

俯瞰講義：エネルギーと地球環境

エネルギー・地球環境問題における技術の役割
山地憲治(10月22日、29日、11月5日)

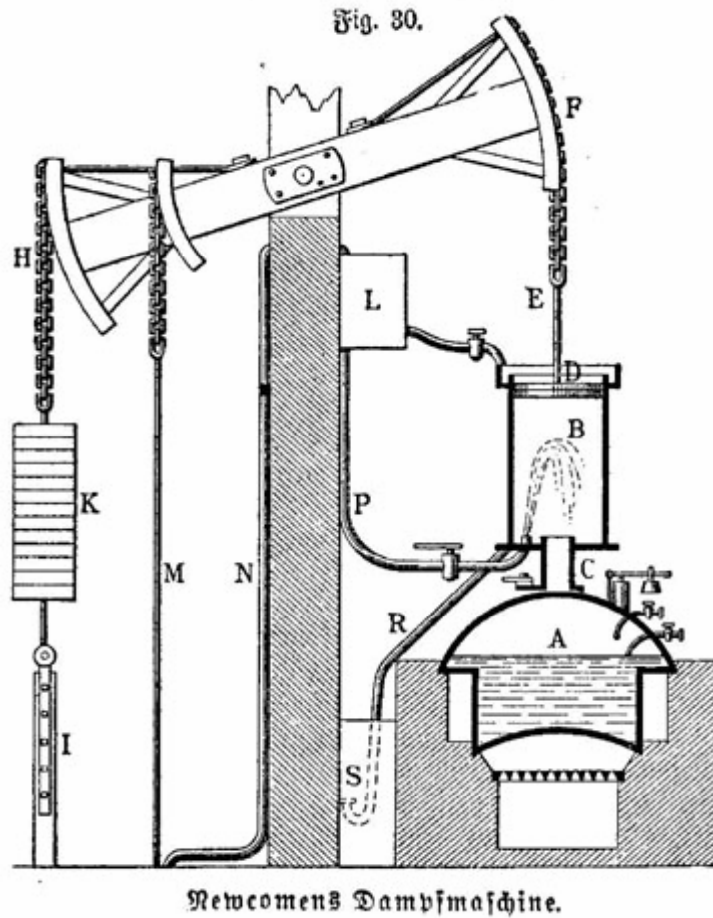
- ・エネルギーシステムの視点
- ・エネルギー資源と技術
- ・地球温暖化対策の長期技術シナリオ

‡:このマークが付してある著作物は、第三者が有する著作物ですので、同著作物の再使用、同著作物の二次的著作物の創作等については、著作権者より直接使用許諾を得る必要があります。

エネルギー資源と技術

- 動力革命を端緒とするエネルギー技術の展開
- 化石燃料資源の利用可能量
- 原子力(核分裂・核融合)技術と資源
- 自然エネルギーの供給力と技術
- これから注目されるエネルギー技術

動力革命の始まり



ニューコメンの
蒸気機関(真空
の力を利用)

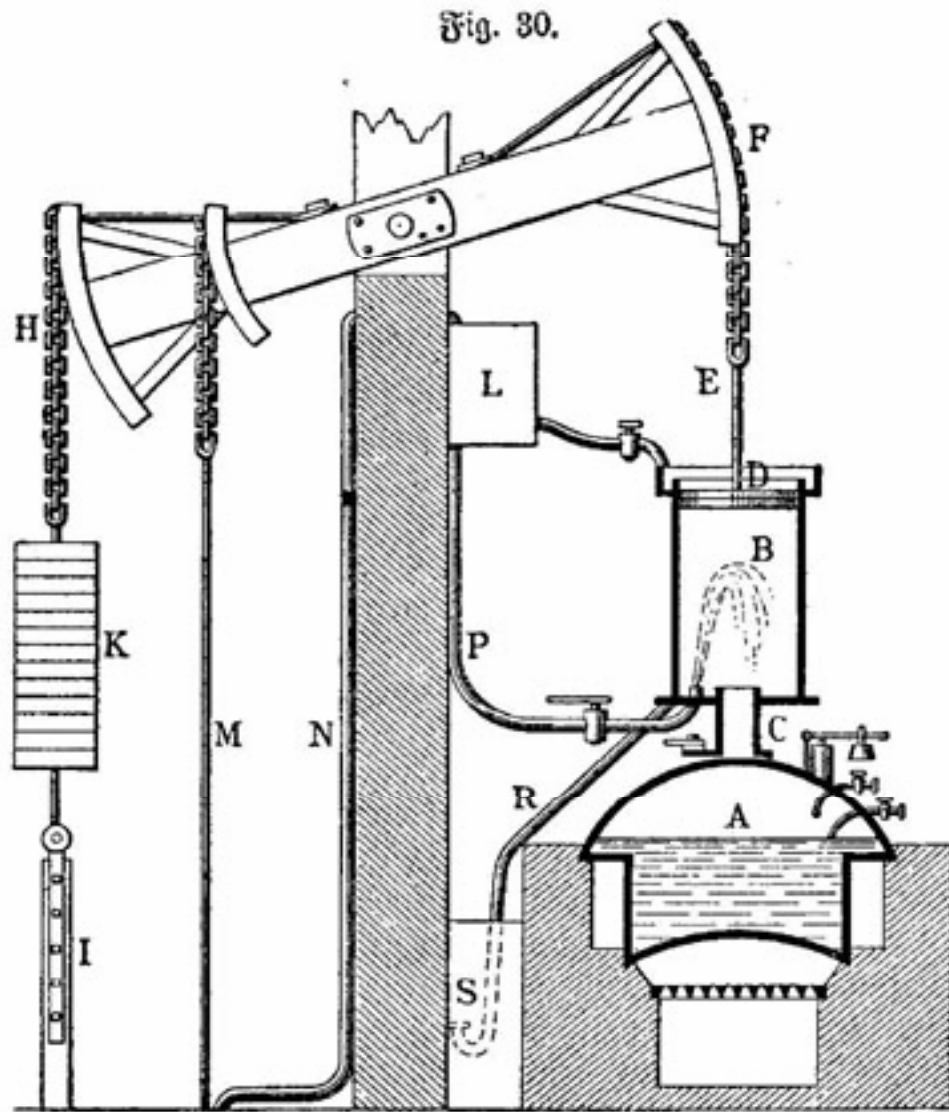


Fig. 30.

ニューコメン の蒸気機関

Newcomens Dampfmaschine.

動力革命から電気と自動車の時代まで

1712:ニューコメン:蒸気機関

1769:ワット:分離凝縮器特許

1800:ボルタ:電池

1814:スチーブンソン:蒸気機関車

1831:ファラデー:電磁誘導の法則

1857:ドレーク大佐:石油生産

1860:ルノワール:実用ガスエンジン

1876:オットー:四サイクルエンジン→1885:ダイムラー:ガソリンエンジン

1879:エジソン:炭素電球、ジーメンス:電車

1882:エジソン:電気事業(会社設立は1881):電力システム

1884:パーソンズ:蒸気タービン

1895:ディーゼル:圧縮着火エンジン(ディーゼルエンジン)

1903:ライト兄弟:飛行機

1938:ハーン:核分裂の発見

1942:フェルミ:原子炉

1944:ホイットル:ジェット機(ガスタービン)

1965:ジェミニ5号に燃料電池搭載

—	蒸気機関
—	電気
—	内燃機関

技術進歩の速度（1）

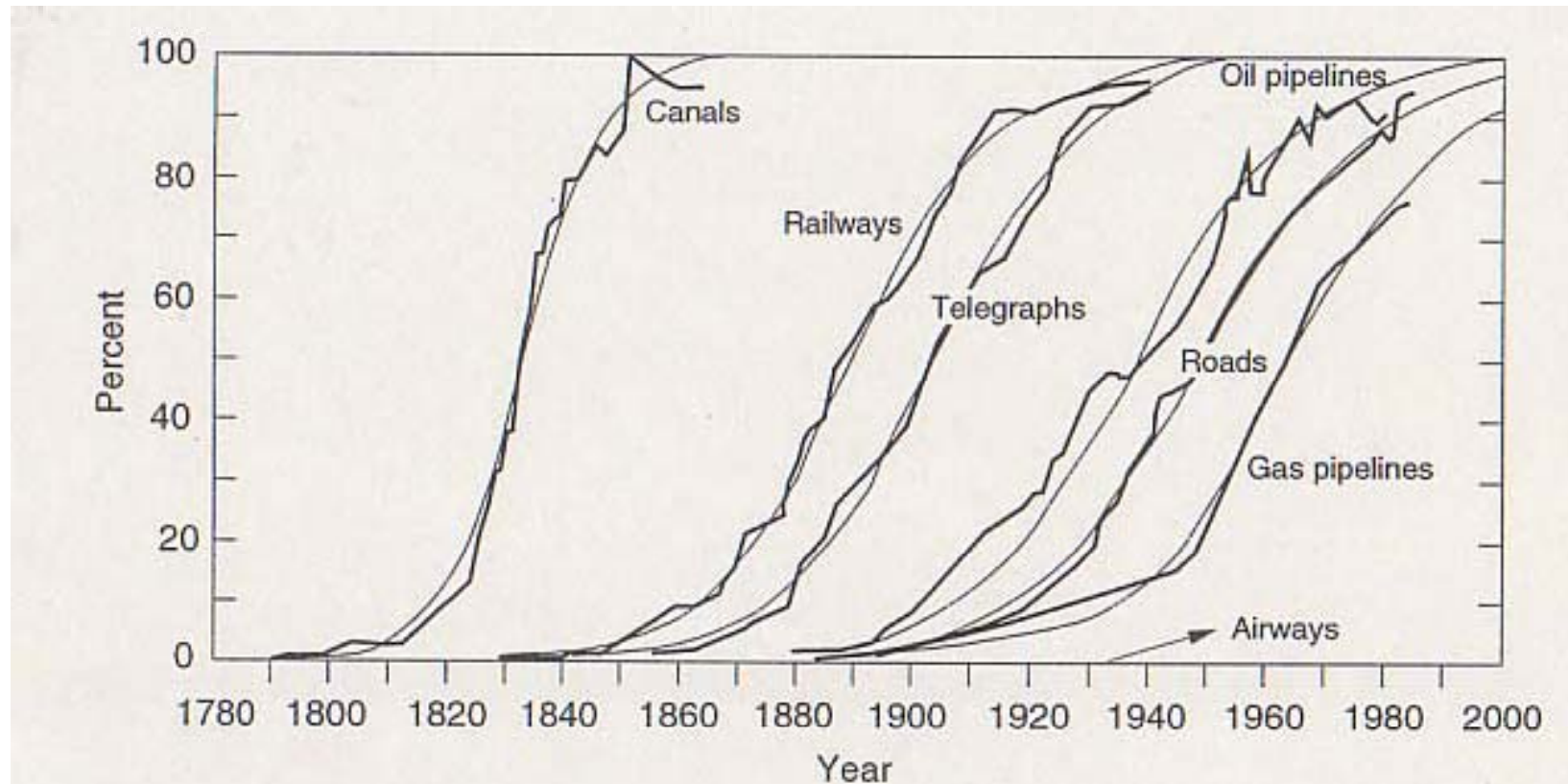
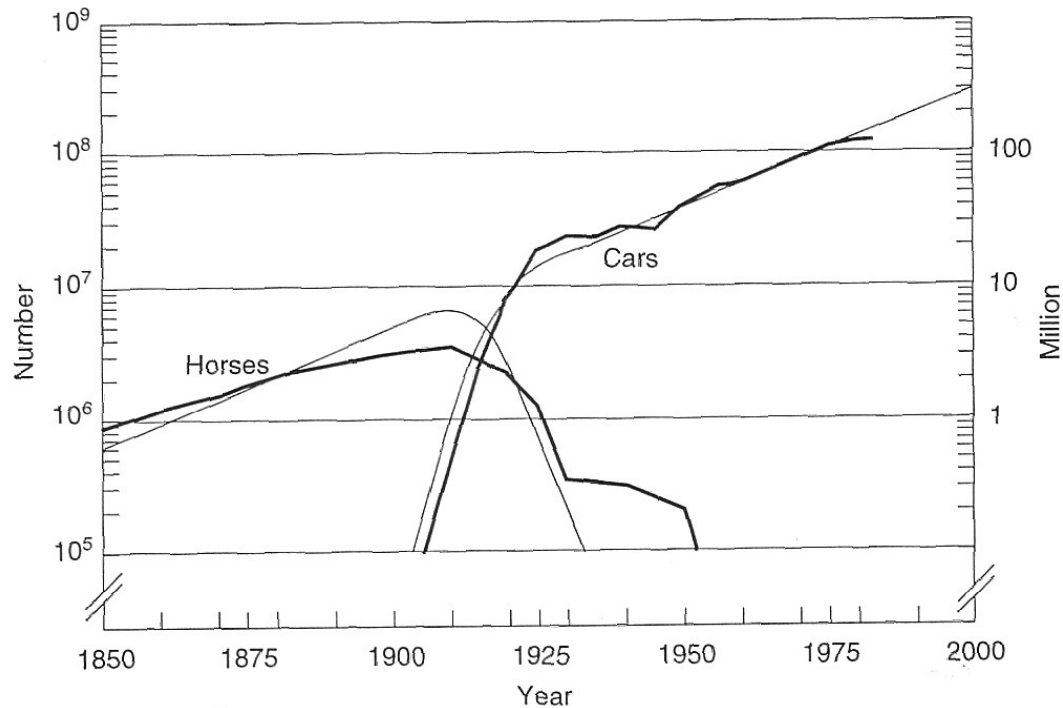


Figure 2.10: Growth of US transport infrastructures as a percentage of their maximum network size, empirical data (bold jagged lines) and model approximation (thin smooth lines). Source: Grübler and Nakićenović (1991). For the data of this graphic see the Appendix.

米国の輸送ネットワークの拡大 ⇒ **インフラの成長は遅い**

技術進歩の速度(2)

Transition from Horses to Cars in U.S.



Model T: 16million cars for
1908—1926: corresponds
160GW introduction in less
than 20 years assuming
10kW/car.

Figure 2.11: Number of (urban) draft animals (horses) and automobiles in the USA, empirical data (bold jagged lines) and estimates (thin smooth lines) from a logistic model of technological substitution. Source: Nakićenović (1986:321).

馬車から自動車への輸送手段の変化(米国)
⇒インフラ上の技術の変化は速い

技術進歩がもたらす需要の拡大例

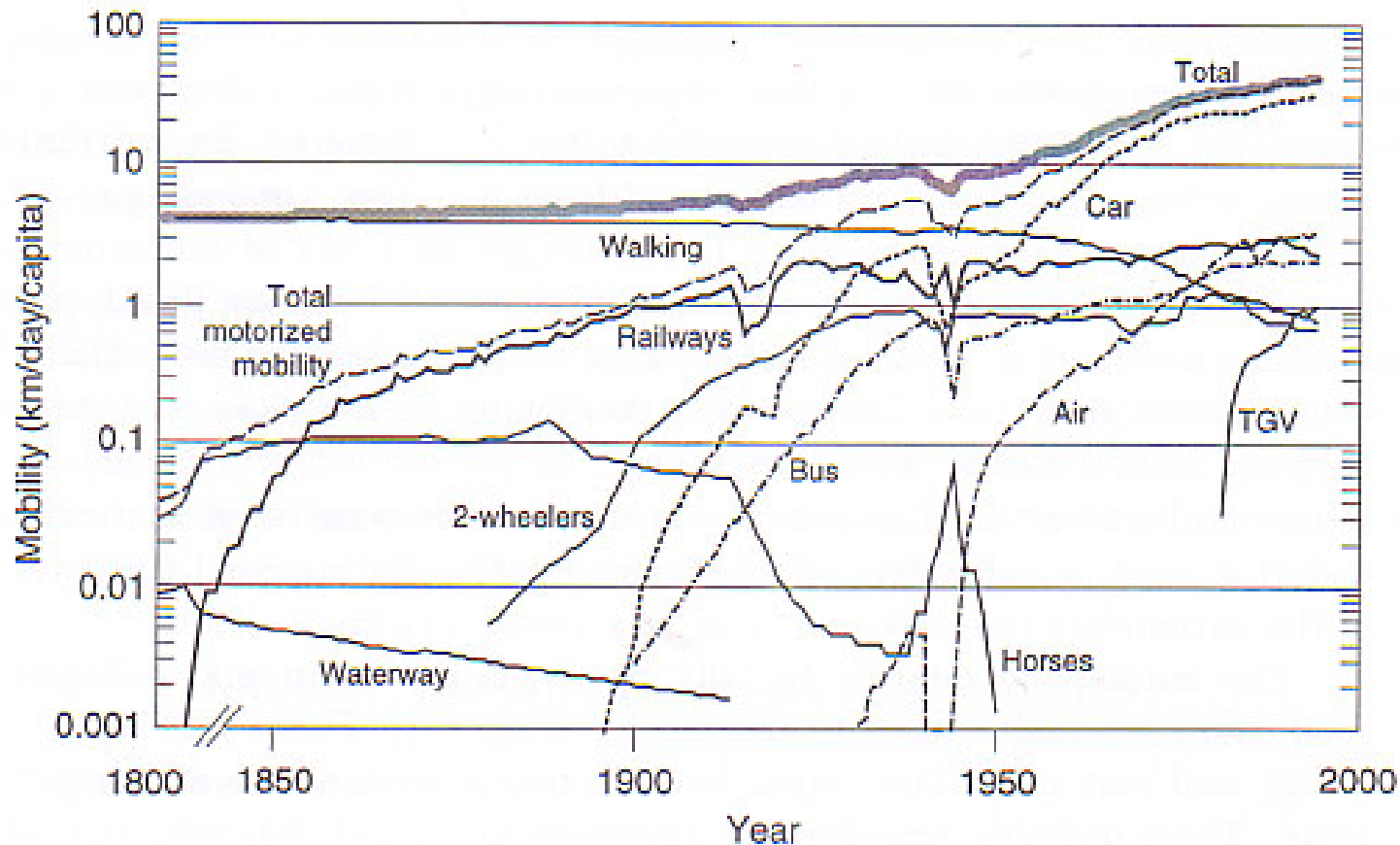
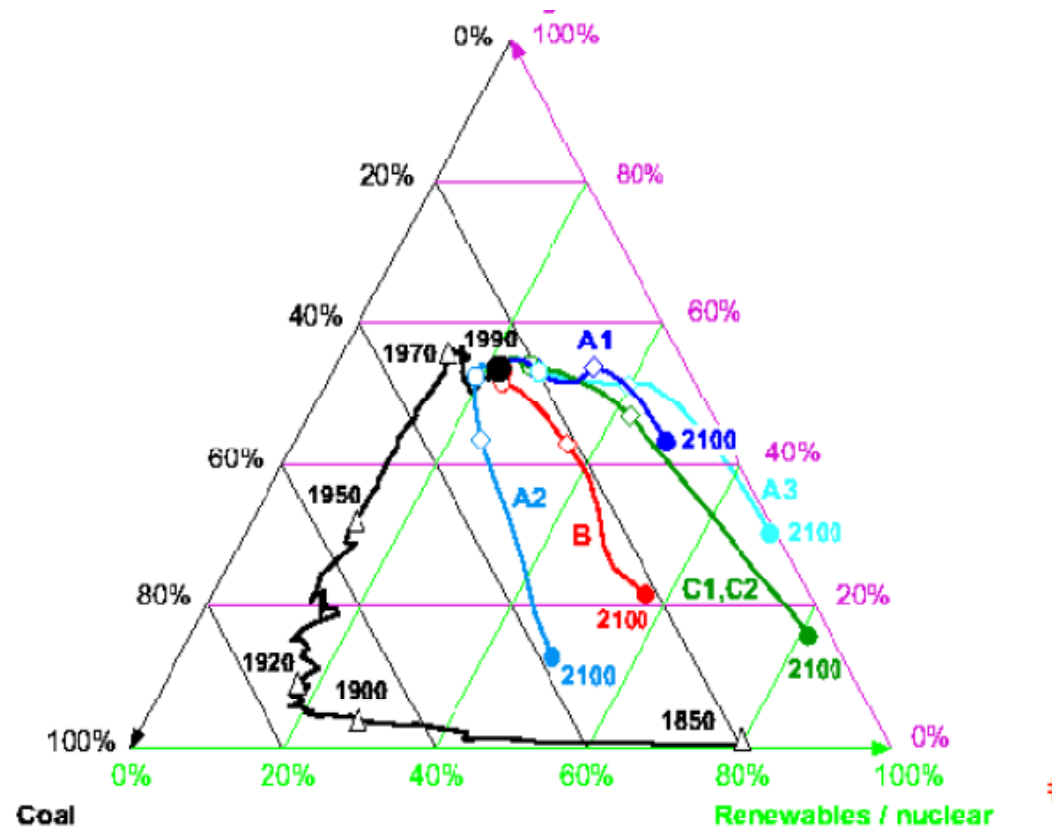


Figure 7.9: Daily mobility (passenger-kilometers traveled per person) in France since 1800, mobility by mode, and total motorized and aggregate mobility. Source: adapted from Grübler (1990a:232). For the data of this graphic see the Appendix.

輸送技術の革新とモビリティ需要の拡大(フランス)

非商業エネルギーを含めた世界の一次エネルギー資源構成の変化：過去と将来の予測

Figure 2: Evolution of primary energy structure, shares of oil and gas, coal, and non-fossil sources, in percent, historical development from 1850 to 1990 (triangles) and in scenarios to 2020 (open circles), 2050 (diamonds), and 2100 (closed circles). For an explanation of the figure see text.



エネルギー資源の定義

— 確認埋蔵量

— 未発見資源

— 究極可採資源量:

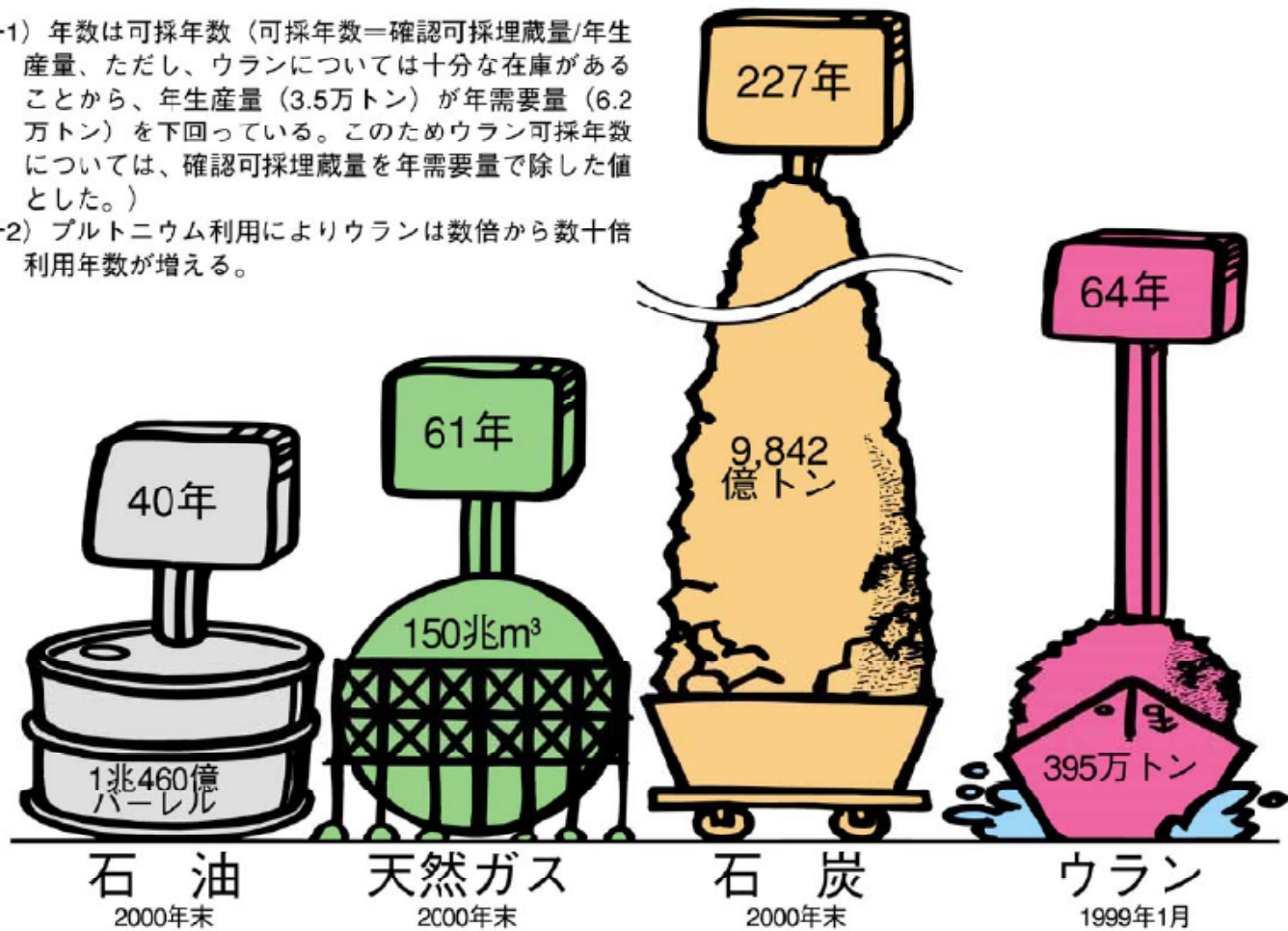
累積使用量 + 確認埋蔵量 + 未発見資源

— 回収費用と回収技術

原始埋蔵量、増進回収技術(EORなど)、...

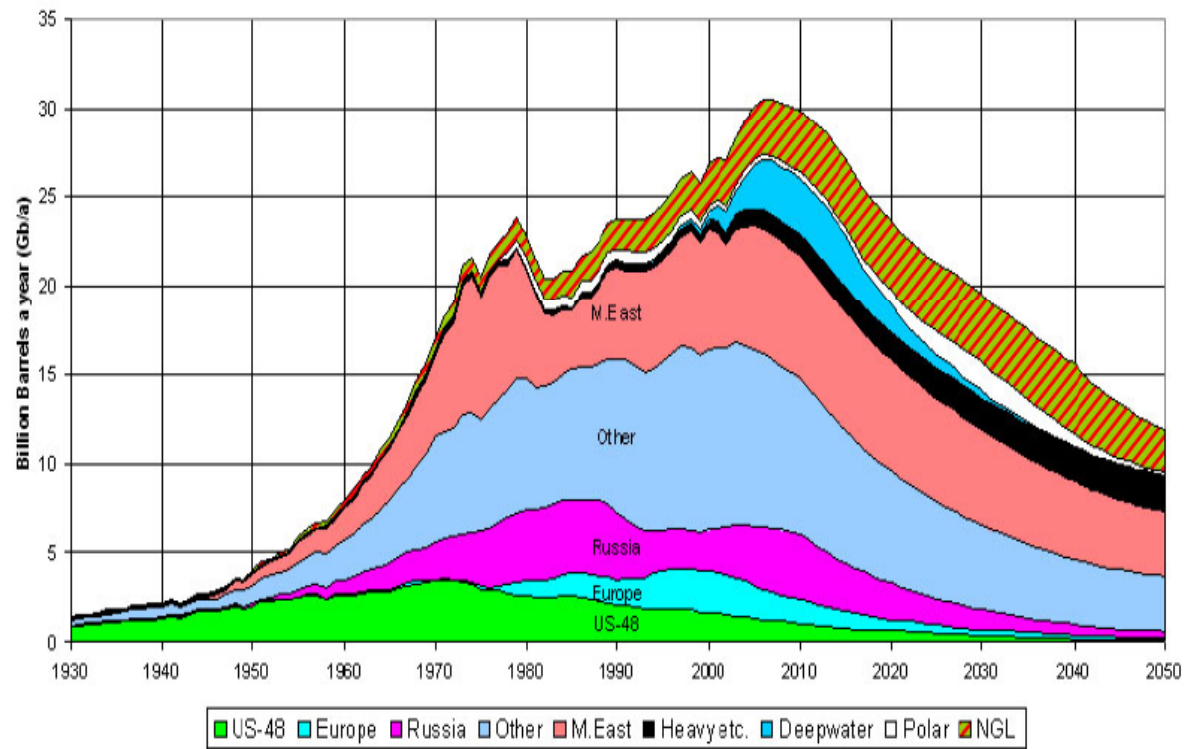
世界のエネルギー資源確認埋蔵量

- (注-1) 年数は可採年数（可採年数＝確認可採埋蔵量/年生産量、ただし、ウランについては十分な在庫があることから、年生産量（3.5万トン）が年需要量（6.2万トン）を下回っている。このためウラン可採年数については、確認可採埋蔵量を年需要量で除した値とした。）
- (注-2) プルトニウム利用によりウランは数倍から数十倍利用年数が増える。

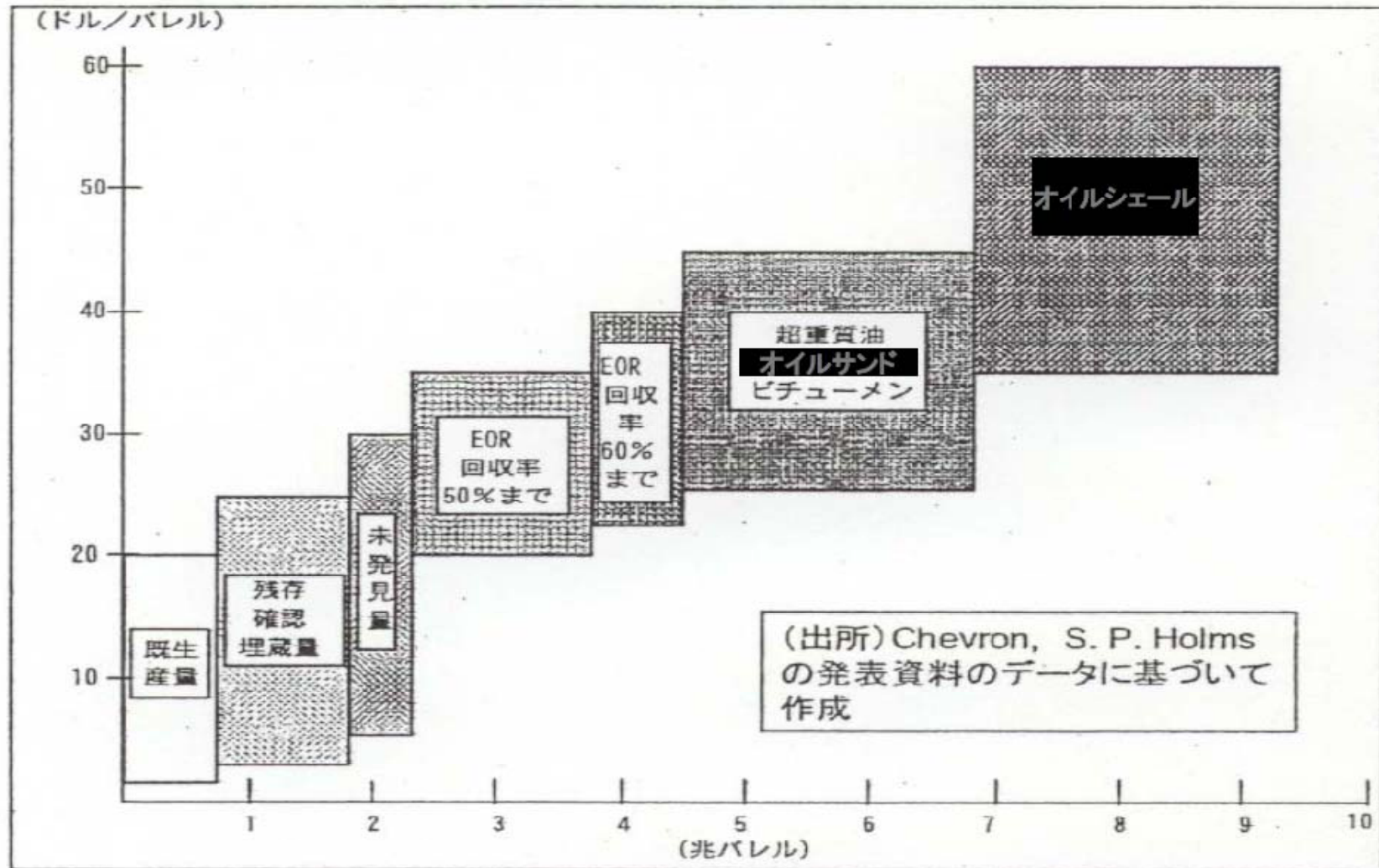


2010年より前に石油ピークが来るとい説 +

OIL AND GAS LIQUIDS
2004 Scenario



在来・非在来資源と原油価格の関係



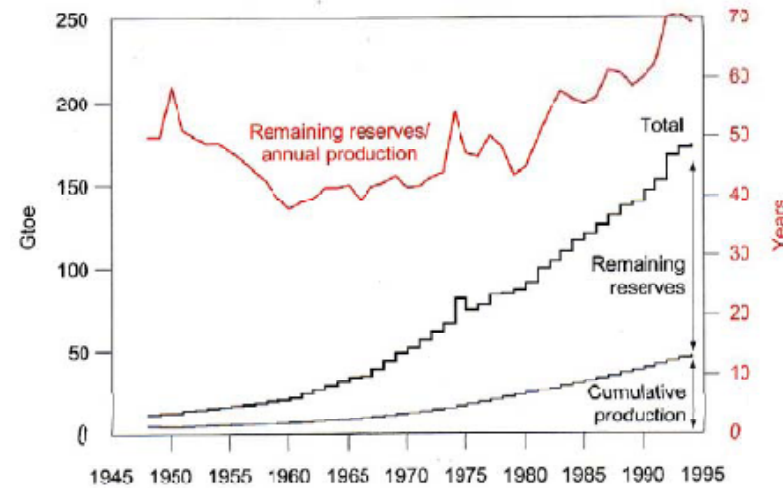
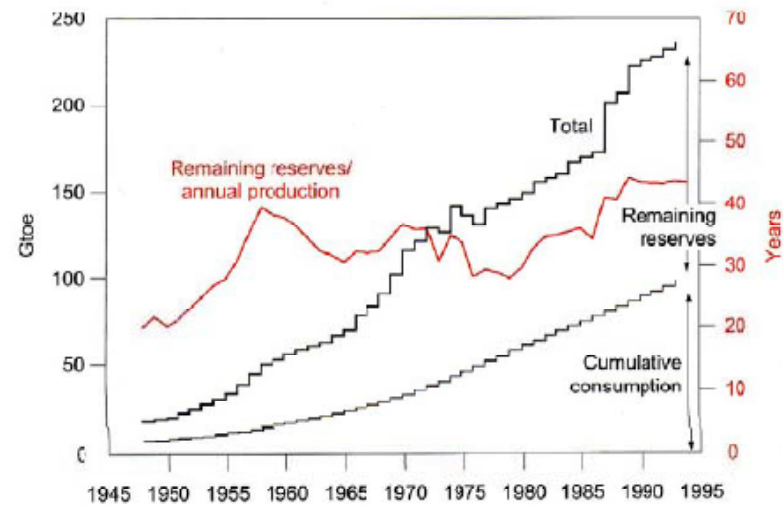


Figure 4.12: Technically and economically recoverable reserves and cumulative production of (*top*) conventional oil and (*bottom*) natural gas, in Gtoe. The increase in the reserve base despite growing production (i.e., the continuous replenishment of reserves from resources) is reflected in the stable or increasing reserve-to-production ratios shown in the figure.

Table 1: Global fossil and nuclear energy reserves, resources, and occurrences, in Gtoe.

	Consumption ^a		Reserves ^b	Resources ^c	Resource base ^d	Additional occurrences
	1850–1990	1990				
Oil						
Conventional	90	3.2	150	145	295	
Unconventional	–	–	193	332	525	1 900
Natural gas						
Conventional ^e	41	1.7	141	279	420	
Unconventional	–	–	192	258	450	400
Hydrates ^f	–	–	–	–	–	<u>18 700</u>
Coal ^g	125	2.2	606	2 794	3 400	3 000
Total ^h	256	<u>7.0</u>	<u>1 282</u>	3 808	<u>5 090</u>	24 000
Uranium ⁱ	17	0.5	57	203	260	150
in FBRs ^j	–	–	3 390	12 150	15 550	8 900

Sources: Masters *et al.*, 1994; Nakićenović *et al.*, 1993; WEC, 1992; Grubler, 1991; MacDonald, 1990; Rogner, 1990; BP, 1995 and earlier volumes; BGR, 1989; Delahaye and Grenon, 1983.

– negligible amounts; blanks, data not available.

^aGrubler and Nakićenović, 1992.

^bMasters *et al.*, 1994; IPCC, 1995b; OECD/NEA and IAEA, 1995; WEC, 1993.

^cResources to be discovered or developed to reserves. Masters *et al.*, 1994 (upper range); IPCC, 1995; OECD/NEA and IAEA, 1995.

^dResource base is the sum of reserves and resources.

^eIncludes natural gas liquids.

^fMacDonald, 1990; Kvenvolden, 1988 and 1993.

^gWEC, 1993.

^hAll totals have been rounded.

ⁱOECD/NEA and IAEA, 1995.

^jFast breeder reactors.

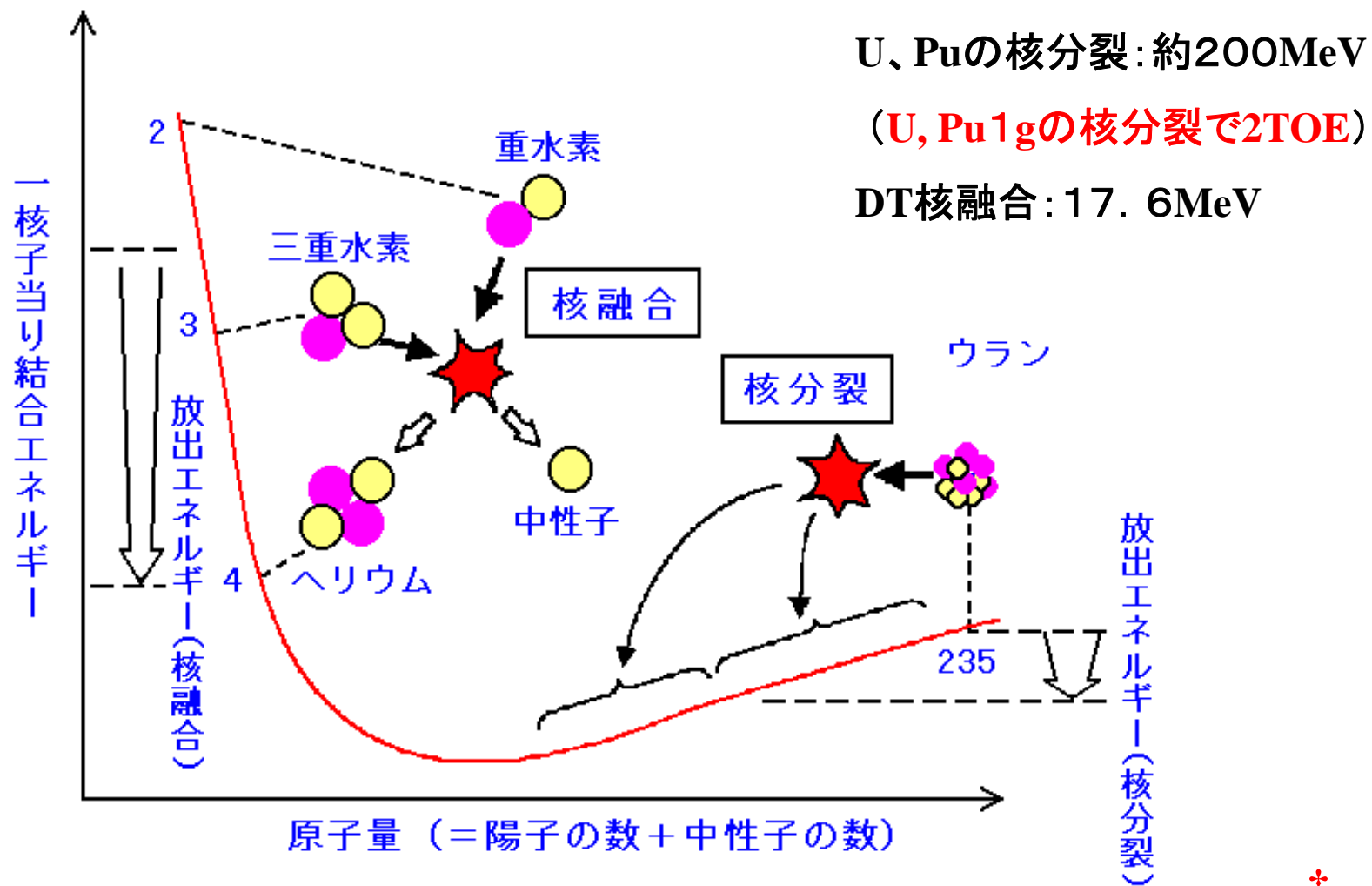
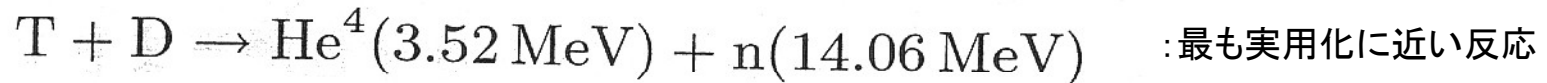
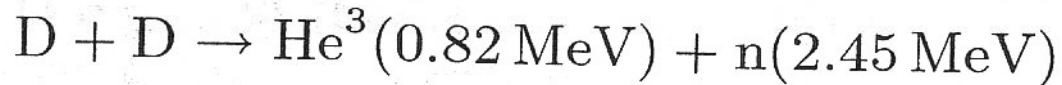


図1 核子間結合エネルギーと核反応エネルギー

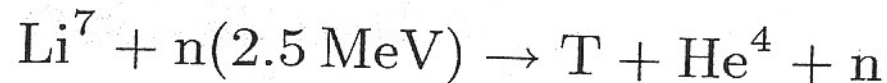
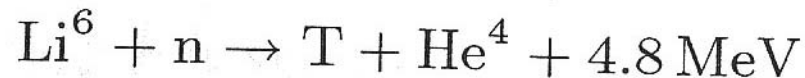
[出典] 狐崎 晶雄: 解説 核融合、JAERI-M 90-150、日本原子力研究所(1996年5月)、p.9 図1

核融合反応の種類 Fusion Reactions



中性子(n)が発生すると材料の放射化を起こす

3重水素(T)は天然には存在しないのでリチウムから製造する必要がある



リチウム同位体の天然存在比

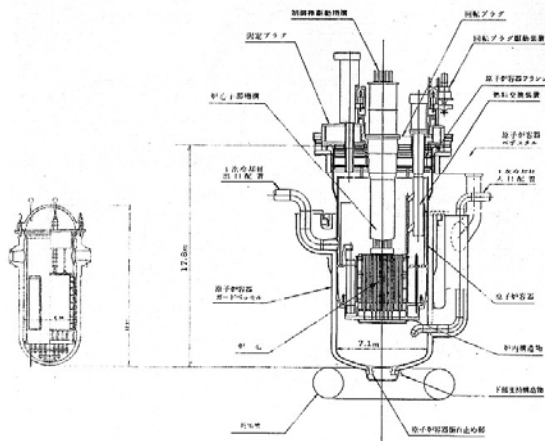
$$\text{Li}^6/\text{Li}^7=7/93$$

軽水炉 → 高速増殖炉 → 核融合炉 への変化は起こるだろうか？

LWR, FBR, and Fusion Reactor

敦賀2号

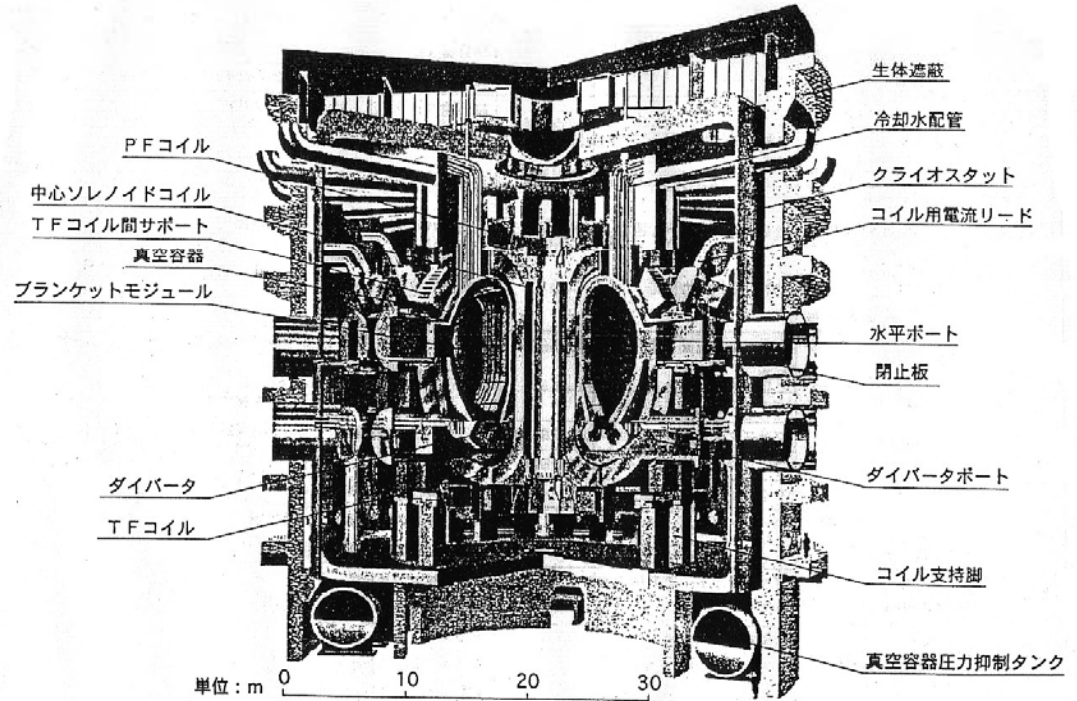
もんじゅ



敦賀2号・もんじゅ原子炉容器の比較

敦賀2号(PWR)：電気出力116万kWe

もんじゅ(FBR原型炉)：電気出力28万kWe



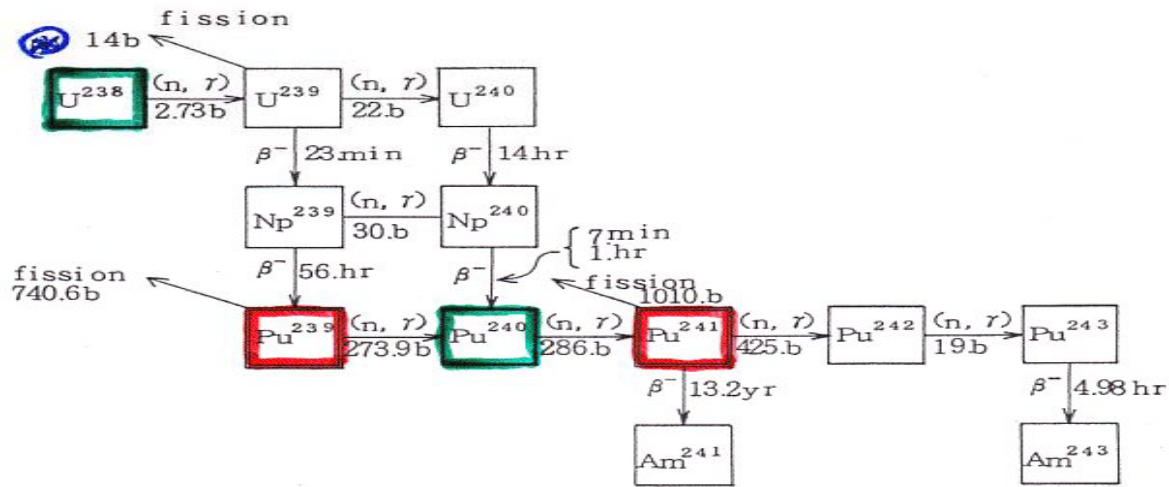
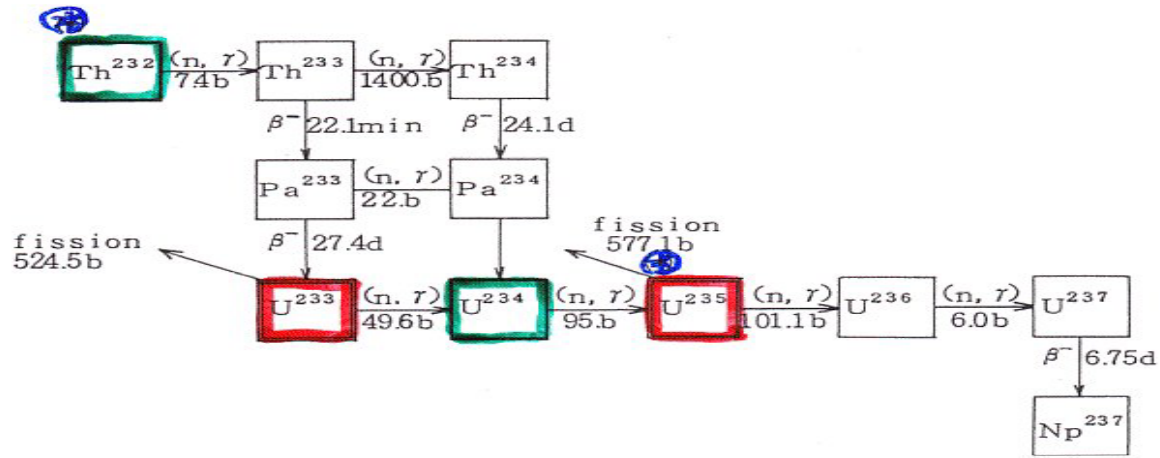
ITERのトカマク本体

ITER(核融合実験炉)：熱出力150万kWt?

炉容器の大きさの比較



山崎 隆浩, 990609



: Fissile Nuclide
 : Fertile Nuclide

: 本論文では、これらの核種には注目しない。
 : 天然に存在する核種を示す。(極微量のものは無視している。)

現在使用している軽水炉における核燃料の燃え方 Fuel burning in LWR

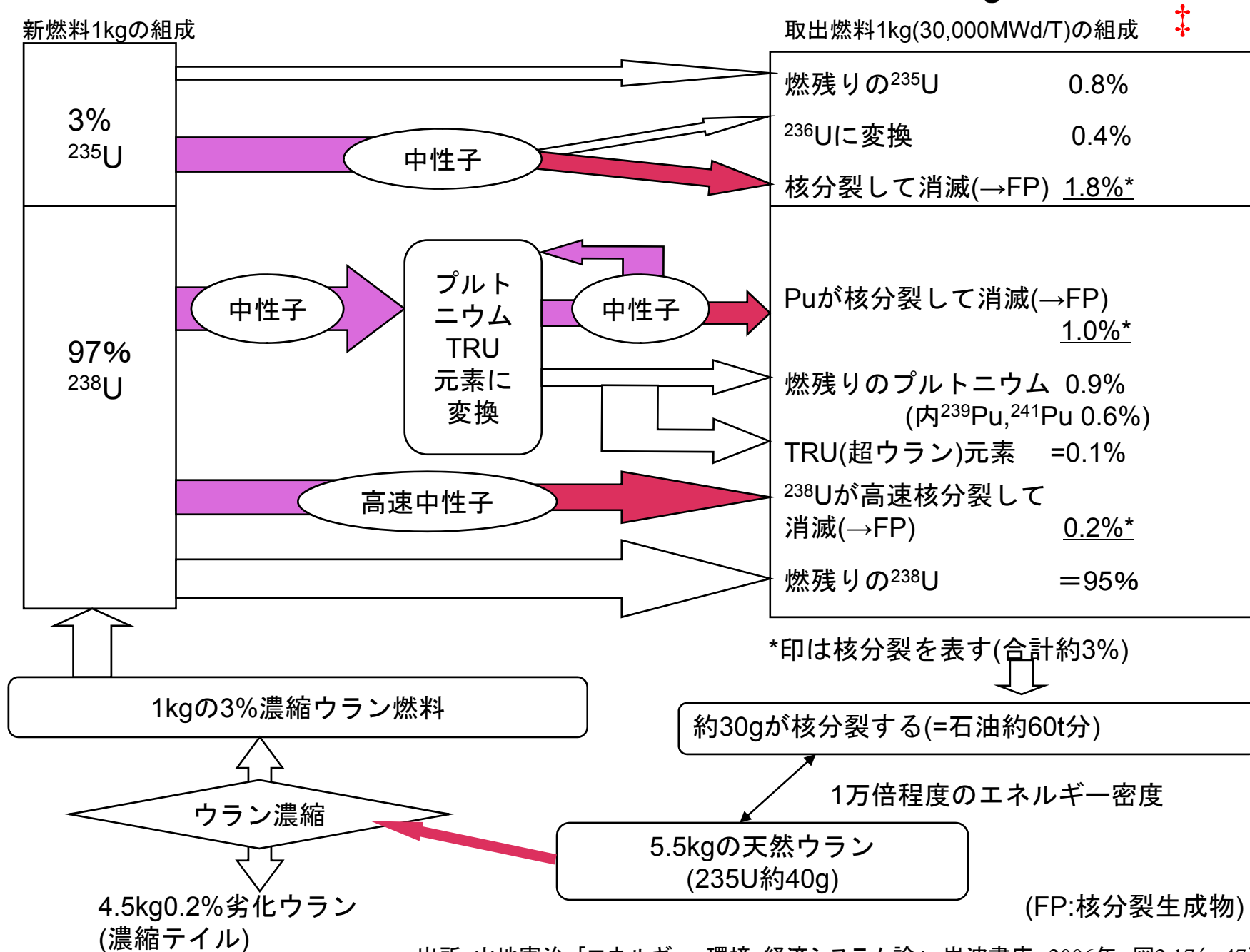


表8 世界の国別ウラン資源埋蔵量
(2001年1月1日現在)

(単位:1,000トンU)

国名	確認埋蔵量*1
オーストラリア	930
カザフスタン	854
カナダ	437
南アフリカ	367
米国	348
ナミビア	283
ブラジル	262
ロシア	175
ウズベキスタン	172
ウクライナ	131
モンゴル	83
インド	78
中国	73
ニジェール	55
日本	7
その他	288
合計	4,543
調整後合計*2	4,084

資料:OECD/NEA,IAEA URANIUM Resources,
Production, Demand 2001

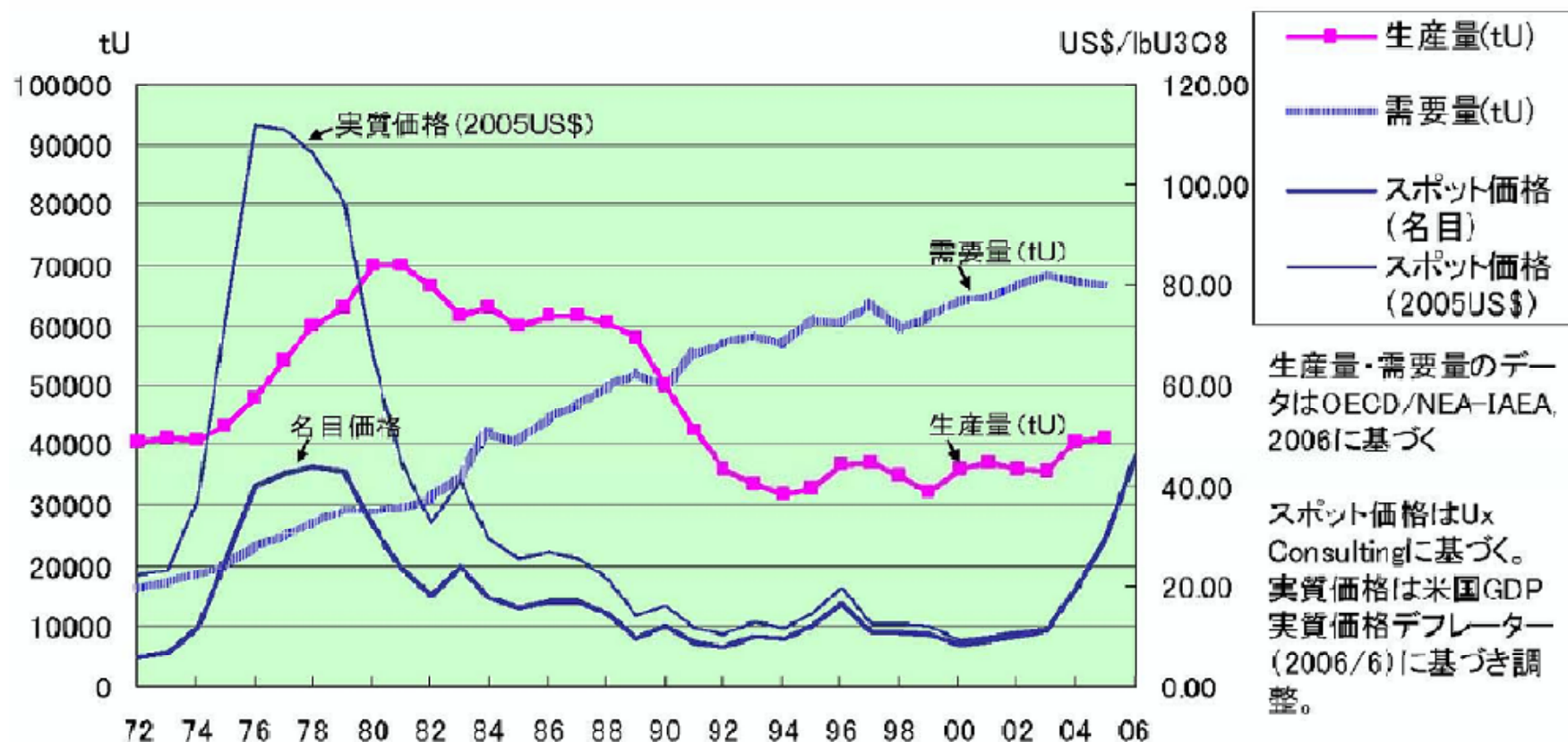
(注) *1:ここで確認埋蔵量とは出典資料の「既知
資源」に該当。

*2:調整後合計は、採鉱・精錬ロスを差し引
いた値。

[出典]原子力委員会(編):原子力白書
平成15年版(2003年12月)、p.139



ウランの生産量・需要・スポット価格の推移

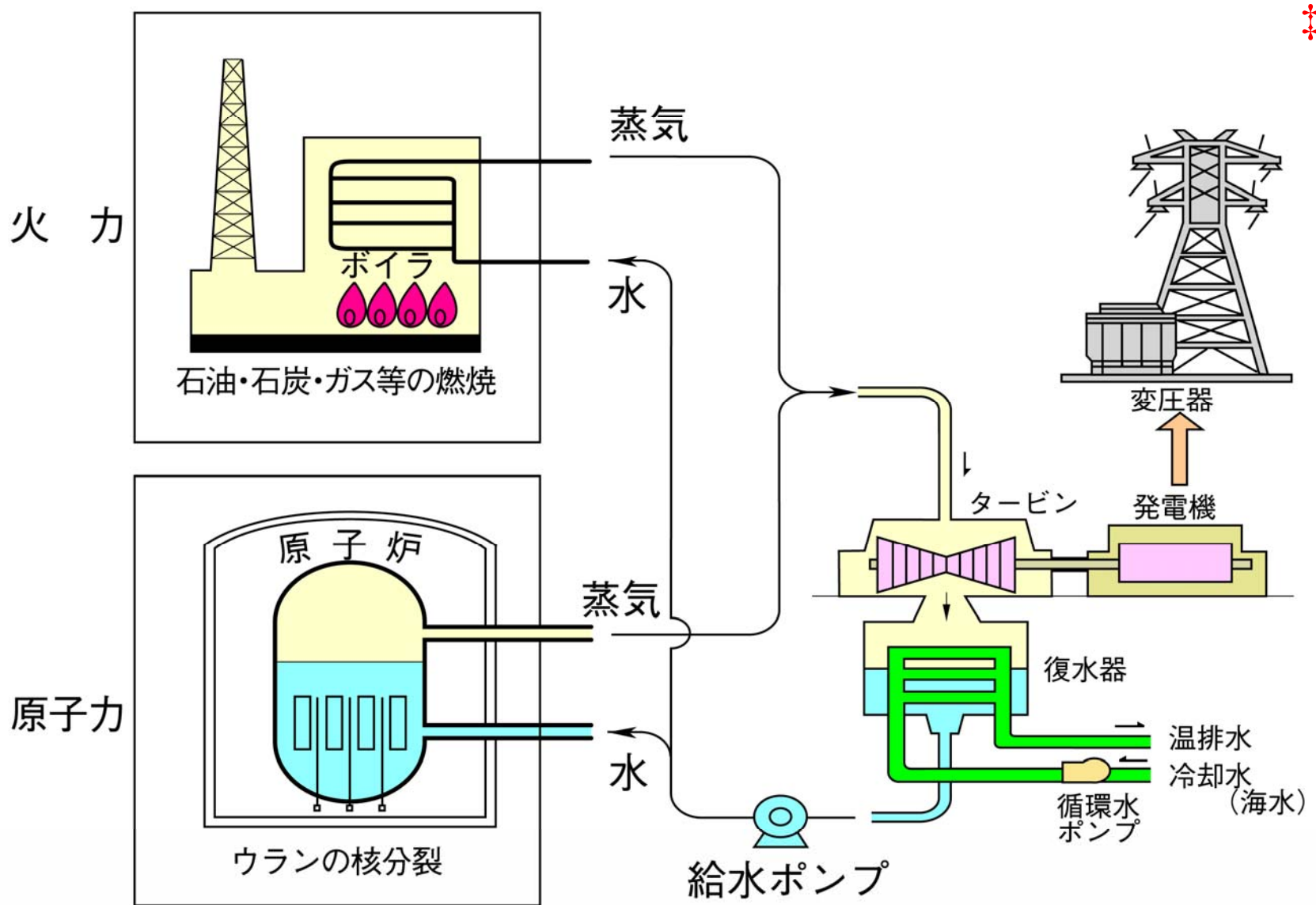


生産量・需要量のデータはOECD/NEA-IAEA, 2006に基づく
 スポット価格はUx Consultingに基づく。
 実質価格は米国GDP実質価格デフレーター(2006/6)に基づき調整。

* 需要量と供給量の差は商業在庫、核軍縮HEU、劣化ウラン再濃縮、回収ウラン等で賄われている。

出所： <http://www.jaea.go.jp/03/senryaku/seminar/06-10.pdf> (p21)

火力発電と原子力発電の違い



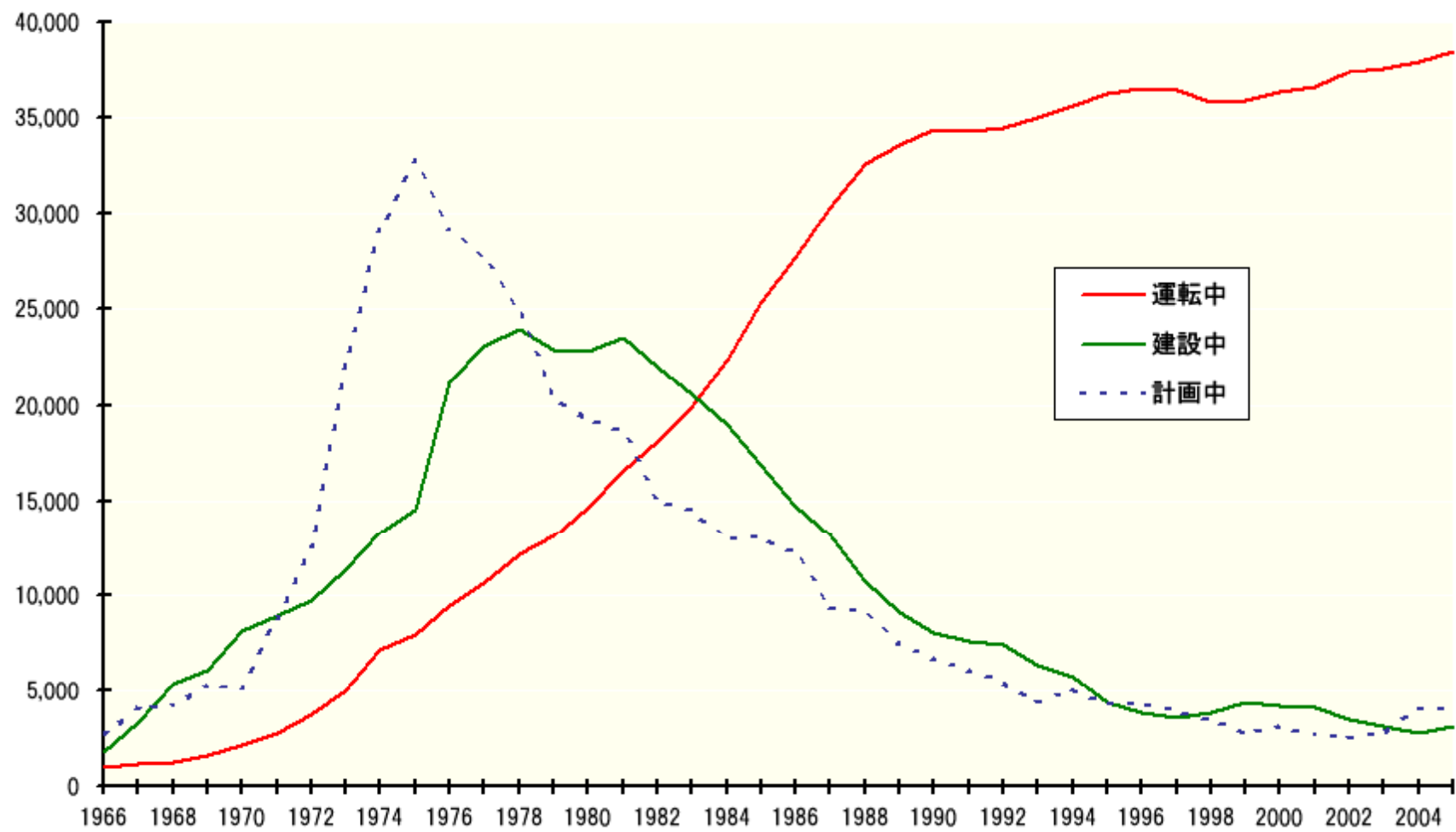
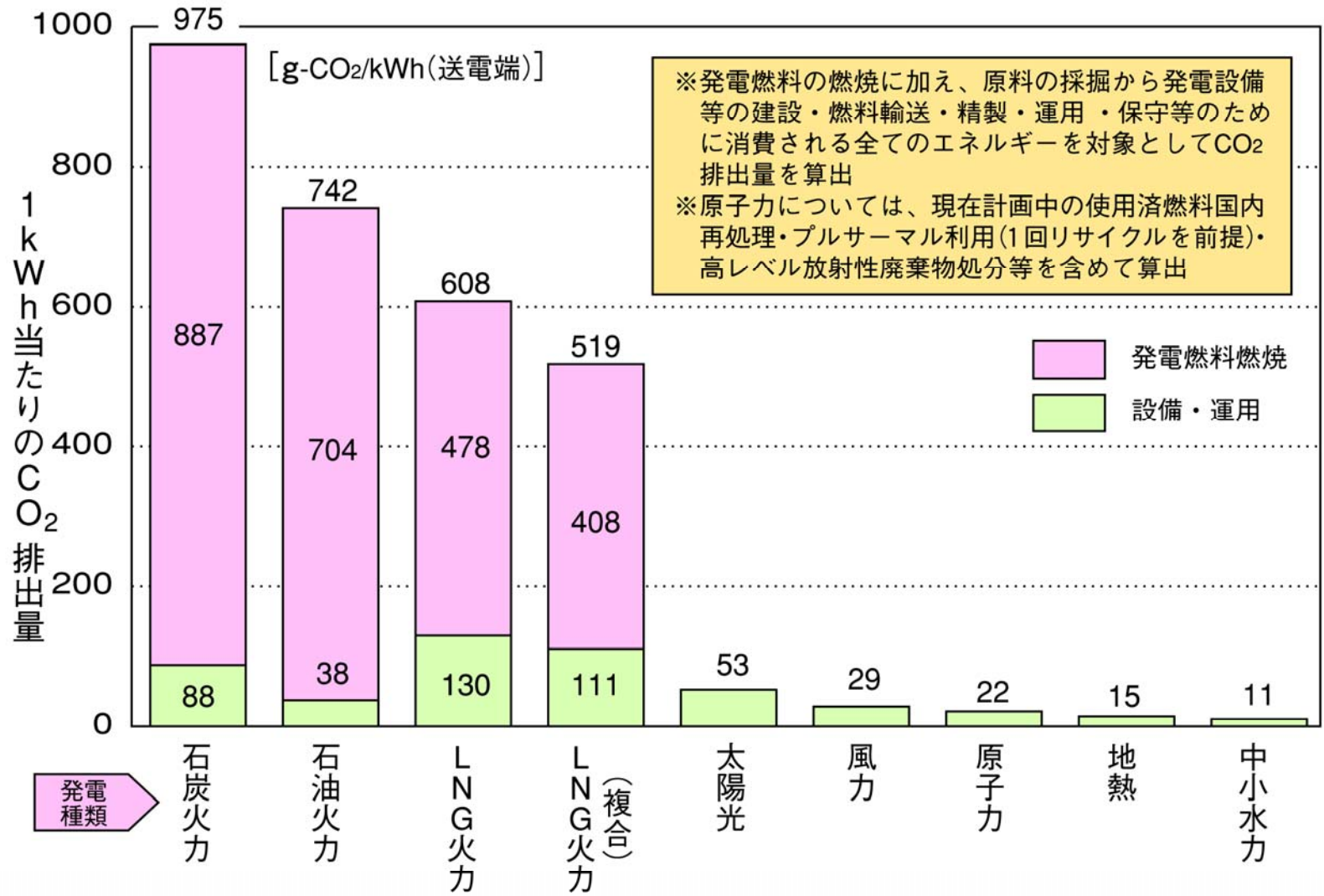
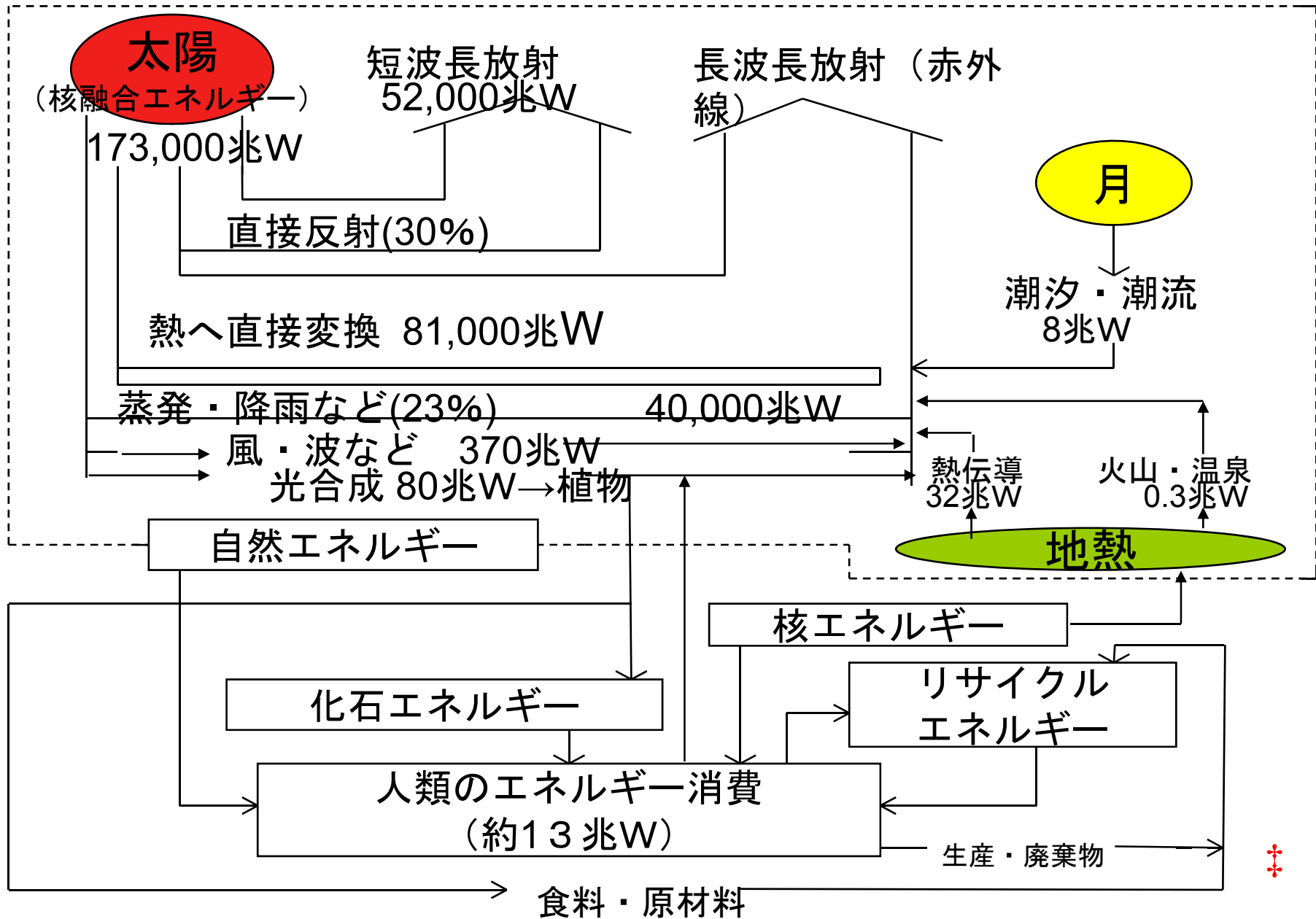


図2 世界の原子力発電設備容量の推移

出所: <http://www.nucpal.gr.jp/atomica/chart.html>

各種電源別のCO₂排出量





地球のエネルギーバランスと各種エネルギー資源

出所: 山地憲治、「エネルギー・環境・経済システム論」、岩波書店、2006年 図1.2(p. 19)

自然エネルギーは資源量よりも経済性が問題

太陽電池のケース

予備知識:

設備利用率 = 実際の発電量(kWh) / (設備の定格容量(kW) × 8760(h))

太陽電池の定格容量を1kWとすると日本の日射条件では年間発電量は約1000kWh

太陽電池の設備利用率は11~12% (=1000/8760); 火力や原子力では70~80%

太陽電池発電の経済性:

設備コスト: X円/kW

設置に必要な面積: 効率 η として $1/\eta$ (m²/kW)、 $\eta=10\%$ なら、100万kWで10km²

設備寿命: Y年

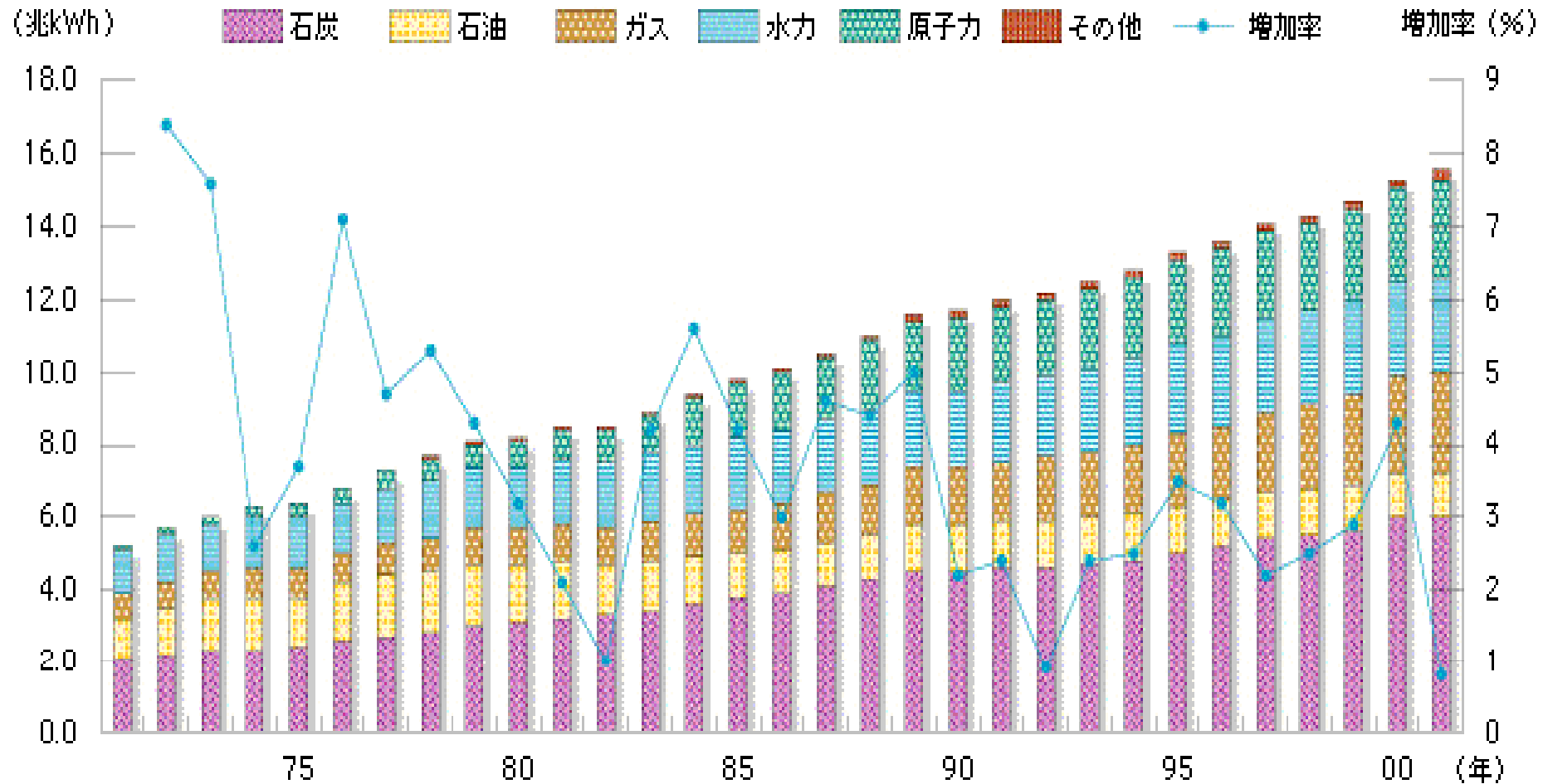
割引率*を考量しない場合での単純発電コスト: X/1000Y

X=50万円、Y=20年 → 発電コスト=25円/kWh

しかし、上記の計算は甘すぎる:

- 1) 割引率(将来のお金の価値は割り引かなければならない): 3%/年とすると20年間での資本回収係数は0.067 → 毎年0.067X円の資本コスト → 発電コスト=33.5円
- 2) 太陽電池の電気は必要なときに供給されるとは限らない → 蓄電設備などの追加コストが必要

世界の発電電力量



資料：IEA「Energy Balances of OECD Countries」「Energy Statistics and Balances of non-OECD Countries」

新エネルギー導入実績と導入目標 New Energy in Japan

		2002年度	2010年度目標	
発電分野	太陽光発電	15.6万kl(63.7万kW)	118万kl(482万kW)	} 838 万Kl
	風力発電	18.9万kl(46.3万kW)	134万kl(300万kW)	
	廃棄物発電+ バイオマス発電	174.6万kl (161.8万kW)	586万kl (450万kW)	
熱利用分野	太陽熱利用	74万kl	90万kl	} 1072 万Kl
	廃棄物熱利用	164万kl	186万kl	
	バイオマス熱利用	68万kl	308万kl※1	
	未利用エネルギー※2	4.6万kl	5.0万kl	
	黒液・廃材等※3	471万kl	483万kl	
合計 (対1次エネルギー供給比)		991万kl (1.7%)	1,910万kl (3%程度)	

※発電分野及び熱利用分野の各内訳は、目標達成にあたっての目安

※1 輸送用燃料におけるバイオマス由来燃料（50万kl）を含む。

※2 未利用エネルギーには雪氷冷熱を含む。

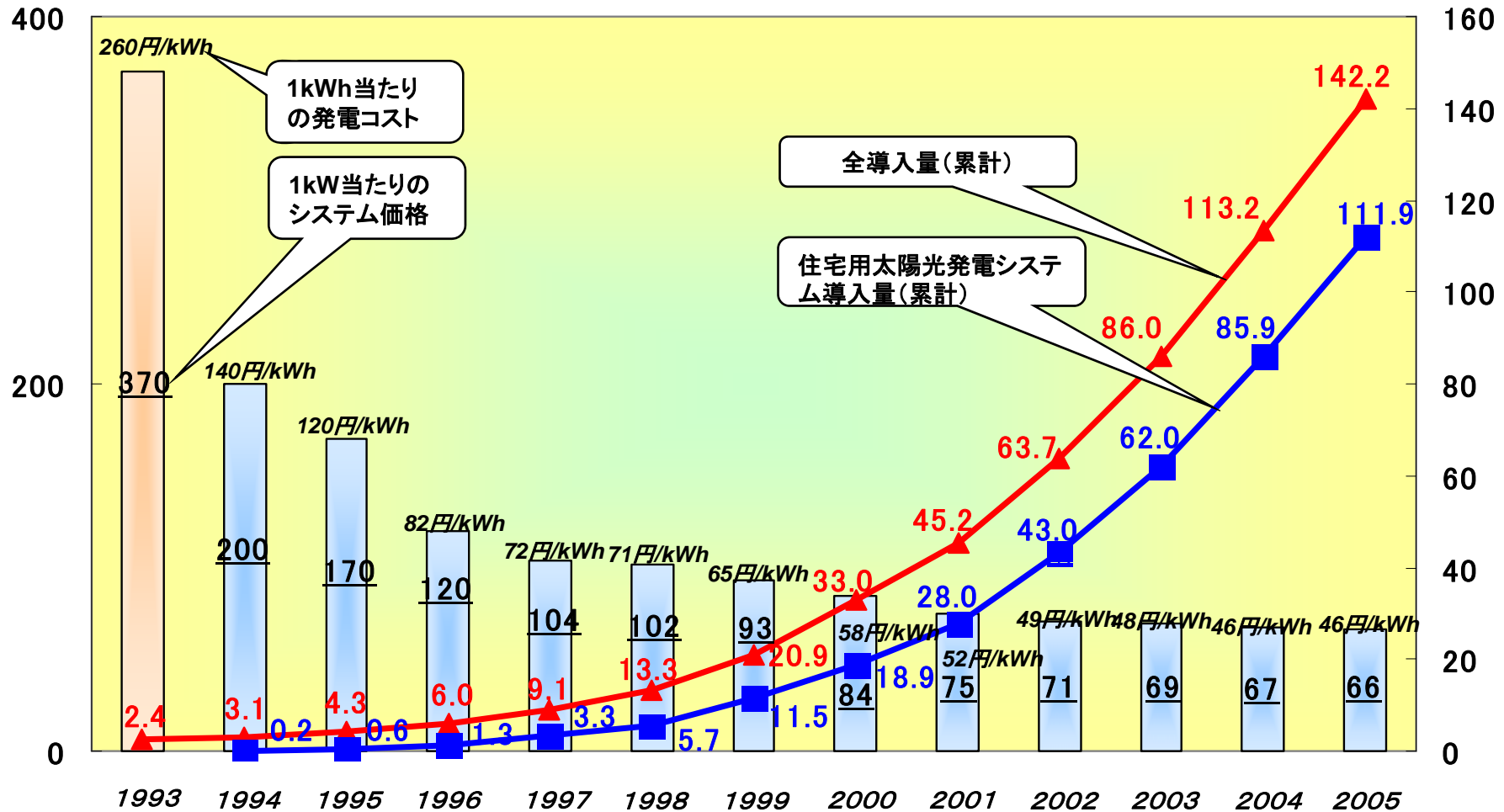
※3 黒液・廃材等はバイオマスの1つであり、発電として利用される分を一部含む。黒液・廃材等の導入量は、エネルギーモデルにおける紙パの生産水準に依存するため、モデルで内生的に試算されたもの。

～日本における太陽光発電に係る現状～ PV in Japan

- ・太陽光については、90年代前半と比較して1/5のコスト削減を達成。
- ・その結果、世界トップレベルの技術力と導入量を確保。

住宅用太陽光発電システム価格
(万円/kW)

太陽光発電導入量
(万kW)

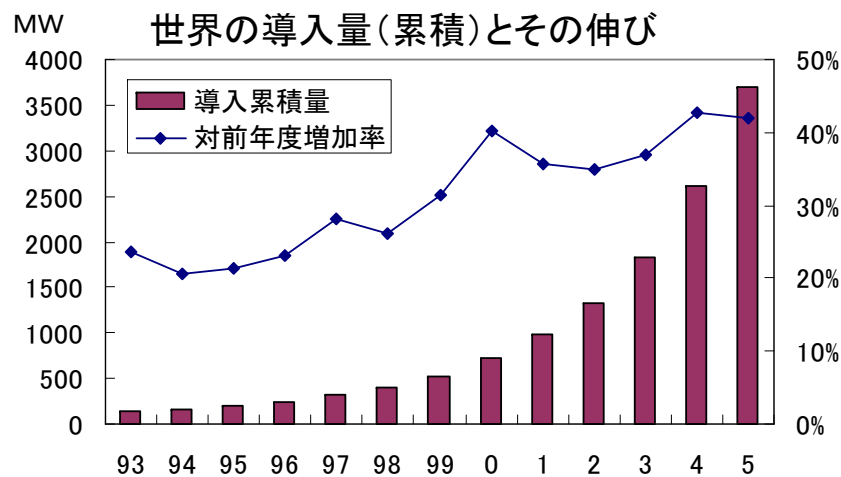


太陽光発電協会等のデータより作成

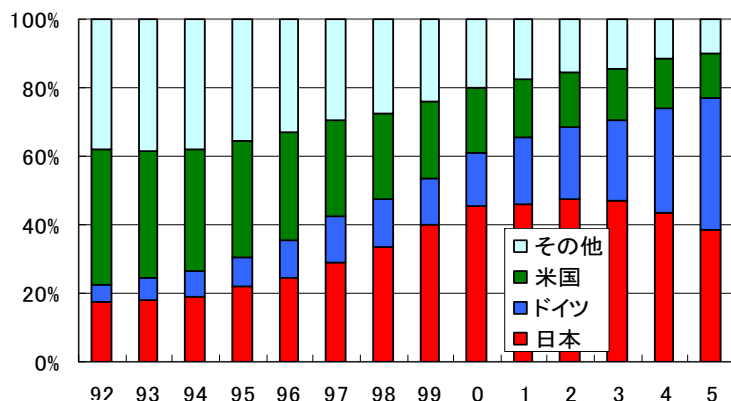
再生可能エネルギーに関する国際的な動向(導入量) ✦

- ・近年、世界全体で、太陽光の累積導入量は前年度比40%前後の伸びで増加。風力は20~25%前後の伸び。
- ・太陽光では、ドイツが日本と同じレベルに累積導入量で到達。風力では、日本はシェアを伸ばしているが、主要国と比較すると依然低いレベル。

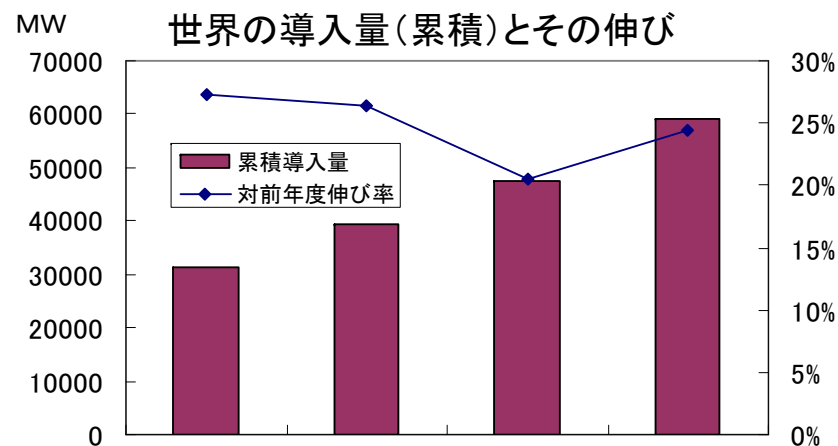
太陽光 PV



導入量(累積)に係る各国シェア



風力 Wind Power



導入量(累積)に係る各国シェア

	2001年末	2005年末
ドイツ	8753(35.6%)	18427(31.1%)
スペイン	3335(13.6%)	10028(16.9%)
アメリカ	4245(17.2%)	9142(15.4%)
日本	300(1.2%)	1150(1.9%)
世界合計	24574(100%)	59206(100%)

日本における現状と現行目標

～再生可能エネルギーの位置づけと我が国の現状～

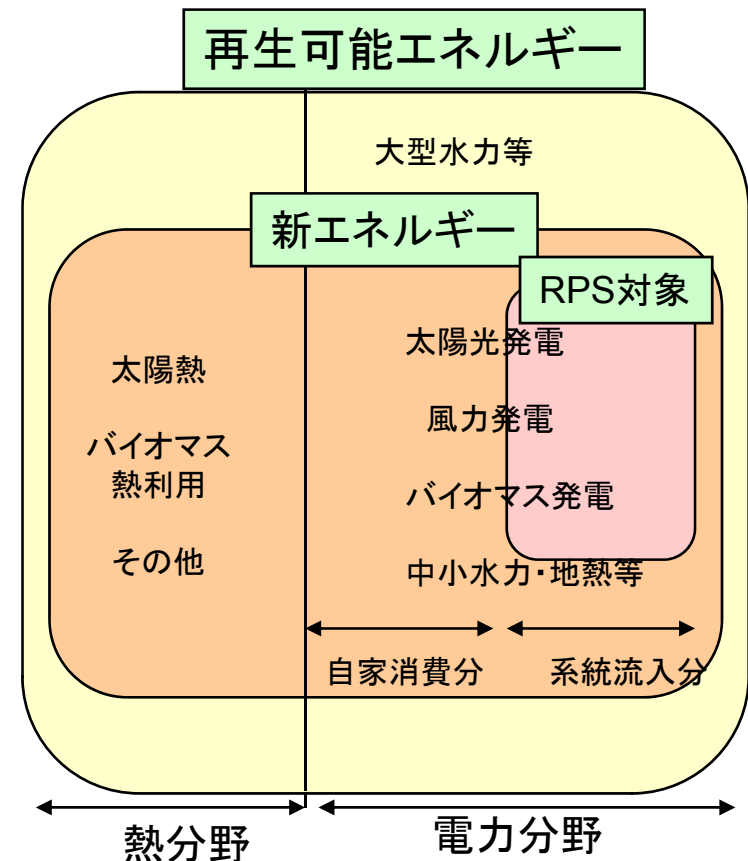
・電力分野における再生可能エネルギー全体で見た場合、現状において、我が国は、欧州、米国と比較して、遜色のないレベルで導入されている。

再生可能エネルギー(電力分野)の導入比率
(三極比較)

	日本	欧州(EU15)	米国
水力	8.2%	10.1%	6.9%
地熱	0.33%	0.20%	0.37%
バイオマス	1.21%	1.38%	1.34%
風力	0.09%	1.62%	0.28%
太陽光	0.09%	0.02%	0.01%
合計	9.9%	13.3%	8.9%

(出典) 日本のみ資源エネルギー庁データ。その他は IEA, "Energy Balances of OECD Countries, 2003-2004"

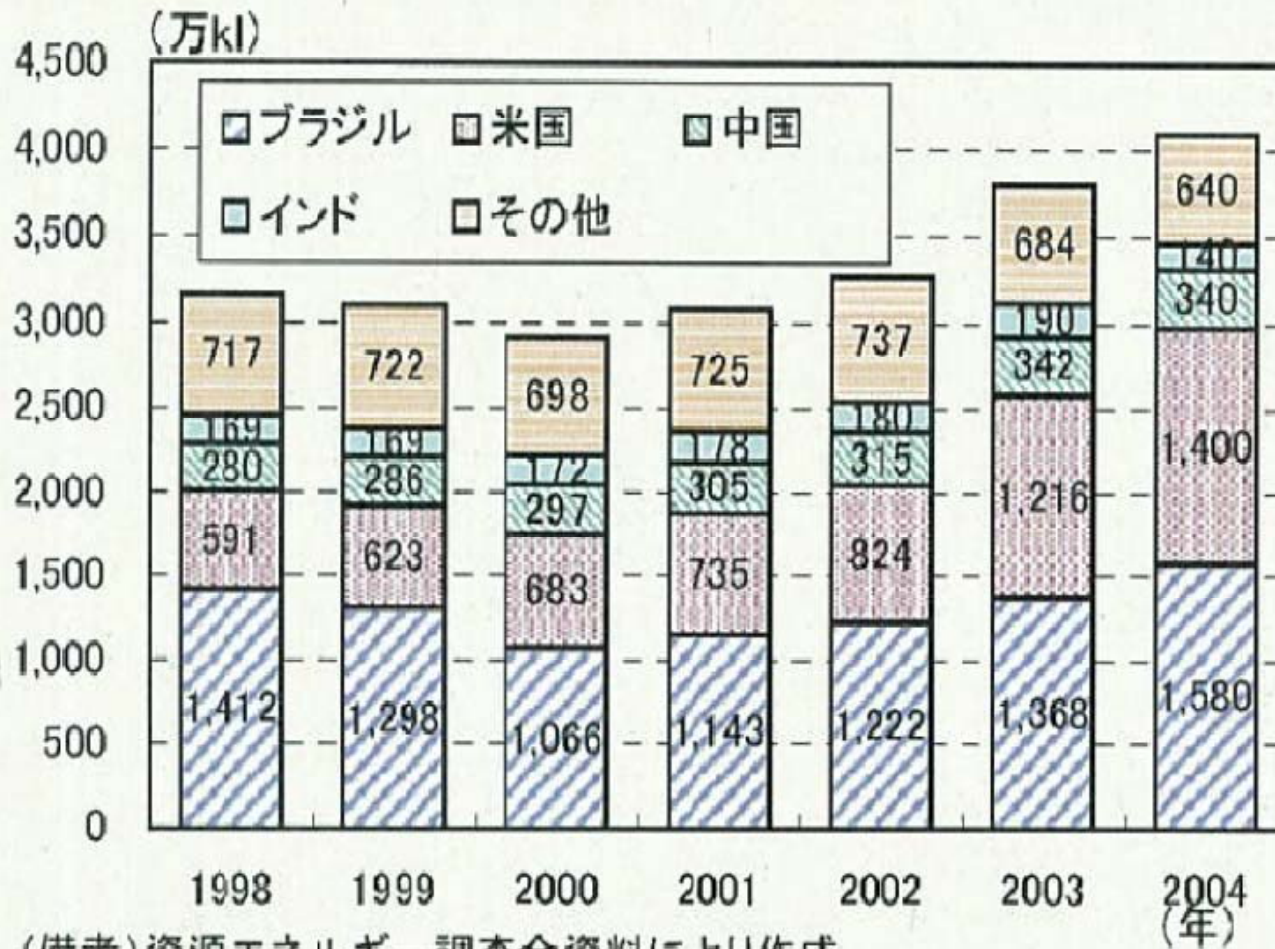
(注) 発電量は自家消費分を含む。



これから注目されるエネルギー技術

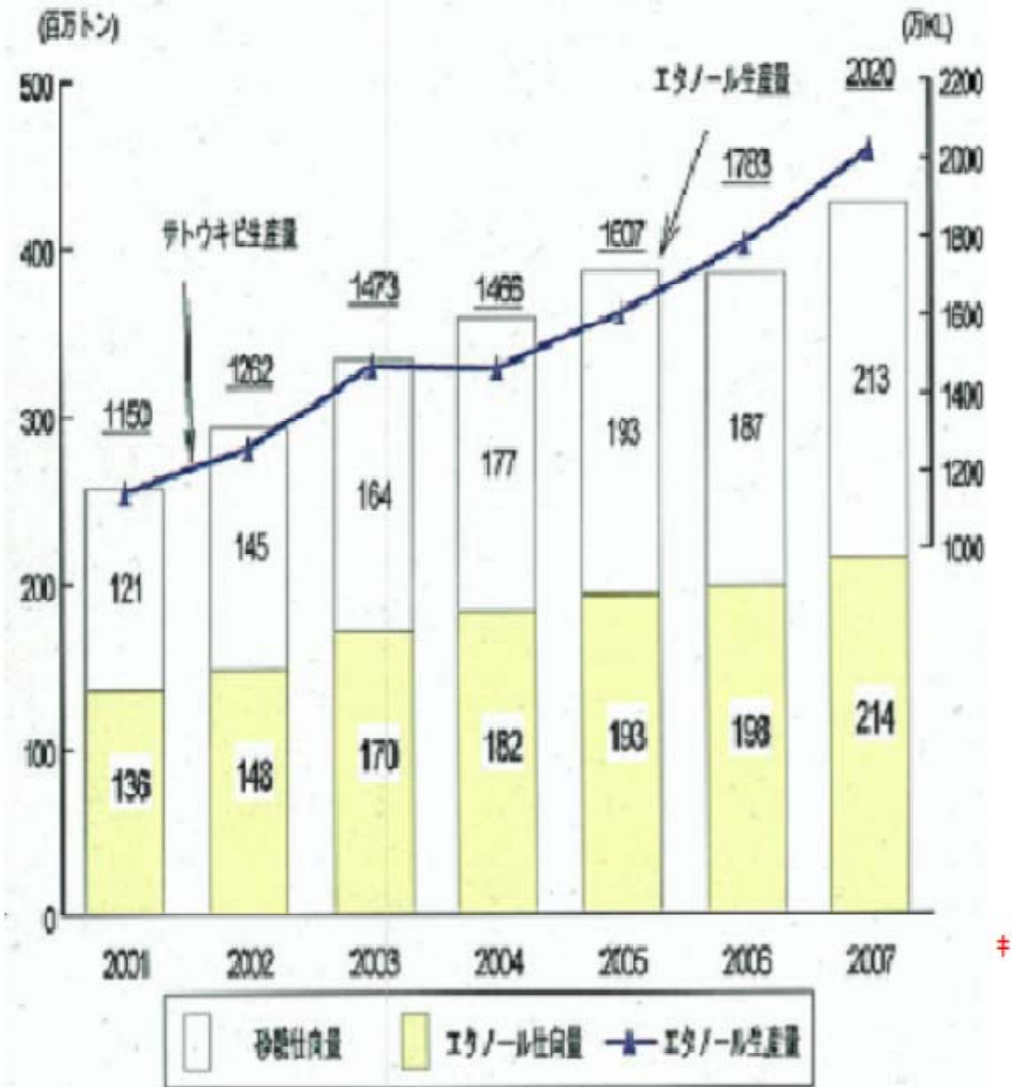
- ー バイオ燃料
- ー 水素
- ー 自動車の新技術
- ー エネルギー変換の高効率化
- ー 照明技術・ヒートポンプ
- ー CO₂の回収・貯留(CCS)
- ー ライフスタイルの選択(技術ではないが)

主要国のエタノール生産量の推移



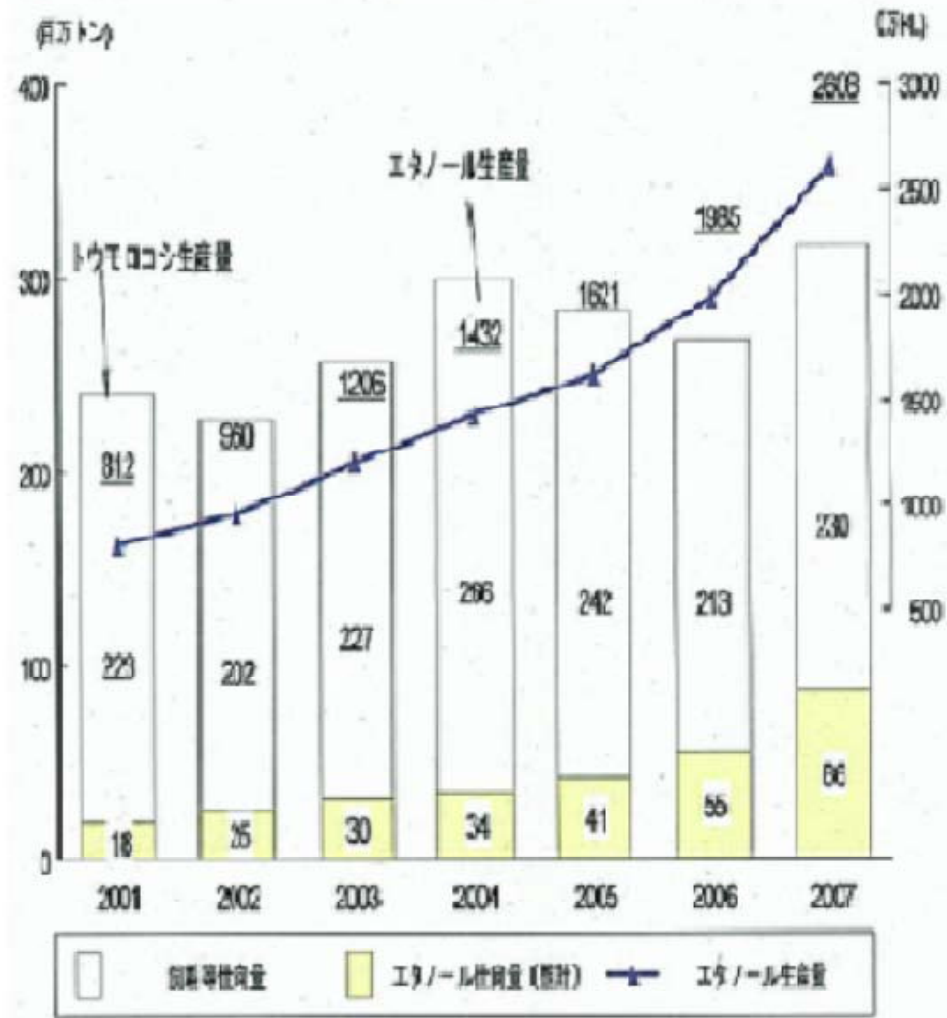
出所：日本政策投資銀行 <http://www.dbj.go.jp/japanese/download/pdf/indicate/no105.pdf> p4、図表12

□ ブラジルのさとうきびの生産量の推移

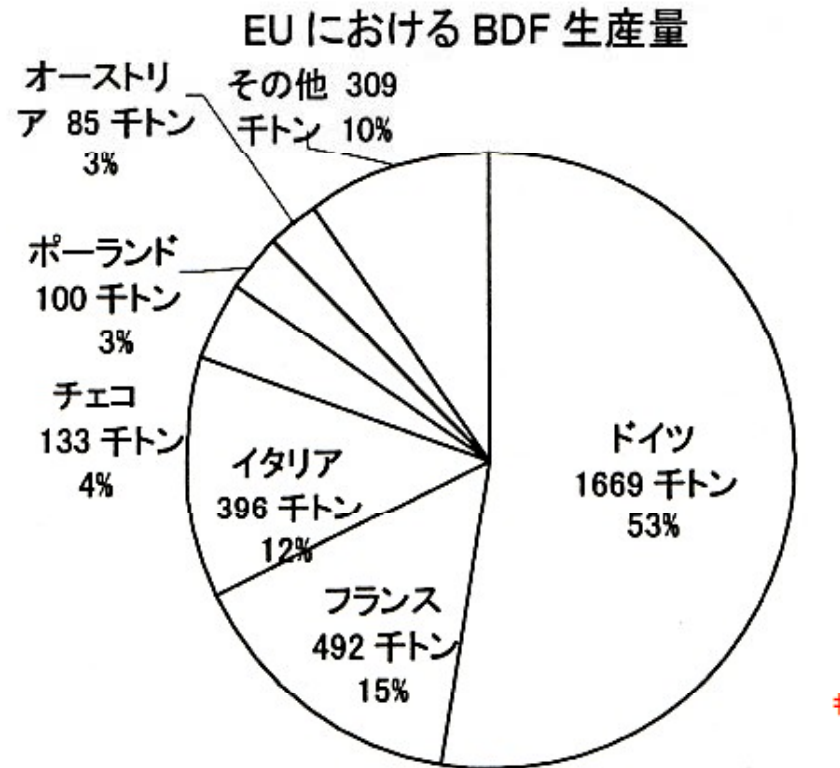
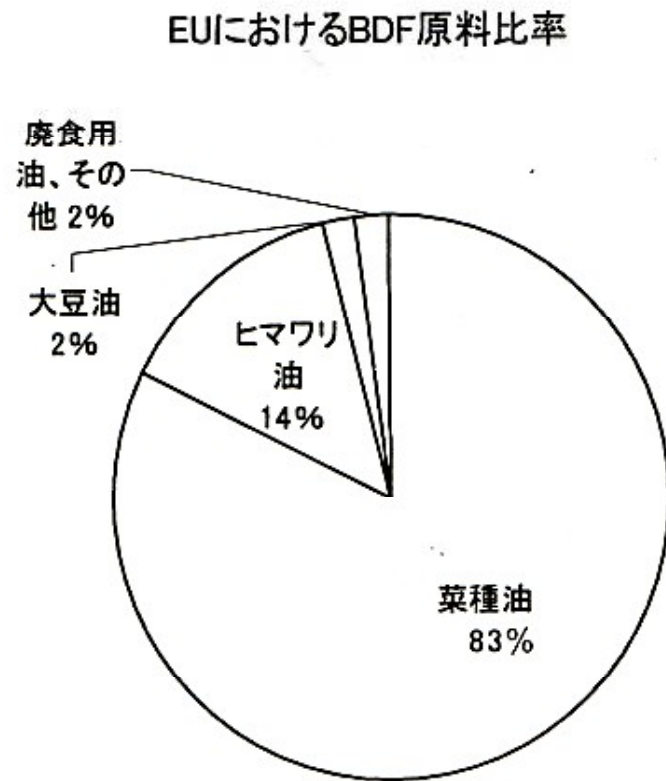


出所：農林水産省大臣官房環境バイオマス政策課バイオマス政策室 提供

□ アメリカのとうもろこしの生産量の推移



出所：農林水産省大臣官房環境バイオマス政策課バイオマス政策室 提供



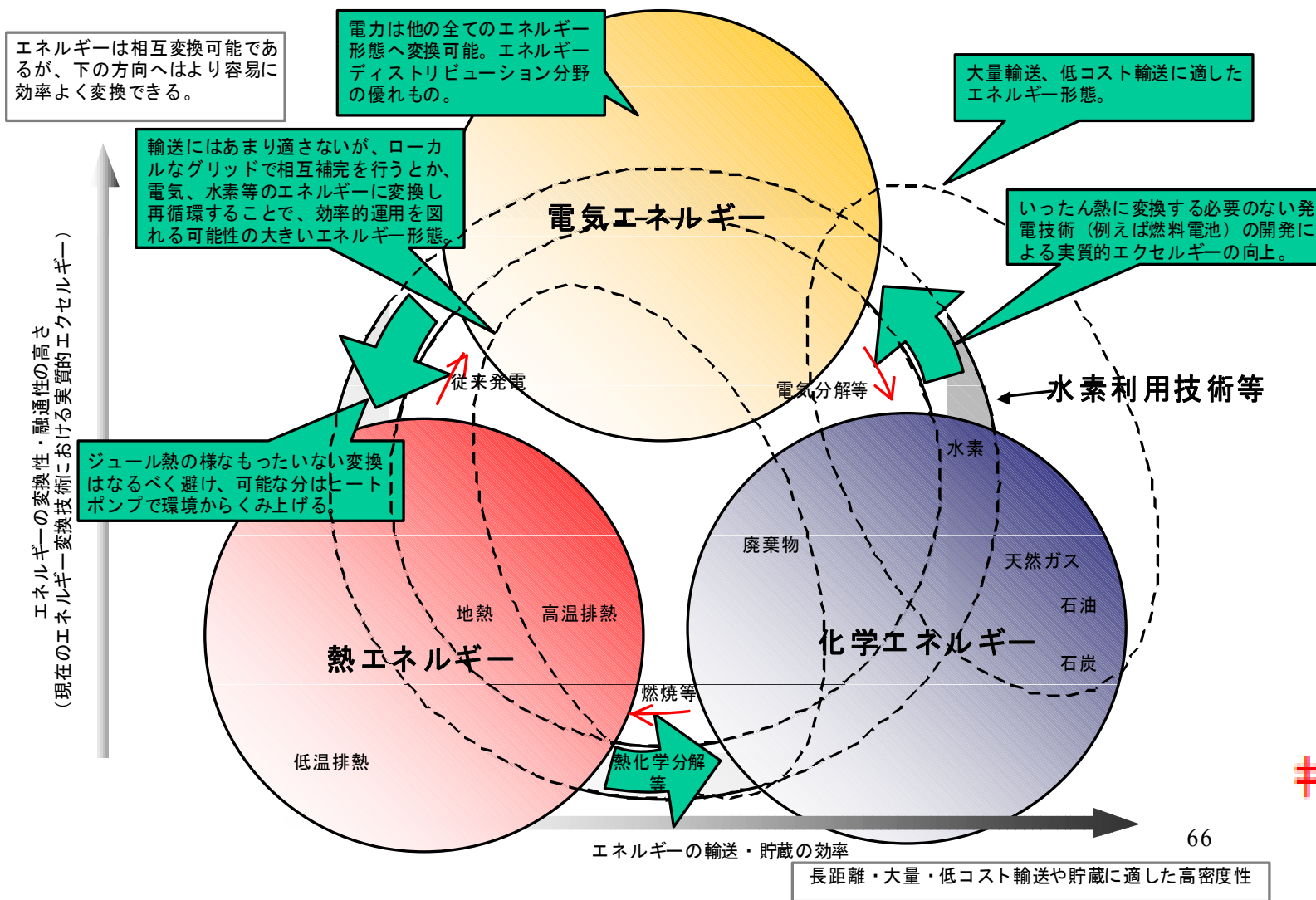
なお、バイオディーゼルの原料として、熱帯地域では**パーム油**が注目されている。

出所：右：<http://www.meti.go.jp/committee/materials/downloadfiles/g50525a40j.pdf> 経済産業省 第20回燃料政策小委員会 p26

左：衆議院調査局・農林水産調査室/環境調査室：バイオマスの利活用についてーバイオ由来燃料を中心としてー、平成19年2月、p23

エネルギー形態の特徴と水素の役割

様々なエネルギー形態の特性

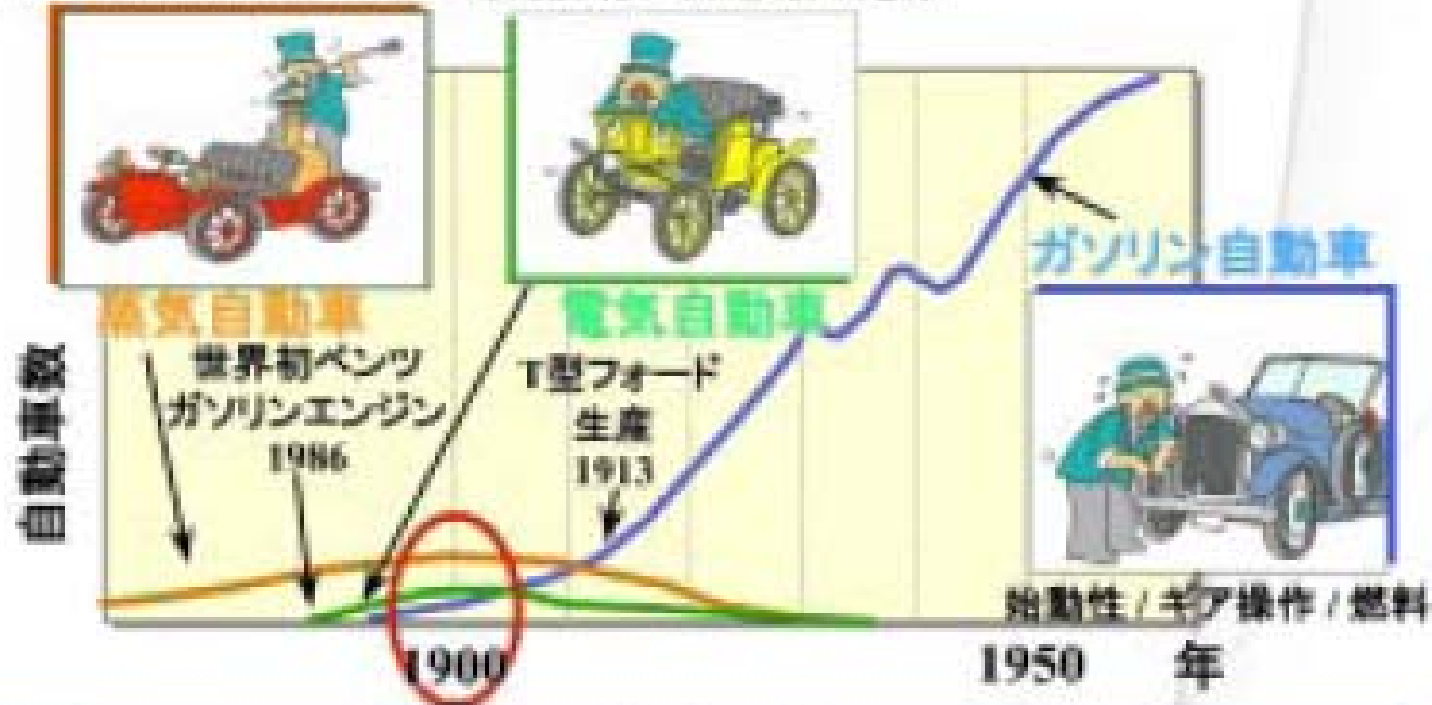


自動車の歴史

History of Cars

始動性/軟水(ボイラー用)

航続距離/充電時間/電運



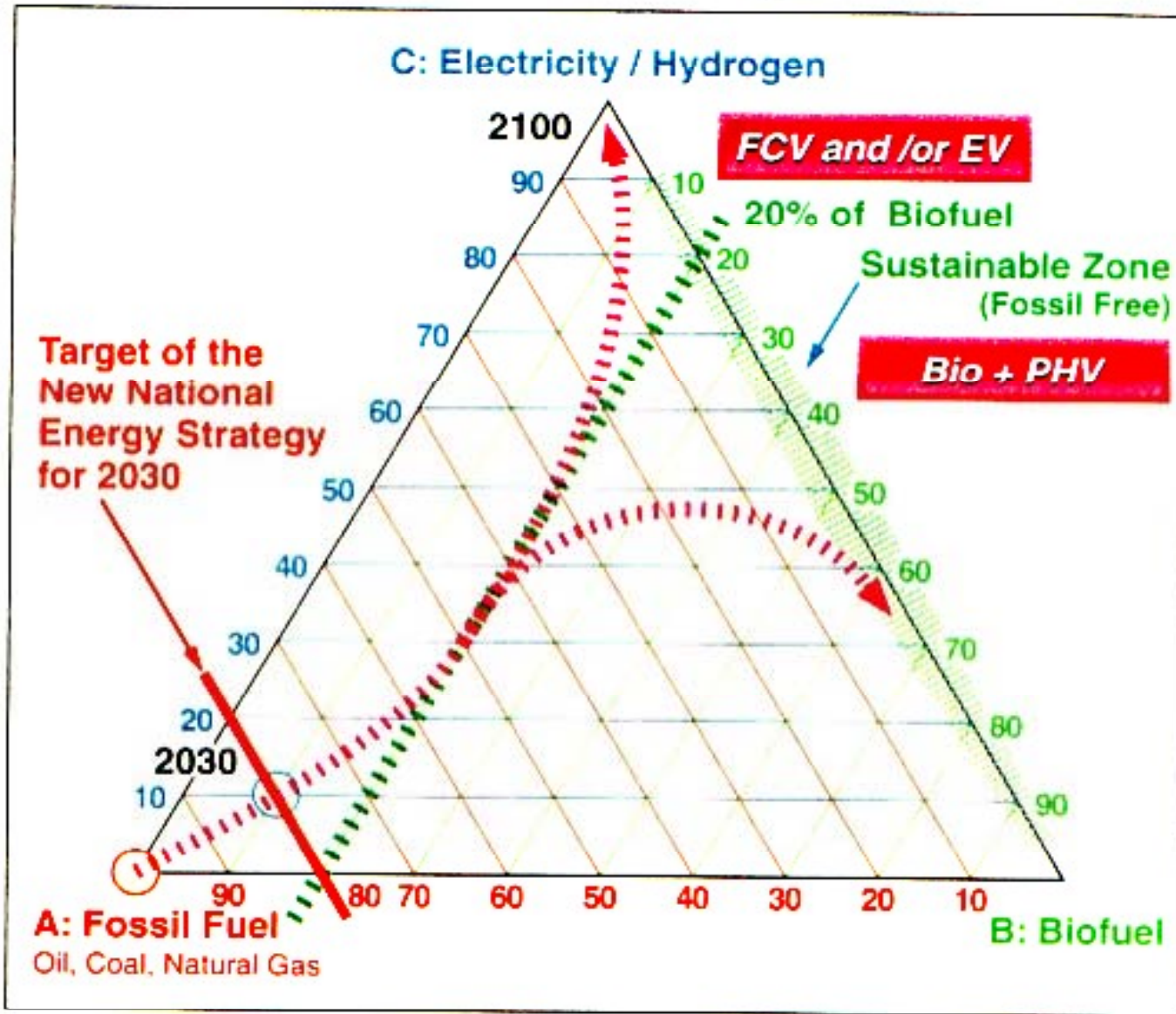
ガソリン自動車が市場の主流になるのに27年かかった。
⇒ 燃料電池自動車も中長期的視野に立って取り組む。

≠

Today For Tomorrow

TOYOTA

Chart 2 Automobile energy sources



≠

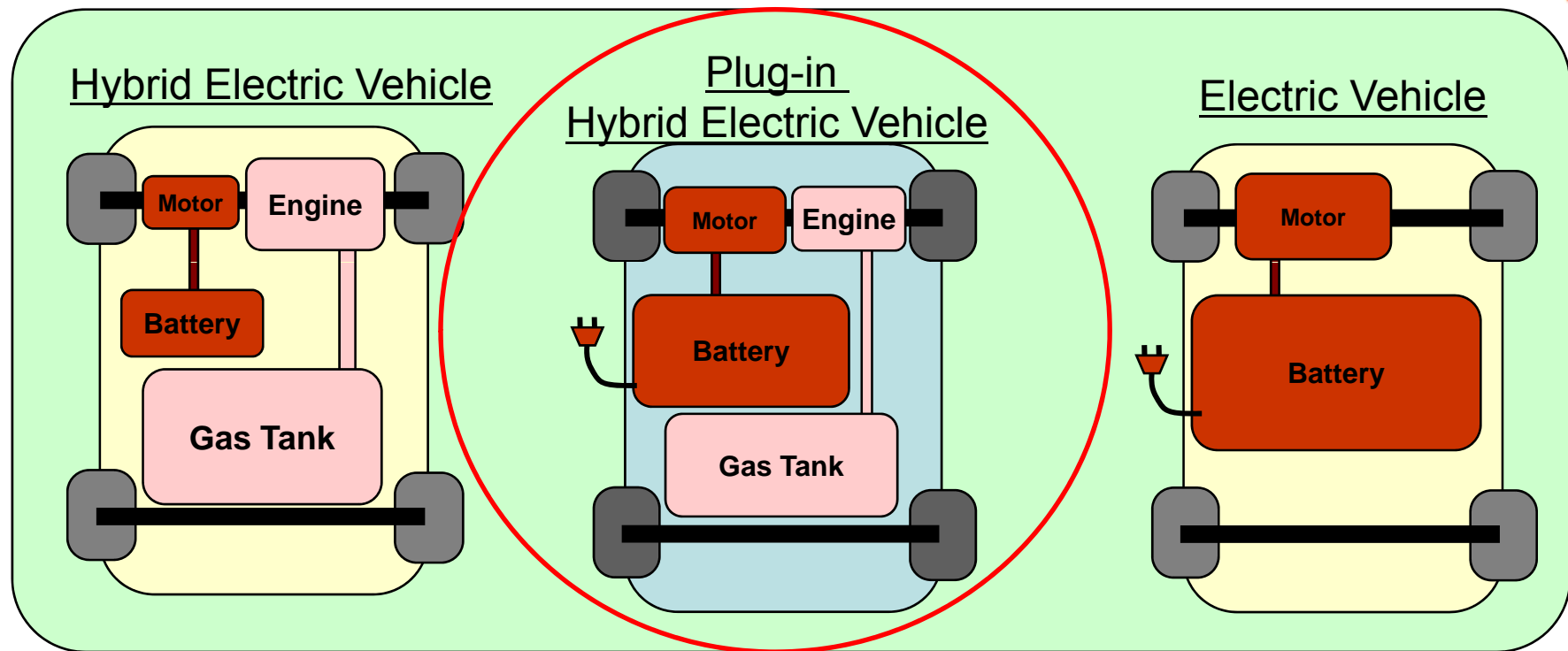
Note : 3D plane defined by $A+B+C=1$. The chart permits trends to be discussed without any constraint of the temporal axis.

Source : Toyota Motor Corp.

出所 : JEF, Japan Spotlight, Sept./Oct. 2007 chart2,p19

プラグインハイブリッド車(PHEV)

- ハイブリッド車のバッテリーを大型化し電気だけで数十kmの走行が可能
- 短距離は電気、長距離はハイブリッド車として走行



火力発電の効率化

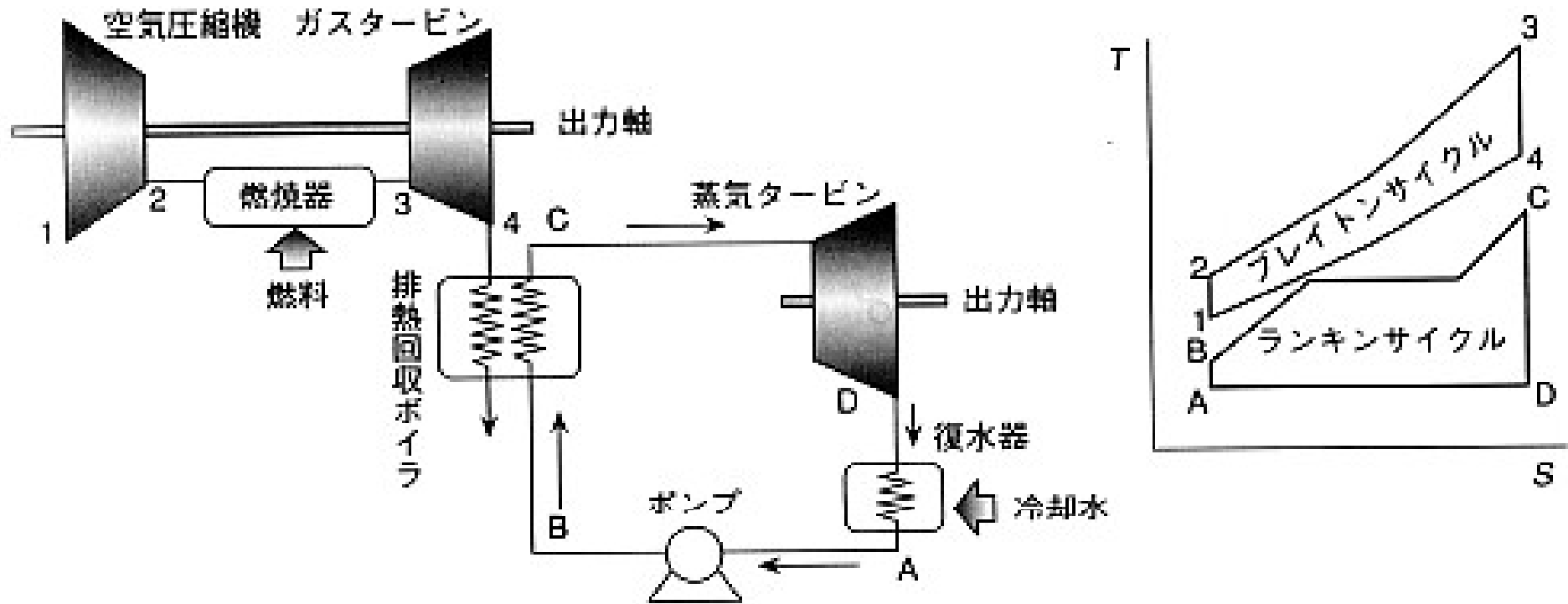
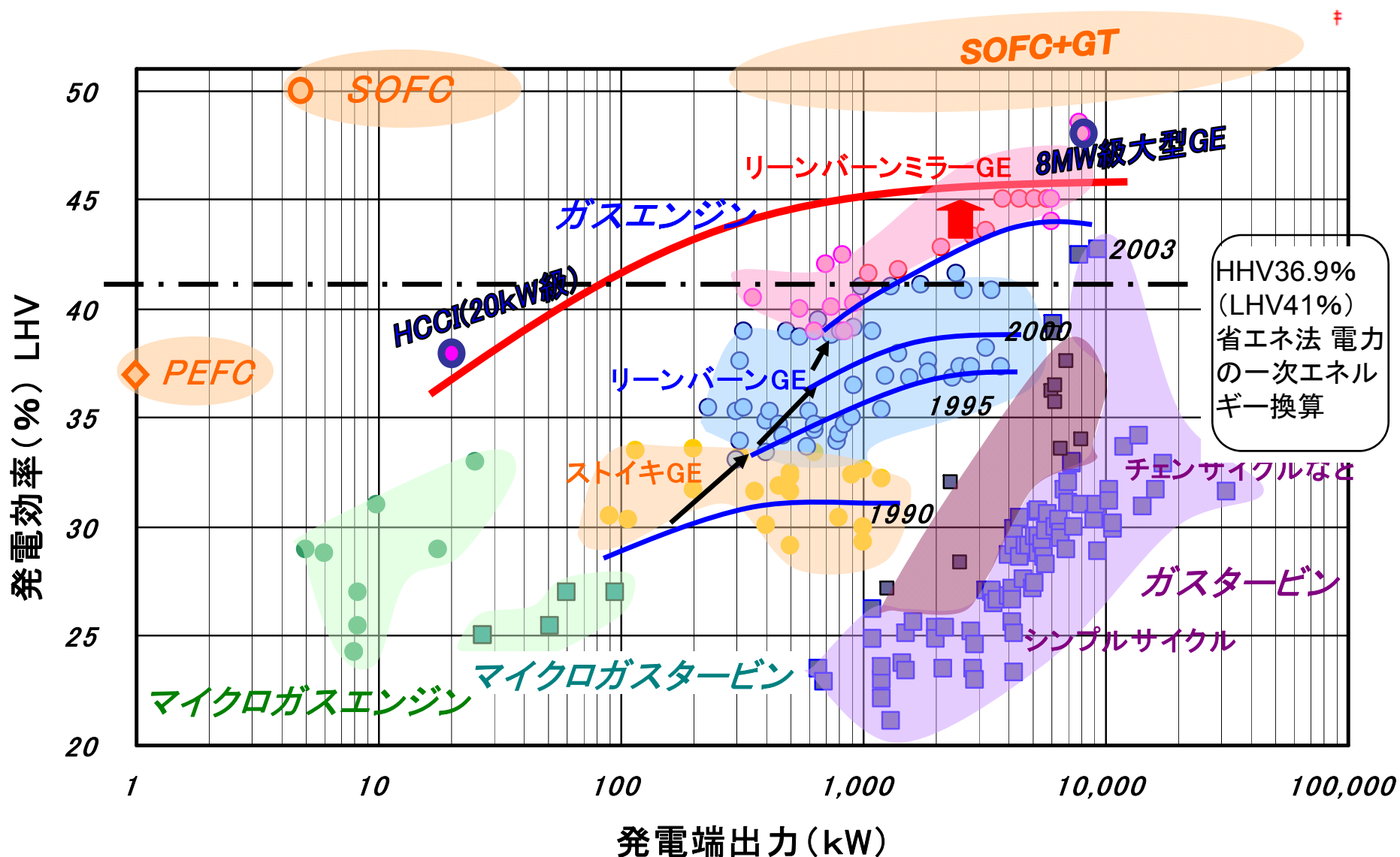


図 3.8 複合サイクルとその T-S 線図。

出所：藤井康正、茅陽一、『エネルギー論』岩波書店、図3.8 (p71) †

将来は高温型燃料電池とガスタービンの組み合わせもある。

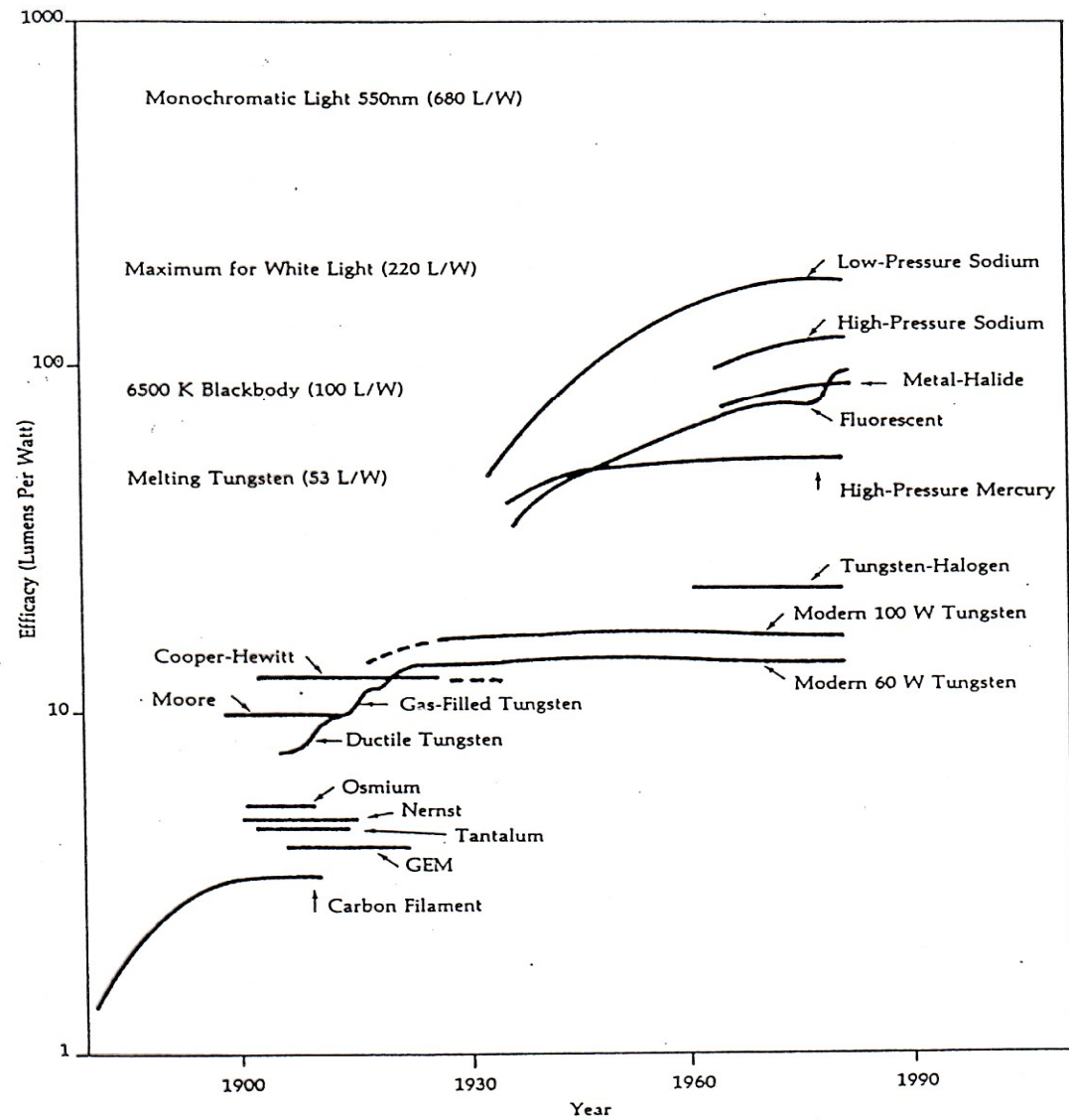
天然ガスコージェネレーションの効率化



分散電源はコージェネ(熱電併給)利用できる

出所: 村木茂、EIT Journal, 54, April 2007 号3 (p20)
<http://www.eit.or.jp/magazine/pdf/EIT54.pdf>

Figure 5. Changes in the Efficacies of Various Light Sources Over Time



↑ LED

This plot shows the evolution of lighting performance within each technology as well as the progress from one technology to another. The efficacies for several standard sources are indicated for comparison.

Source: J.M. Anderson and J.S. Saby, "The Electric Lamp: 100 Years of Applied Physics," *Physics Today* (October 1979): 32-40.

照明技術の効率向上と照明需要の増大(英国)

	単位(100)	1800年	1900年	2000年
燃料単価	(22 ペンス/kWh)	100	27	18
技術効率	(35 lumen-hrs/kWh)	100	1,450	70,000
照明単価	(5千 ￡/百万lumen-hrs)	100	2.4	0.03
照明需要	(500億 lumen-hrs)	100	22,000	3,400,000

(通貨価値は2000年で実質化)

極めて大きなリバウンド効果: 単価1/3000に対し、需要は3万倍以上の増大。

燃料単価の低下の影響より、**技術効率向上の影響**のほうがはるかに大きい。

CO₂の回収・貯留: CCS 地中貯留、海洋貯留

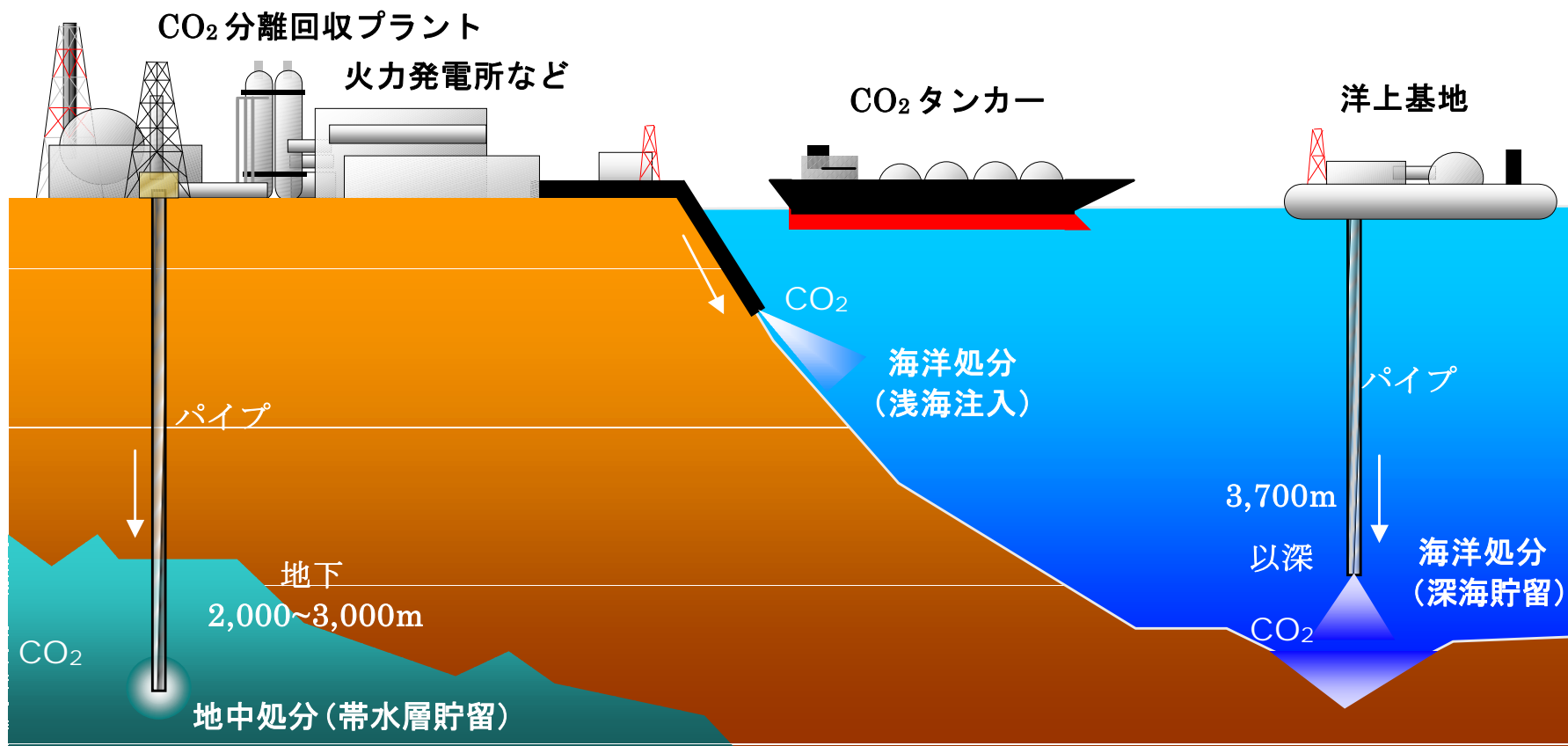
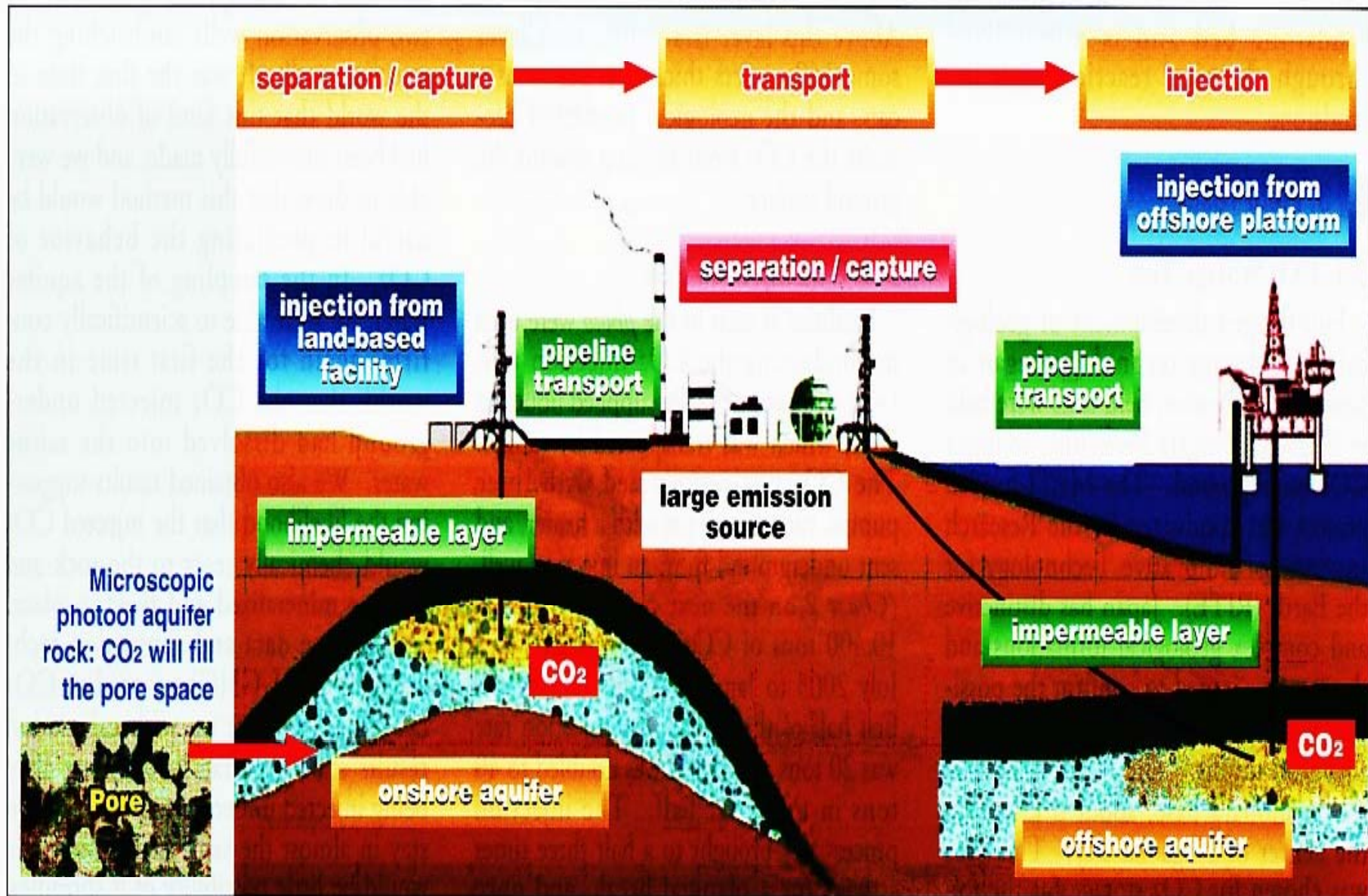


Chart 1 Schemes of CO₂ capture & its geological storage



Source : RITE

出所 : JEF, Japan Spotlight, Sept./Oct. 2007