

# 今後のエネルギー情勢と技術選択

---

平成15年10月24日

筑波大学 内山洋司

# 発表内容

---

エネルギー供給の基本要件

超長期のエネルギー需給

最近のエネルギー情勢

今後のエネルギー技術の選択

## エネルギー供給の三要件



# エネルギー資源

---

化石燃料

原子力

再生可能エネルギー

# 入手しやすさ

化石燃料

資源は豊富、コストも安価

供給途絶不安がある(特に石油)

原子力

資源は豊富、コストも安価

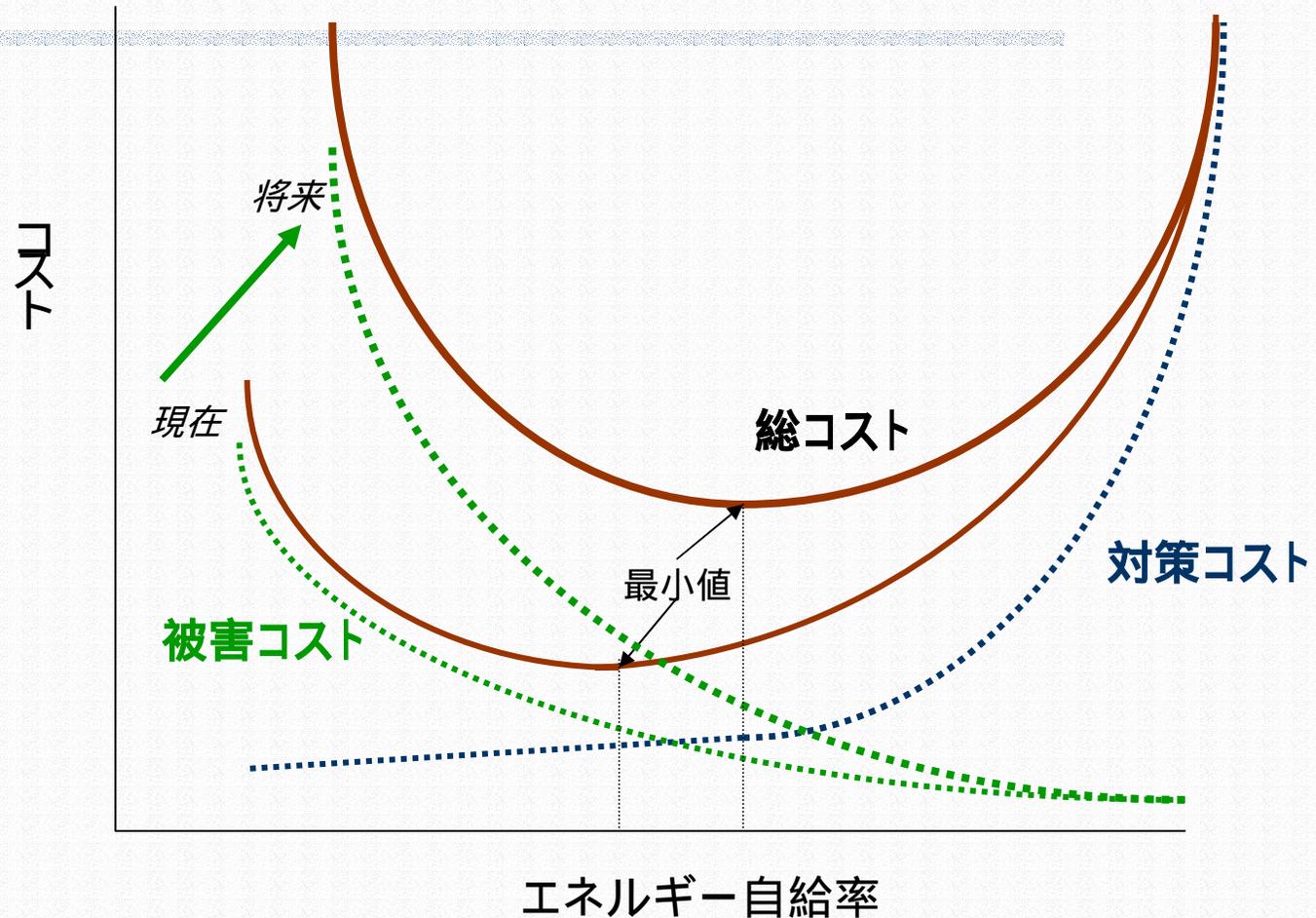
プルトニウムは準国産エネルギー

再生可能エネルギー

資源は潜在的に豊富で供給途絶もない

地域的に偏在しコスト高

# セキュリティ(入手しやすさ)と費用関数



# 使いやすさ

## 化石燃料

### 燃料の取り扱い

電気：信頼性(停電不安がない)と質(電圧と周波数に変動がない)は高い

## 原子力

### 核燃料サイクルの整備

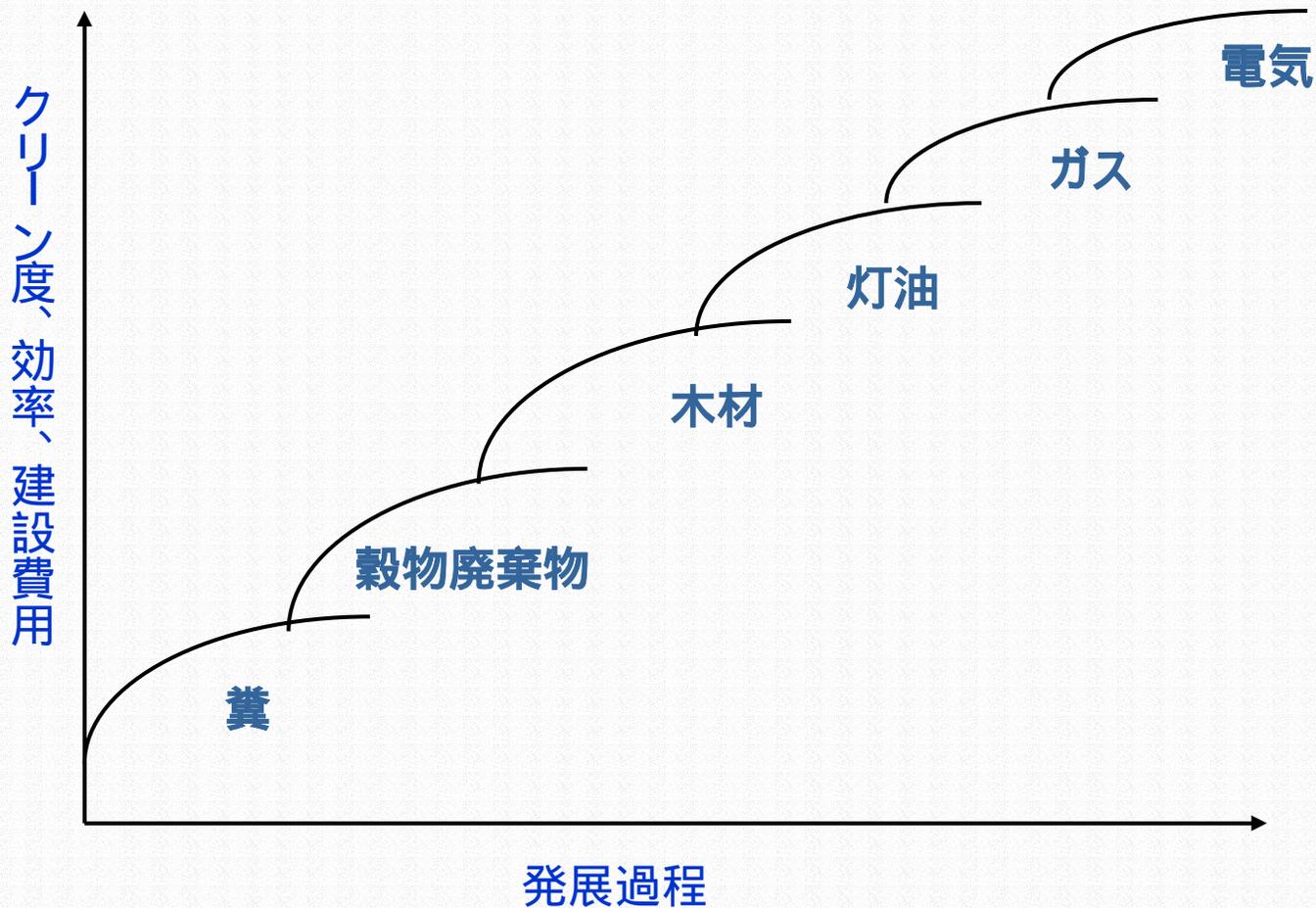
電気：信頼性と質は高い

## 再生可能エネルギー(主に太陽光と風力)

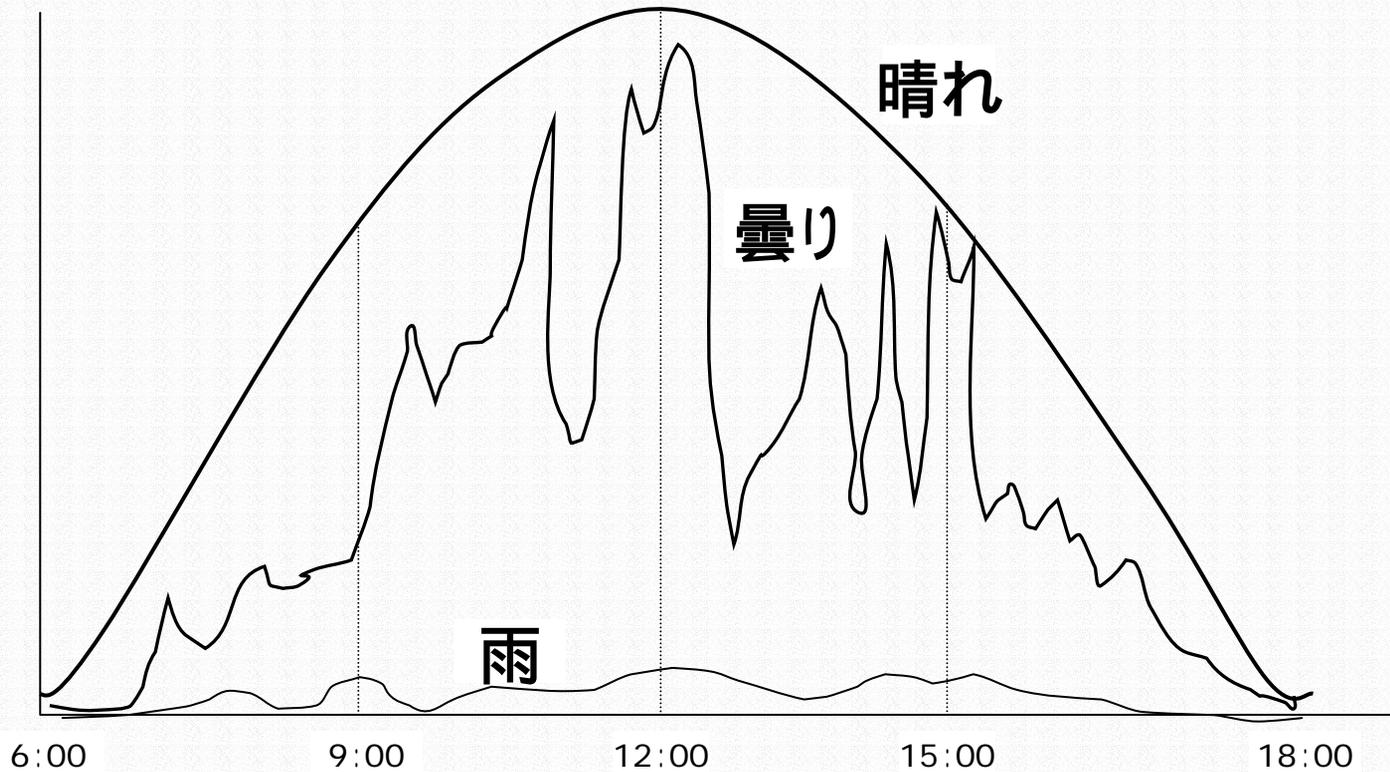
### エネルギーとしての不安定性

電気：季節・週・日で出力が変動、電圧・周波数が変動

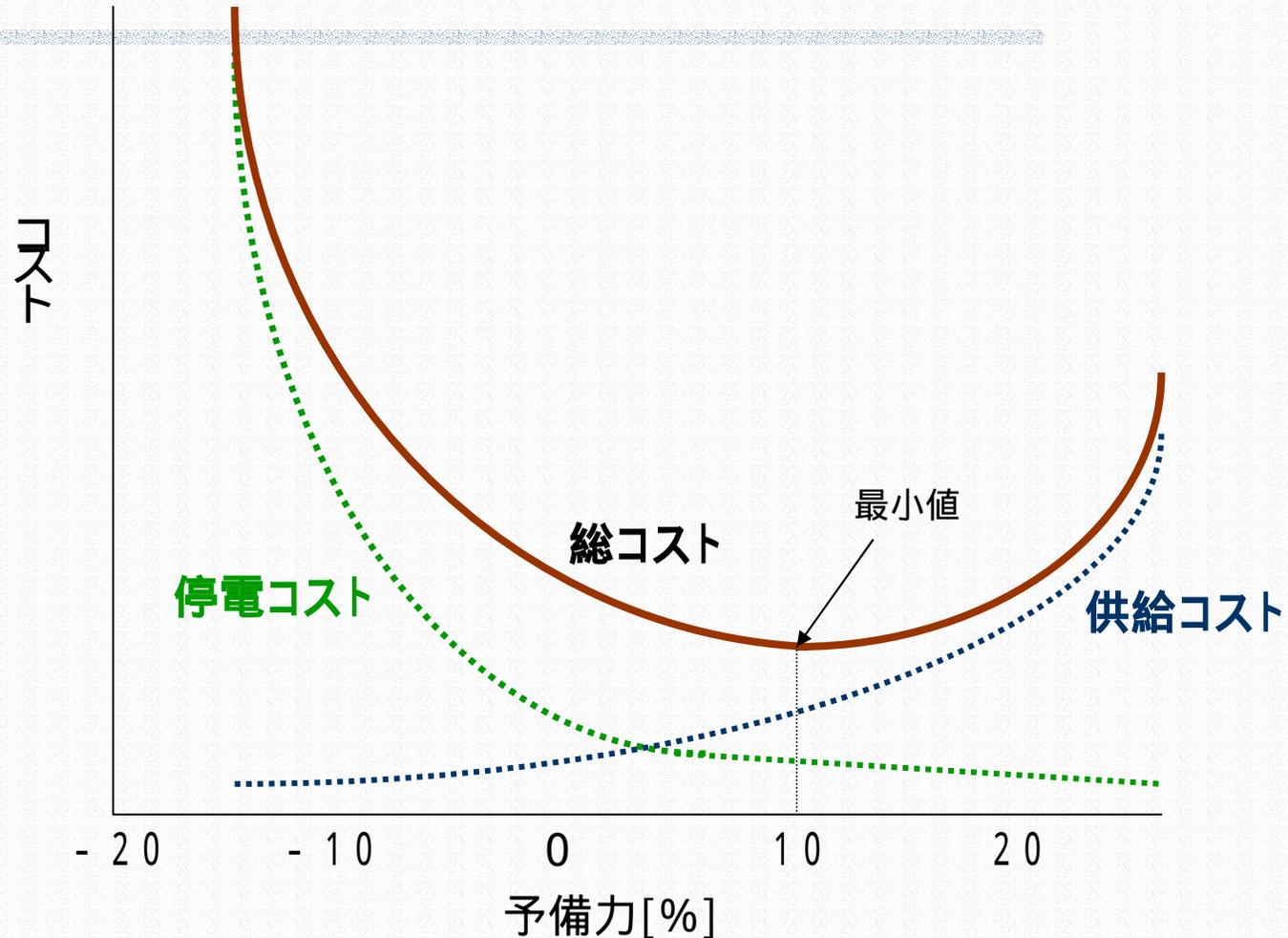
# 使いやすさ(家庭のエネルギー)



# 太陽光発電の一日の出力曲線



# 予備力(使いやすさ)と費用関数



# 受け入れやすさ

化石燃料

酸性雨、温暖化問題

事故への不安(炭坑爆発、タンカーの座礁、ガス爆発)

原子力

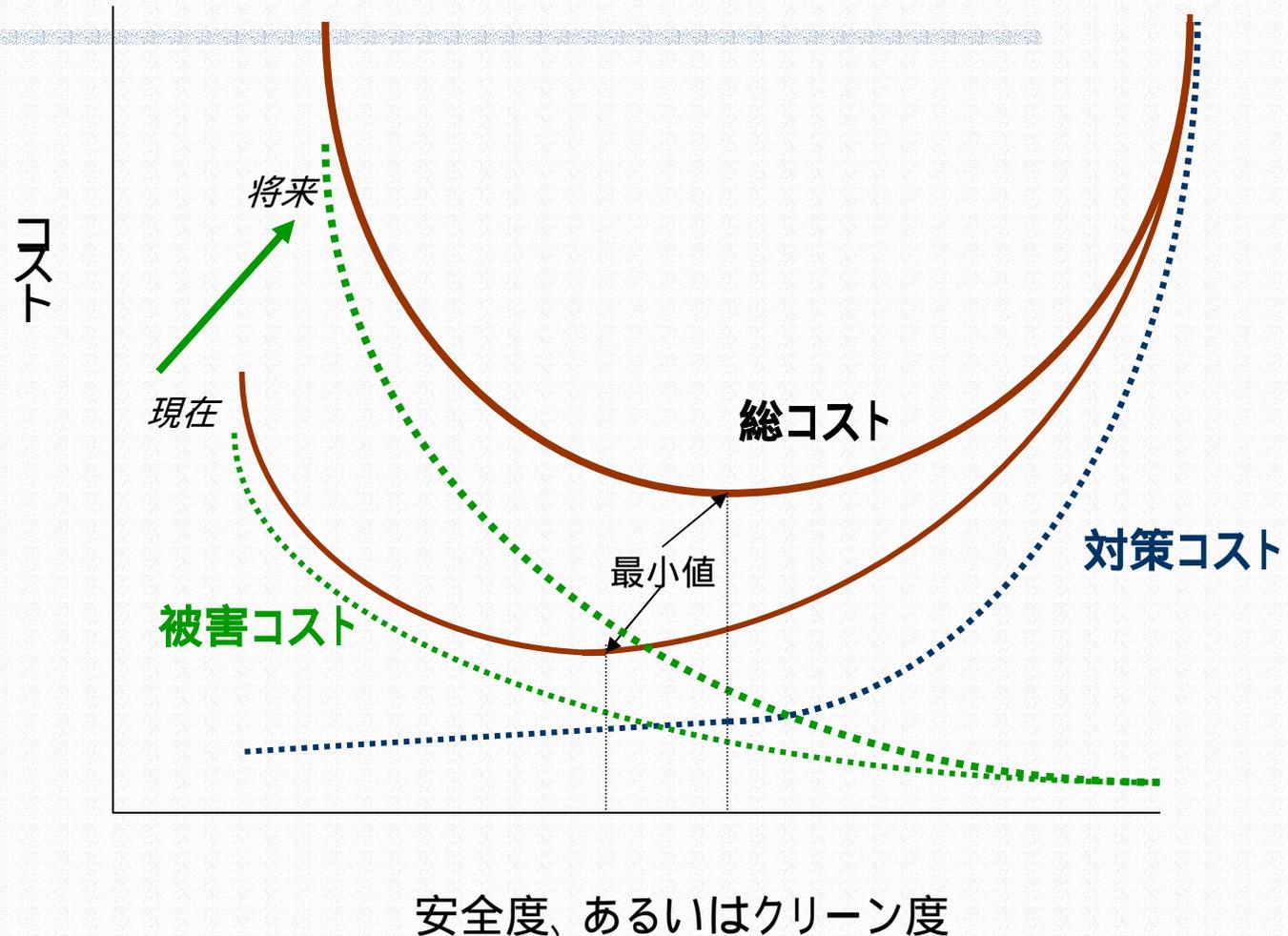
放射性物質の漏洩

原子力事故への不安

再生可能エネルギー

最も安全でクリーン(風力:渡り鳥被害、高調波による電波障害、騒音 太陽光:アイランディング対策、半導体工場でのフロン対策 廃棄物:ダイオキシン対策)

# 安全と環境(受け入れやすさ)の費用関数



# 最近のエネルギー情勢

- 需要：伸びが停滞（ゼロサム社会）
- 供給：技術の小型分散化
- 産業：エネルギー・電力産業の自由化
- 環境：環境意識の高まり（CO<sub>2</sub>削減目標）
- 政策：利用者サイドの重要性

# エネルギー・電力産業の自由化

**利点：競争によるコスト削減**

**小規模分散型技術の開発**

**課題：経済外部性の軽視**

- (1) 中長期の設備計画(供給力の確保)**
- (2) エネルギーセキュリティ**
- (3) 環境問題**
- (4) 省エネルギー**
- (5) 離島・僻地のエネルギー供給**

# 海外における脱原子力の動き

チェルノブイリ事故(1986年)

ドイツの原子力廃止計画(耐用期間32年)

エネ需要の低迷、石炭産業の育成、ロシアの天然ガス

スウェーデンのバーセベック炉廃止(1999年)

1980年議会決定(代替エネの難しさ)、デンマークから輸入(石炭火力)

台湾における脱原子力

与党が建設中止を撤回

アメリカの原子力政策

新設ゼロ、稼働率向上(65% ⇒ 85%)

豊富な資源と供給ルート

欧州の天然ガス: 北海、ロシア、アフリカ、中東

米国の豊富な資源: 石油、ガス、石炭

# 中・長期のエネルギー情勢

**難しい省エネルギー** (都市化、豊かさ、快適さの追求)

**天然ガス需要の高まり** (環境問題で順風)

**エネルギー基盤施設の更新** (火力と原子力)

**不透明な中東情勢** (不安定になる石油供給)

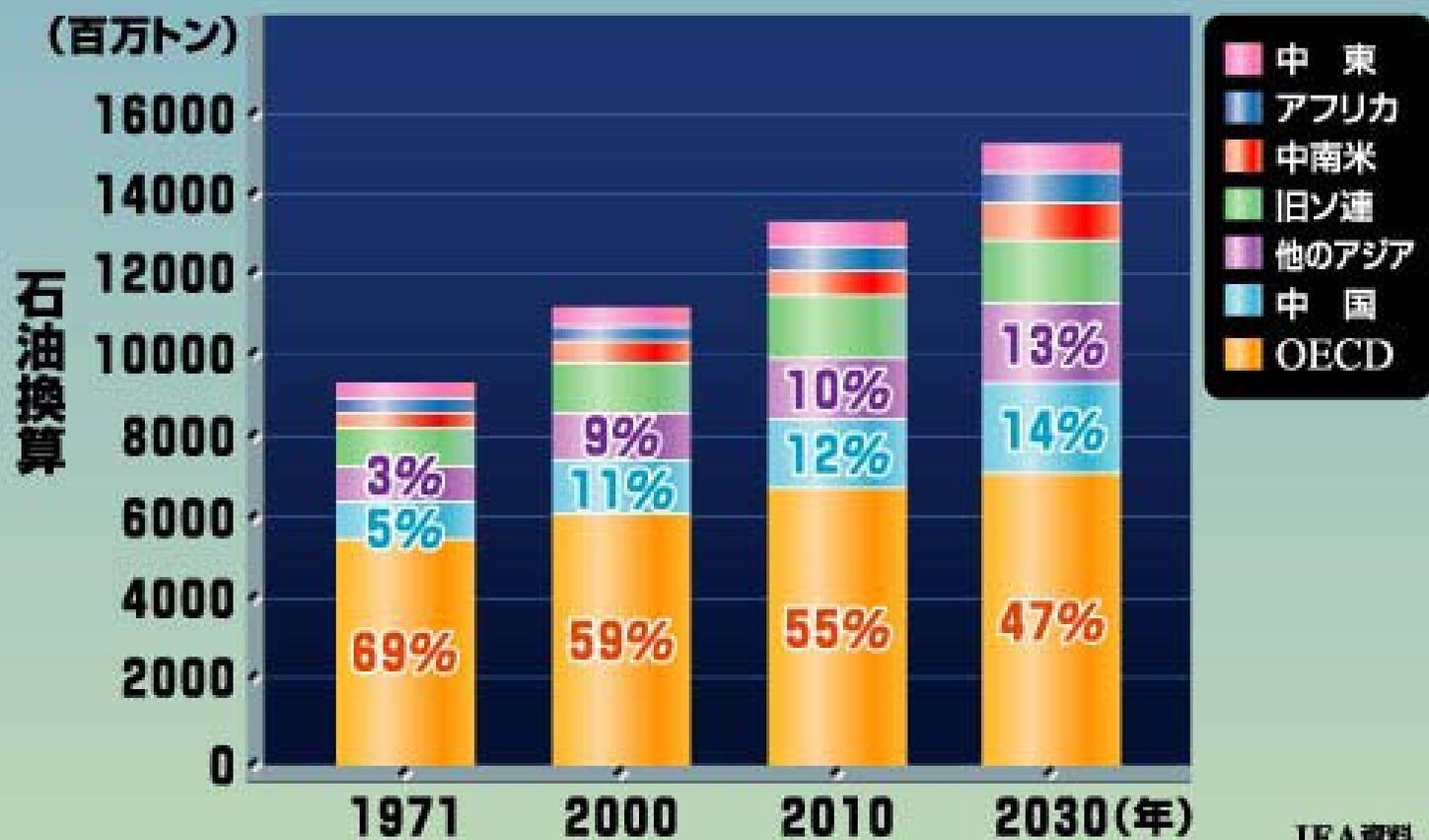
**増大するアジア地域のエネルギー需要**

(経済発展と人口増加, 中国のオリンピック景気?)

**アジア地域のエネルギーセキュリティと環境問題**

**厳しさが増す地球温暖化対策**

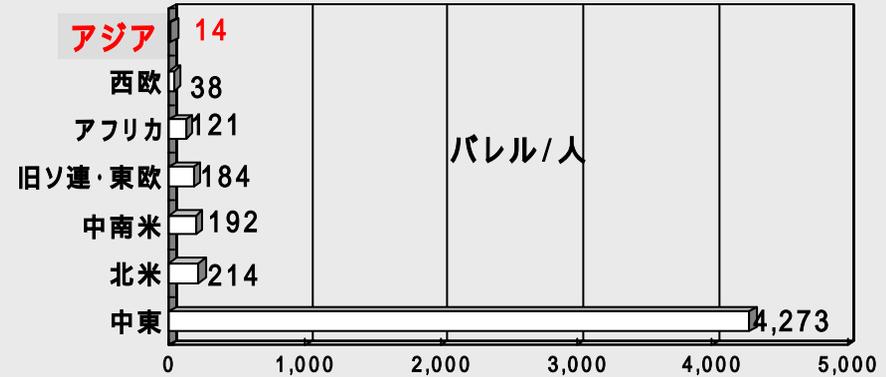
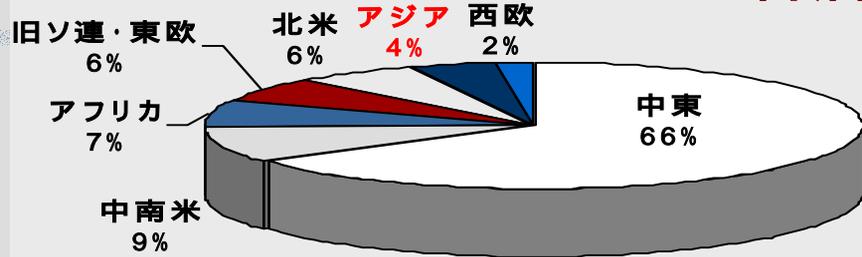
# 世界のエネルギー需要予測



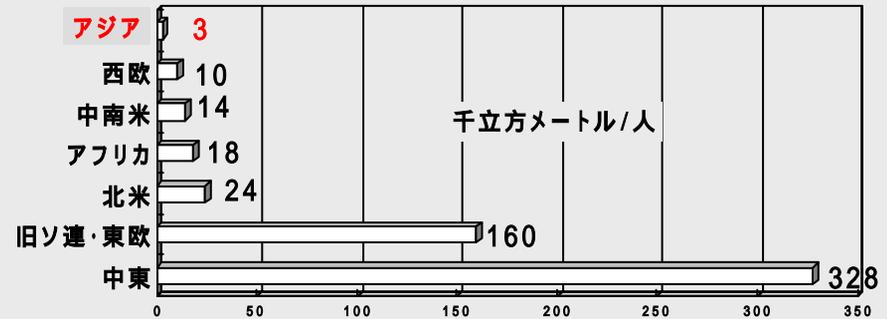
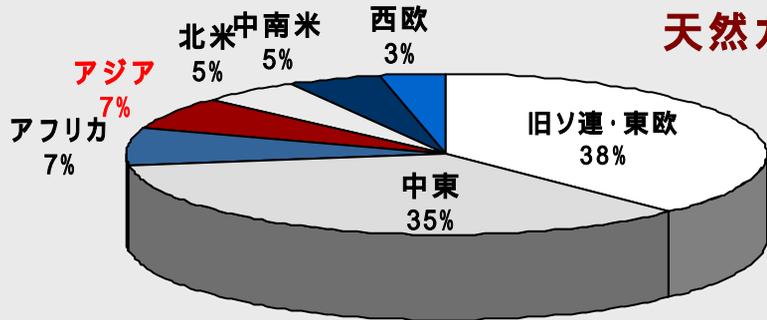
IEA資料

# 地域別に見た化石燃料の確認埋蔵量

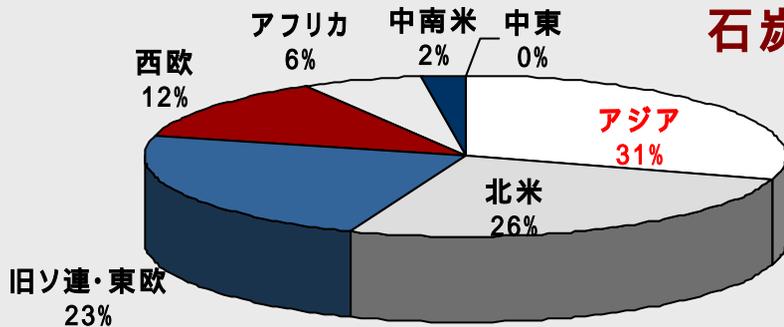
## 石油



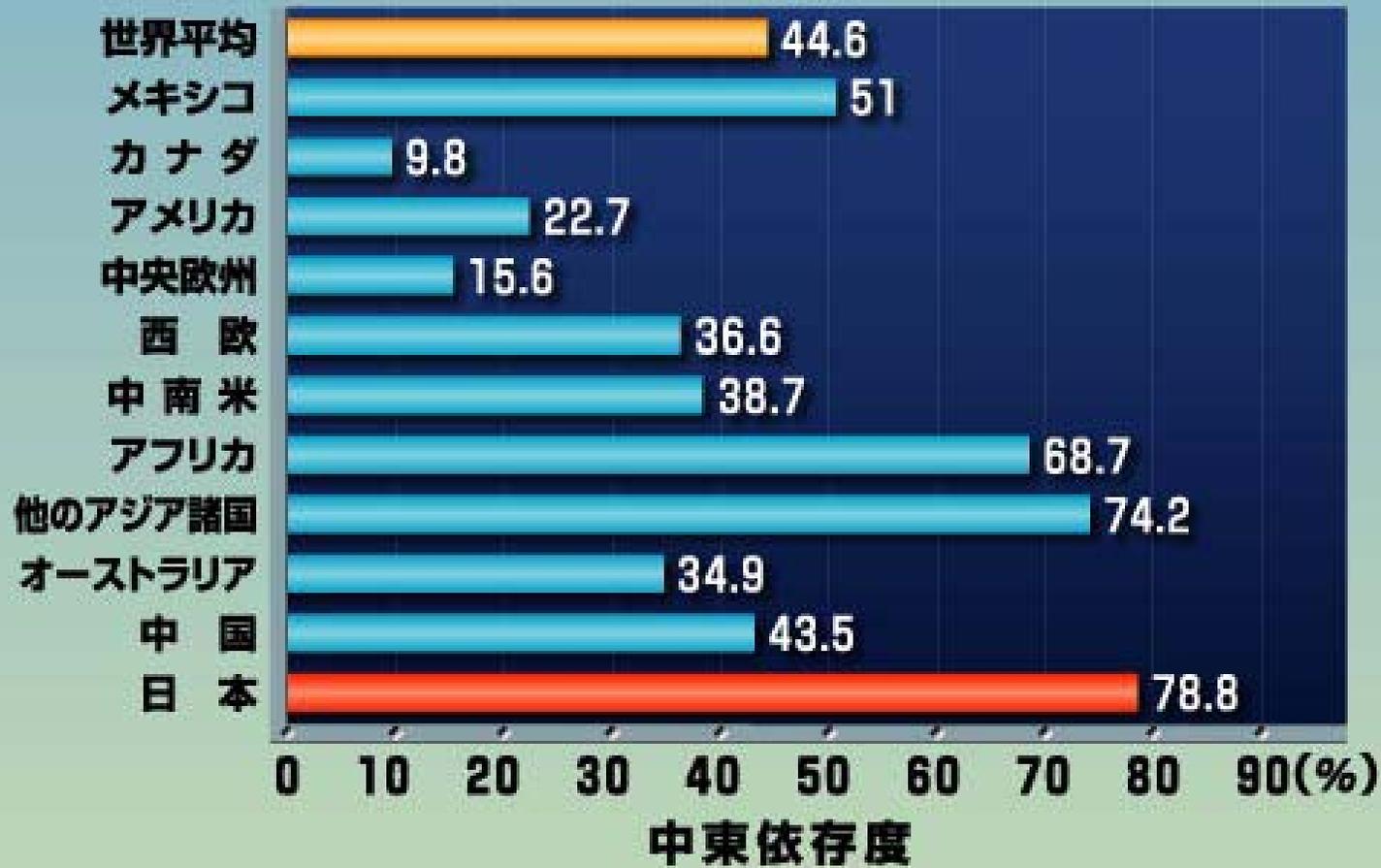
## 天然ガス



## 石炭



# 国・地域別にみた石油の中東依存度



# アジア地域のエネルギー問題

## 増大するエネルギー需要

(経済発展と人口増加, 中国のオリンピック景気)

難しい省エネルギー (都市化、豊かさ、快適さの追求)

不透明な中東情勢 (不安定になる石油供給)

人口に対する化石燃料資源が乏しいアジア地域

巨額な資金を要する天然ガス利用

石炭利用による環境問題

厳しさが増す地球温暖化対策

## アジア地域に求められているエネルギー供給基盤整備

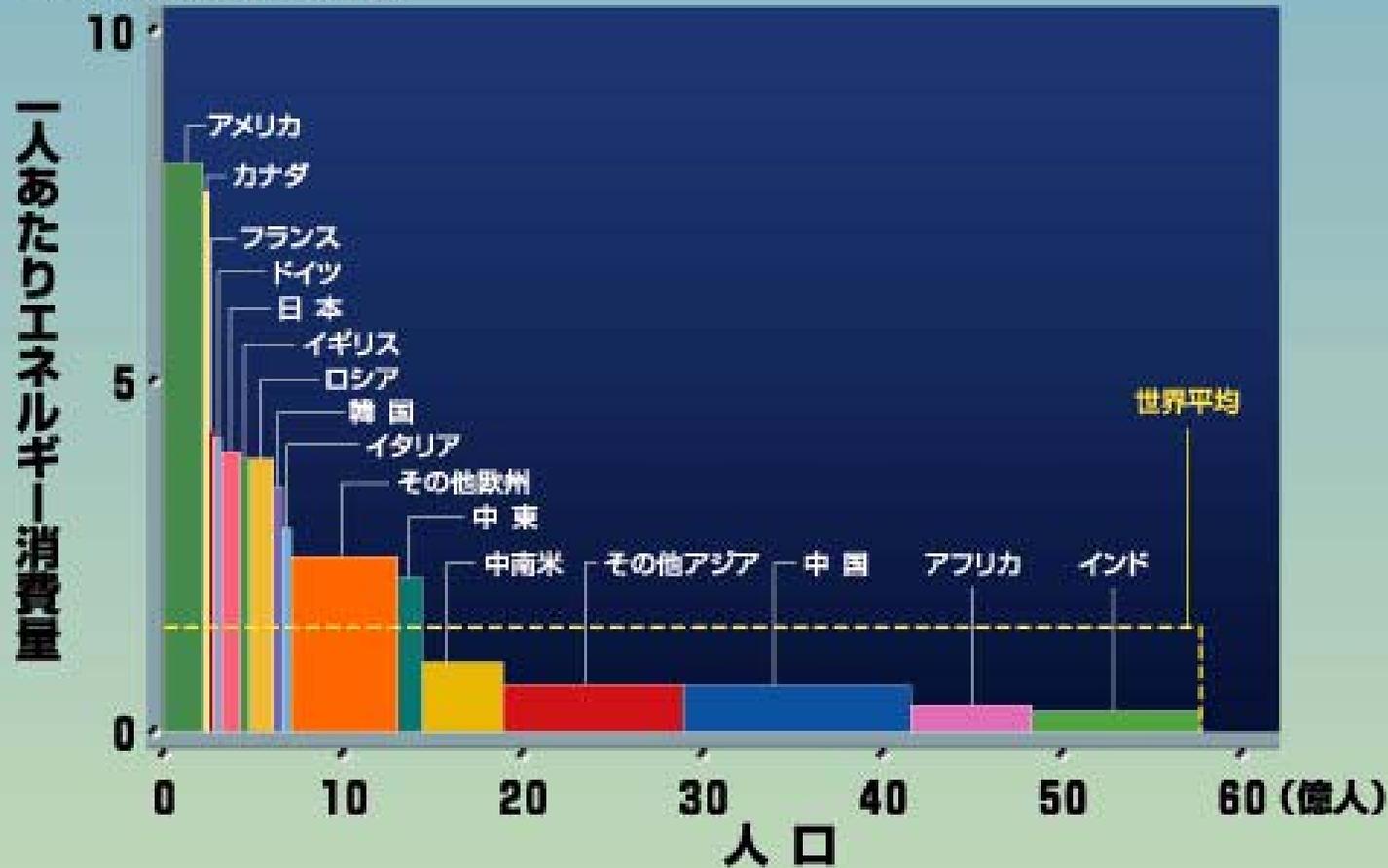
| エネルギー供給基盤施設 |  |
|-------------|--|
| 石油          | 製油所の建設<br>輸入原油・石油製品の受入施設<br>緊急時対策としての石油備蓄基地                                  |
| 石炭          | 中国における鉄道など石炭輸送網の整備<br>輸入石炭の受入港湾施設<br>環境保全のためのクリーンコール技術開発                     |
| 天然ガス        | 中国やインドなどへのLNG供給チェーン<br>アジア地域の広域天然ガス幹線パイプラインの整備<br>各国における天然ガスの基幹パイプラインと末端網の整備 |
| 電力供給        | 発電所の新設<br>幹線送電線と末端配電網の整備<br>長期的な視点からの原子力発電と再生可能エネルギーの導入                      |

# 世界の一次エネルギー消費量の推移



## 国別・地域別にみた人口と一人あたりのエネルギー消費量

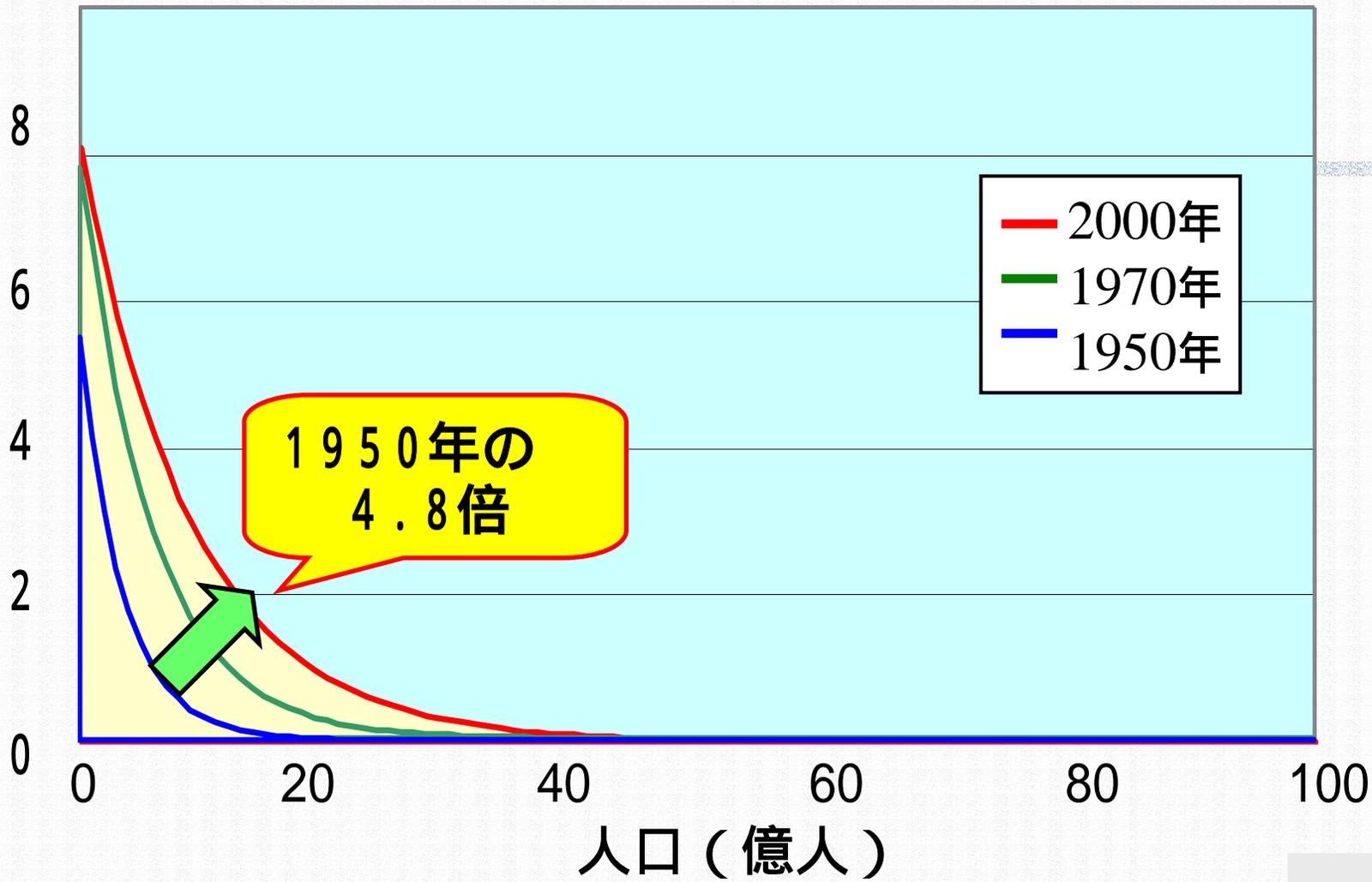
(トン(石油換算)/人)



# 一人当たりエネルギー消費量と人口の推移

石油換算  
(トン/人)

10



1950年の  
4.8倍

# 一人当たりエネルギー消費量と 人口の分布の予測

石油換算  
(トン/人)

10

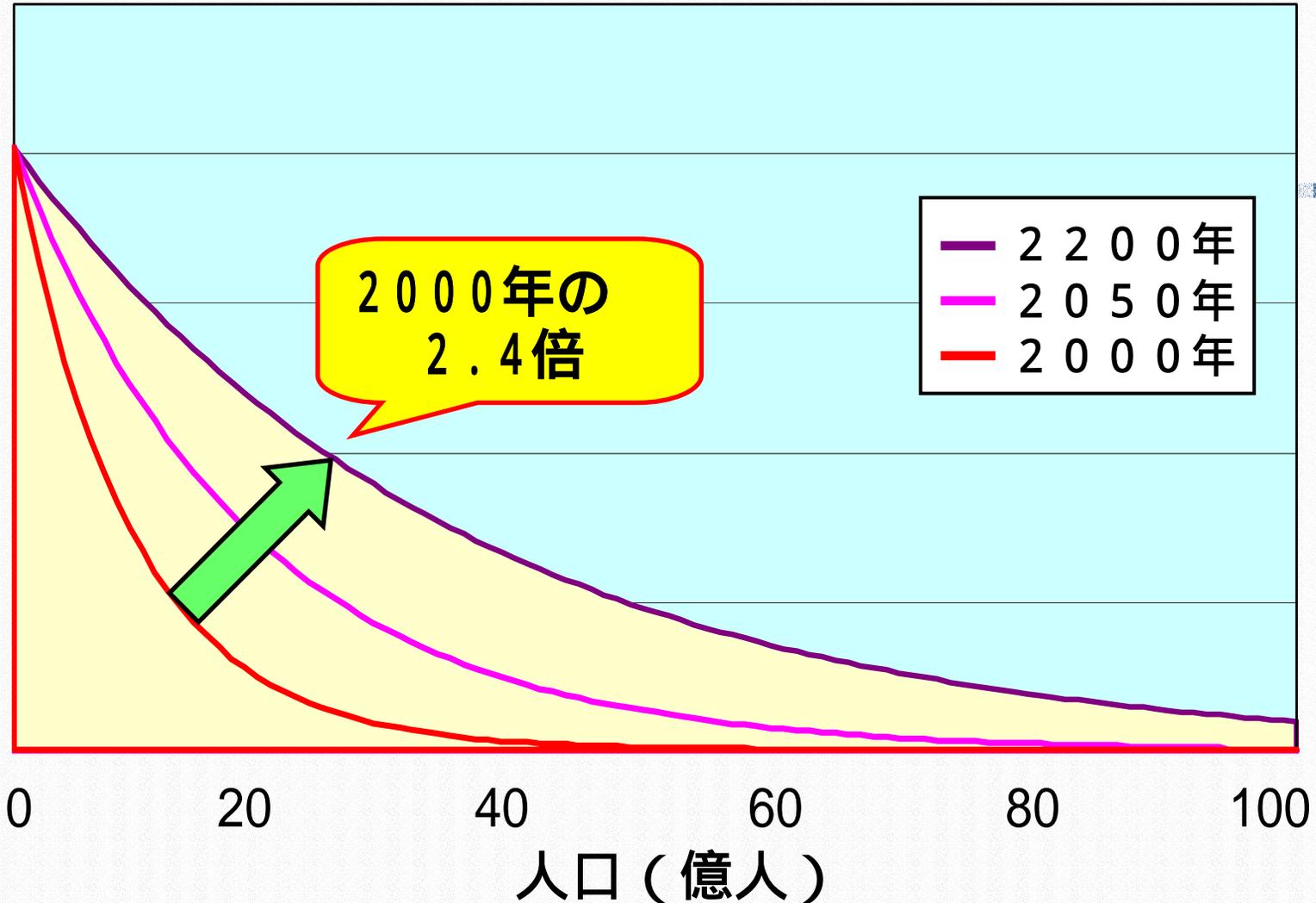
8

6

4

2

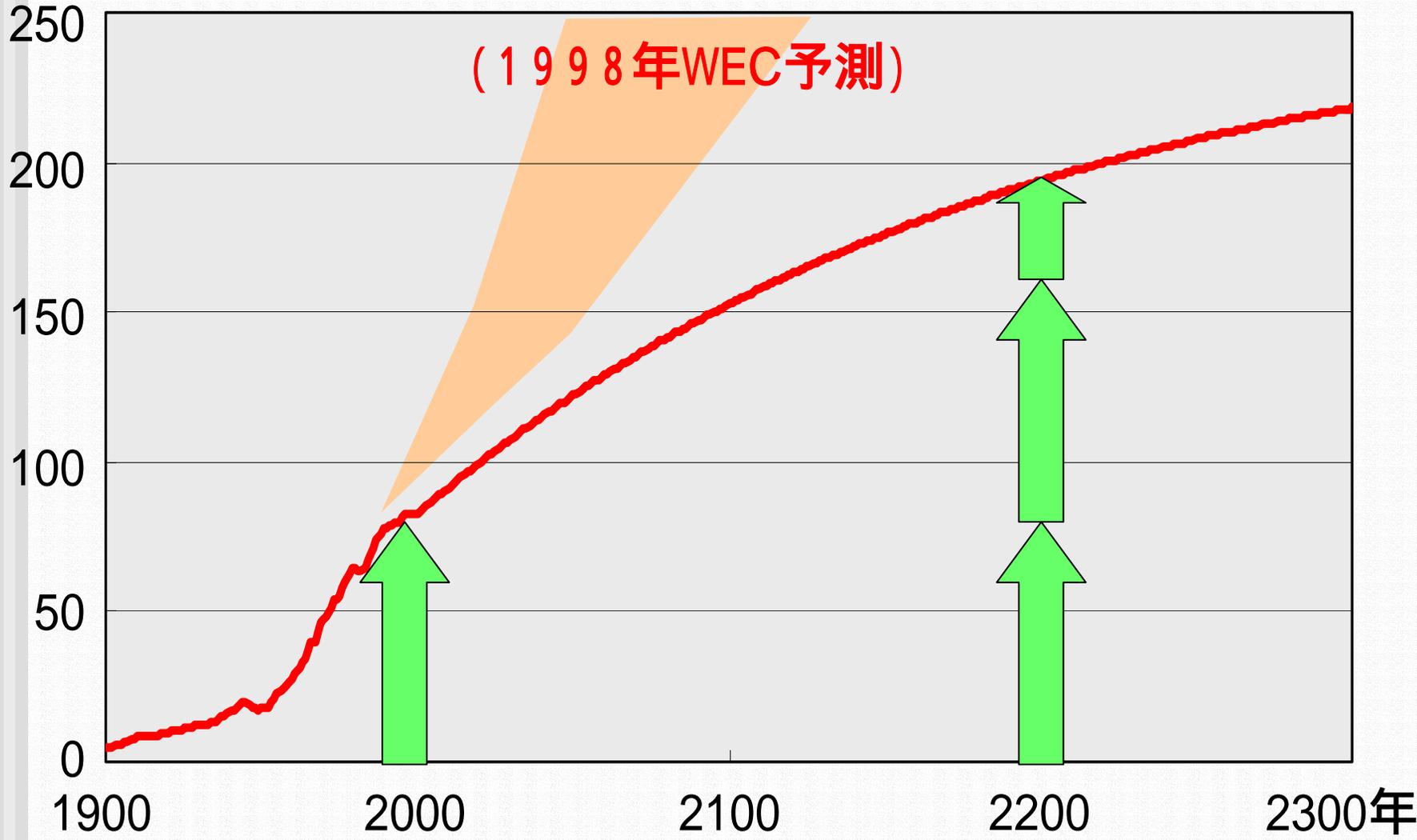
0



人口 (億人)

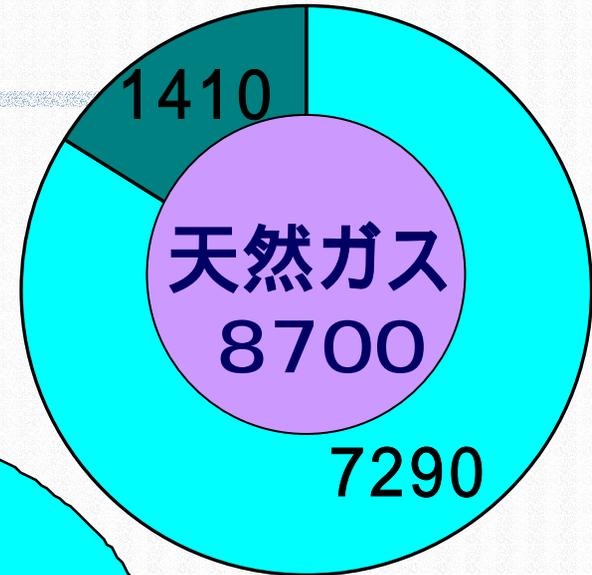
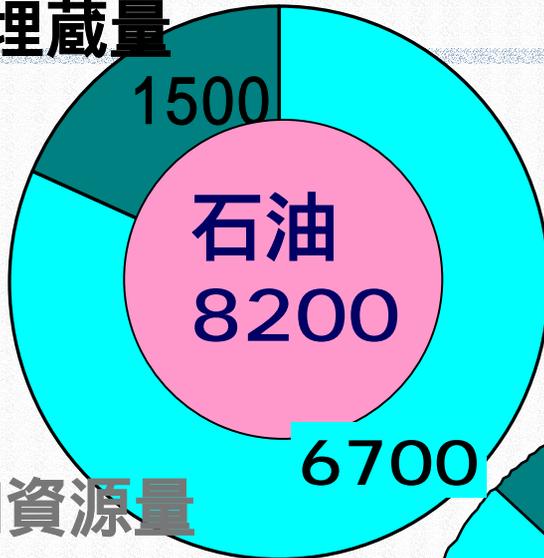
# 世界のエネルギー需要予測

億トン

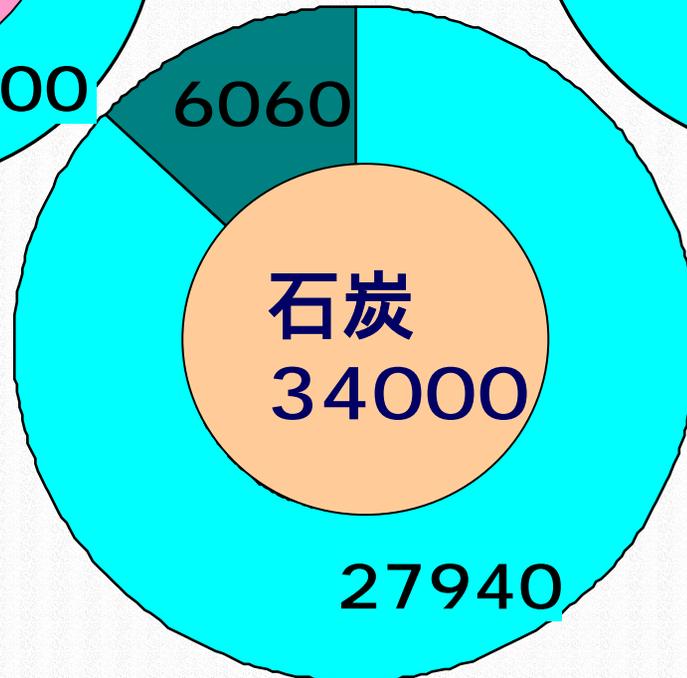


# 確認埋蔵量と資源量

確認埋蔵量



追加資源量



単位：億トン

# 世界のエネルギー需給展望

(億トン)

250

200

150

100

50

0

1900

2000

2100

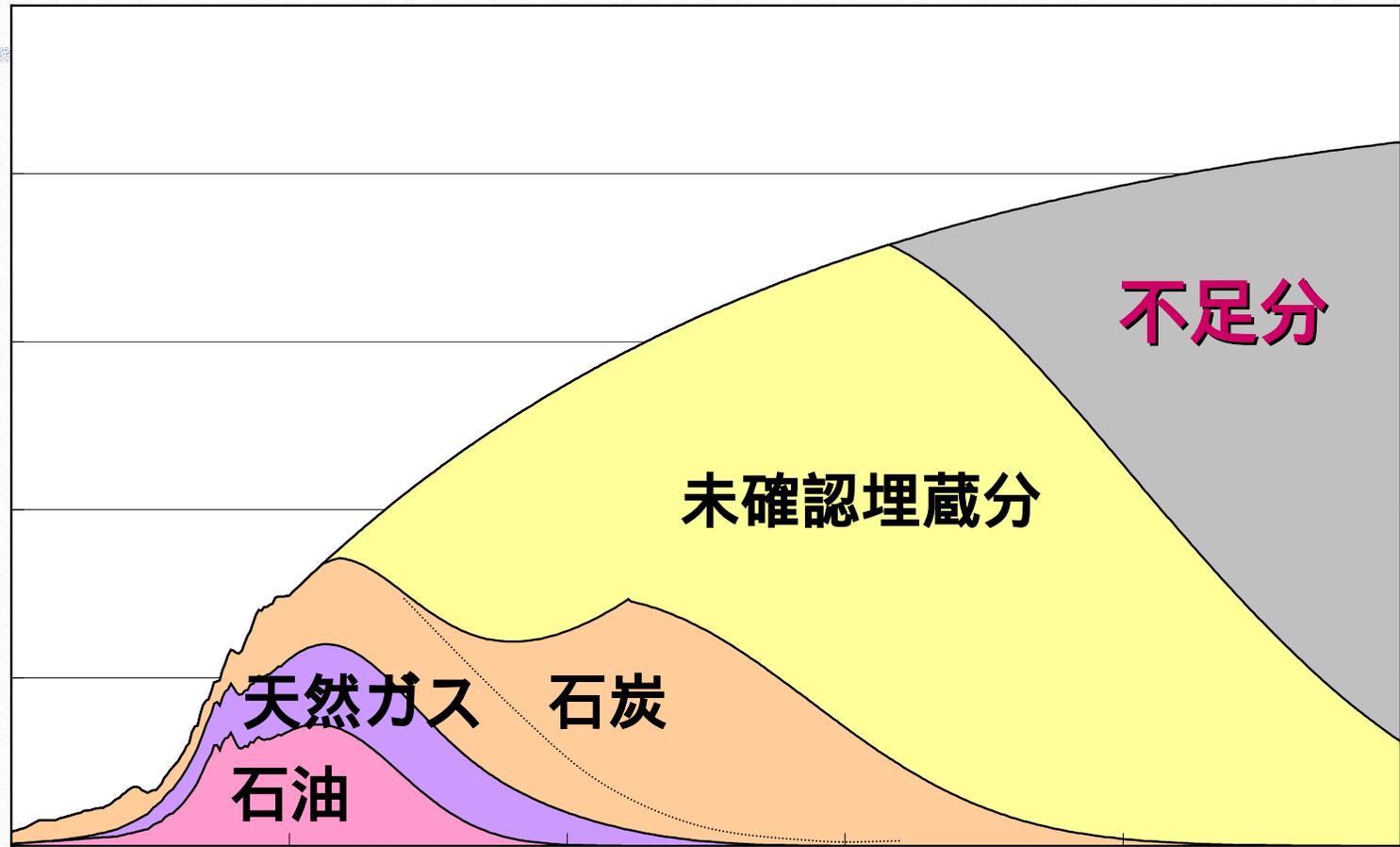
2200

2300

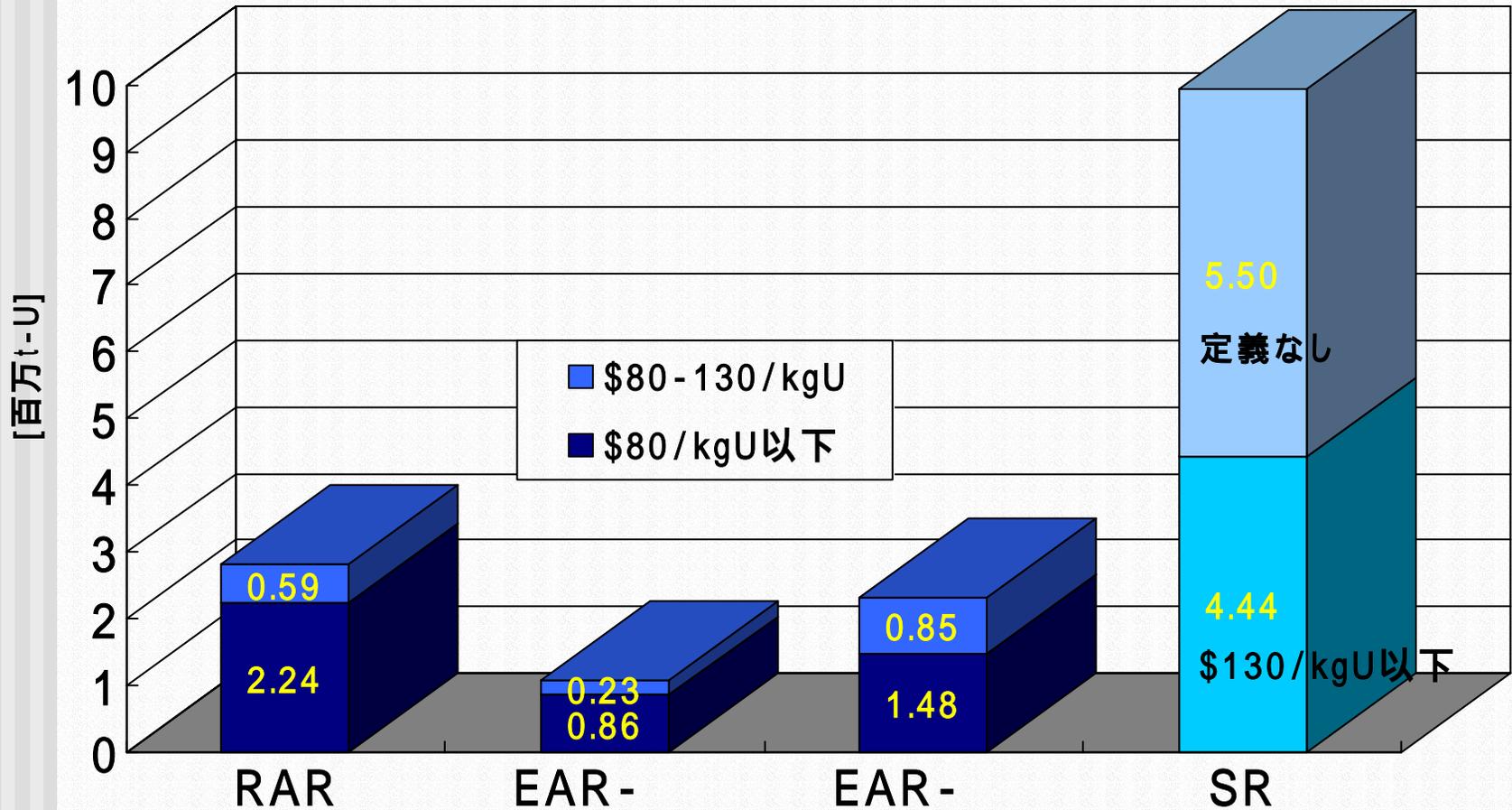
2400

注) 世界のエネルギー需要の90%を化石燃料で供給

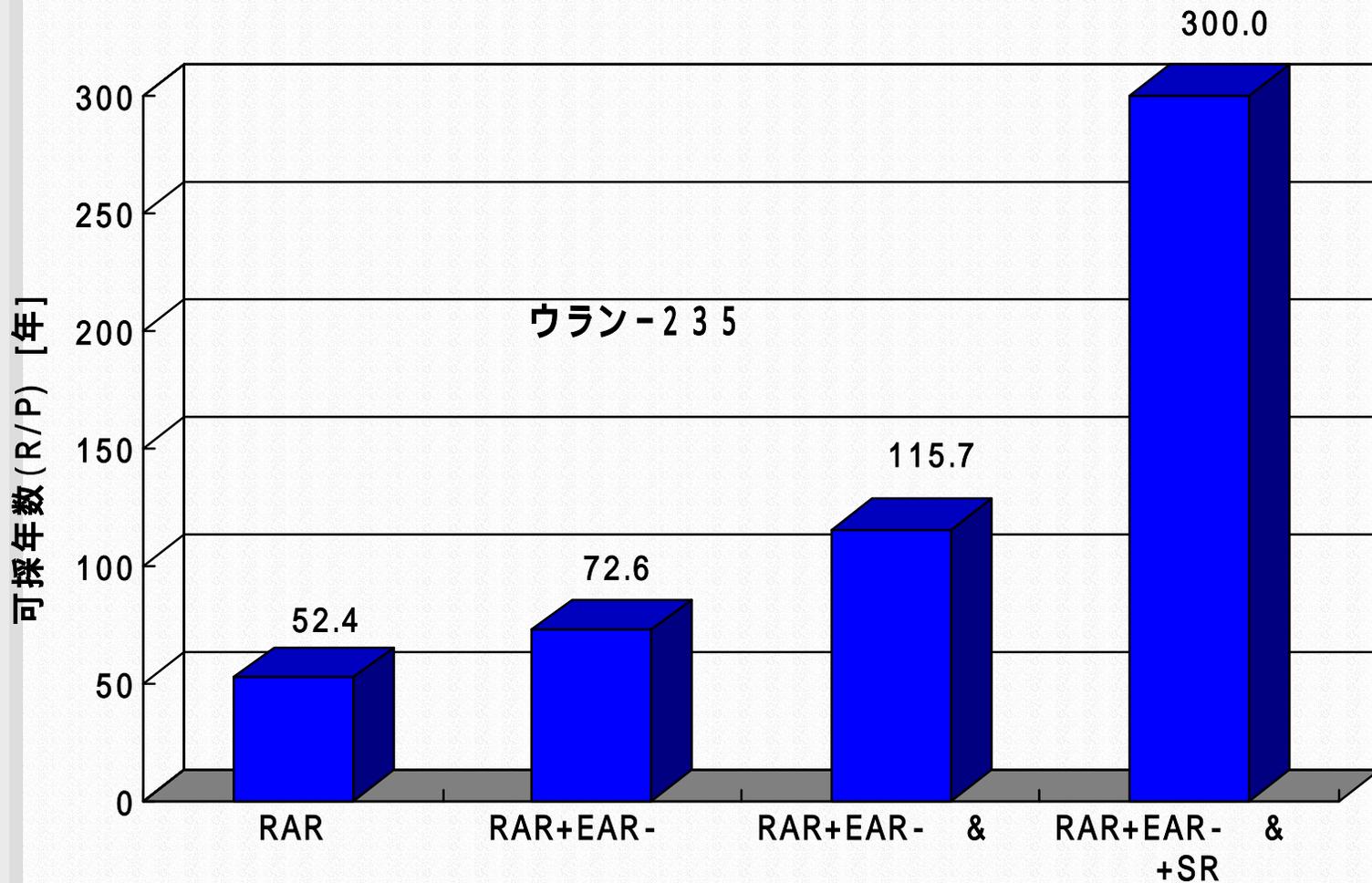
(年)



# ウランの資源量 (16.2百万t - U)



# ウランの可採年数



# 回転機械の運動エネルギーと理論出力

$$\text{(運動エネルギー)} = \text{(質量)} \times \text{(流速)}^2 / 2$$

$$\text{(理論出力)} = \text{(密度)} \times \text{(作動面積)} \times \text{(流速)}^3 / 2$$

# 風力、水力、蒸気による出力の違い

|     | 密度<br>[kg/m <sup>3</sup> ] | 流体速度<br>[m/s]    | 単位面積あたり出力 |
|-----|----------------------------|------------------|-----------|
| 風力  | 1.29                       | 20               | 1         |
| 水力  | 1,000                      | 44<br>(有効落差100m) | 8,400     |
| 水蒸気 | 74                         | 400              | 460,000   |

# エネルギー密度の比較

| エネルギー源   | エネルギー密度[MJ/kg]    | エネルギー源 | エネルギー密度[MJ/kg] |
|----------|-------------------|--------|----------------|
| ウラン(235) | $6.6 \times 10^7$ | 乾燥木材   | 14 ~ 15        |
| 原油       | 42 ~ 47           | 麦わら    | 12 ~ 15        |
| 植物油      | 37 ~ 38           | 赤身の肉   | 5 ~ 10         |
| 天然ガス     | 33 ~ 37           | 魚      | 2.9 ~ 9.3      |
| バター      | 29 ~ 30           | じゃがいも  | 3.2 ~ 4.8      |
| 石炭(瀝青炭)  | 27 ~ 29           | 果物     | 1.5 ~ 4        |
| たんぱく質    | 23                | 人糞     | 1.8 ~ 3        |
| 石炭(褐炭)   | 22 ~ 24           | 野菜     | 0.6 ~ 1.8      |
| シリアル穀類   | 15.2 ~ 15.4       | 尿      | 0.1 ~ 0.2      |

出典: Vaclav Smil, "Energies", MIT Press, 1999)

# 各種電源のエネルギー密度

--- 発電所敷地面積あたりの発電電力量 ---

| 対象       | 敷地面積あたりの電力密度[kWh/m <sup>2</sup> ・年] | 備考                             |
|----------|-------------------------------------|--------------------------------|
| 家庭の電力需要  | 35                                  | 一戸建(敷地50坪、契約40A)               |
| 事務所の電力需要 | 400                                 | 8階建て(延床面積3,000m <sup>2</sup> ) |
| バイオマス発電  | 2                                   | ポプラプランテーション(6年サイクル)、発電効率34%    |
| 風力発電     | 21                                  | 米国テハチャピWF、C.F.20%              |
| 太陽光発電    | 24                                  | 家庭屋根(50坪、3kW、設備利用率15%)         |
| 水力発電     | 100                                 | 日本の水力発電所約100箇所の平均値             |
| 石炭火力     | 9,560                               | 碧南石炭火力(210万kW)                 |
| 原子力発電    | 12,400                              | 柏崎刈羽(821.2万kW)                 |

# 正味エネルギー収支の試算例

## 正味エネルギー収支



# 風力発電と太陽光発電の経済性

- - 電力需要の1%を供給する費用は - -

|  | 原子力発電  | 風力発電  | 太陽光発電                                 |
|--|--|---|---------------------------------------|
| 設備容量 [ 万 kW ]                            | 1 3 5  | 5 4 0   | 9 0 0                                 |
| 費用(16年間)[ 億円 ]<br>( 建設費 )<br>( 燃料・運転保守 ) | 1兆300億円<br>( 4 , 1 8 5 )<br>( 6 , 1 1 5 )  | 1兆4,256億円<br>( 1 0 , 8 0 0 )<br>( 3 , 4 5 6 ) | 7兆2,000億円<br>( 9 0 , 0 0 0 )<br>( 0 ) |
| 設置台数 [ 基 ]                               | 1  | 1 0 , 8 0 0<br>( 現状 100 基 / 年 )               | 3,000,000<br>( 現状 1 万 軒 / 年 )         |
| 試算条件                                     |  |   |                                       |
| 単機出力 [ kW ]                              | 1,350,000  | 500   | 3                                     |
| 設備利用率 [ % ]                              | 80   | 20  | 12                                    |
| 建設単価 [ 万円 / kW ]                         | 31   | 20  | 80                                    |
| 燃料単価 [ 円 / kWh ]                         | 1.7  | 0   | 0                                     |
| 経済性前提                                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>燃料費 ( 原子力 ): <math>1.7 \text{ 円/kWh} \times 1,350,000 \text{ kW} \times 8,760 \text{ h} \times 0.8 = 160.8 \text{ 億円 / 年}</math></li> <li>運転保守費 ( 原子力 ): 221.4 億円 / 年<br/>年経費率 5.29% ( 運転維持 3.91%、一般管理費 0.50%、諸税 0.88% )</li> <li>運転保守費 ( 風力 ): 年経費率 2%、( 太陽光 ): 年経費率 0%</li> </ul> |   |                                       |

# 再生可能エネルギーの特徴と課題

|       | 特徴                                 |                      |                  |              | 課題                           |
|-------|------------------------------------|----------------------|------------------|--------------|------------------------------|
|       | 利用方法                               | 開発状況                 | 利用率と特性           | 分布           |                              |
| 太陽熱・光 | 熱利用<br>発電（光、熱）<br>パッシブシステム<br>生物利用 | 商用段階<br>（一部開発<br>段階） | 発電：10～30%<br>間欠的 | 広域分散         | 材料<br>効率<br>コスト<br>気象データ     |
| 水力    | 発電<br>動力利用                         | 商用段階                 | ベース負荷<br>季節変動    | 広域分散<br>山岳地帯 | 水問題<br>生態系影響<br>コスト          |
| 風力    | 発電<br>揚水動力<br>帆船動力                 | 商用段階                 | 15～30%<br>間欠的    | 海岸、半島、<br>山岳 | 設計<br>風況データ<br>立地            |
| 海洋    | 波力<br>潮流<br>潮汐<br>海洋温度差            | 開発段階                 | ベース負荷<br>間欠的     | 海岸<br>熱帯地域   | 材料<br>性能<br>コスト              |
| 地熱    | 直接熱利用<br>発電（浅部、深部）<br>高温岩体<br>マグマ熱 | 商用段階<br>（一部開発<br>段階） | ベース負荷<br>安定      | 火山地域         | 探索・抽出<br>掘削技術（高温<br>岩体、マグマ熱） |
| バイオマス | 燃焼利用<br>発酵<br>液化・ガス化               | 一部商用段<br>階           | ベース負荷<br>季節変動    | 広域分散         | コスト<br>農林業管理                 |

# 水力エネルギーの潜在利用可能量

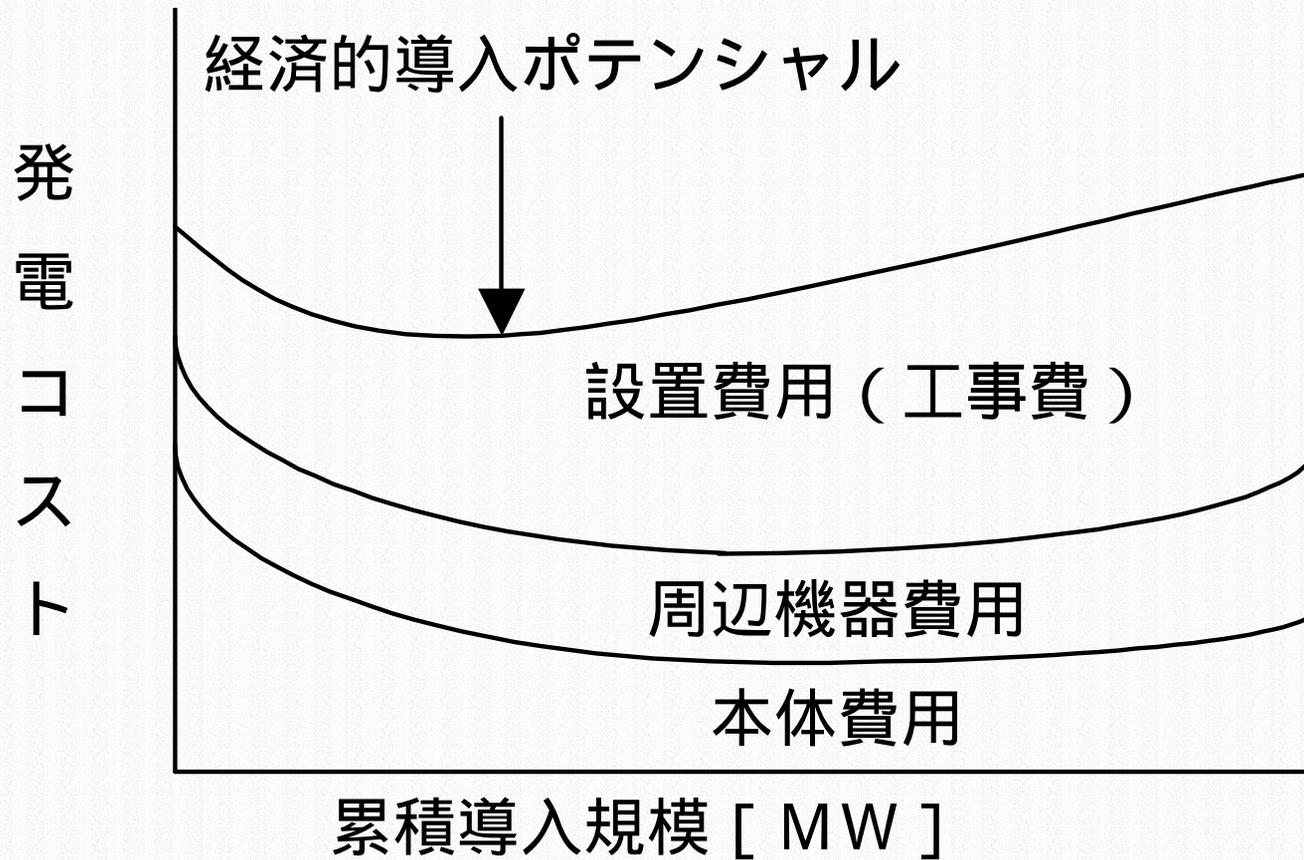
| 地域      | 包蔵水力 [TWh/年] |        |       | 水力発電 (1997年) |             |             |
|---------|--------------|--------|-------|--------------|-------------|-------------|
|         | 理論的          | 技術的    | 経済的   | 設備量 [GWe]    | 発電量 [TWh/年] | 建設中設備 [MWe] |
| 北米      | 5,817        | 1,510  | 912   | 141          | 697         | 882         |
| 中南米     | 7,533        | 2,868  | 1,199 | 114          | 519         | 18,331      |
| アフリカ    | 3,294        | 1,822  | 809   | 16           | 48          | 1,464       |
| 中東      | 195          | 216    | 128   | 9            | 27          | 7,749       |
| 西欧      | 3,258        | 1,235  | 770   | 14           | 498         | 6,707       |
| 東欧      | 304          | 171    | 128   | 21           | 66          | 1,211       |
| 旧ソ連     | 3,583        | 1,992  | 1,288 | 66           | 225         | 16,613      |
| アジア計画経済 | 6,511        | 2,159  | 1,302 | 64           | 226         | 51,672      |
| 南アジア    | 3,635        | 948    | 103   | 28           | 105         | 13,003      |
| 他アジア    | 5,520        | 814    | 142   | 14           | 41          | 4,688       |
| 太平洋先進国  | 1,134        | 211    | 184   | 34           | 129         | 841         |
| 合計      | 40,784       | 13,945 | 6,964 | 655          | 2,582       | 124,161     |
| 合計(*)   | 40,500       | 14,320 | 8,100 | 660          | 2,600       | 126,000     |

\* : 地域別データの不足分および過大評価分を調整 World Atlas, 1998

参考 : 世界の電力消費量 (13,928TWh/年[1997年])

# 再生可能エネルギーの経済性

- - 経済的条件の良い立地点のポテンシャル - -



# 光合成の効率

**光合成**: 葉緑素が太陽エネルギーによってCO<sub>2</sub>、水からデンプンを合成



植物の可視光利用率 : 50%

葉緑体の吸収効率 : 80%

明反応 (光子 有機物[ATP, NADP]) : 28%

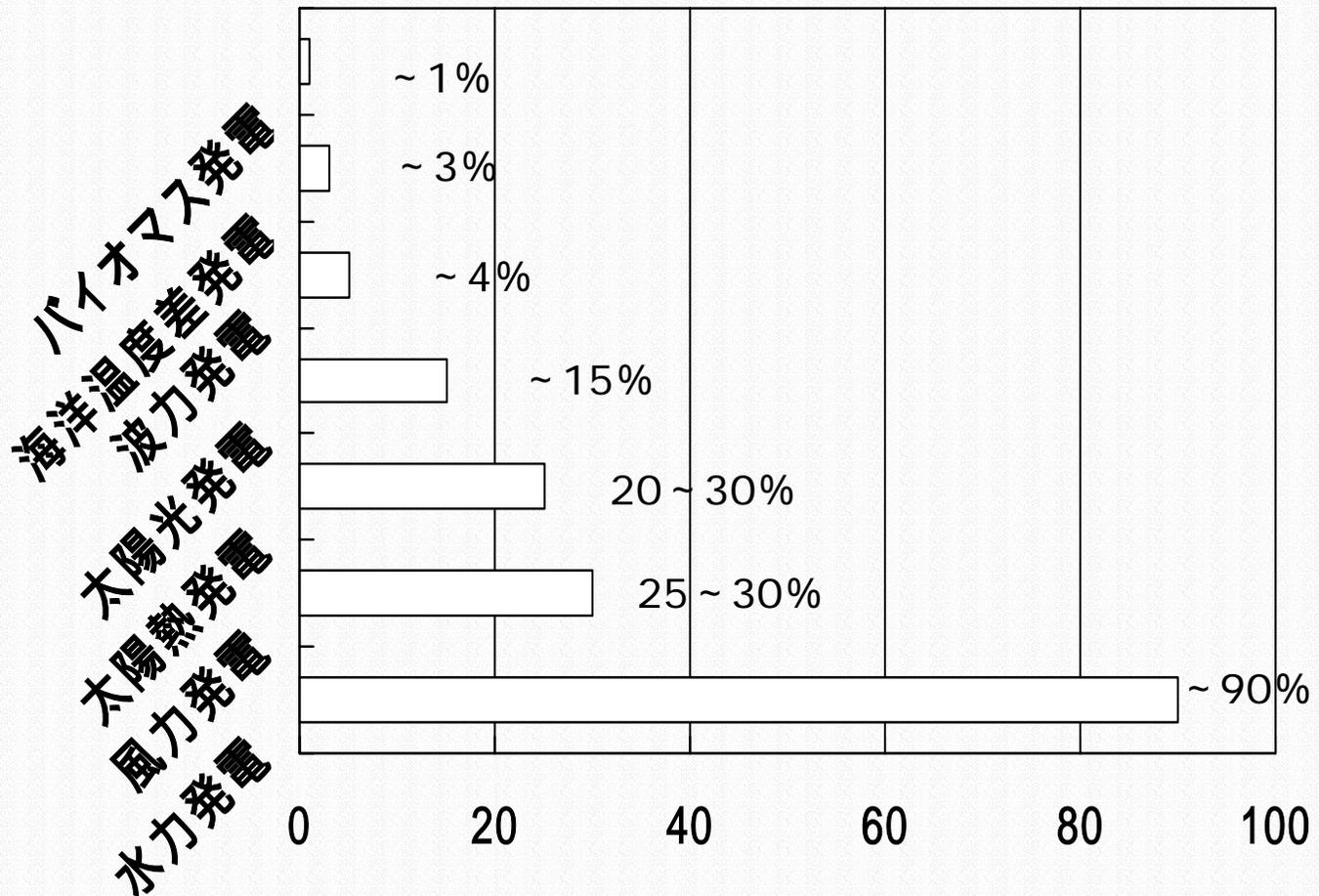
暗反応 (CO<sub>2</sub> グルコース) : 60%

---

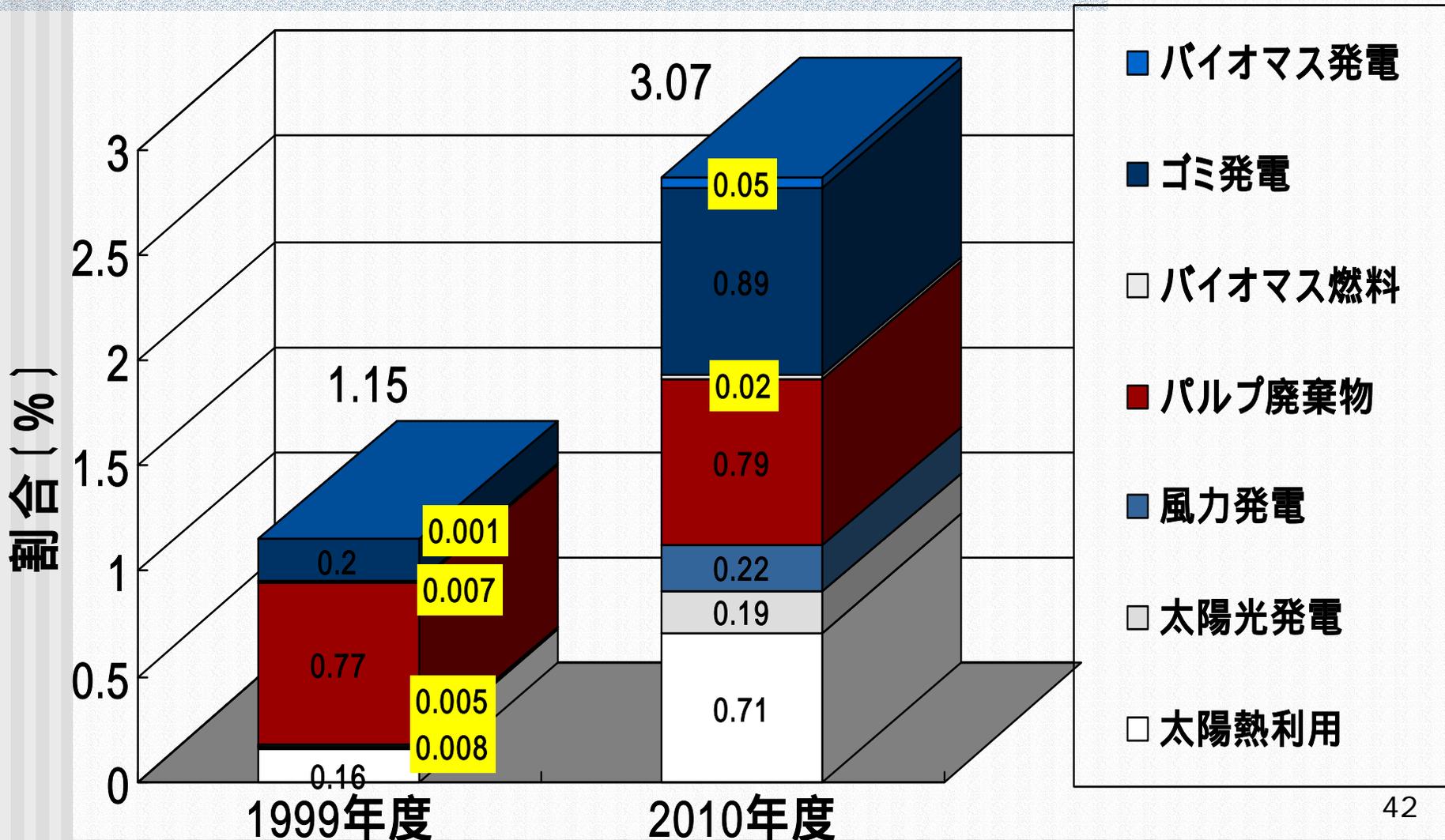
理論効率 : 6.7%

実際の効率 : 1 ~ 2% (C4植物 : ~ 3%)

# 太陽エネルギーの電力変換効率



# 我が国の新エネルギー導入目標



# 再生可能エネルギーの普及方策

- - 助成策が不可欠 - -

国からの補助金は期限限定  
自発的な補助政策への移行

共同組合方式

グリーン電力基金

グリーン証書

R P S (renewable portfolio standard)

企業の税額控除

国と自治体による支援制度

# これからの原子力技術に求められること

**大型軽水炉の維持補修の高度化**

(更新・寿命延伸への柔軟な対応)

**国民が安心できる原子力技術**

(固有安全炉、身近な小型原子炉)

**原子力新産業の創出**

(熱供給、淡水化、放射線利用)

**柔軟性ある核燃料サイクルの確立**

(国民の信頼性と経済性を考慮した技術継承)

# アジア地域における原子力の役割と課題

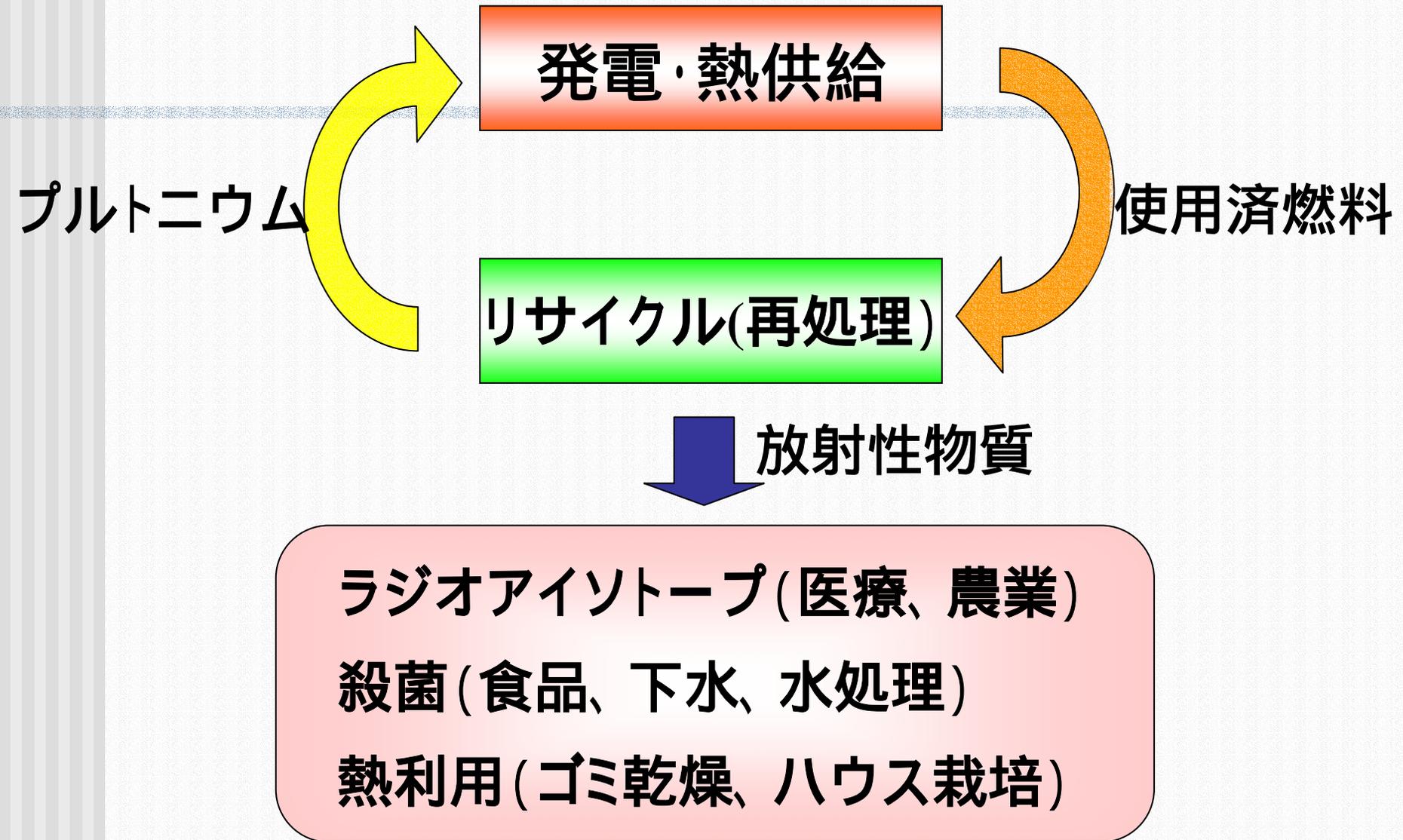
## [役割]

脆弱なエネルギー供給構造からの脱却  
酸性雨と地球温暖化への対策

## [課題]

プルトニウム利用技術の開発  
放射性廃棄物の処理処分技術の確立  
核拡散防止に向けた地域協力

# リサイクル型原子力システム



# 核融合について: 利点

資源の豊富さ

放射線影響の軽減(トリチウムと放射化はある)

安全性が高い(炉の暴走がない)

核拡散問題の軽減

基礎科学の発展

# 核融合について：課題

## 基礎研究の段階

- ・導入は早くても21世紀の後半、
- ・技術的、経済的、社会的な面で評価が難しい

## 技術の位置づけ

- ・ベース電源の更新技術、
- ・水素の製造技術

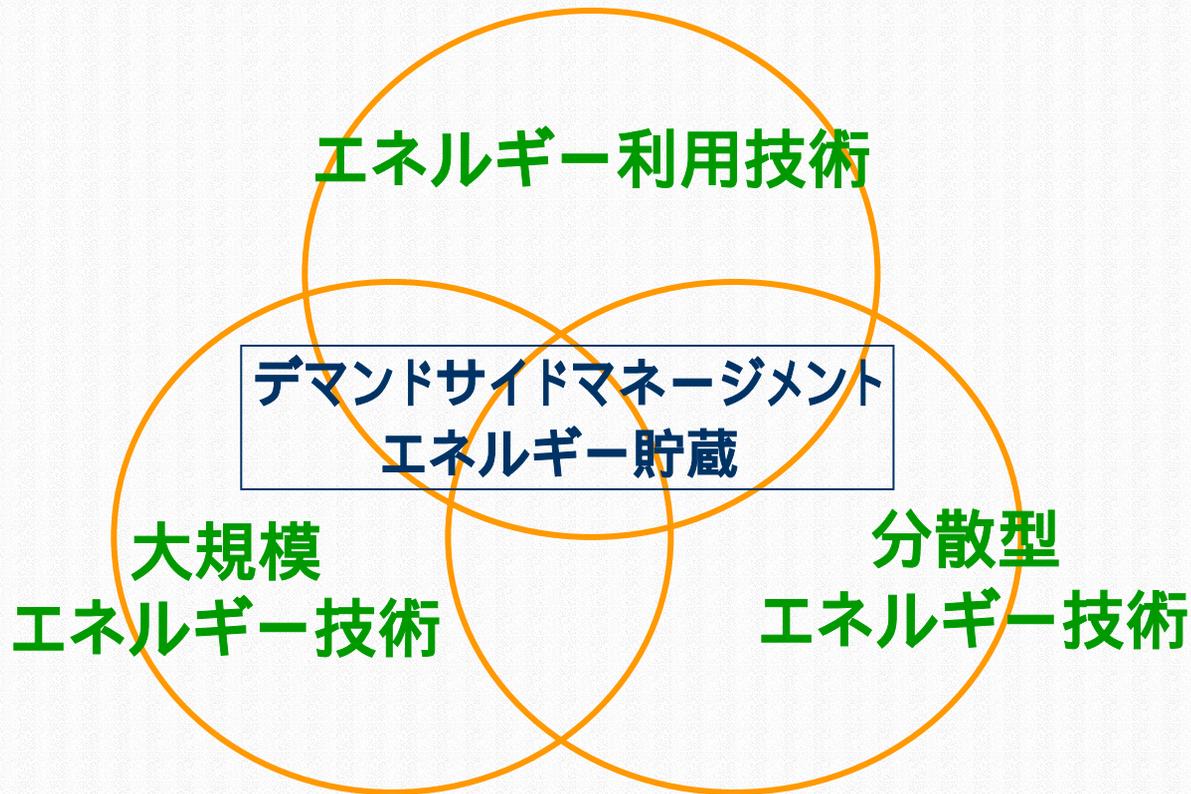
## 経済性問題

- ・巨額な初期投資、
- ・電気代などの運転維持費、
- ・投資資金の回収、
- ・市場の波及効果が小さい、
- ・限られた国の科学研究費、

## 開発体制

- ・若者の原子力離れ、
- ・原子力関連機関の合理化、
- ・民間企業の研究意欲の低下

# これからのエネルギー技術開発 ～ “規模の経済” から “範囲の経済” へ～



# 省庁横断の総合エネルギー政策

## 省エネ・環境重視のインフラ整備

(国土交通省、経済産業省)

## 都市のエネルギー・環境政策

(環境省、国土交通省、経済産業省、地方自治体)

## 地球規模のエネルギー・環境政策

(環境省、外務省、農水省、国土交通省、経済産業省)

## エネルギー・環境税制の見直し

(財務省、国土交通省、経済産業省)

## エネルギー教育

(文部科学省、環境省、経済産業省)