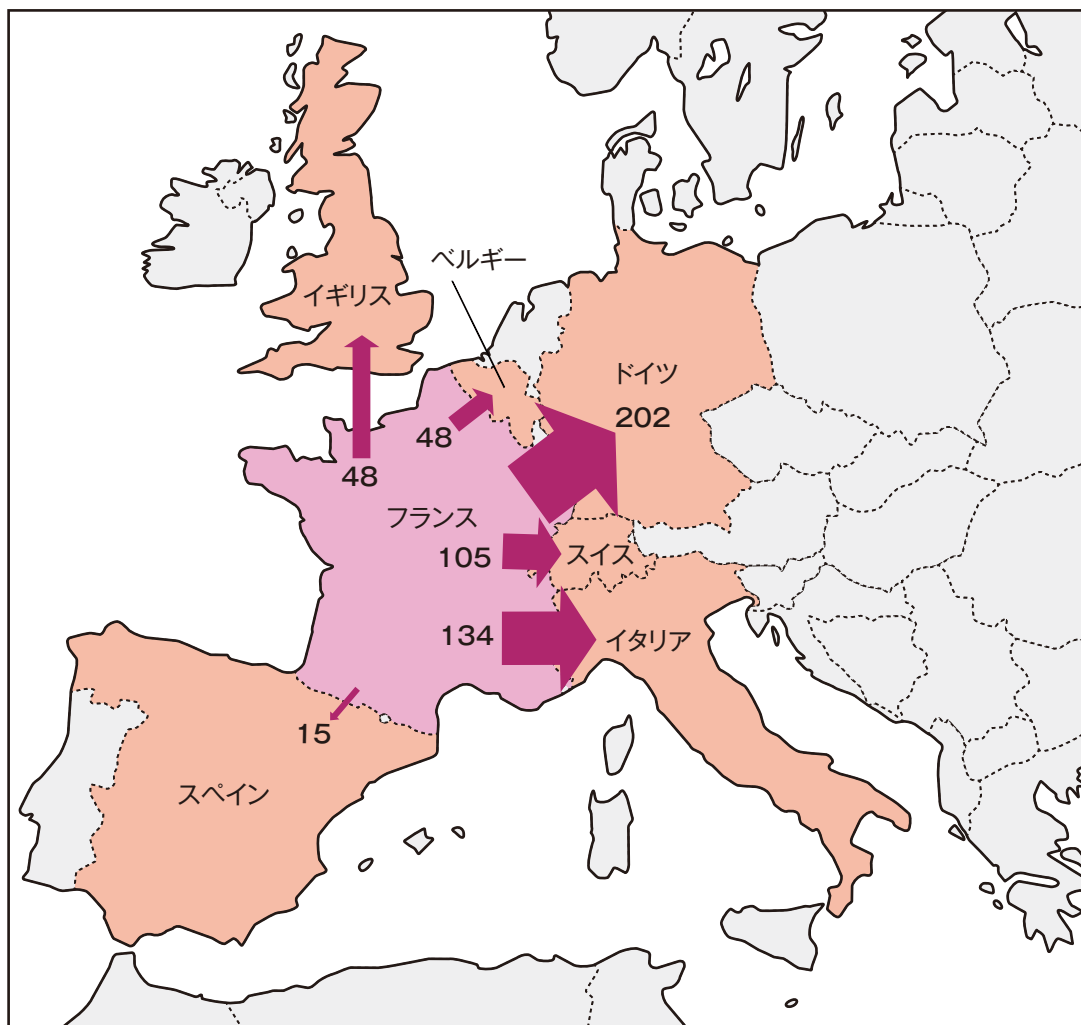
# ヨーロッパにおける天然ガスのパイプライン網

ヨーロッパでは地続きのため  
パイプラインでガスを輸送



# フランスを中心とした電力の輸出入

(単位:億kWh)



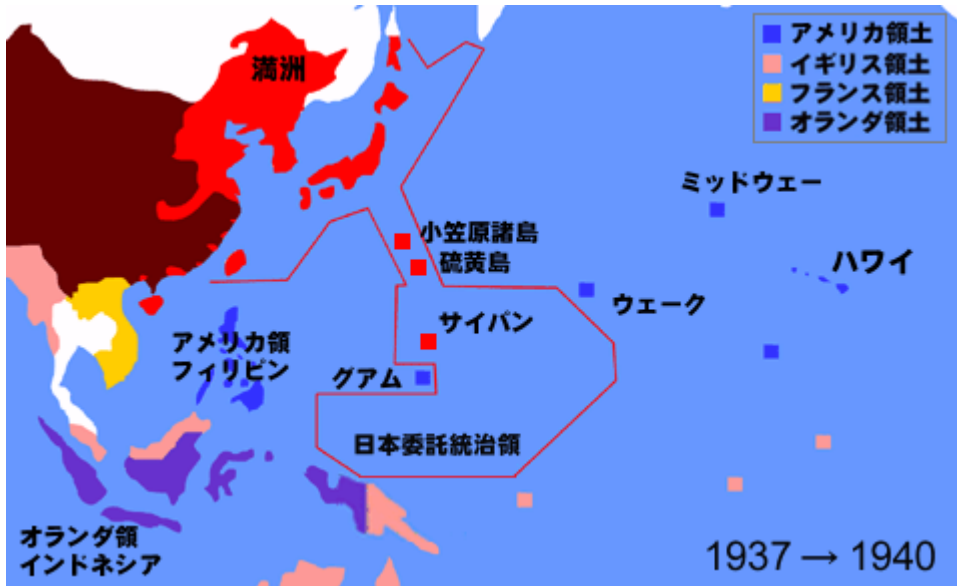
電力も国を超えて融通が可能  
(脱原発のドイツもフランスから輸入している)

(2011年)

フランスからの輸出電力量(A)	551億kWh
フランスの発電電力量(B) (送電端)	5,430億kWh
輸出比率(A/B)	10%

(注)四捨五入の関係で合計値が合わない場合がある

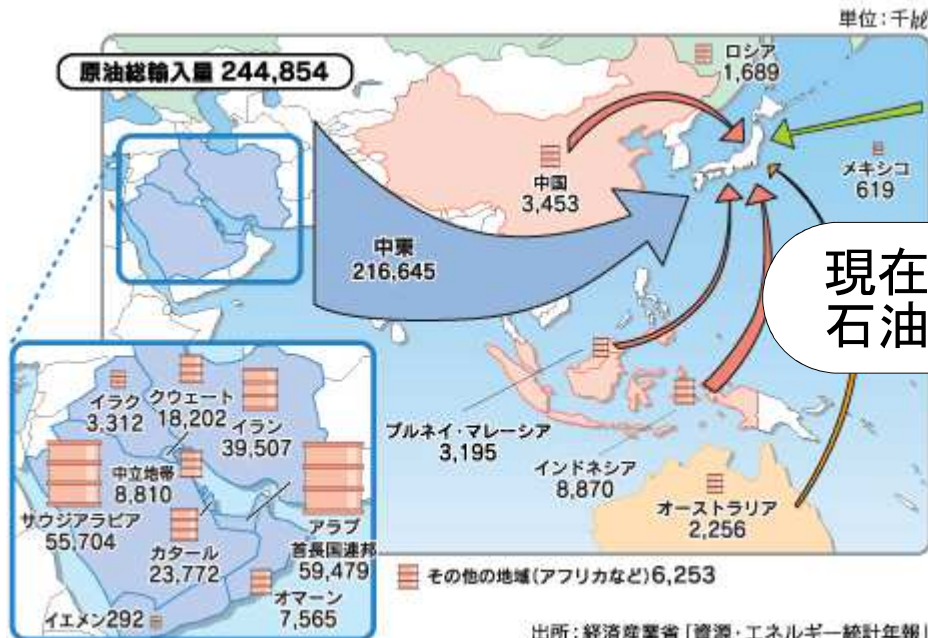
# エネルギー安全保障



## ABCD包囲網

太平洋戦争は様々な世界情勢の結果として起きてしまいましたが、日本にとって開戦を決断する決定的な理由の一つに、ABCD包囲網による「石油の禁輸」が上げられます。その頃既に石油が無くなれば国としてたち行かなくなることは明らかでした。（この頃はまだ中東の油田は開発されていません）

**人類はエネルギーを奪い合って戦争すら起こしてきた**



現在はほとんどの石油を中東に依存

政情が不安定で戦争などの危険性

## 中東からの日本への石油の海上輸送路

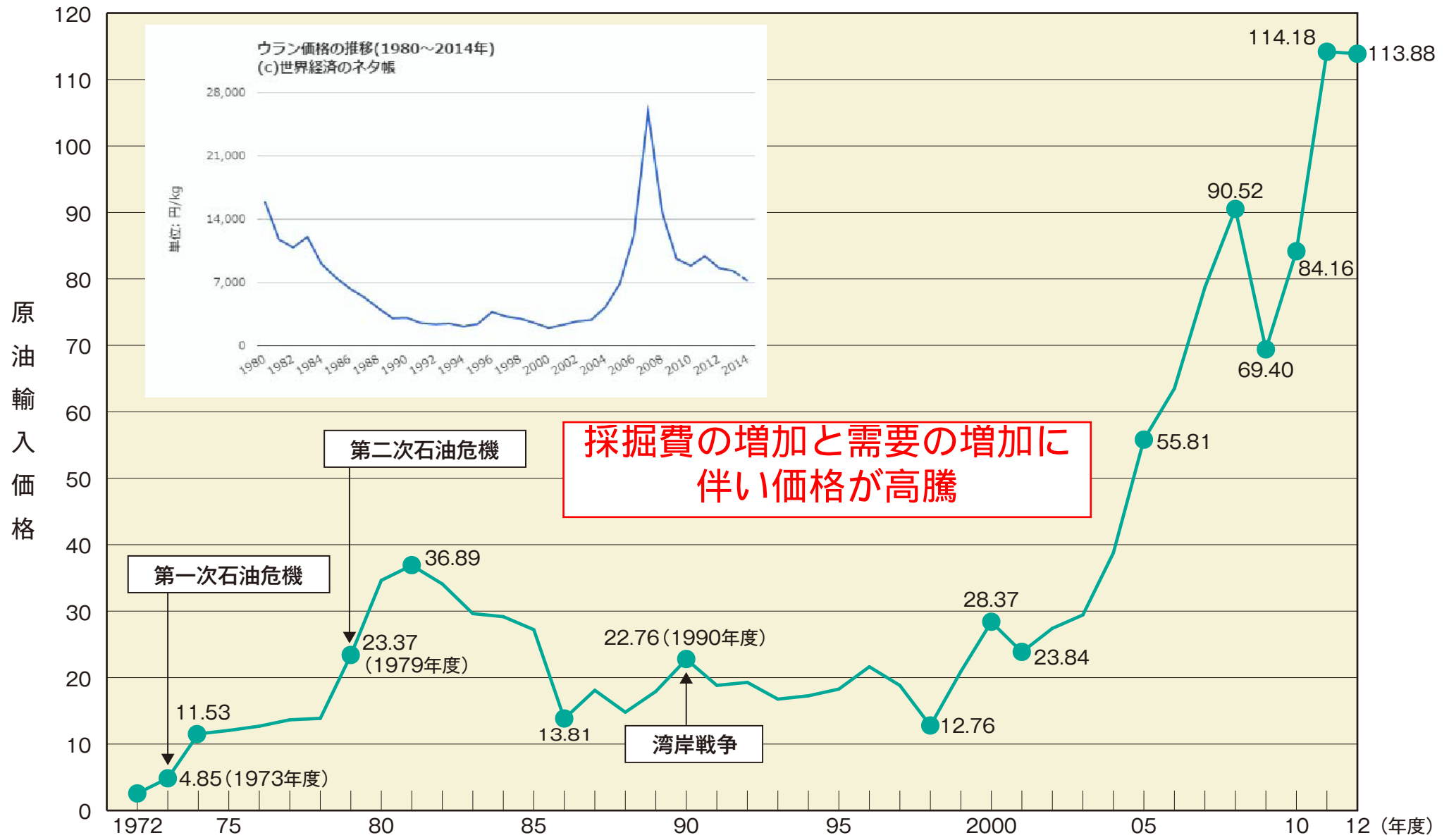
### 輸送経路の危険性



出典：資源エネルギー庁資料「石油輸送に関する現状について」他より作成

# 原油輸入価格の推移

(ドル／バーレル)



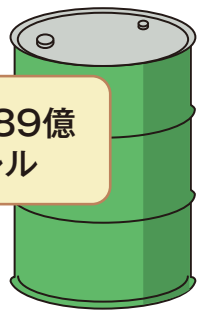
# 世界のエネルギー資源確認埋蔵量

オイルショックの頃にもあと  
50年と言っていたのでは・・・

価格が高騰するとより条件の悪い  
鉱山でも採算が合うようになる

53年

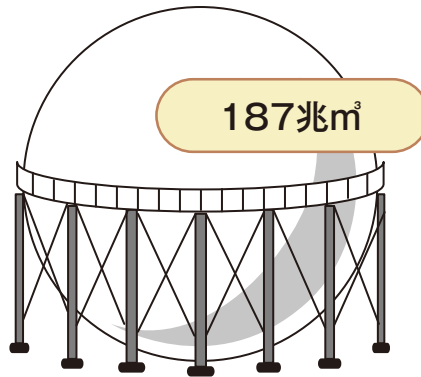
1兆6,689億  
バレル



石油※1  
(2012年末)

56年

187兆m<sup>3</sup>



天然ガス※1  
(2012年末)

109年

8,609億トン



石炭※1  
(2012年末)

93年

533万トン



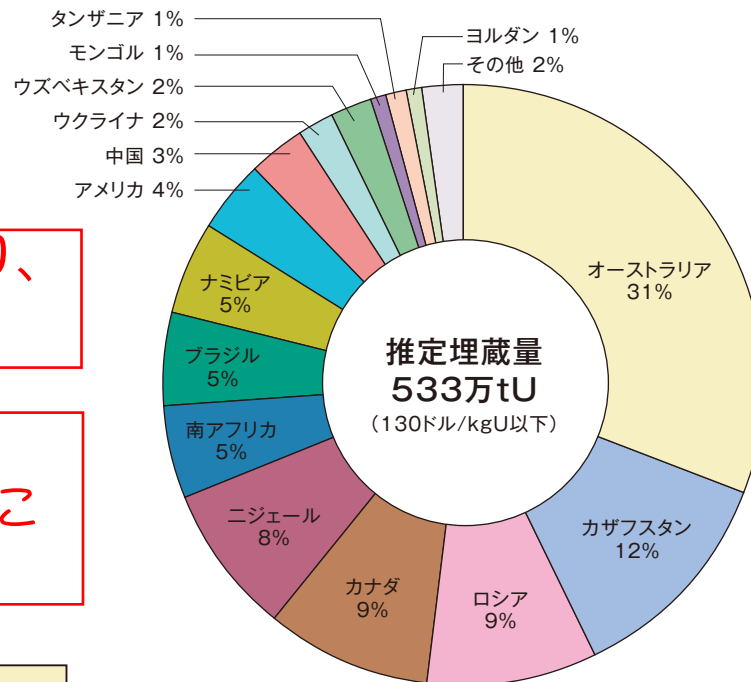
ウラン※2  
(2011年1月)

(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



# ウラン資源埋蔵量と確保状況

## ウラン資源埋蔵量



産出国が原油と大きく異なり、比較的広く分布している

ウラン自体は地殻の中でありふれた元素で花崗岩1tに11gも含まれている

海中には45億トンのウランが溶けている  
→ 数万円/gのコストが課題

## 日本のウラン購入契約状況

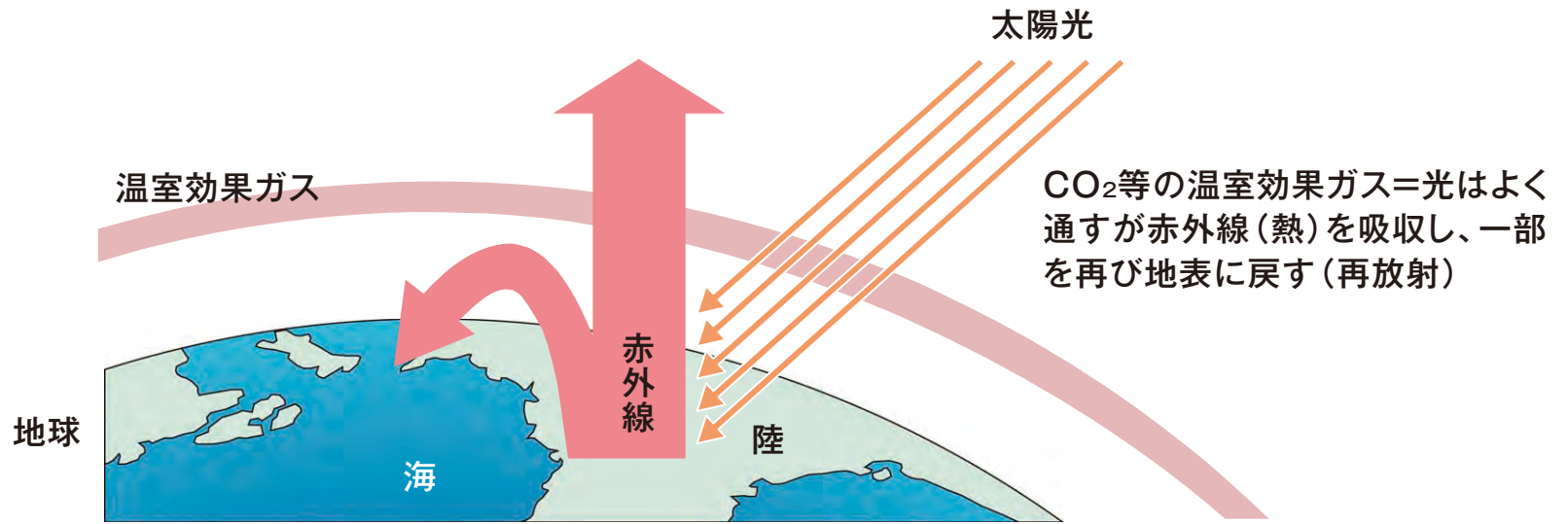
(2012年3月現在)

輸入契約形態	相手先国	契約数量 (U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> ショート・トン)
長期契約、短期契約および製品購入	カナダ、イギリス、南アフリカ、オーストラリア、フランス、アメリカ 等	約379,800
開発輸入分	ニジェール、カナダ、カザフスタン 等	約82,100
合 計		約461,900

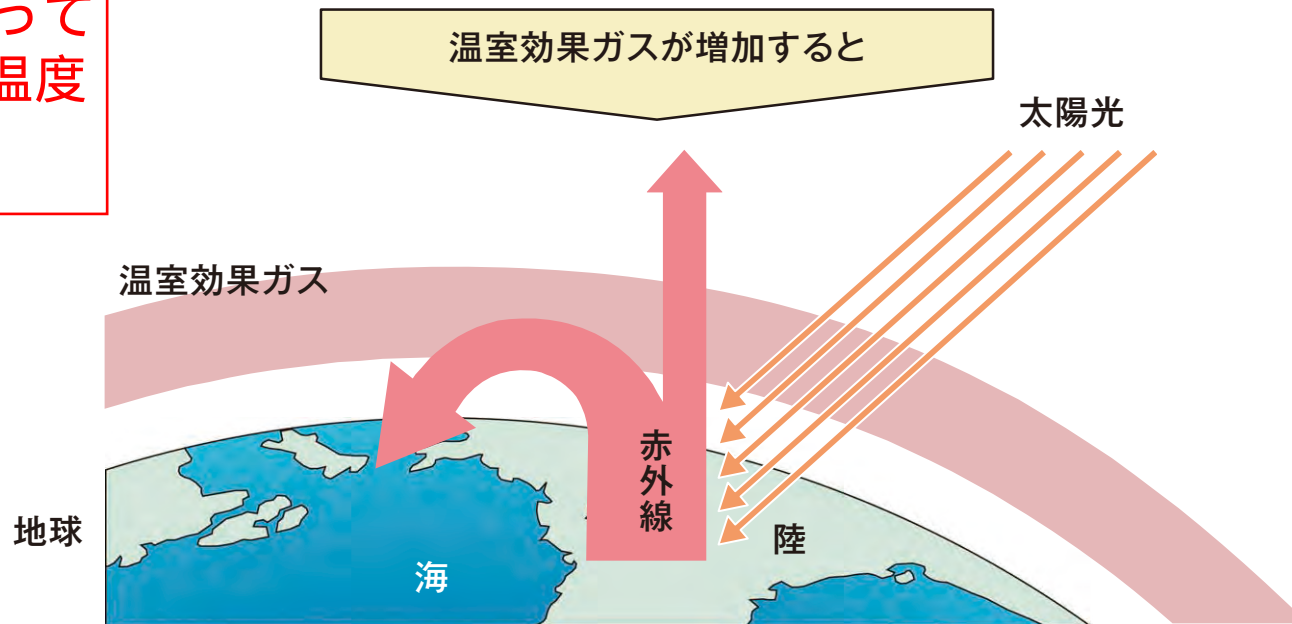
(注) 四捨五入の関係で合計値が合わない場合がある。tU:金属ウランでの重量トン  
1ショート・トン= 約0.907トン



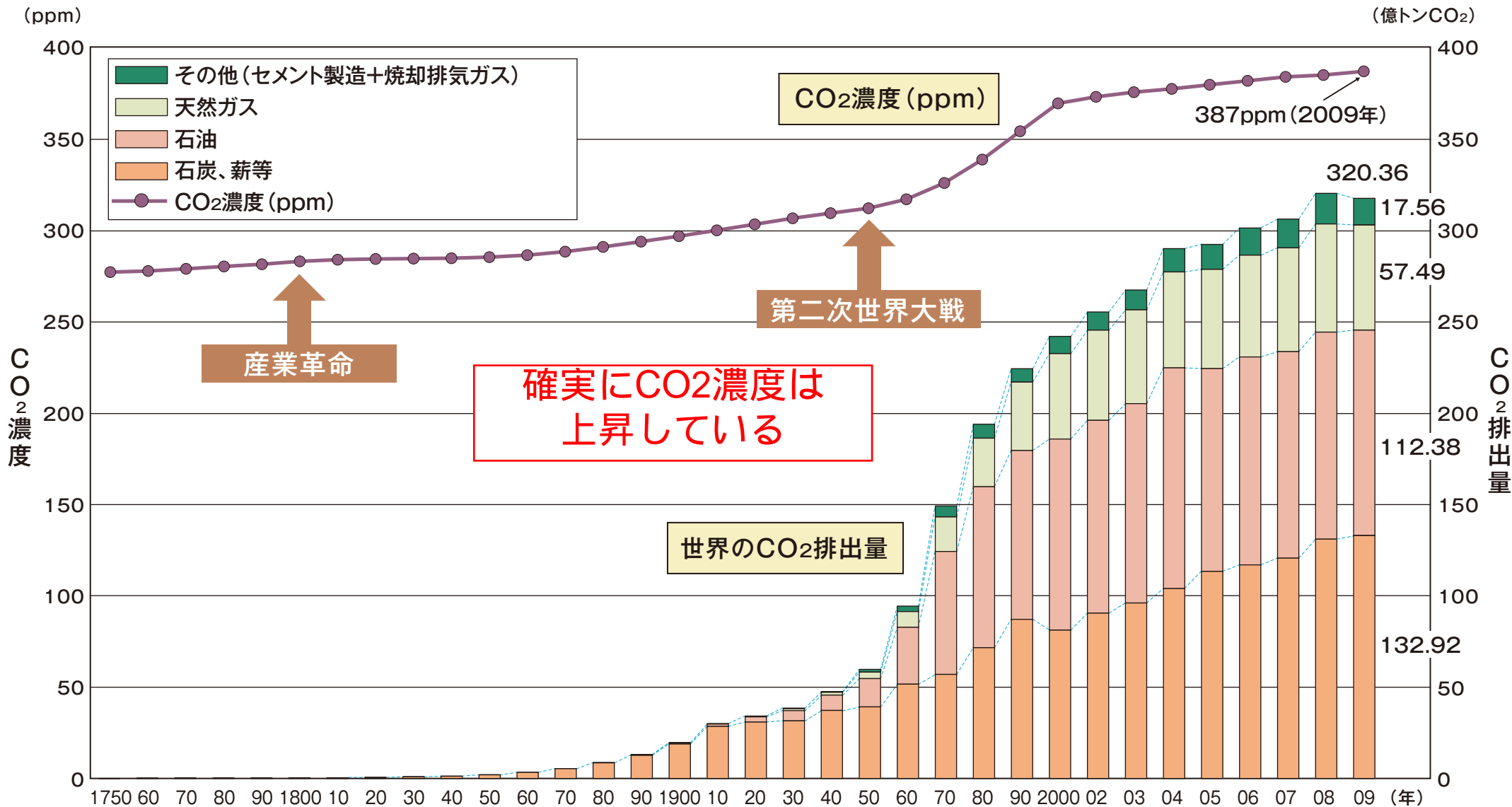
# 温室効果のしくみ



CO<sub>2</sub>の増加によって  
全地球的に地表温度  
が上昇する



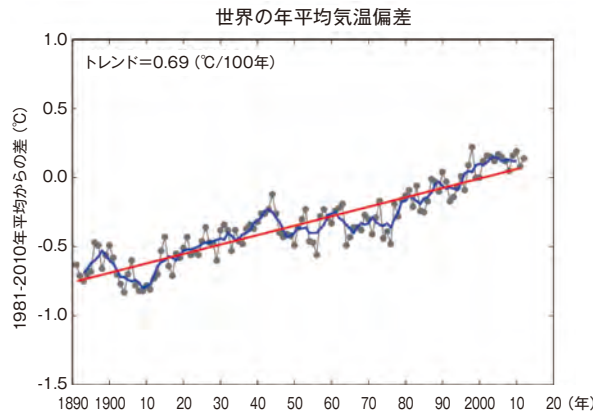
# 化石燃料等からのCO<sub>2</sub>排出量と大気中のCO<sub>2</sub>濃度の変化



(注) 四捨五入の関係で合計値が合わない場合がある

# 平均気温の変化

## 世界の年平均気温の偏差 (1891~2013年)



折線(黒) : 各年の基準値からの偏差 (1981~2010年平均からの差)  
(2013年は偏差+0.2°C)

折線(青) : 偏差の5年移動平均

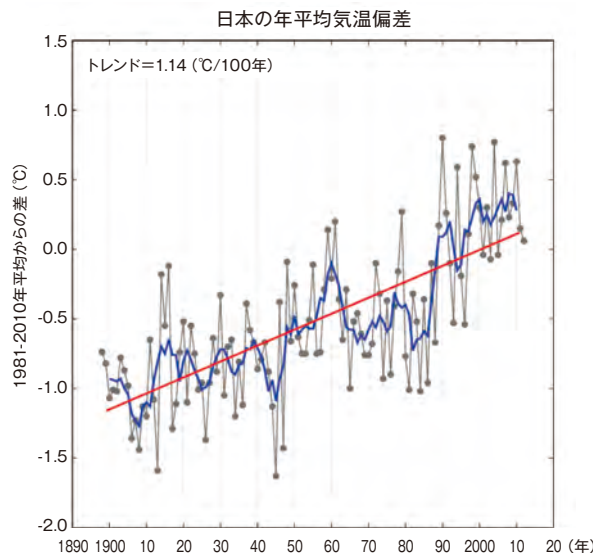
直線(赤) : 長期的な変化傾向  
(100年あたり約0.69°Cの割合で上昇)

基準値は1981~2010年の30年平均値

年による変動もあるが確実に  
平均気温は上昇している

気温だけでなく降雨量の増加、  
台風の大型化などの要因となる

## 日本の年平均気温の偏差 (1898~2013年)



折線(黒) : 国内17観測地点※での基準値からの偏差  
(2013年は平均差+0.34°C)

折線(青) : 偏差の5年移動平均

直線(赤) : 長期的な変化傾向  
(100年あたり約1.14°Cの割合で上昇)

基準値は1981~2010年の30年平均値

※17観測地点: 網走、根室、寿都、山形、石巻、伏木、長野、水戸、飯田、銚子、境、浜田、彦根、多度津、宮崎、名瀬、石垣島

長期的には寒冷化の可能性もあるが、  
ツンドラが融けてメタン  
ガスが放出され始めると破滅的  
(温室効果 メタン > CO2)

# 新エネルギーの評価と課題

## エネルギー密度の低さと出力変動が難点

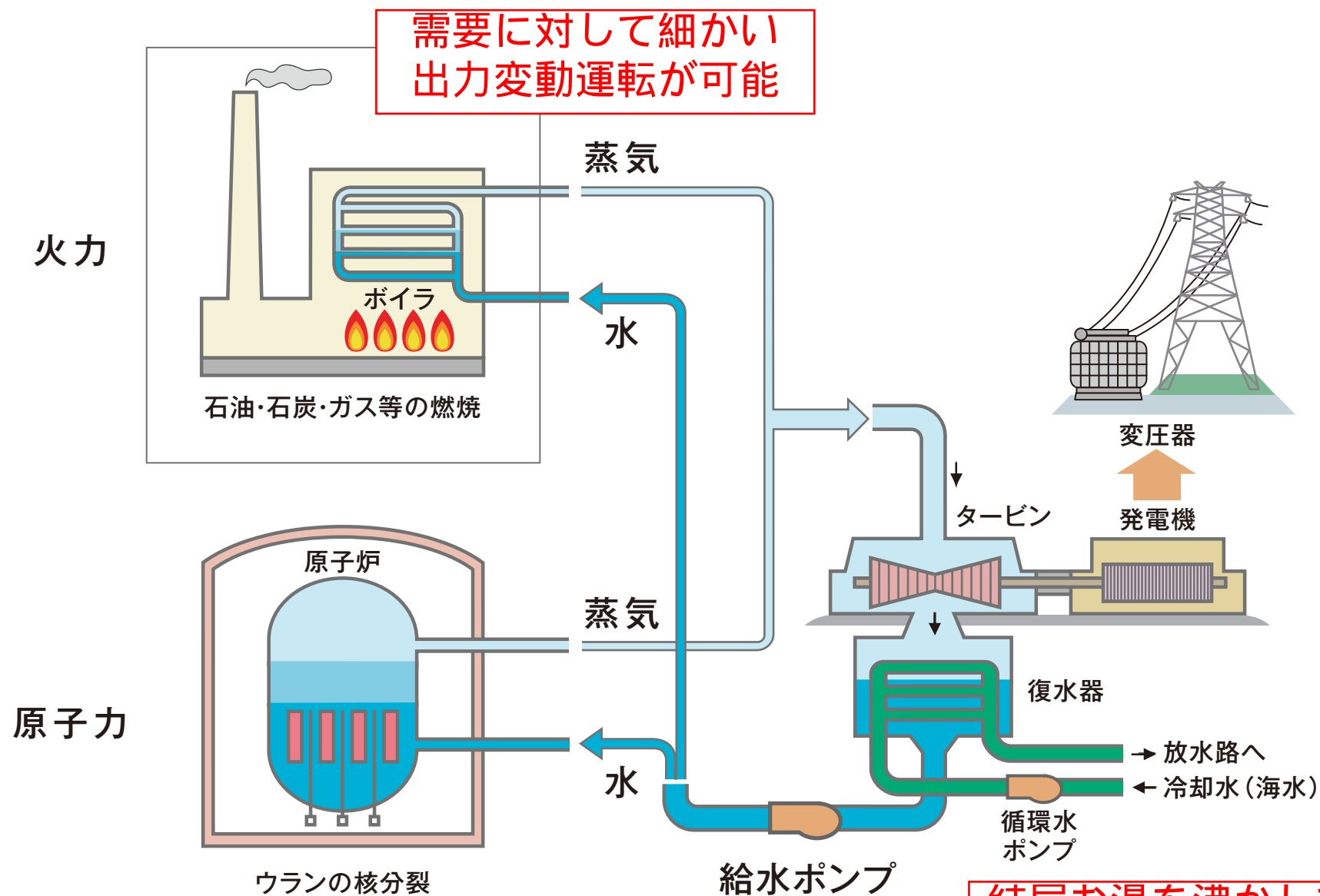
	太陽光発電	風力発電	廃棄物発電(バイオマス発電を含む)
メリット	<ul style="list-style-type: none"> <li>○枯渇する心配がない</li> <li>○発電時にCO<sub>2</sub>等を出さない</li> <li>○需要地に近いため送電ロスがない</li> <li>○需要の多い昼間に発電</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○枯渇する心配がない</li> <li>○発電時にCO<sub>2</sub>等を出さない</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○発電に伴う追加的なCO<sub>2</sub>の発生がない</li> <li>○新エネルギーの中では連続的に得られる安定電源</li> </ul>
デメリット	<ul style="list-style-type: none"> <li>○エネルギー密度*1が低く、火力・原子力と同じ電力量を得ようとすると広大な面積が必要</li> <li>○夜間は発電できず、さらに雨、曇りの日は発電出力が低下し不安定</li> <li>○設備にかかるコストが高い</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○エネルギー密度が*1低く、火力・原子力と同じ電力量を得ようとすると広大な面積が必要</li> <li>○風向き・風速に時間的・季節的変動があり、発電が不安定</li> <li>○風車の回転時に騒音が発生</li> <li>○風況の良い地点が偏在</li> <li>○設備にかかるコストが高い</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○発電効率が低い</li> <li>○ダイオキシンの排出抑制対策や焼却灰の減量化等の更なる環境負荷低減が必要</li> </ul>
必要な敷地面積*2	100万kW級原子力発電所1基分を代替する場合		大阪環状線内側は30km <sup>2</sup>
	約58km <sup>2</sup> 山手線の面積とほぼ同じ	約214km <sup>2</sup> 山手線の面積の約3.4倍	
設備利用率	12%	20%	

※1 エネルギー密度:単位面積あたりでどれくらい発電できるかを表す数値

※2 第1回低炭素電力供給システム研究会(平成20年7月)

電力は貯蔵が利かず、需要と供給量をぴったり一致させる  
系統制御が非常に大変

# 火力発電と原子力発電の違い

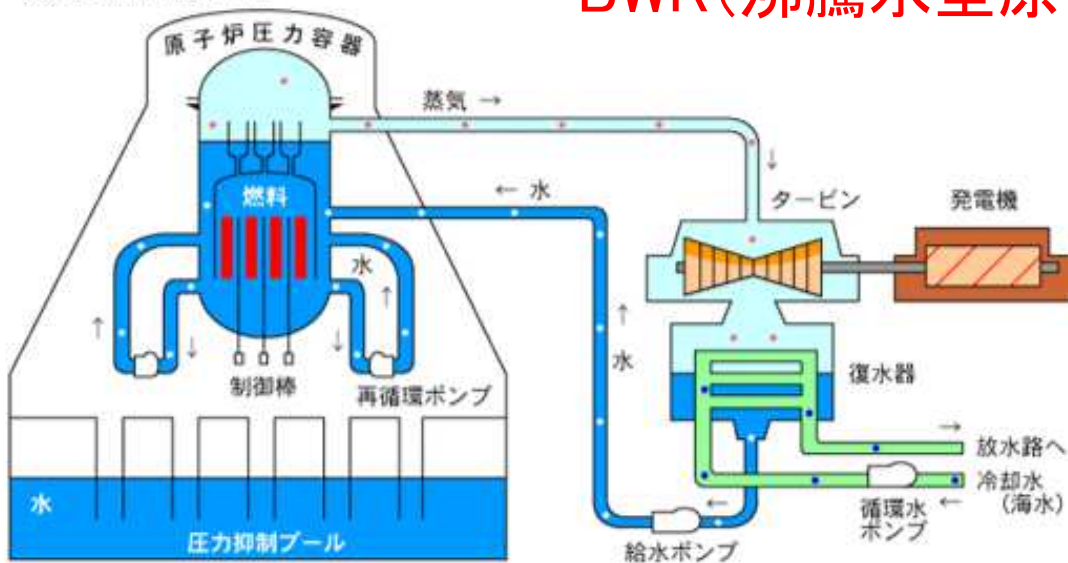


核分裂生成物の挙動などのため細かい出力変動は苦手

結局お湯を沸かしているという点はどちらも同じ

# BWR と PWR の比較

原子炉格納容器



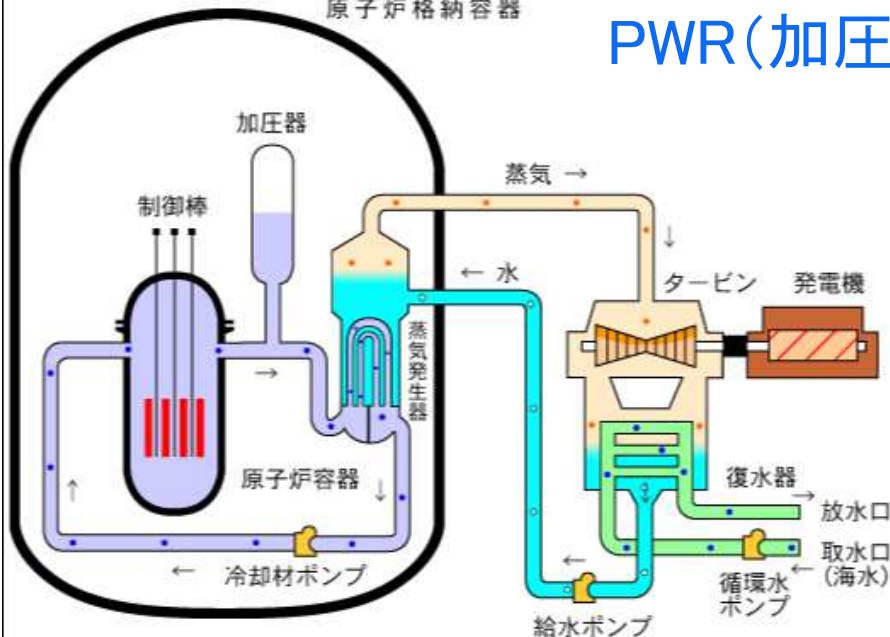
BWR(沸騰水型原子炉)

直接蒸気を取り出す→  
蒸気発生器が不要で  
構造がシンプル

東日本で主流。世界シェア 17%

一長一短でどちらが優れて  
いる、というわけではない

原子炉格納容器



PWR(加圧水型原子炉)

高温高圧水を取り出し、  
蒸気発生器で蒸気を発生  
→復水器では2次系冷却水を冷やす。  
格納容器容積が大きく余裕がある

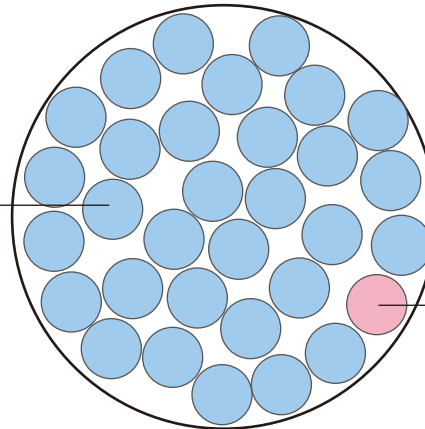
西日本で主流。世界シェア 72%

# 天然ウランと濃縮ウラン

天然ウラン

ウラン238  
99.3%

半減期45億年



半減期7億年

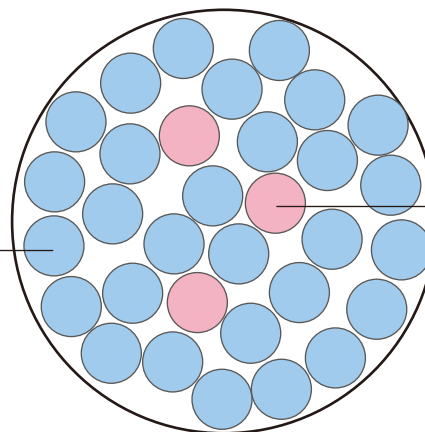
ウラン235  
0.7%

濃縮

軽水炉ではU-235の  
濃縮が必要

低濃縮ウラン

ウラン238  
95~97%

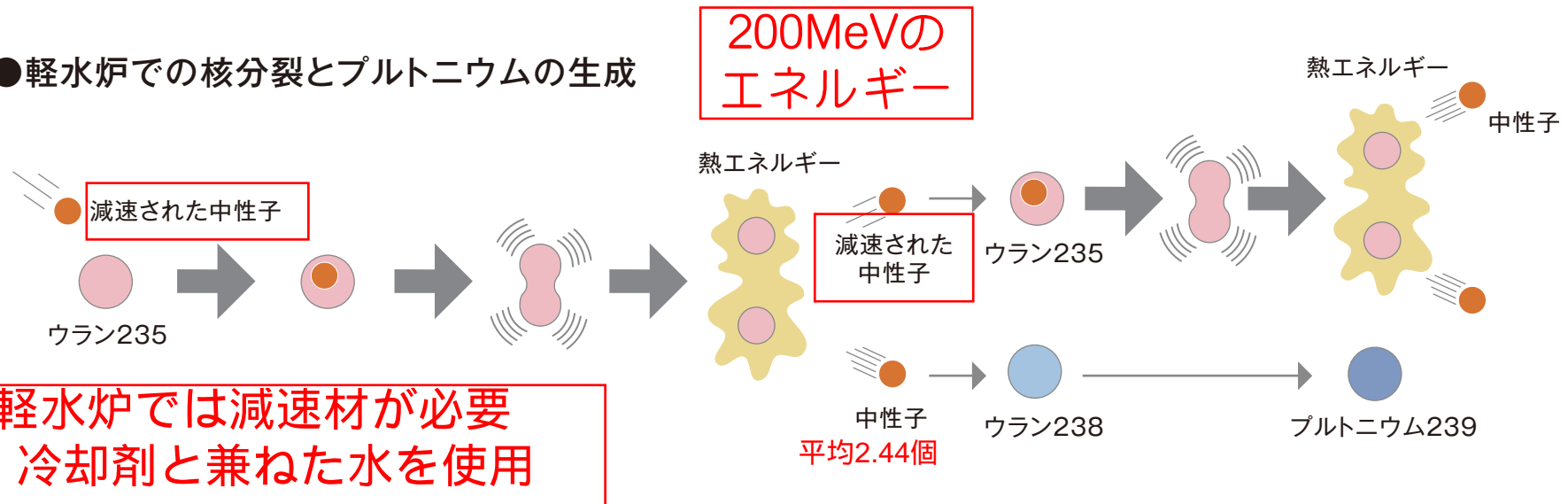


ウラン235  
3~5%

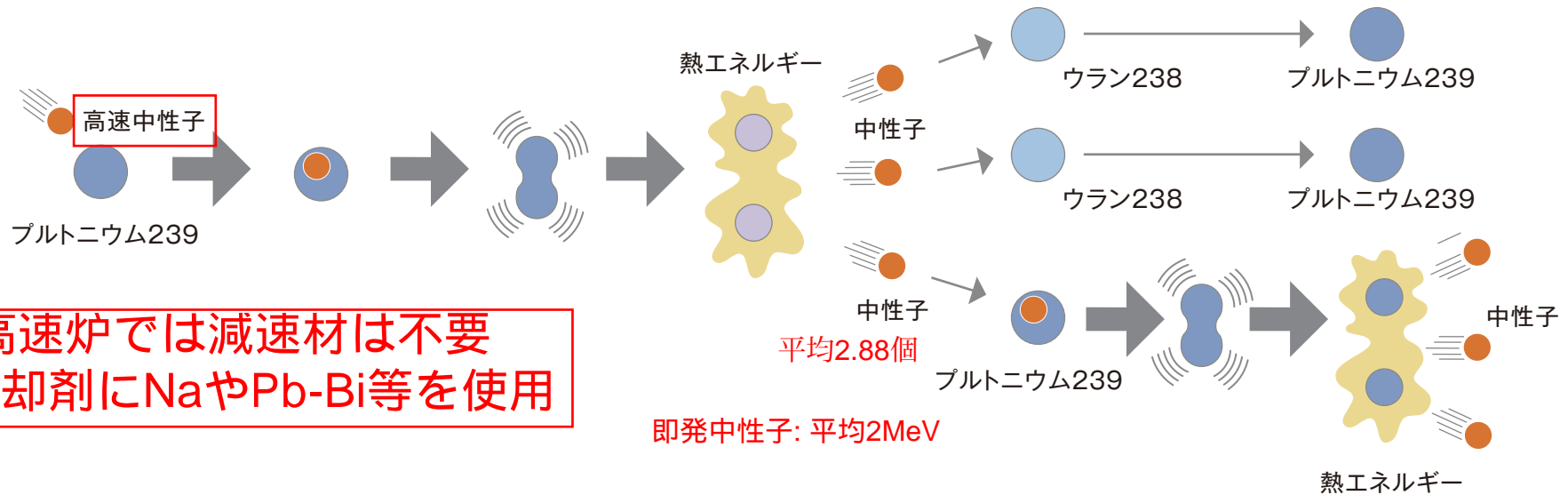


# ウランの核分裂とプルトニウムの生成・核分裂

## ●軽水炉での核分裂とプルトニウムの生成



## ●高速増殖炉での核分裂とプルトニウムの生成(増殖)





# 核分裂で生成するエネルギー

核分裂1回あたり: 200MeV

→ 1g の U-235 で 24,000kWh = 1MWd

2t の石油、2.9t の石炭に相当

一世帯での一日平均消費電力 10kWh

日本全体の消費電力  $10^{12}$  kWh/年

→  $2.7 \times 10^9$  kWh/day

発電効率

熱出力 → 1/3 → 電気出力

一日 340kg の U-235 で  
日本中の電力を補うことができる

燃料の初期装荷量

電気出力 100万kW の BWR: 130t  
PWR: 80t

3年で交換  
(実働1000日)

燃焼度

12.5GWd/t (電気出力)  
→ 37.5GWd/t (熱出力)

燃料棒被覆管の制約などで3年で交換しているが  
燃料自体はもっと長期間使用可能

高燃焼度化

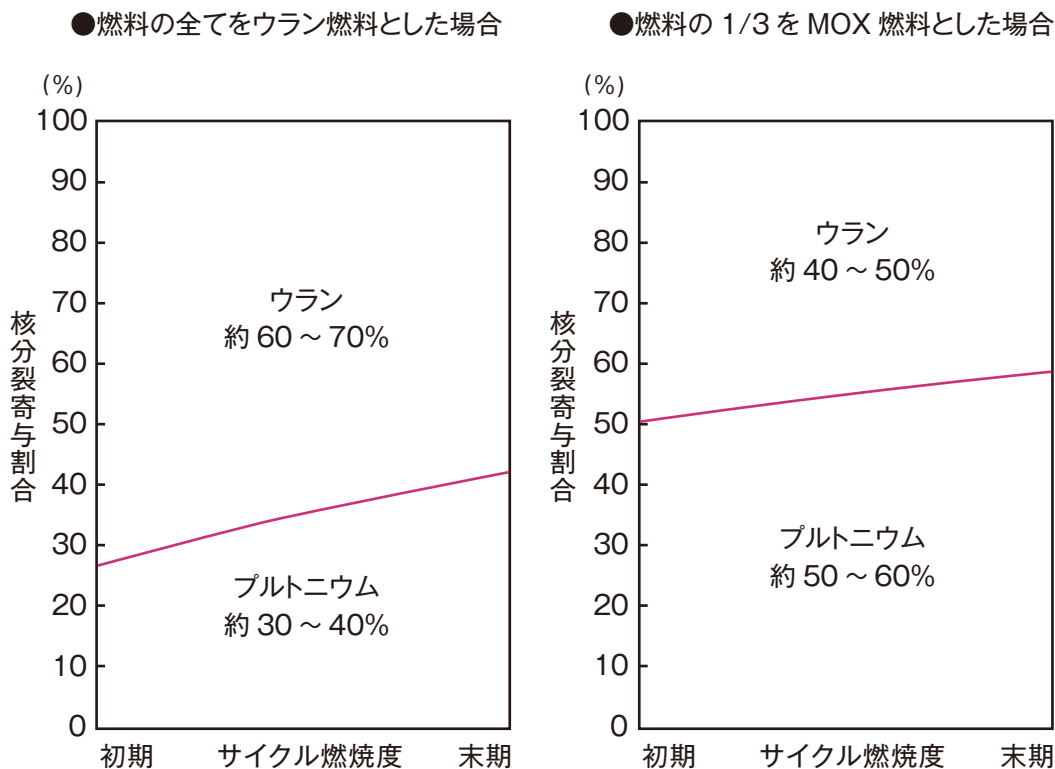
現在 55GWd/t が実用化

経済性の向上 → 材料開発の必要性

U-235 4% だと全量燃えても  
40GWd/t  
→ プルトニウムが燃える分

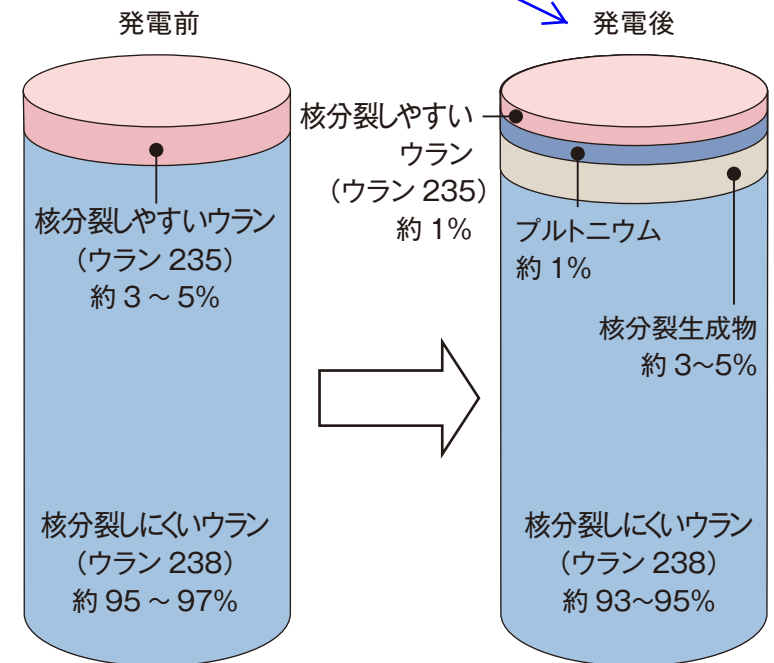
# 軽水炉内でのウラン燃料の燃焼による変化

## ① 炉心におけるウランとプルトニウム核分裂寄与割合 (BWR平衡炉心の例)



## ② 発電前後でのウラン燃料の変化 (例)

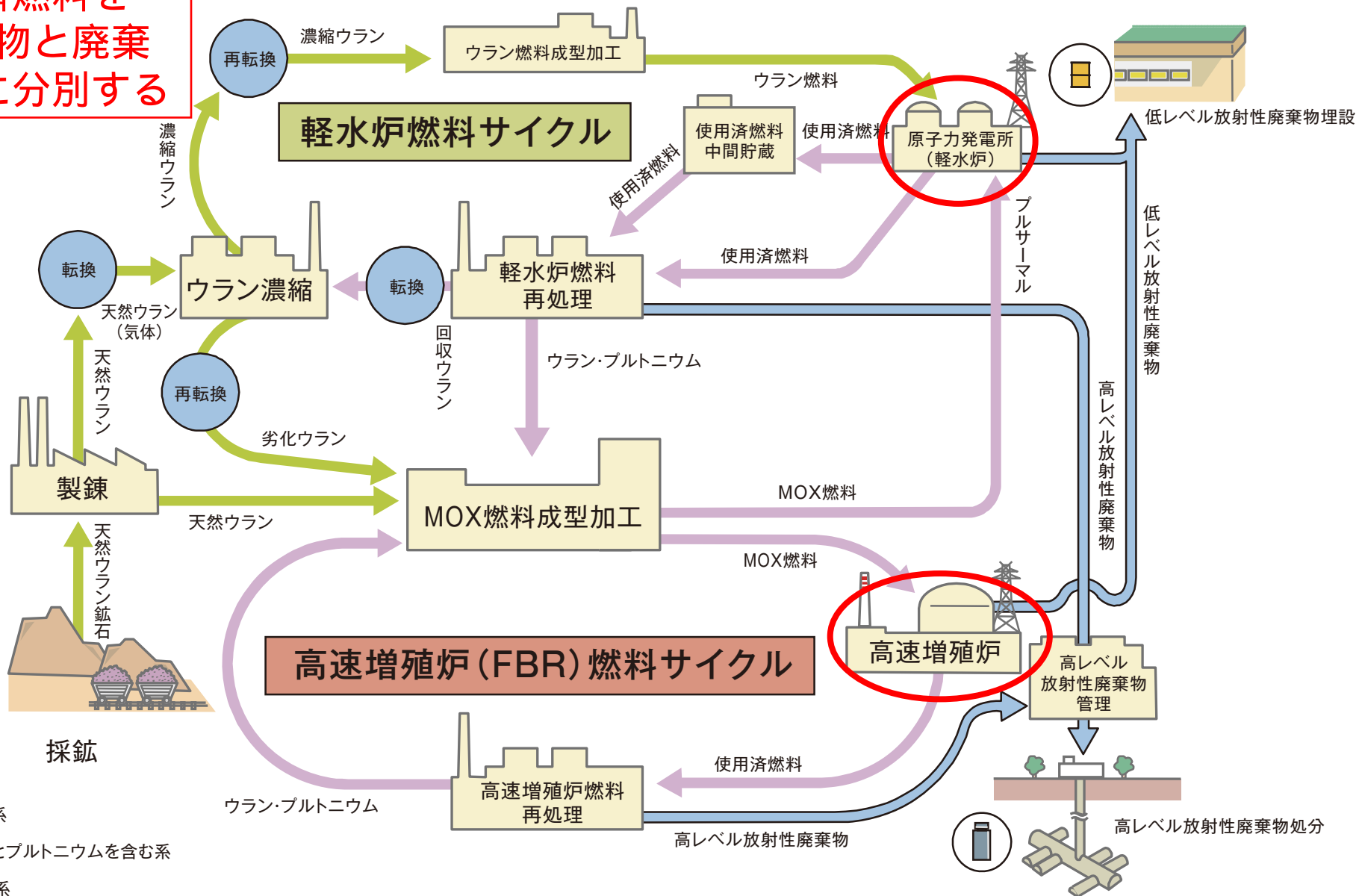
40GWd/t 程度  
3年で交換



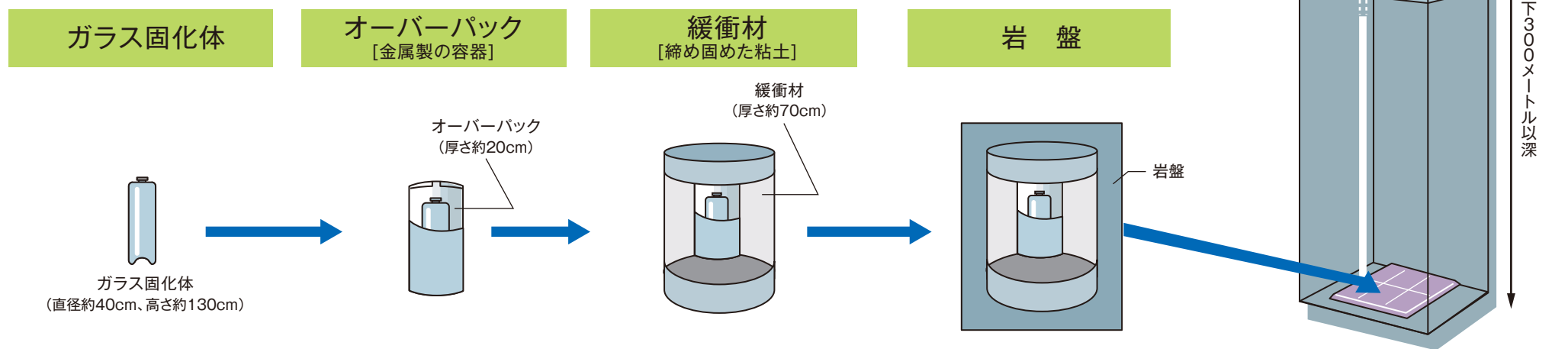
運転に伴ってU-235の割合が減り、Puが増加していく

# 原子燃料サイクル (FBRを含む)

使用済燃料を  
使える物と廃棄  
する物に分別する



# 高レベル放射性廃棄物多重バリアシステム



**放射性物質をガラスの中に閉じ込め地下水に溶け出しにくくする**

放射性物質はガラスと一体化した状態で閉じ込められる。

**地下水をガラス固化体に触れにくくする**

オーバーパックは、ガラス固化体の放射能がある程度減衰するまでの期間、地下水とガラス固化体の接触を防ぐ。

**地下水と放射性物質の移動を遅らせる**

緩衝材は、水を通しにくく、物質の移動を抑制するなどの特性を有するベントナイトという粘土を主成分としている。

**放射性物質の移動を遅らせる**

深い地下にある岩盤では、地下水の動きが極めて遅く、放射性物質は岩盤にしみ込んだり、吸着されたりすることで、その移動がさらに遅くなる。

**地層処分施設**

地下300mよりも深いところに処分することで、放射性物質が溶け出したとしても、私たちの生活環境にもたらされるにはきわめて長い時間を要し、それによる放射線は私たちが日常生活の中で受けている放射線に比べて十分に低く、人間の健康に影響を及ぼすことはない。

**人工バリア + 天然バリア = 多重バリアシステム**

処分後1000年で人工バリアは消失してしまうことを想定して安全評価

地下水に溶ける量は核種の溶解度に依存し、飽和溶解度以上は溶けない