

LCAの考え方と特徴

～発電システムのLCAと経済性～

平成22年10月26日（火）

筑波大学大学院システム情報工学研究科
リスク工学専攻
内山 洋司

講義項目

1. エネルギー変換の概要
2. 発電プラントのLCA
 - ①エネルギー収支（積み上げ法）
 - ②CO₂排出量（積み上げ法）
 - ③軽水炉（積み上げ法）・・・エネ総工研
 - ④産業連関分析法
3. 経済性
4. リスク評価
 - ①リスクの種類
 - ②定量化・・・最近の図
 - ③原子力の特徴（セキュリティ、経済性、環境性に優れている。
しかし安全不安がある。
 - ④各種発電技術のリスク評価
5. 各国の開発状況

講義項目

1. 社会のエネルギー利用
2. エネルギー変換の概要
3. 発電プラントのライフサイクル評価
4. 産業活動から見たライフサイクル評価
5. 発電プラントの経済性
6. 発電プラントの外部性問題
7. おわりに

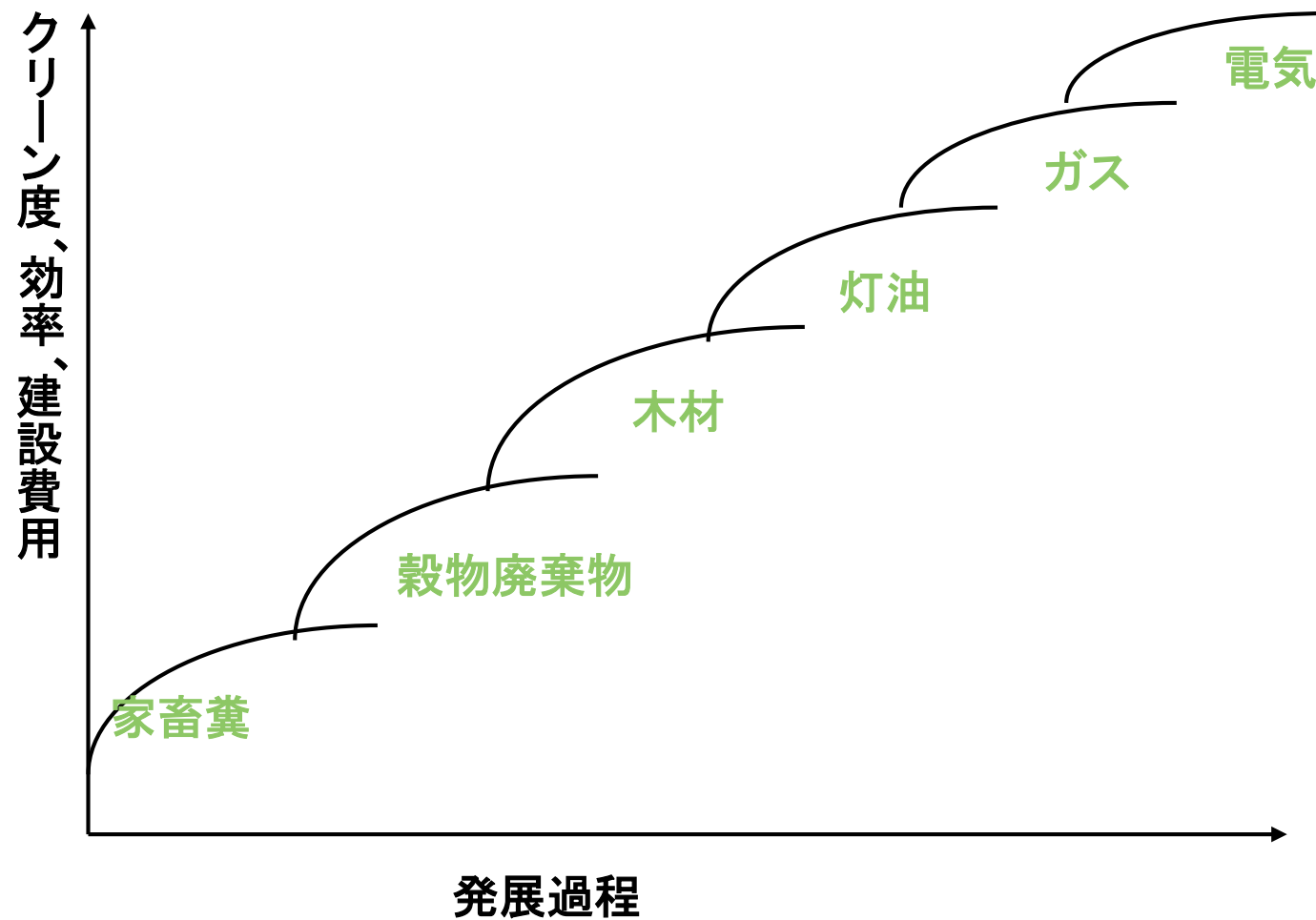
変えられるか、これまでの流れ

- ★経済発展でエネルギー消費量が増える。
- ★産業の高度化と快適な生活は電力消費量を増大する。
- ★エネルギー消費量の増大が二酸化炭素や汚染物質の排出を増大する。

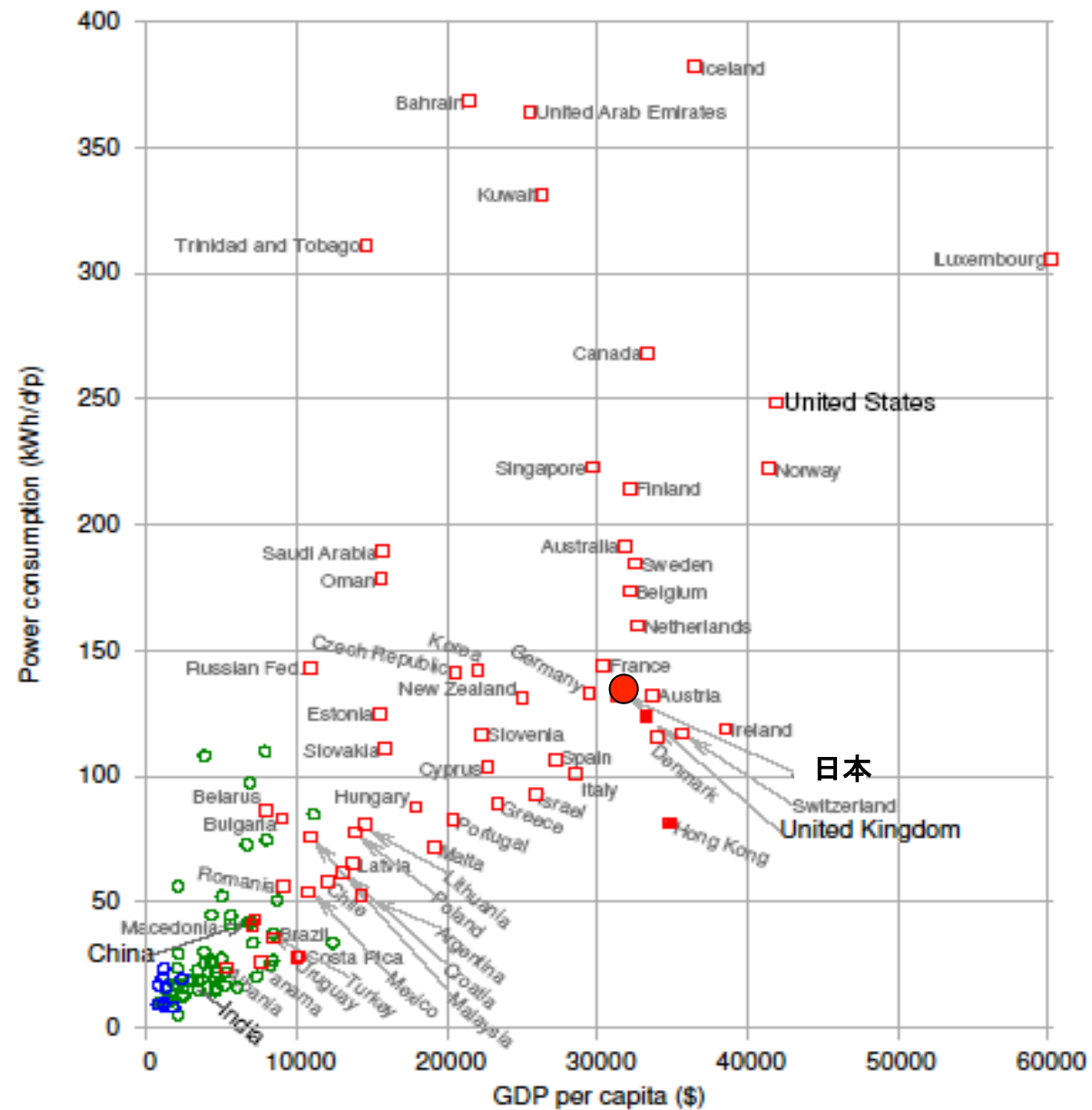
世界の一次エネルギー消費量の推移



クリーンで使いやすいエネルギー

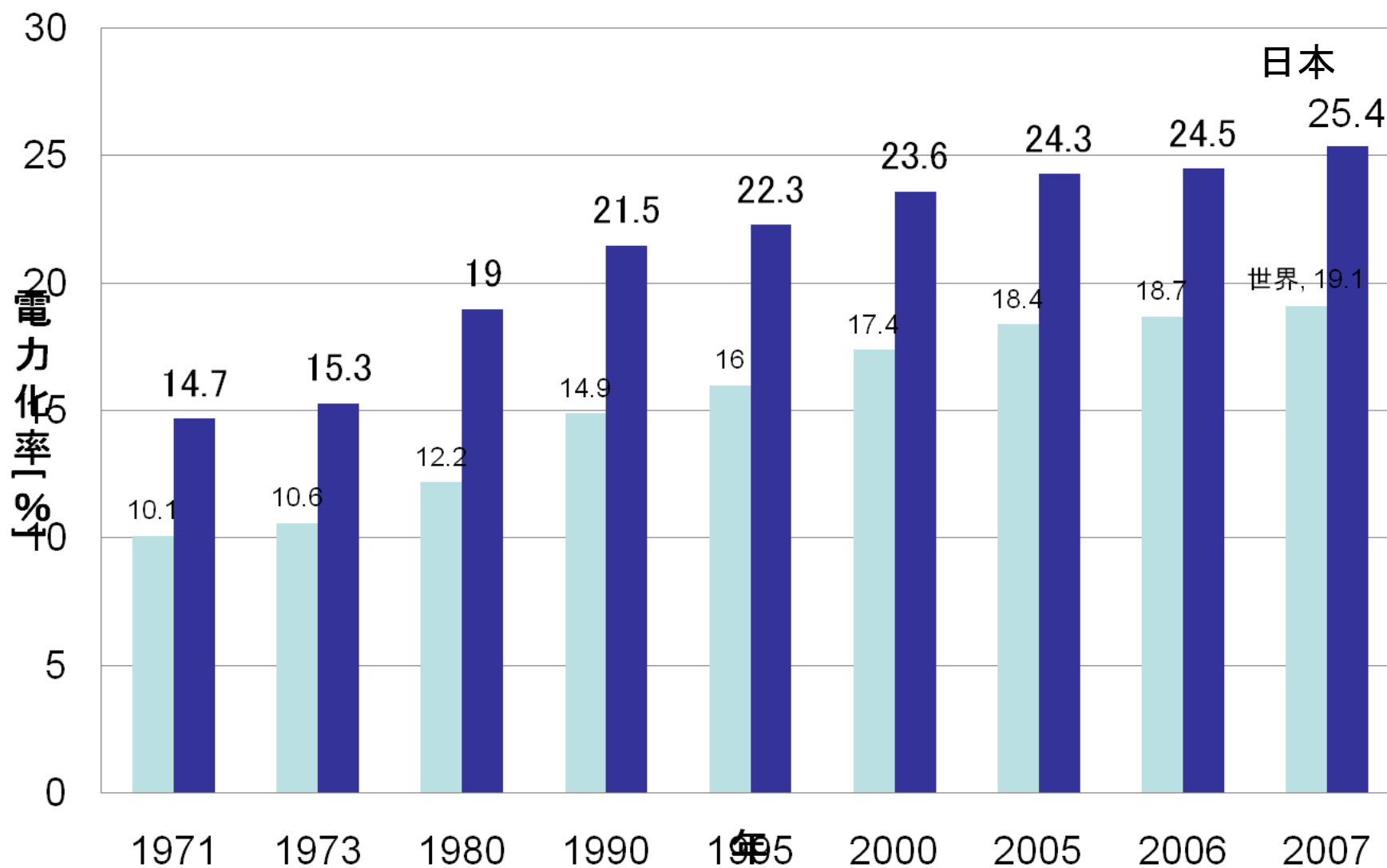


経済成長と電力消費量



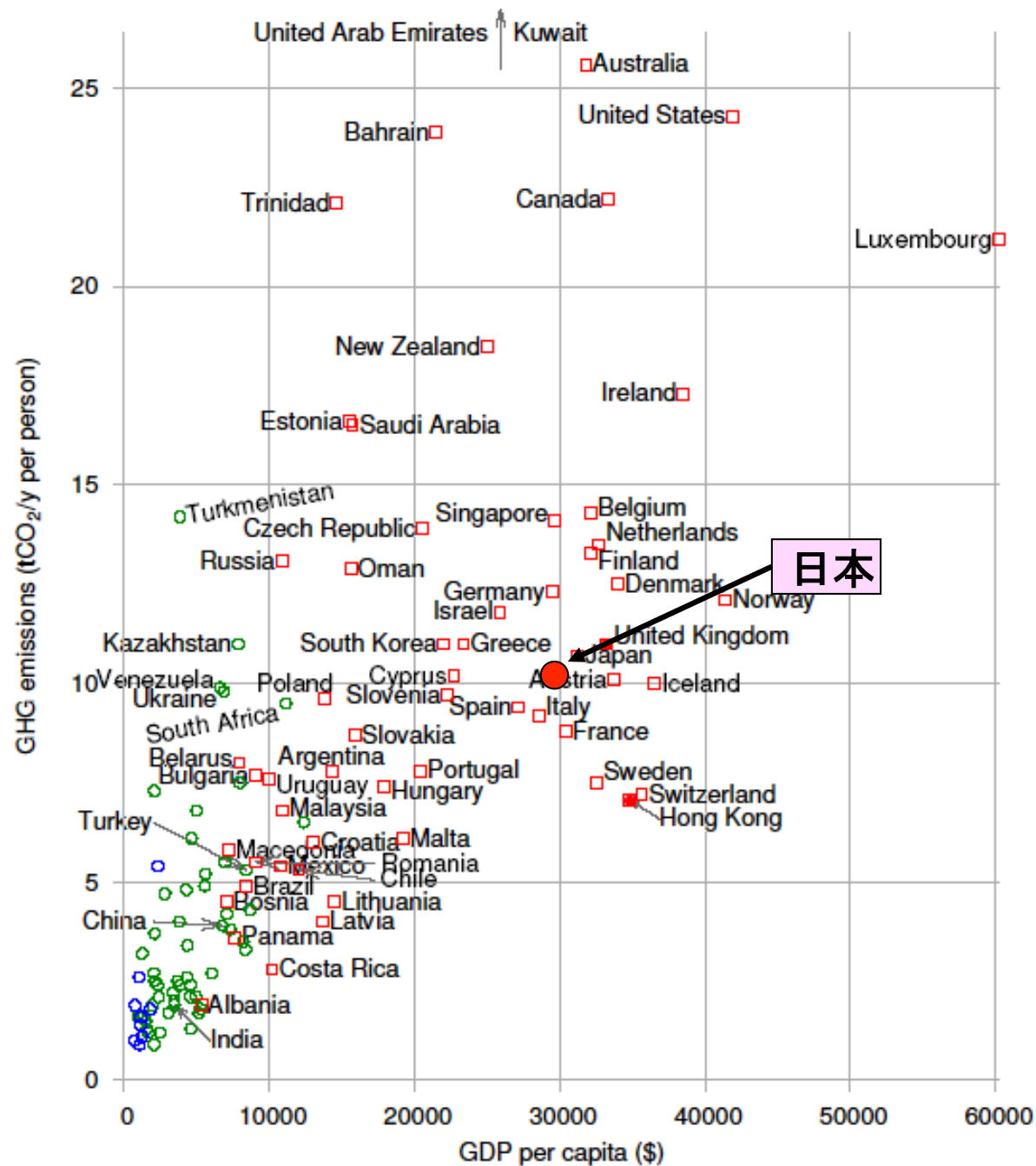
出典: Sustainable energy without hot air(2009)

電力化率の推移(最終エネルギー消費)

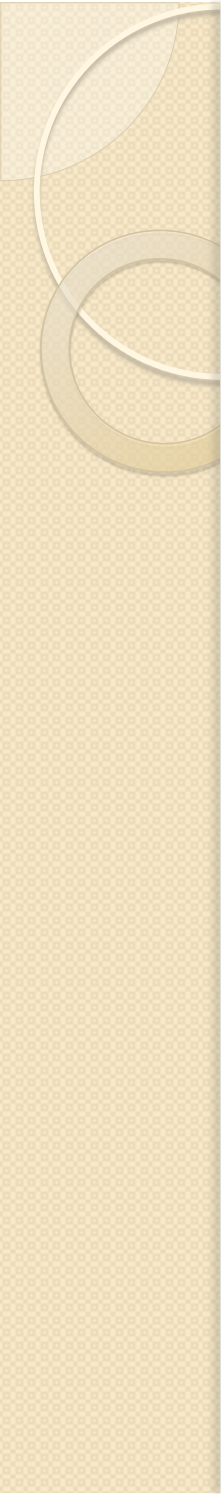


出典：(財)省エネルギーセンター「エネルギー・経済統計要覧」2010年

経済成長と二酸化炭素排出量



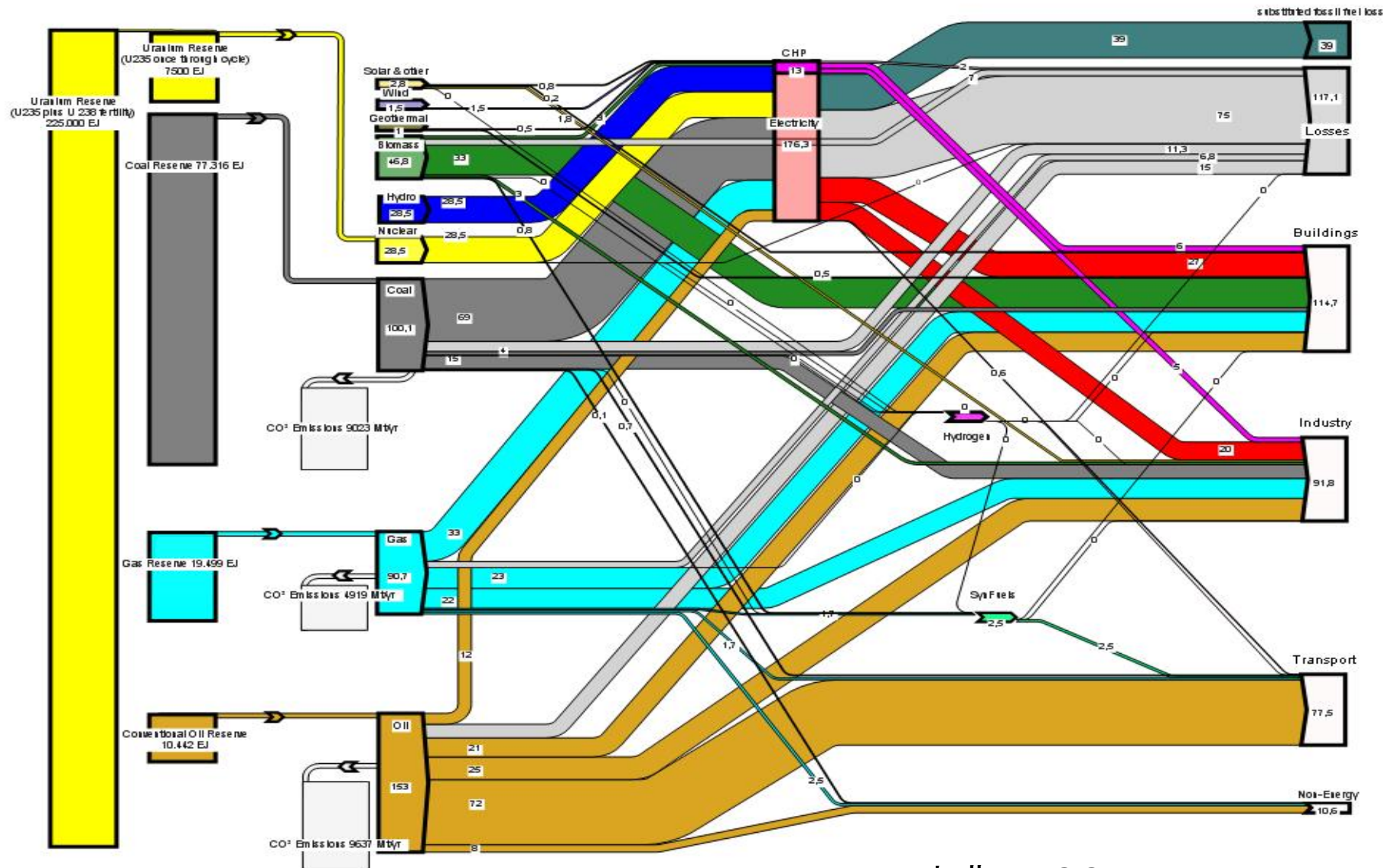
出典: Sustainable energy without hot air(2009)



何がエネルギー変換を決めているのか

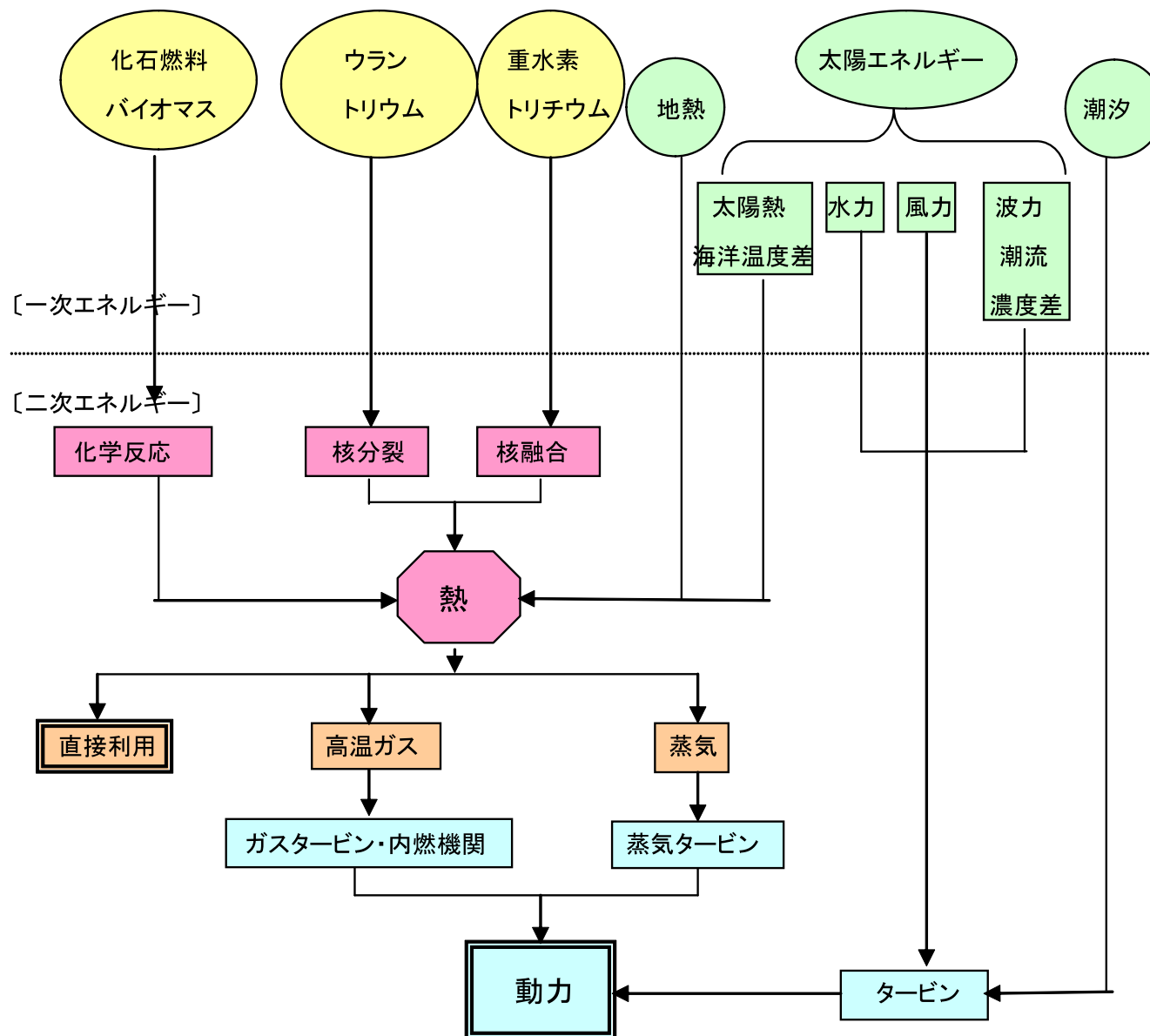
- ★エネルギー変換方式には色々ある
- ★化石燃料がエネルギー源の中心
- ★エネルギー密度とエネルギー変換効率

エネルギーシステム

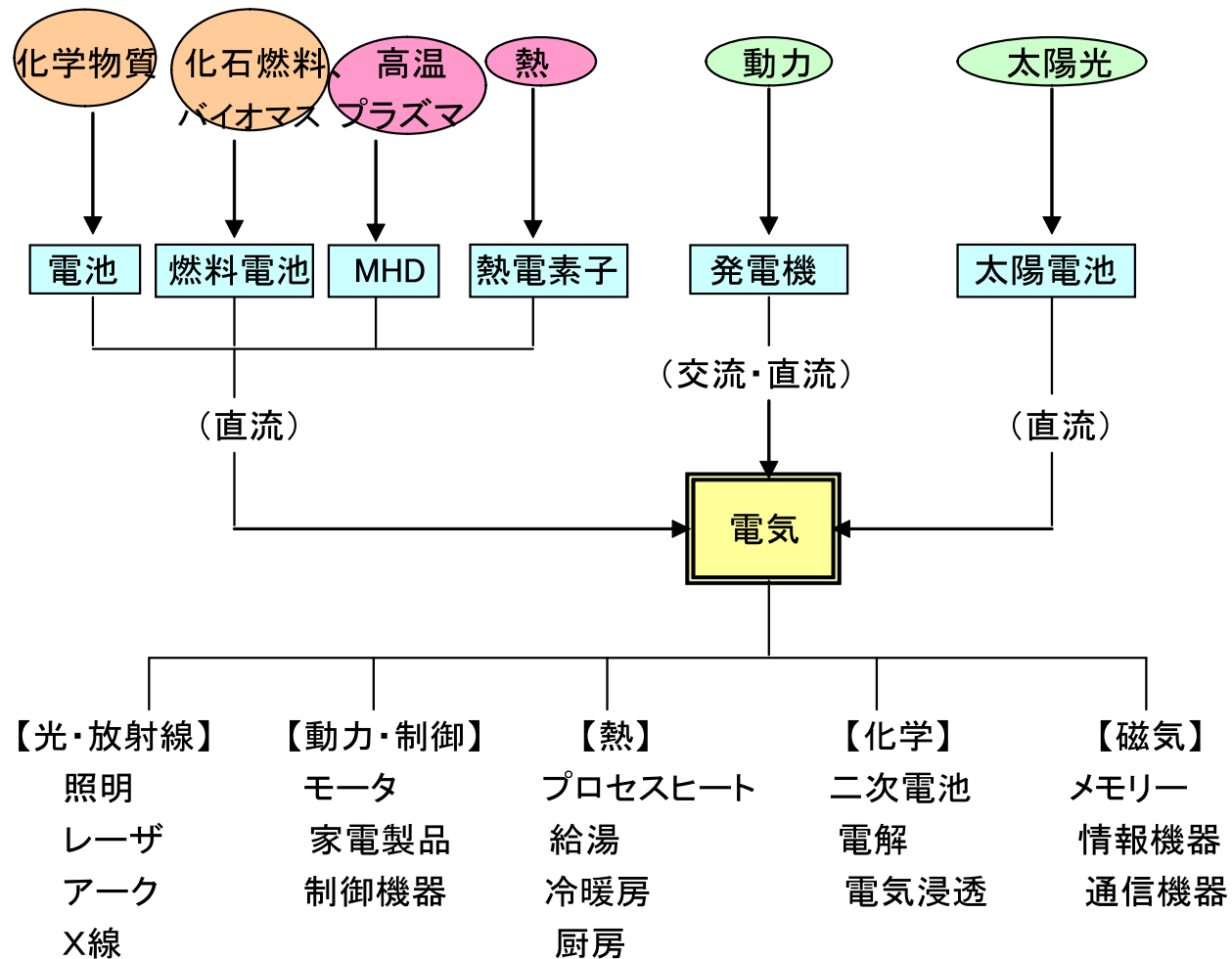


出典: IPCC, AR4

エネルギー・動力変換



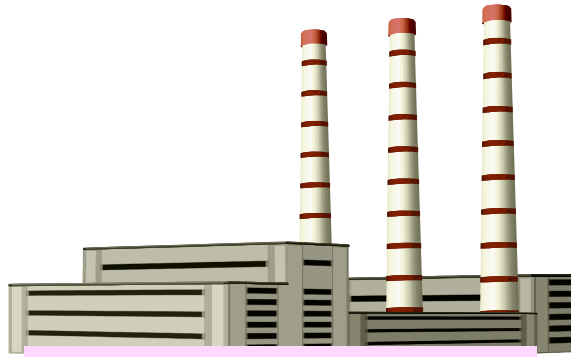
電気への変換



発電のエネルギー源



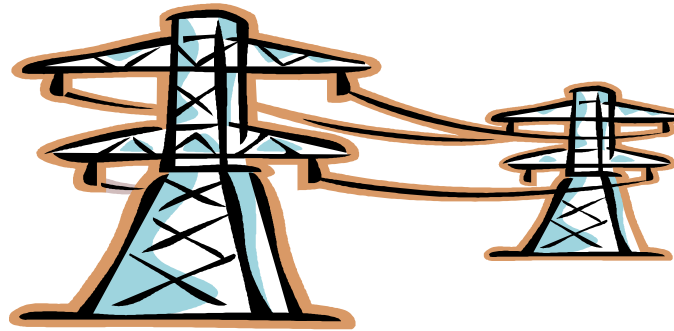
原子力発電



火力発電



バイオマス発電



太陽光発電

水力発電



風力発電



風力、水力、水蒸気の出力密度

媒体		比重量 [kg/m ³]	流体速度 [m/s]	出力密度 [kW/m ²]	(倍率)
風力 (風速毎秒20m)		1.29	20	5.16	(1)
水力 (有効落差100m)		1,000	44.3	43,500	(8,400)
水蒸気 (超々臨界圧)		74	400	2,370,000	(460,000)
参考	太陽光	—	—	0.947	(0.18)
	地熱	—	—	0.017	(0.003)

注) 太陽光と地熱は、地表面積あたりの出力密度

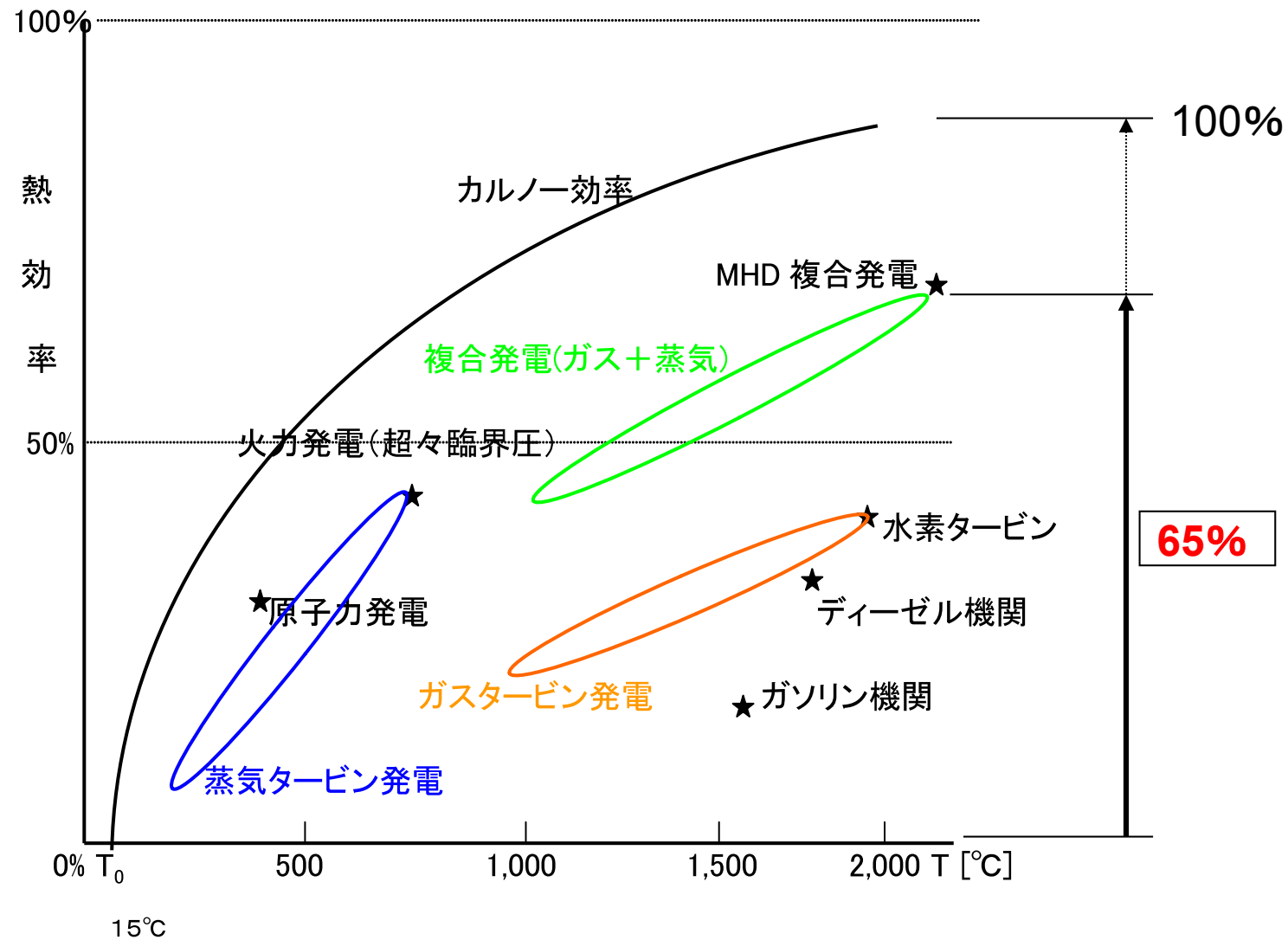
化学エネルギーの変換効率

	変換後	効率[%]
大型ボイラ	熱	90-98
大型電動モータ	運動	90-97
ガスコンロ	熱	90-96
乾電池	電気	85-95
改良型薪ストーブ	熱	25-45
大型蒸気タービン	電気	33-45
大型ガスタービン	電気	30-38
ディーゼルエンジン	電気	30-35
哺乳類の生後成長	化学	30-35
内燃機関	運動	15-25
哺乳類の筋肉	運動	15-20
蒸気機関車	運動	3-6
ローソク	光	1-2

エネルギー変換と効率

	変換	効率[%]
大型発電機	運動→電気	98-99
大型水力タービン	運動→電気	90-95
風力タービン	運動→電気	30-40
太陽電池のセル効率	光→電気	20-30
穀物の光合成(最大)	光→化学	4-5
世界の平均的な光合成	光→化学	0.3
高圧ナトリウム燈	電気→光	15-20
蛍光灯	電気→光	10-12
白熱電球	電気→光	2-5

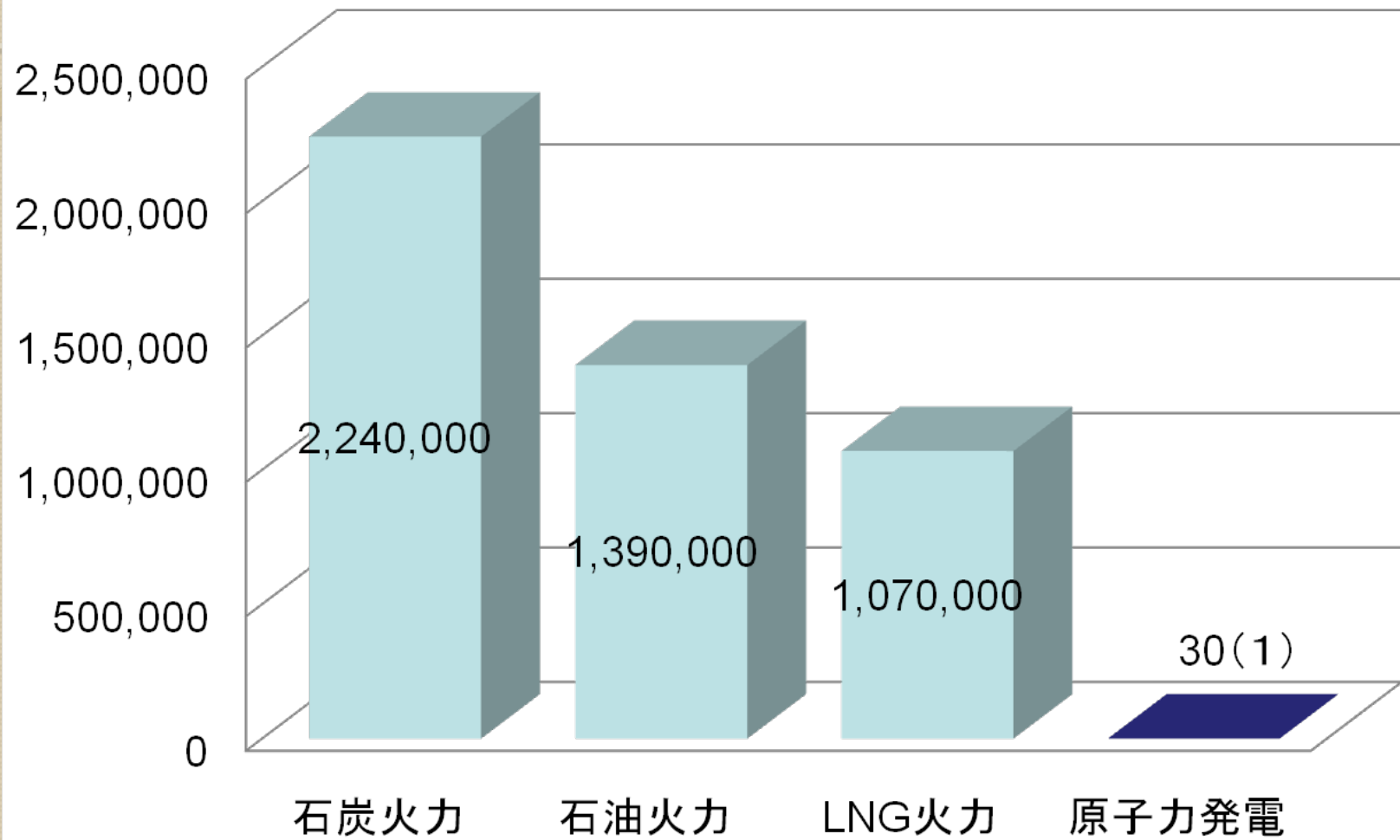
カルノーサイクル効率と実際の効率



発電プラントの燃料消費量

発電出力: 100万kW、年設備利用率: 75%

燃料消費量[トン/年]

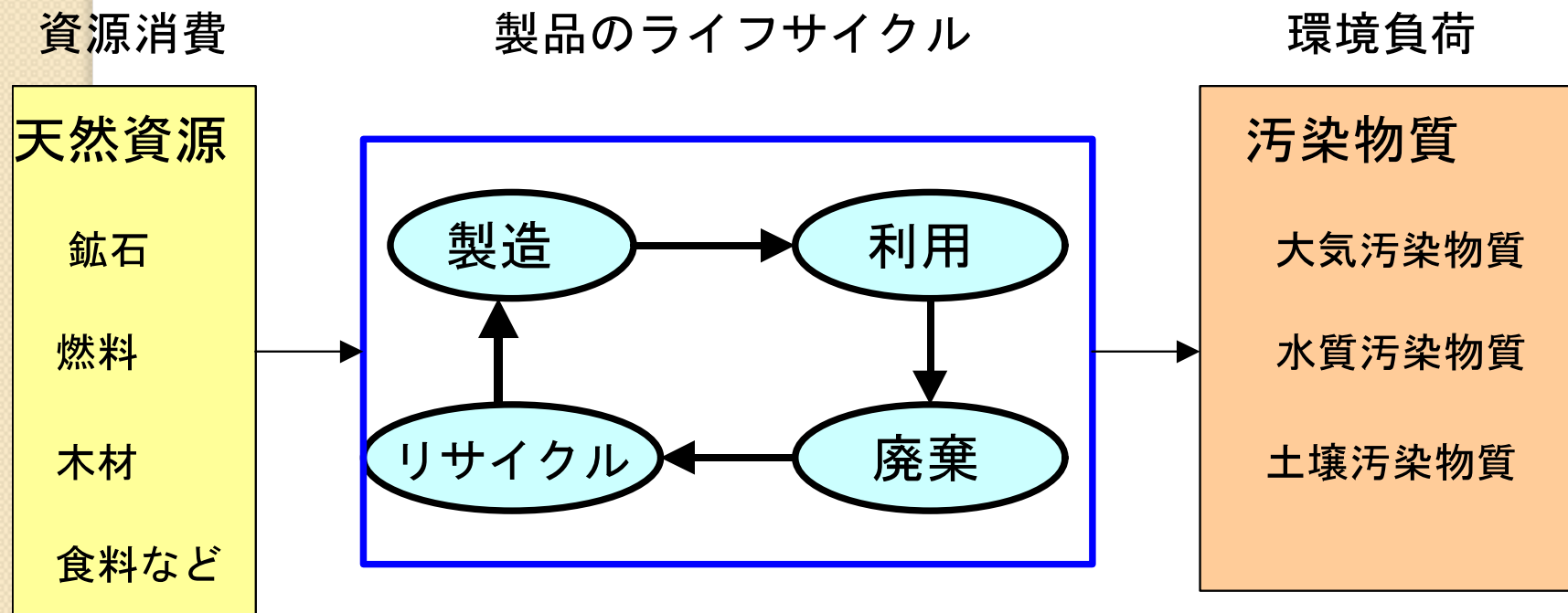


ライフサイクルから見て何がわかるのか

- ★社会はシステムでできており、
構成要素の影響を定量的に理解する
- ★効率的な発電システムとは
- ★環境負荷が大きい要素を特定する
- ★技術進歩は環境負荷をどこまで
改善できるのか

ライフサイクル評価

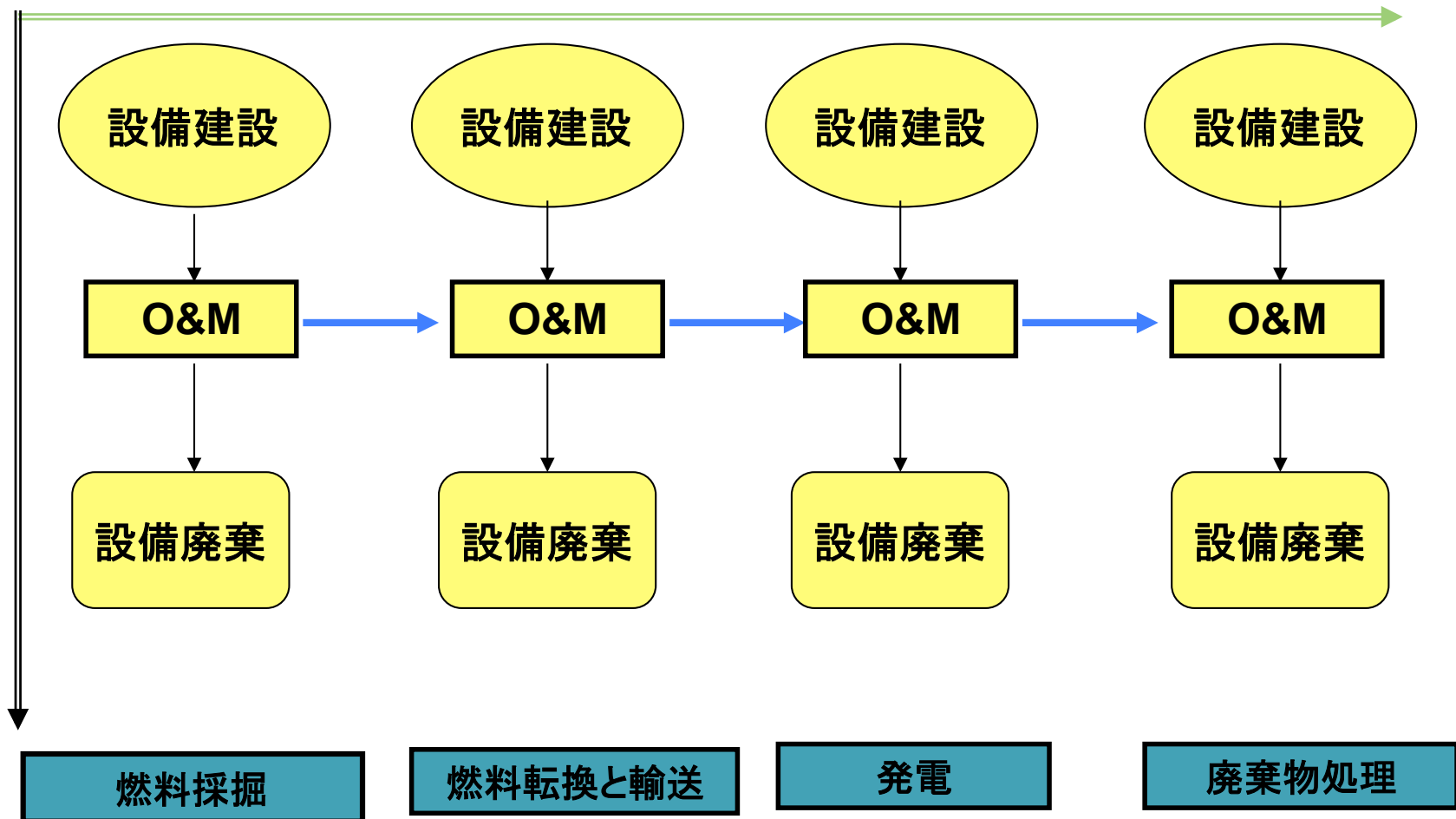
---製品と技術の環境診断法---



発電システムのライフサイクル・プロセス

燃料・エネルギー供給プロセス

ライフサイクル・プロセス



発電プラントの発電出力と設備利用率

発電システム	発電出力 [MW]	設備利用率 [%]	所内率 [%]	発電システム	発電出力 [MW]	設備利用率 [%]	所内率 [%]
原子力発電	1,000	75	3.4	風力発電	0.3	20	10
石油火力	1,000	75	6.1	太陽光発電 (電気事業)	1.0	1.5	5
LNG火力	1,000	75	3.5	太陽光発電 (家庭)	0.003	15	0
石炭火力	1,000	75	7.4				
水力発電	10	45	0.25				
地熱発電	55	60	7.0				

石炭火力の投入エネルギー

段階	投入エネルギー 〔TJ/年〕	プロセス構成比 〔%〕				
		採掘	輸送	発電	灰捨	計
設備	266	1.0	1.2	3.1	2.5	7.8
運用	3,152	47.5	40.4	4.2	0.2	92.2
合計	3,418	48.5	41.6	7.3	2.7	100

石油火力の投入エネルギー

段階	投入エネルギー 〔TJ/年〕	プロセス構成比 〔%〕				
		採掘	輸送	精製	発電	計
設備	169	2.0	1.0	0.2	3.0	6.2
運用	2,559	21.5	19.8	48.2	4.3	93.8
合計	2,727	23.5	20.8	48.4	7.3	100

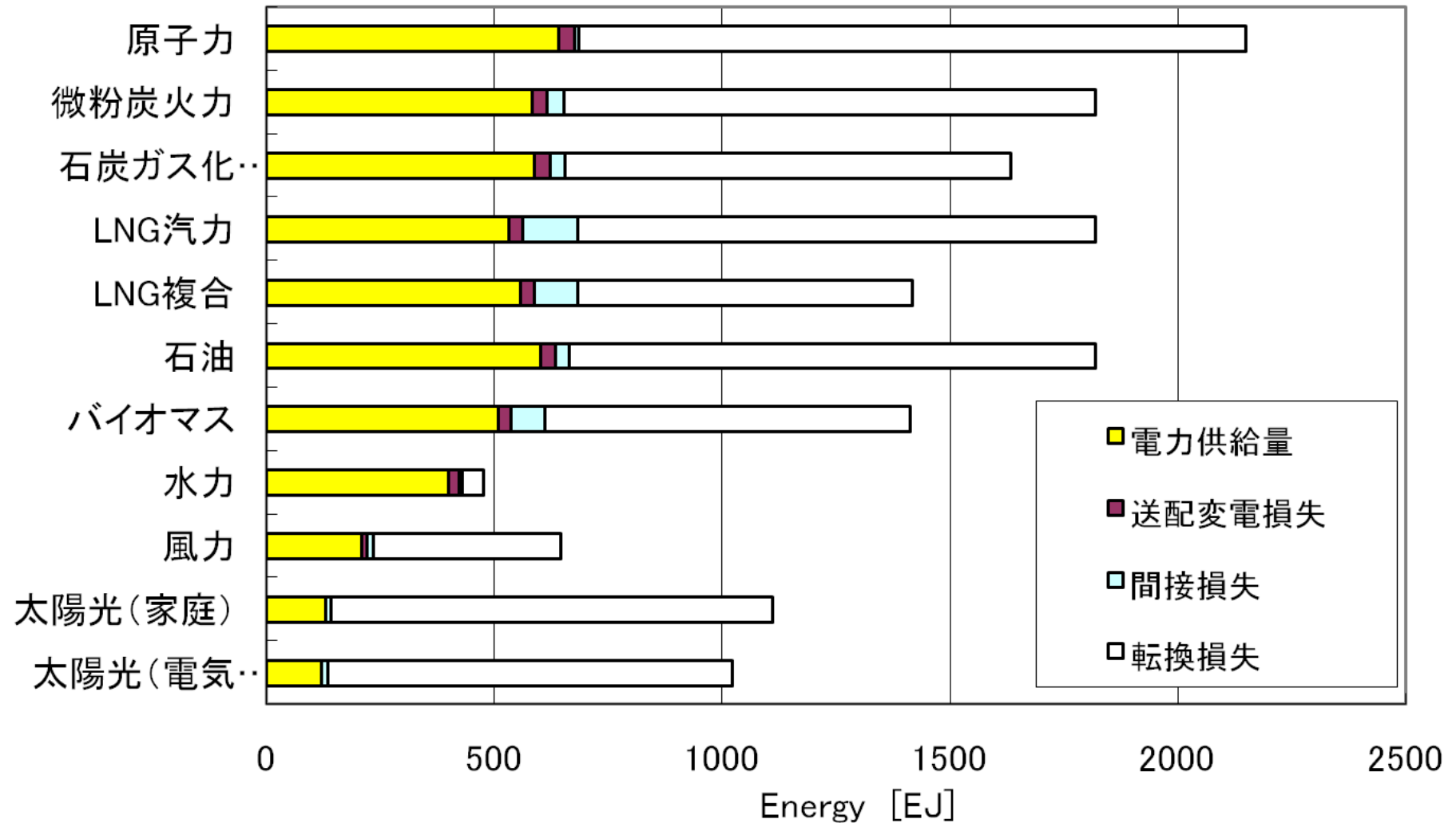
原子力発電の投入エネルギー (ワンス・スルー、ガス拡散法)

段階	投入エネルギー 〔TJ/年〕	プロセス構成比 〔%〕							
		採掘	製錬・フッ化	濃縮	加工	発電	燃料貯蔵	廃炉	計
設備	211	0.4	0.1	0.1	0.0	5.4	2.2	0.2	8.5
運用	2,282	0.1	4.0	80.5	0.6	6.0	0.2	0.0	91.5
合計	2,493	0.5	4.1	80.6	0.6	11.4	2.4	0.2	100

原子力発電の投入エネルギー (プルサーマル、遠心分離法)

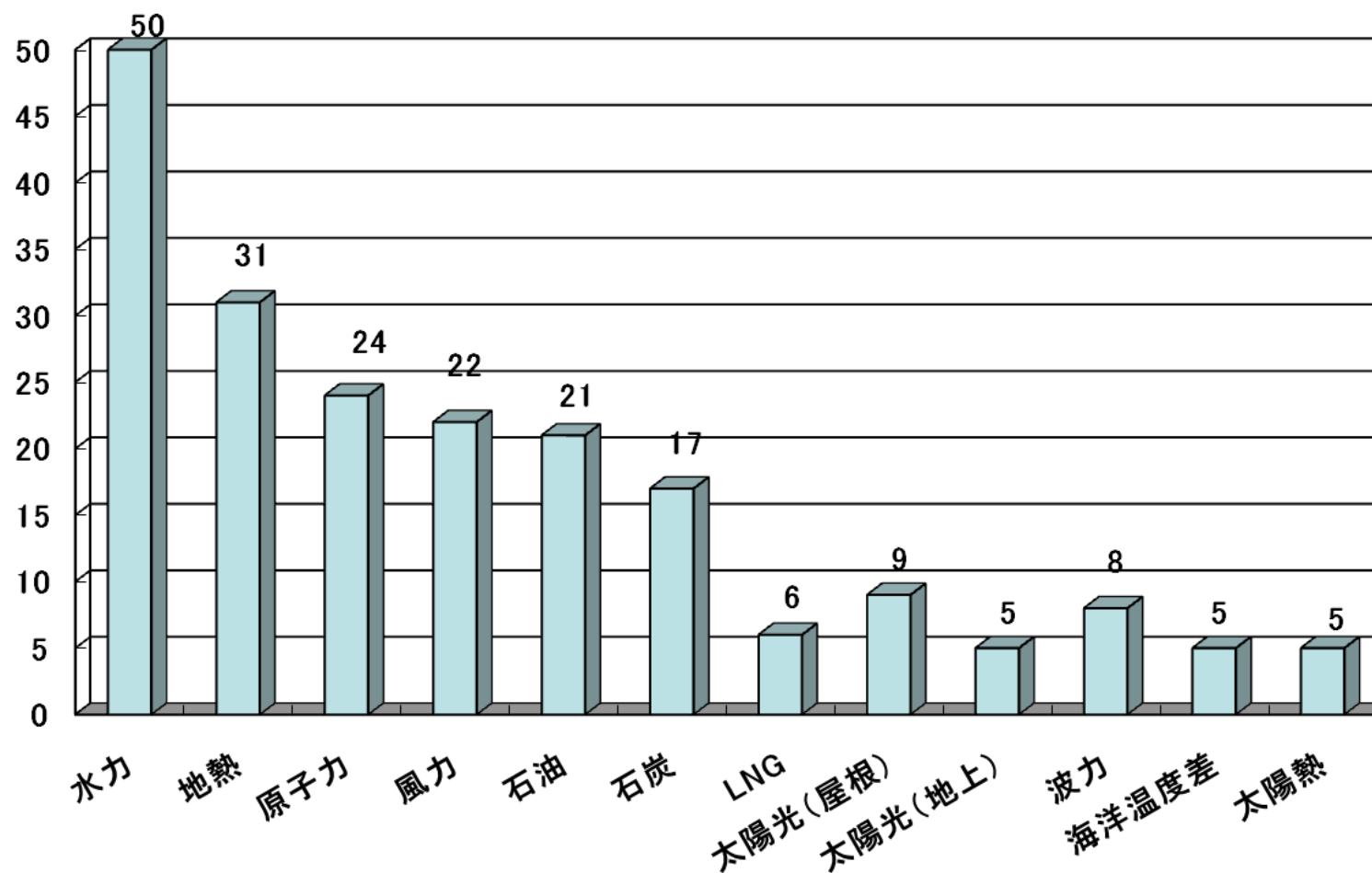
段階	投入エネルギー 〔TJ/年〕	プロセス構成比 〔%〕								
		採掘	製錬・ フッ化	濃縮	加工 (MOX/ Pu転換)	発電	再処 理	処分	廃炉	計
設備	282	0.9	0.1	2.4	0.1 (0.2)	15.6	3.8	9.3	0.4	32.7
運用	580	0.2	9.6	19.3	1.8 (0.3)	17.5	18.1	0.4	0.0	67.3
合計	862	1.1	9.7	21.7	1.9 (0.5)	33.1	21.9	9.7	0.4	100

発電システムの正味エネルギー収支



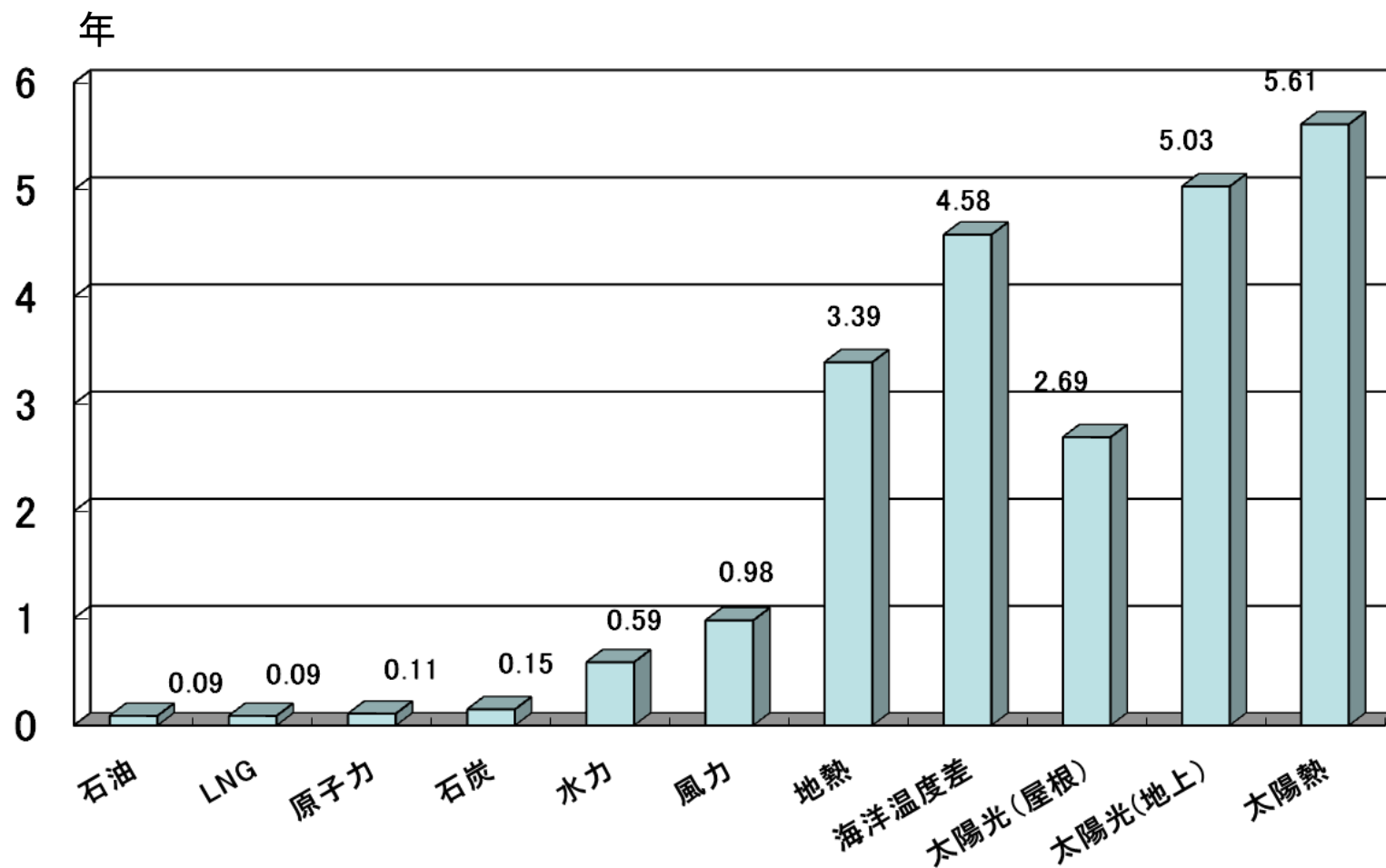
発電システムのエネルギー収支比

(生産エネルギー) / (投入エネルギー) : プラント耐用年数30年

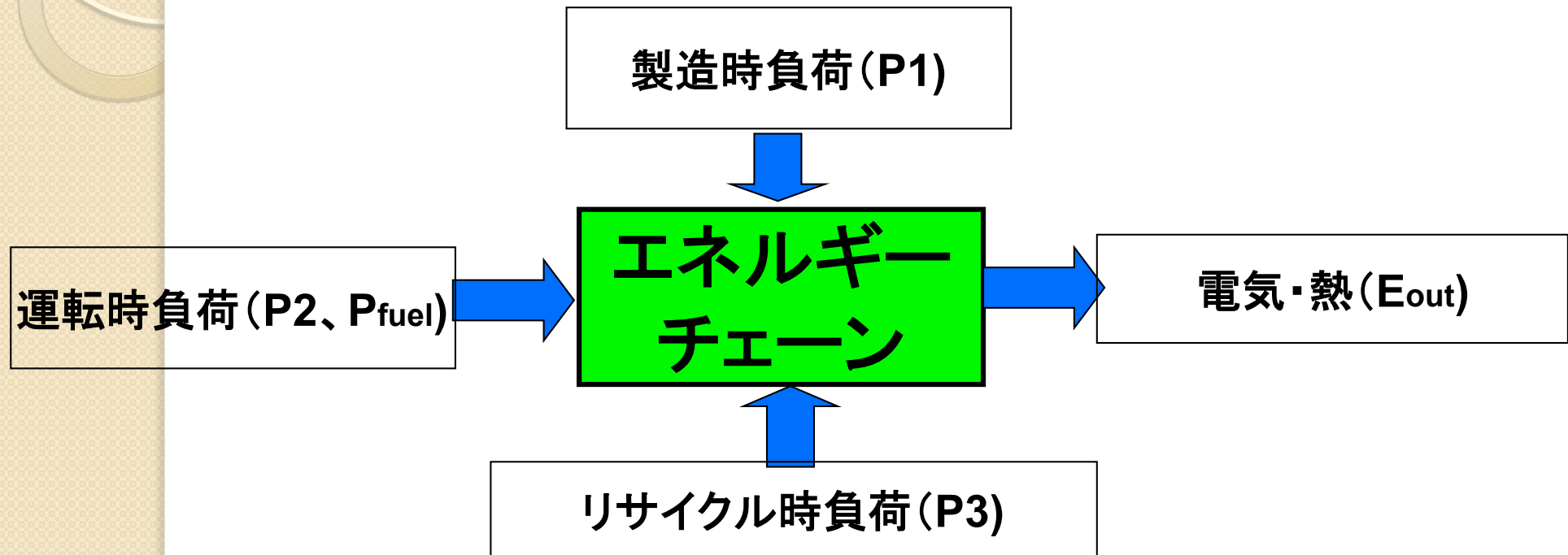


発電システムのエネルギー回収期間

{ (生産エネルギー) - (運転保守エネルギー) } / 設備投入エネルギー
(プラント耐用年数30年)



環境負荷原単位の計算



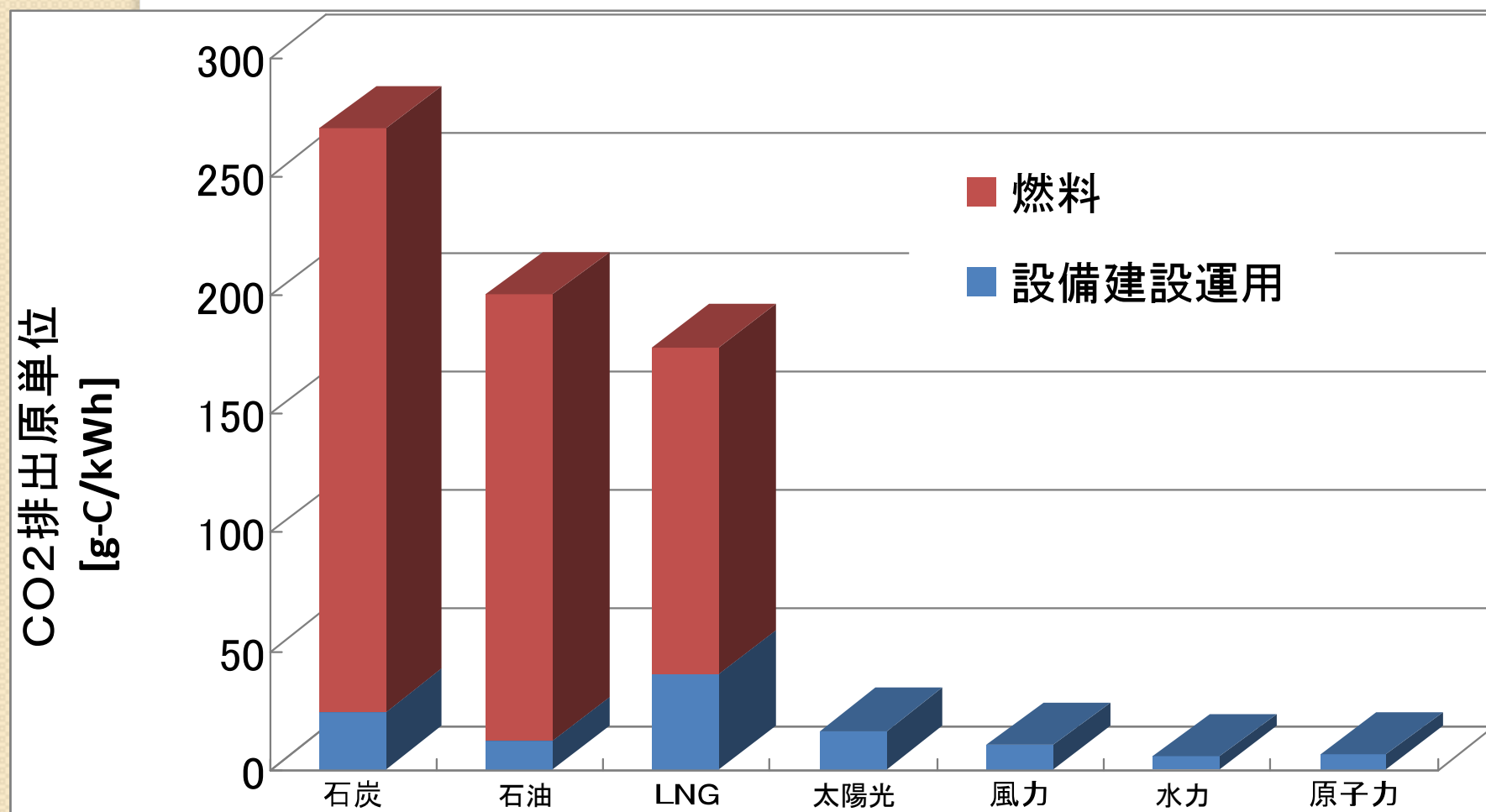
$$\text{環境負荷原単位} = (P1 + P2 + P_{\text{fuel}} + P3) / E_{\text{out}}$$

* 運転保守時環境負荷: 耐用期間の環境負荷量で燃料からの排出も含む

各発電システムのCO2排出原単位(単位:g-C/kWh)

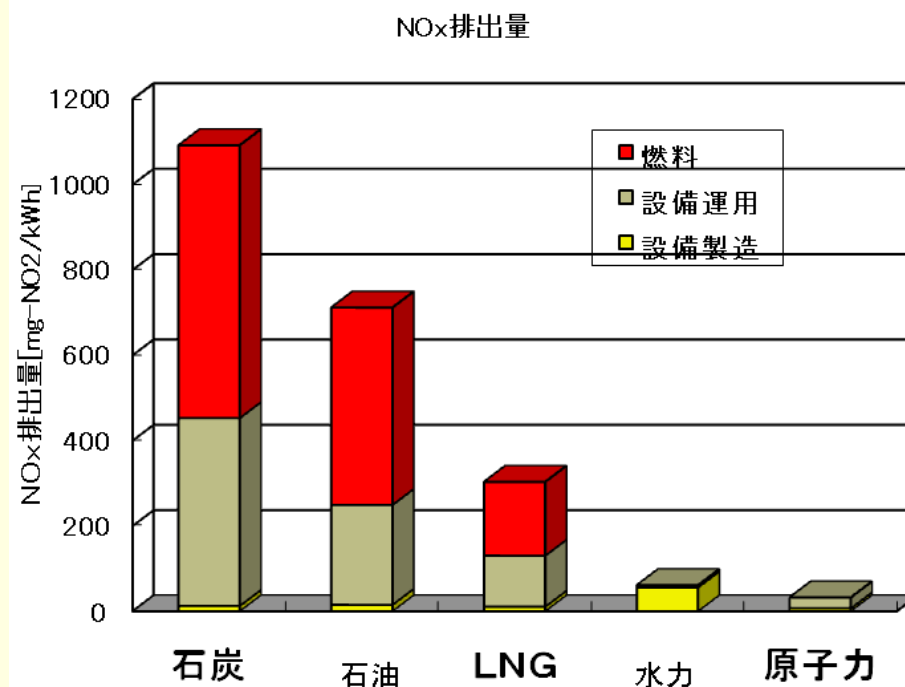
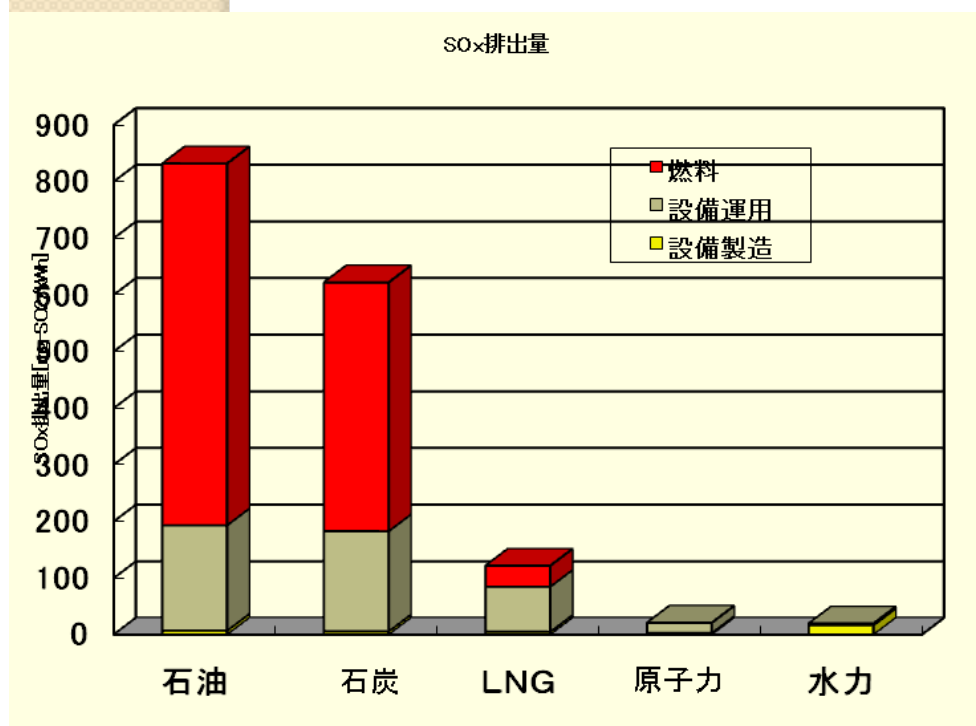
発電システム	設備製造	維持保守	燃焼	メタン漏れ	合計
石炭火力	1.09	9.78	246.33	12.69	269.89
石油火力	0.62	7.21	188.41	3.10	200.06
LNG火力	0.55	24.10	137.27	16.05	177.67
原子力発電	1.00	4.46	—	0.24	5.70
水力発電	4.63	0.07	—	0.11	4.81
地熱発電	1.39	4.63	—	0.27	6.29
風力発電	6.73	2.41	—	0.37	9.51
太陽光（家庭）	11.91	3.57	—	0.53	16.01
太陽光（地上）	26.24	6.82	—	1.25	34.31

発電システムの温室効果ガス分析



出典：内山「発電システムのライフサイクル分析」電力中央研究所研究報告Y94009(1995)

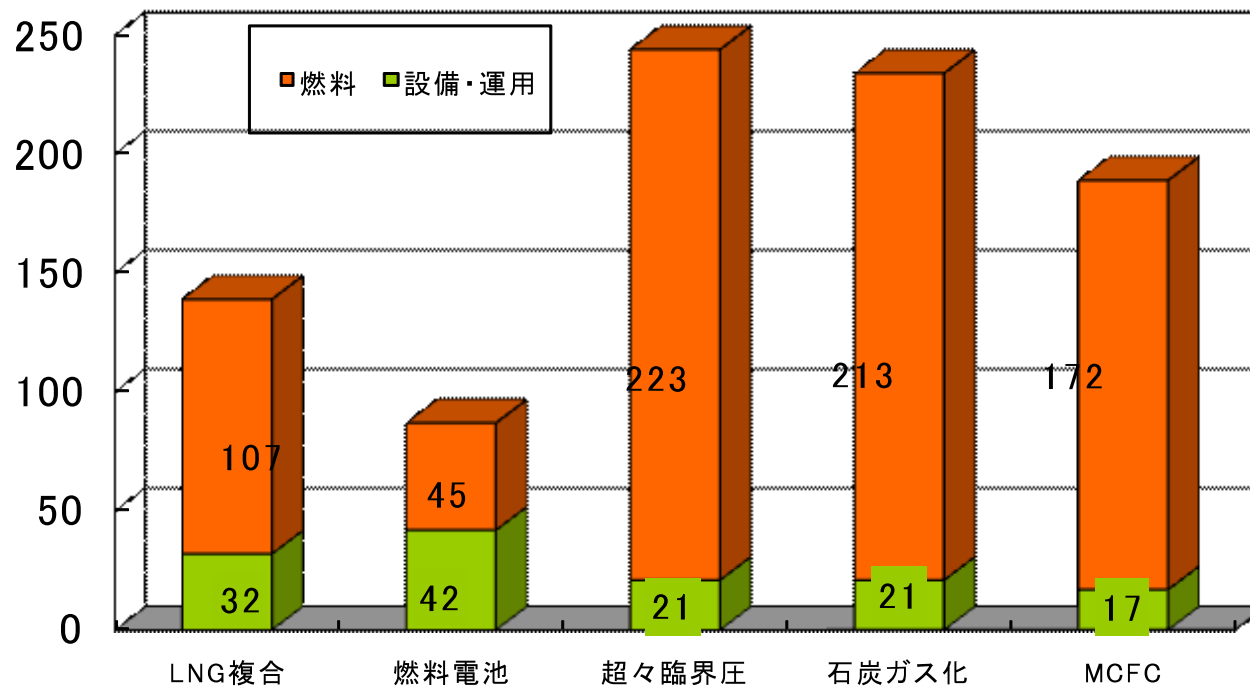
発電システムのSO_xとNO_x排出量



出典: 本藤、内山「わが国の電力生産におけるライフサイクルCO₂, SO_x, NO_x排出量の推計」Y98509(1999)

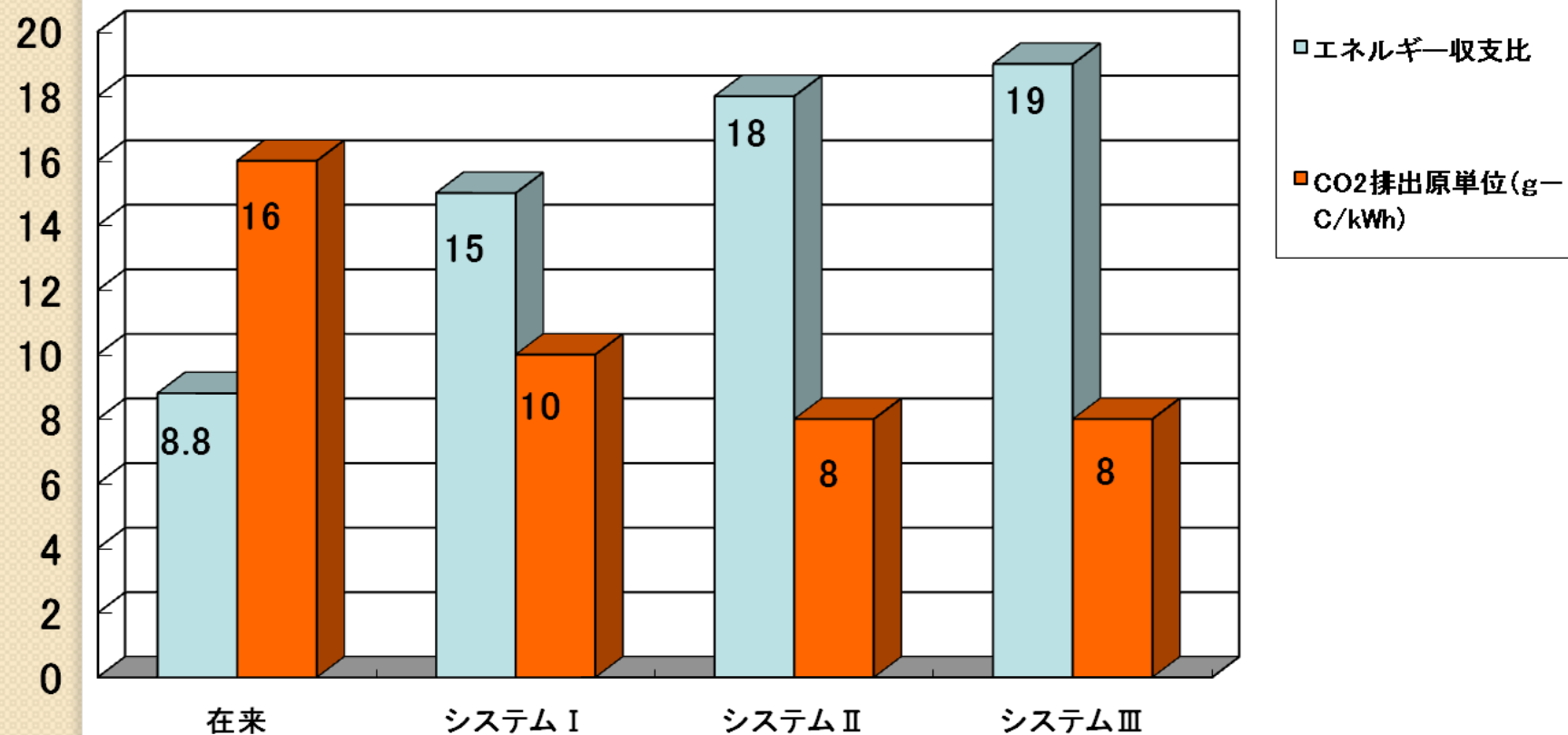
火力発電の技術進歩

	LNG複合	燃料電池 コジェネ	超々臨界圧 発電	石炭ガス化 複合	MCFC 複合
発電出力 〔MW〕	1,000	10	1,000	1,000	1,000
発電効率 〔%〕	50	40 (80)	43	45	55



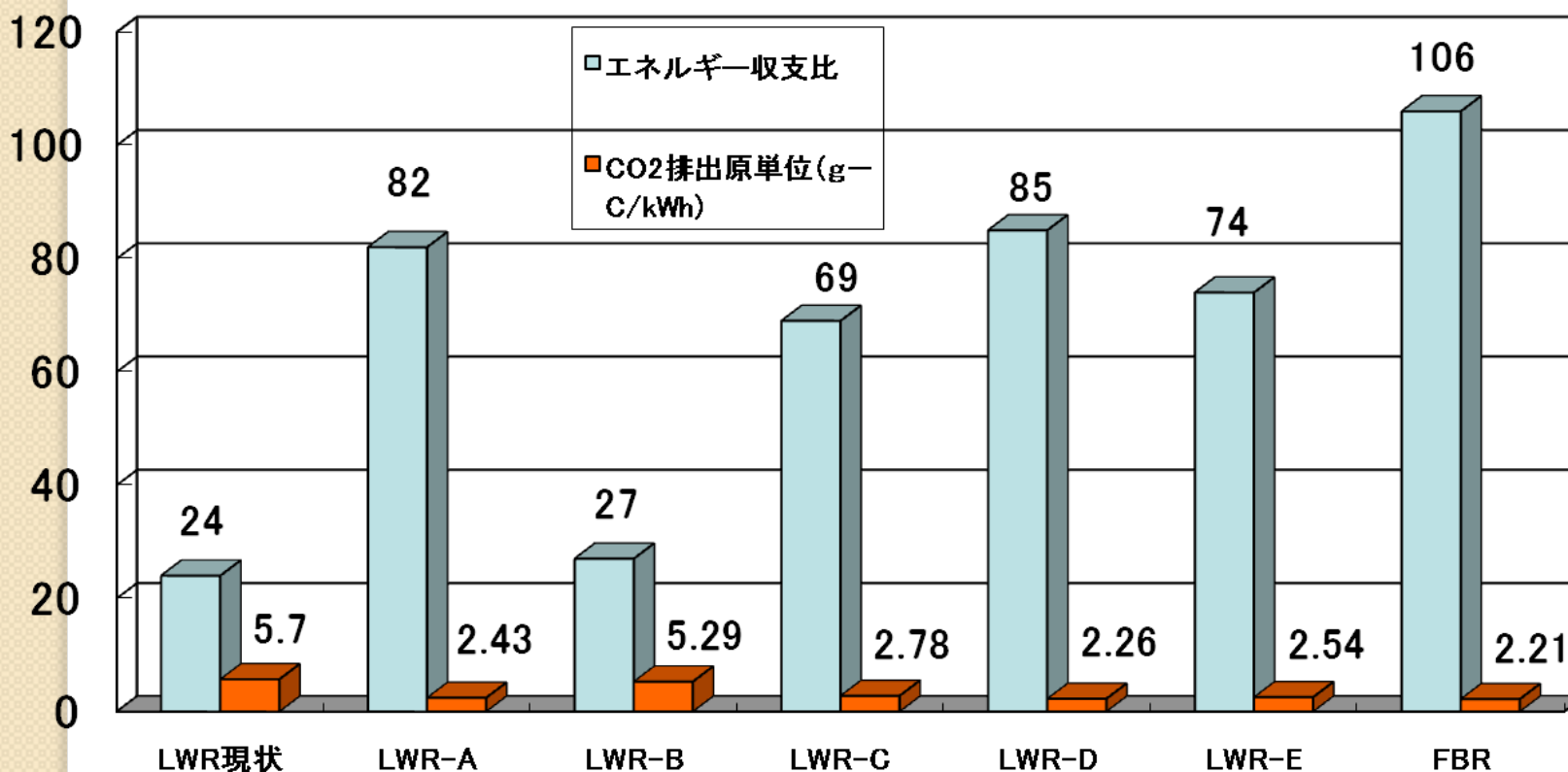
太陽光発電の技術進歩

	年生産規模	セル効率	シリコン層厚
システムⅠ	1GW多結晶	20%	300μm
システムⅡ	1GW多結晶	20%	150μm
システムⅢ	！GWアモルファス	12.6%	—



原子力発電の技術進歩

	LWR現状	LWR-A	LWR-B	LWR-C	LWR-D	LWR-E	高速増殖炉
燃料サイクル	ワンスルー	ワンスルー	プルサーマル	プルサーマル	ワンスルー	プルサーマル	プルリサイクル
濃縮	ガス拡散	遠心法	ガス拡散	遠心法	遠心法	遠心法	なし
燃焼度[GWd/t]	30	30	30	30	45	45	61.3
利用率[%]	75	75	75	75	88	88	90



産業から技術の役割を考える

- ★技術は産業活動の一要素
- ★産業活動から技術の環境負荷を推計する
- ★低炭素社会に向けて改善すべき活動要素とは
- ★技術進歩が果たせる役割は

産業連関表

- 1年間の生産活動である財・サービスの取引を部門間の投入と産出による行列で表示したものである。産業連関表を縦（列）方向に読むと各産業の投入構造が示され、横（行）方向に読むと各産業の生産物の需要先が示される。
- 日本では1955年に経済企画庁と通商産業省がそれぞれ独自に作成（1951年を対象年次）
- 5年ごとに作成（平成12年度表は総務省、内閣府、金融庁、財務省、文部科学省、厚生労働省、農林水産省、経済産業省、国土交通省、環境省の表同作業）

産業連関表の構造

需要部門(買い手)					中間需要					最終需要					(控除)輸	国内生産額	
					1 農林水産業	2 鉱業	3 製造業	計		家計外消費支出	消費者固定資本形成費	在庫増減	輸出入	計			
供給部門(売り手)					生産される財・サービス					A	B					C	A+B-C
中間投入	1 農業	2 林業	3 水産業	製造業	生産された財・サービスの原材料及び粗付加価値の構成	生産された財・サービスの販売先の構成											
	供給される財・サービス					【産出】											
	計 D																
粗付加価値	家計外消費支出	雇用者所得	営業余剰	資本減耗引当金	【投入】	・ 行生産額(A+B-C)と列生産額(D+E)は一致する。 ・ 粗付加価値の合計と最終需要-輸入の合計は一致する。											
	(控除)補助金																
計 E																	
国内生産額 D+E																	

競争輸入型産業連関表

産業部門	1	2		j		n	最終需要	輸入(控除)	国内生産額
1	x_{11}	x_{12}		x_{1j}		x_{1n}	F_1	$-M_1$	X_1
2	x_{21}	x_{22}		x_{2j}		x_{2n}	F_2	$-M_2$	X_2
i	x_{i1}	x_{i2}		x_{ij}		x_{in}	F_i	$-M_i$	X_i
n	x_{n1}	x_{n2}		x_{nj}		x_{nn}	F_n	$-M_n$	X_n
粗付加価値	V_1	V_2		V_j		V_n			
国内生産額	X_1	X_2		X_j		X_n			

輸入内生モデル

需給均衡式

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} X_j + F_i^d + E_i = X_i + M_i, i = 1, 2, \dots, n$$

F_i^d : 国内需要, E : 輸出

$$M_i = m_i \left(\sum_{j=1}^n a_{ij} X_j + F_i^d \right), i = 1, 2, \dots, n$$

$$m_i = M_i / \left(\sum_{j=1}^n a_{ij} X_j + F_i^d \right)$$

m_i : 輸入係数

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} X_j + F_i^d + E_i = X_i + m_i \left(\sum_{j=1}^n a_{ij} X_j + F_i^d \right), i = 1, 2, \dots, n$$

$$X_i - (1 - m_i) \sum_{j=1}^n a_{ij} X_j = (1 - m_i) F_i^d + E_i, i = 1, 2, \dots, n$$

需給均衡式(行列)

$$[I - (I - \hat{M})A]X = (I - \hat{M})FD + E$$

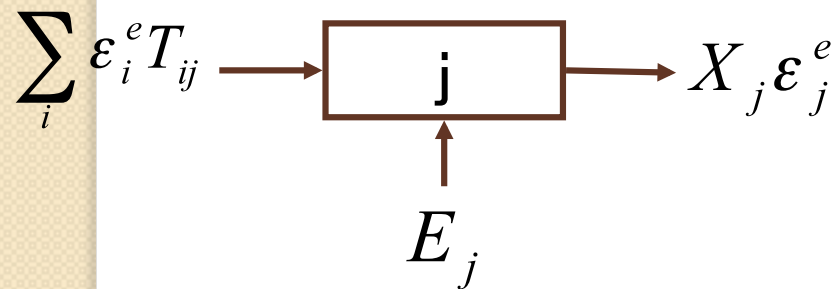
$$X = [I - (I - \hat{M})A]^{-1} [(I - \hat{M})FD + E]$$

FD : 最終需要行列

I : 単位行列

$\hat{M}$: 輸入係数を主対角要素に取った対角行列

財 j の国内生産におけるエネルギーバランス



j : ある財・サービス

X_j : 財 j の生産額

T_{ij} : X_j 生産するために直接必要となる財 i の額

ε_j : 財 j の生産時のエネルギー原単位

E_j : 財 j を生産するために直接投入されるエネルギー

エネルギーバランス

$$\sum_i \varepsilon_i^e T_{ij} + E_j = X_j \varepsilon_j^e$$

エネルギーバランス(行列)

$$\varepsilon^e T + E = X \varepsilon^e$$

$$\varepsilon^e = E'(I - A)^{-1}$$

産業連関表を使ったLCA研究

- 産業連関分析

利点：財・サービスを生産する際に生じる環境負荷を原理的にはもれなく評価することが可能

欠点：5年おきに改訂を繰り返し、基本的な枠組みに変更はないものの、その都度部門概念や部門の範囲を変更しているため、異時点間での比較が困難



1. 時系列産業連関表（TSIO：Time Series Input-Output）とこれに付随する環境負荷データの開発
2. TSIOを用いた電力部門のエネルギー環境負荷分析

時系列産業連関表

- TSIO

対象年：1970～2000年

部門分類：155部門(1985-90-95年接続表統合小分類に準拠)

目的：エネルギー・環境負荷分析を行うことを目的とする

→エネルギーバランス表との接続

→エネルギー関連部門の細分化

各年の基礎統計

85,90,95:1985-90-95年接続表（95年基準）

80:1980-85-90年接続表（90年基準）

75:1975-80-85年接続表(85年基準)

70:1970-75-80年接続表(80年基準)

その他の年：延長表



ベンチマーク年

中間年

直接間接エネルギー消費量・CO₂排出量の推計

- 直接エネルギー消費量の推計方法
 - IEAのエネルギーバランス表を利用
 - 転換部門と最終消費部門に分けて推計
 - エネルギー消費量の単位はtoe(石油換算トン) に統一
 - 発電効率：水力100%、原子力33%、地熱10%

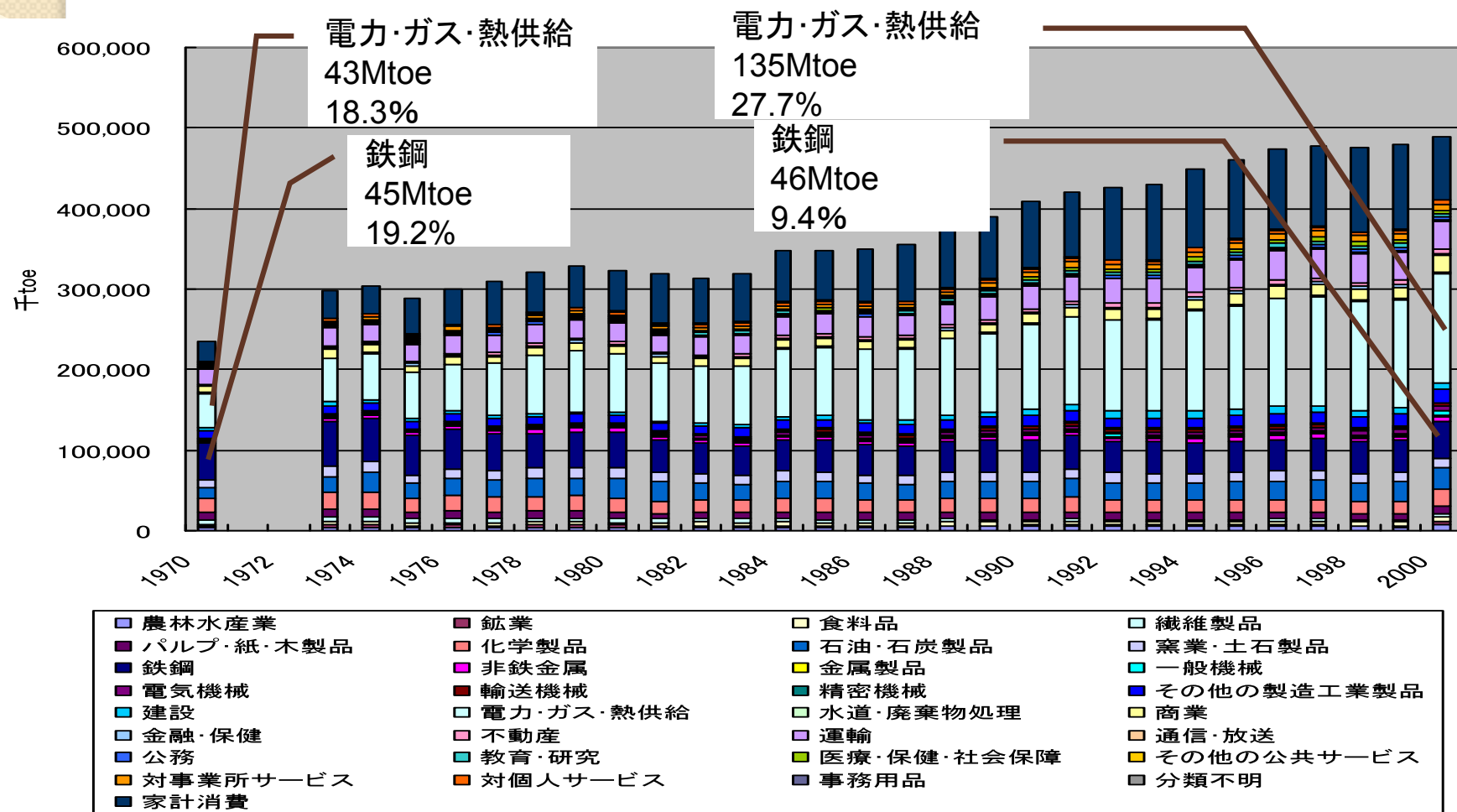
$$\varepsilon_0 = E' A$$

- 直接間接エネルギー原単位

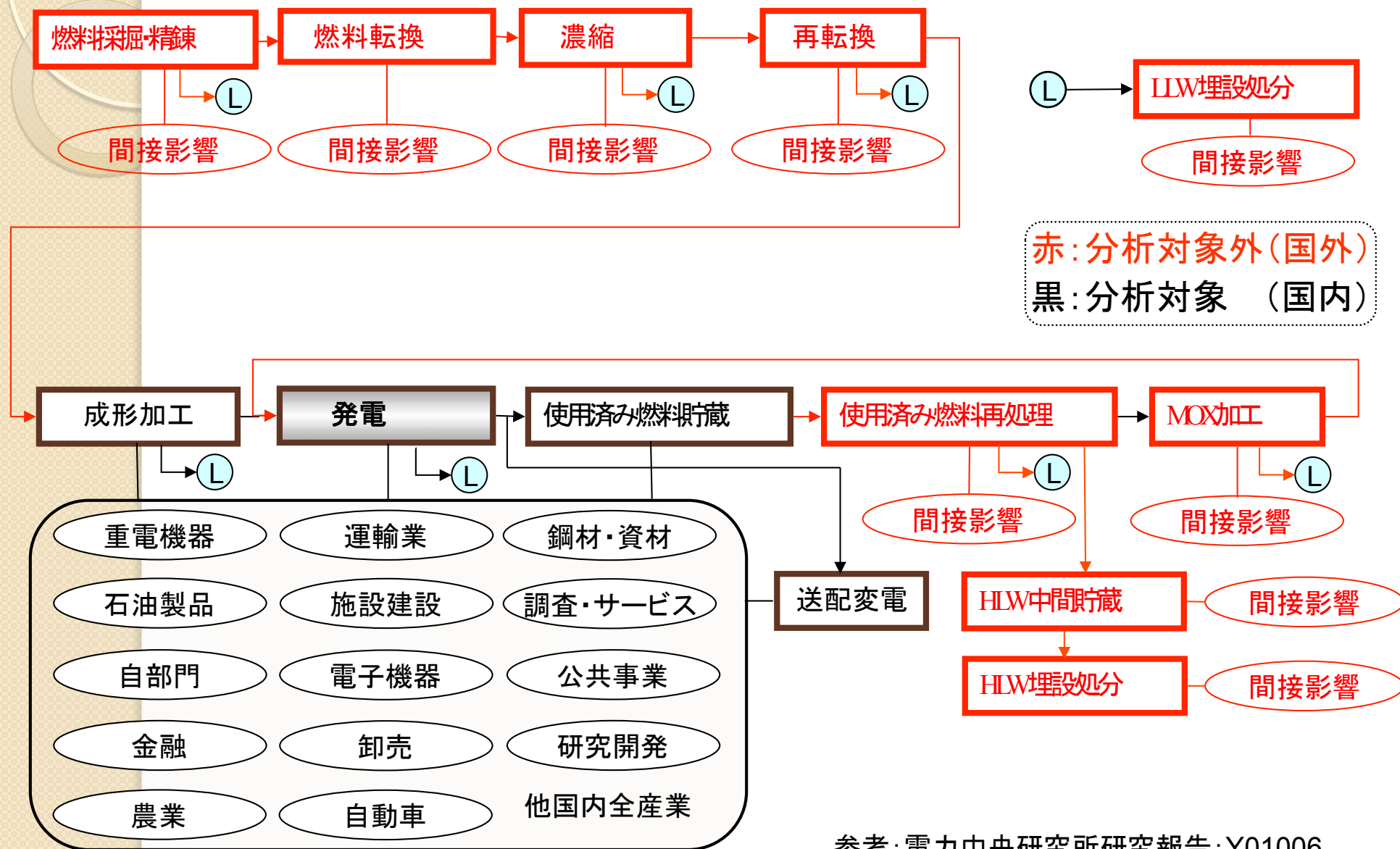
$$\varepsilon = E'(I - A)^{-1}$$

E'：直接エネルギー原単位、 $(I-A)^{-1}$ ：レオンチェフの逆行列

産業別直接エネルギー消費量の推移

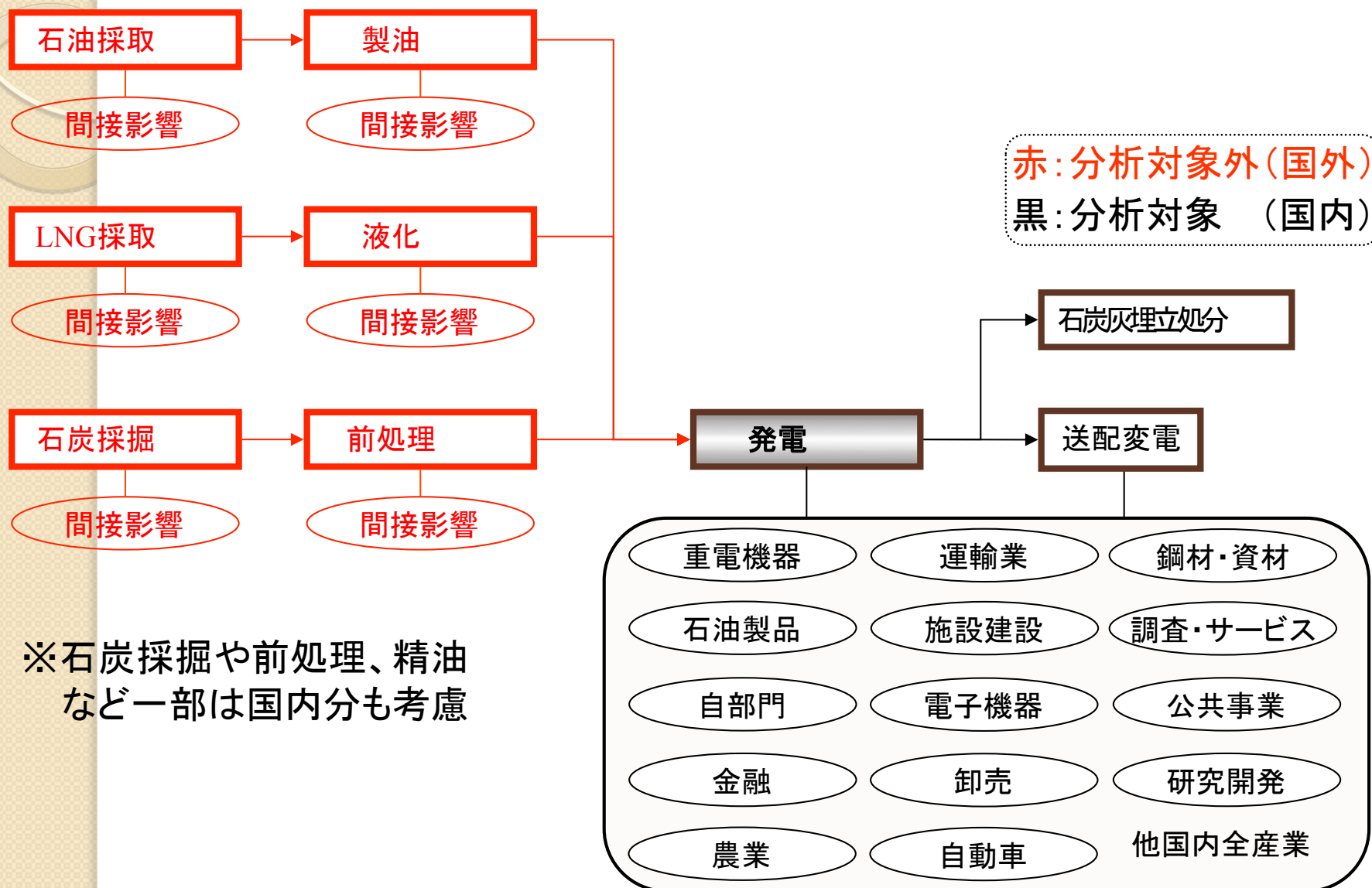


TSIOによるLCAバウンダリ:原子力発電事業

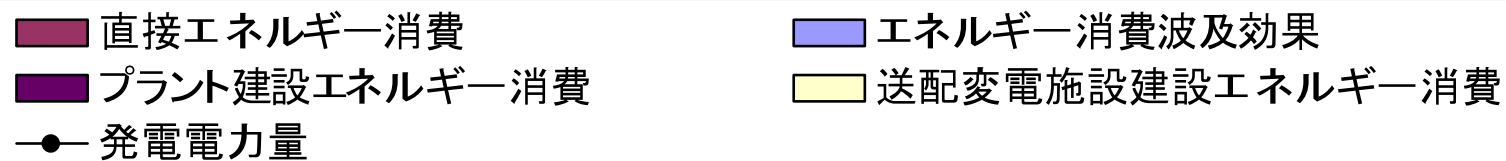
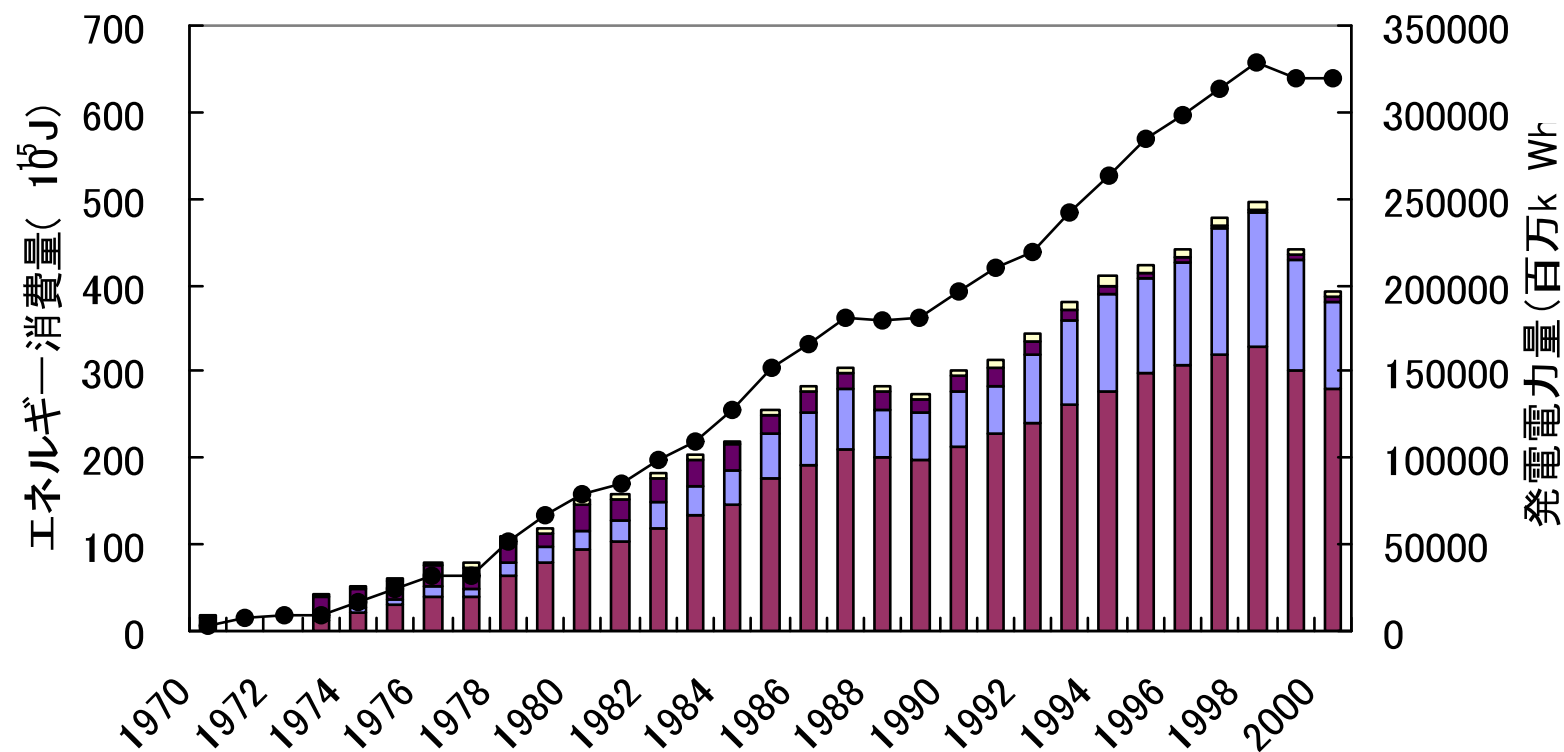


参考: 電力中央研究所研究報告: Y01006

TSIOによるLCAバウンダリ: 火力発電事業

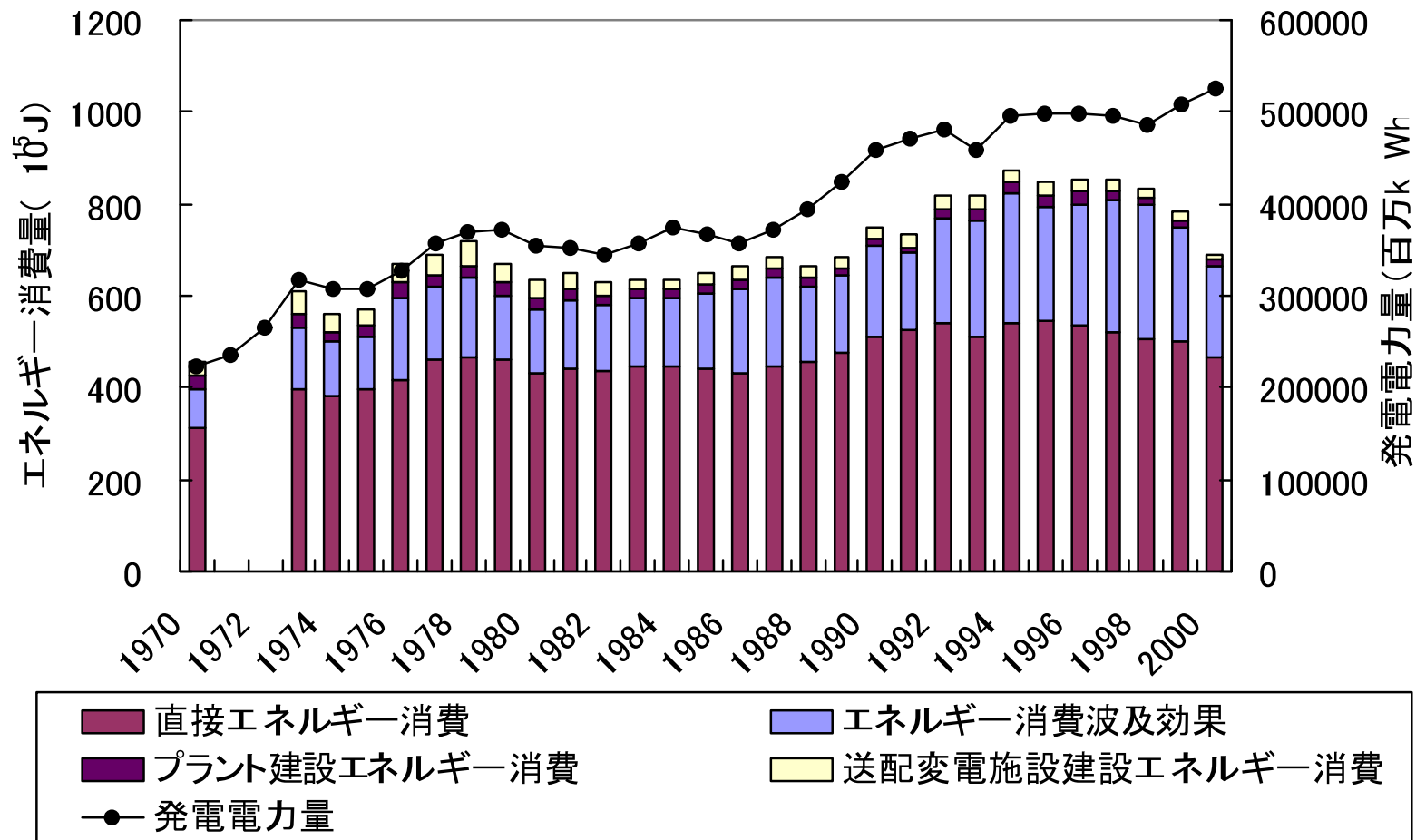


エネルギー消費量（原子力）



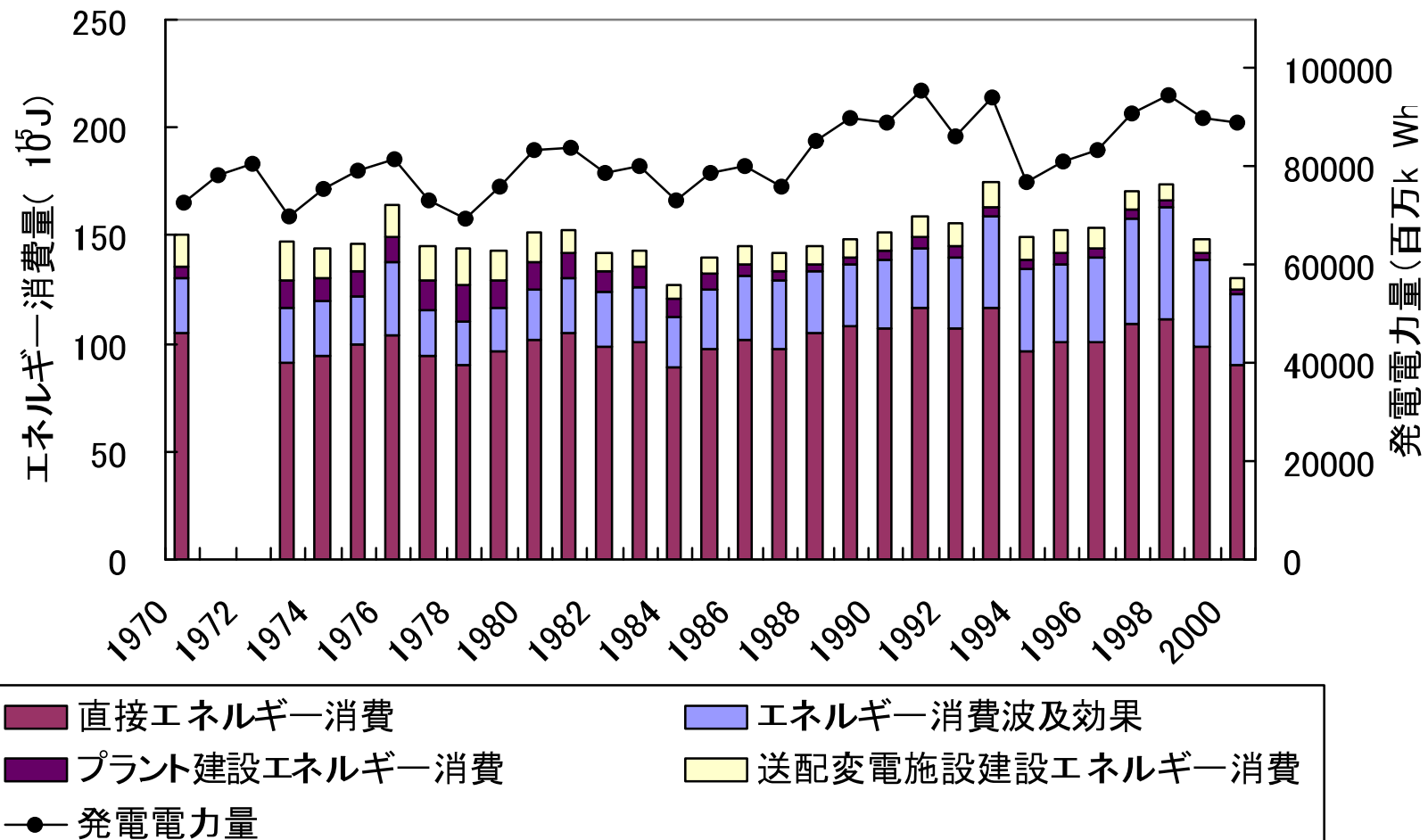
発電電力量の伸びに合わせてエネルギー消費量が施設・運用とも増加している

エネルギー消費量（火力）



直接エネルギー消費(所内電力)はほぼ一定だが、発電電力量は伸びている→総合的な発電効率が良化している

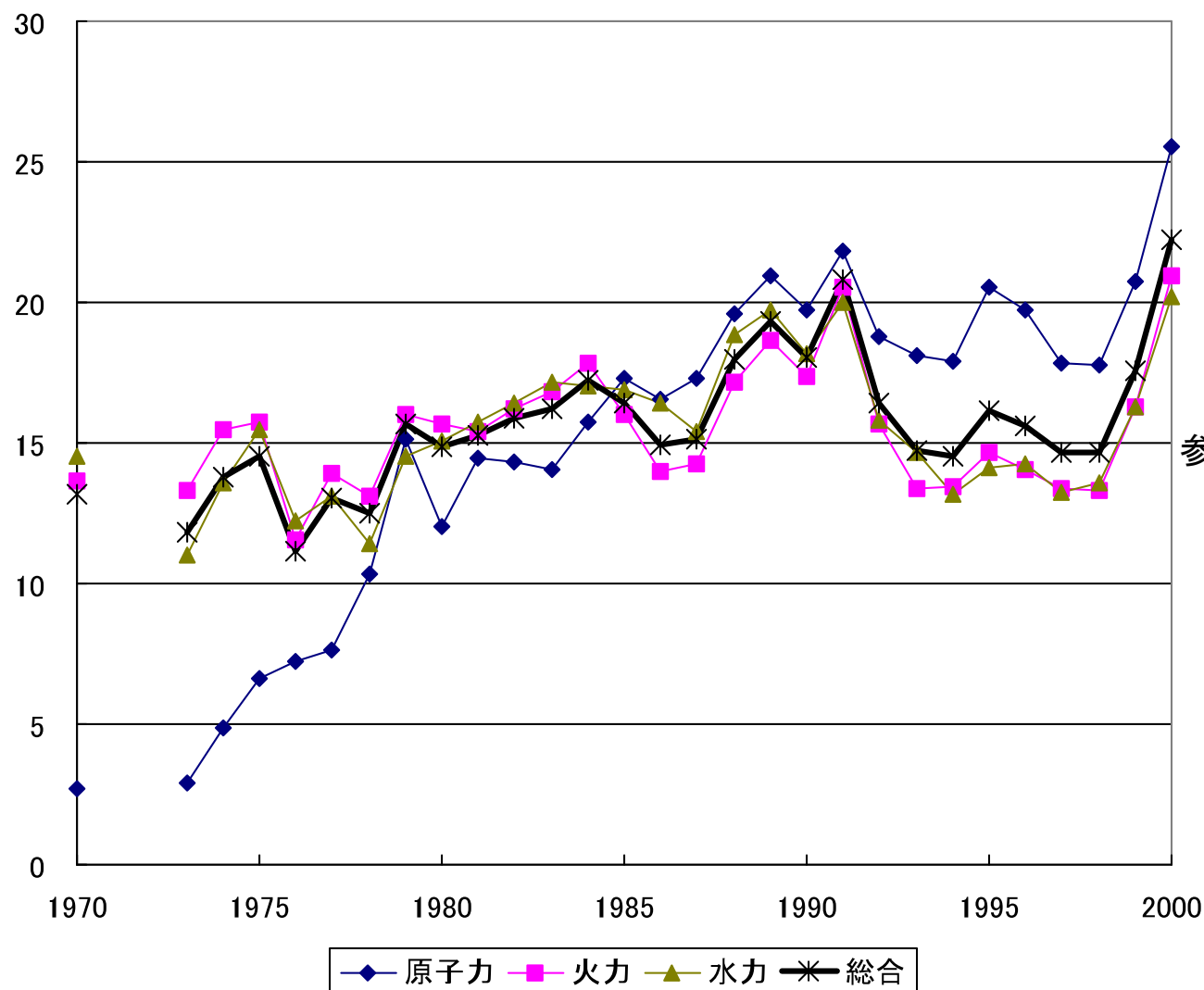
エネルギー消費量（水力）



1980年までは施設建設エネルギーが大きい。

発電の出力が年毎に変動するため、総エネルギー消費も変動する。

エネルギー収支分析



積み上げ法参考値:

石炭火力:17

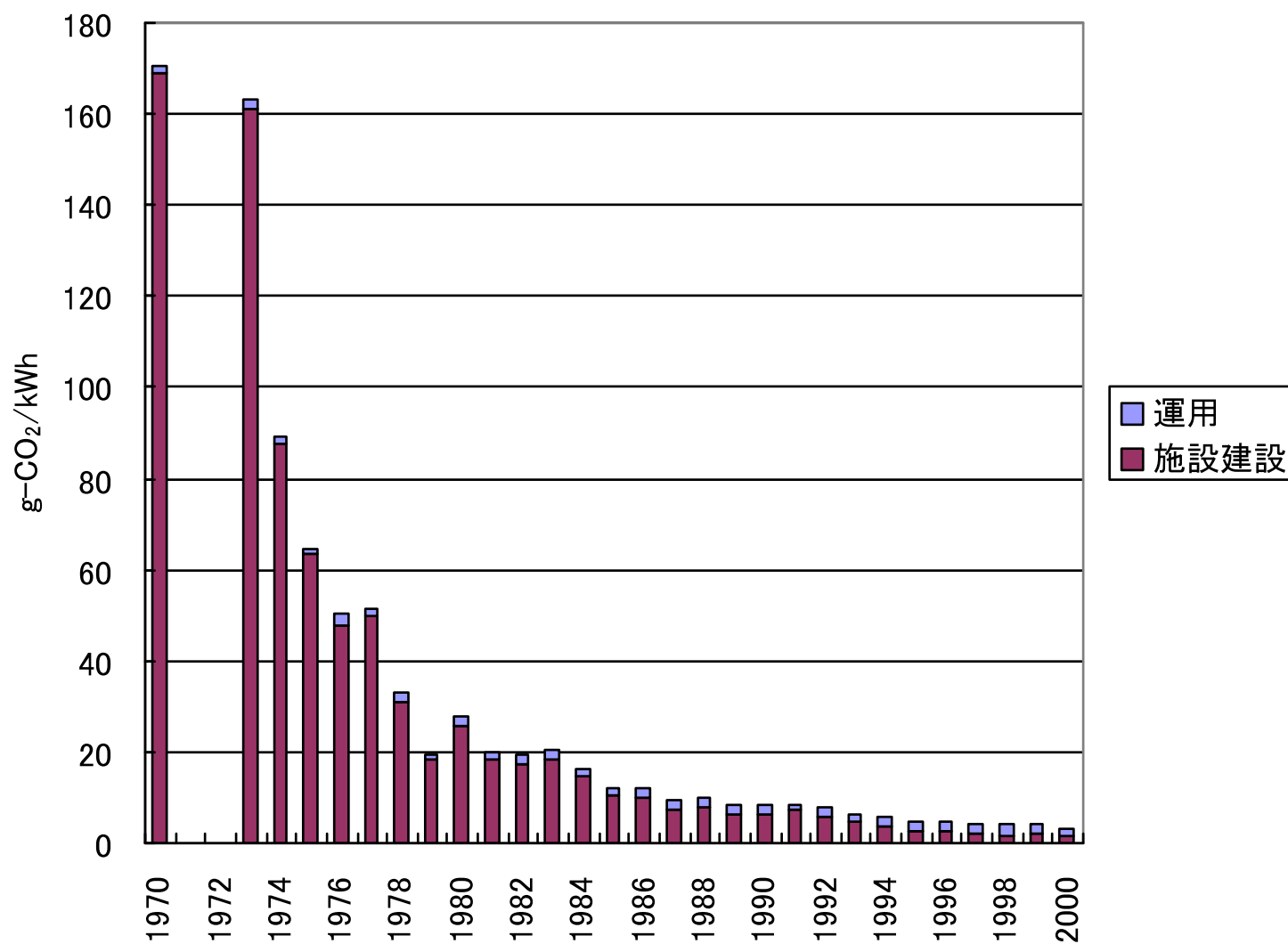
石油火力:21

原子力:24

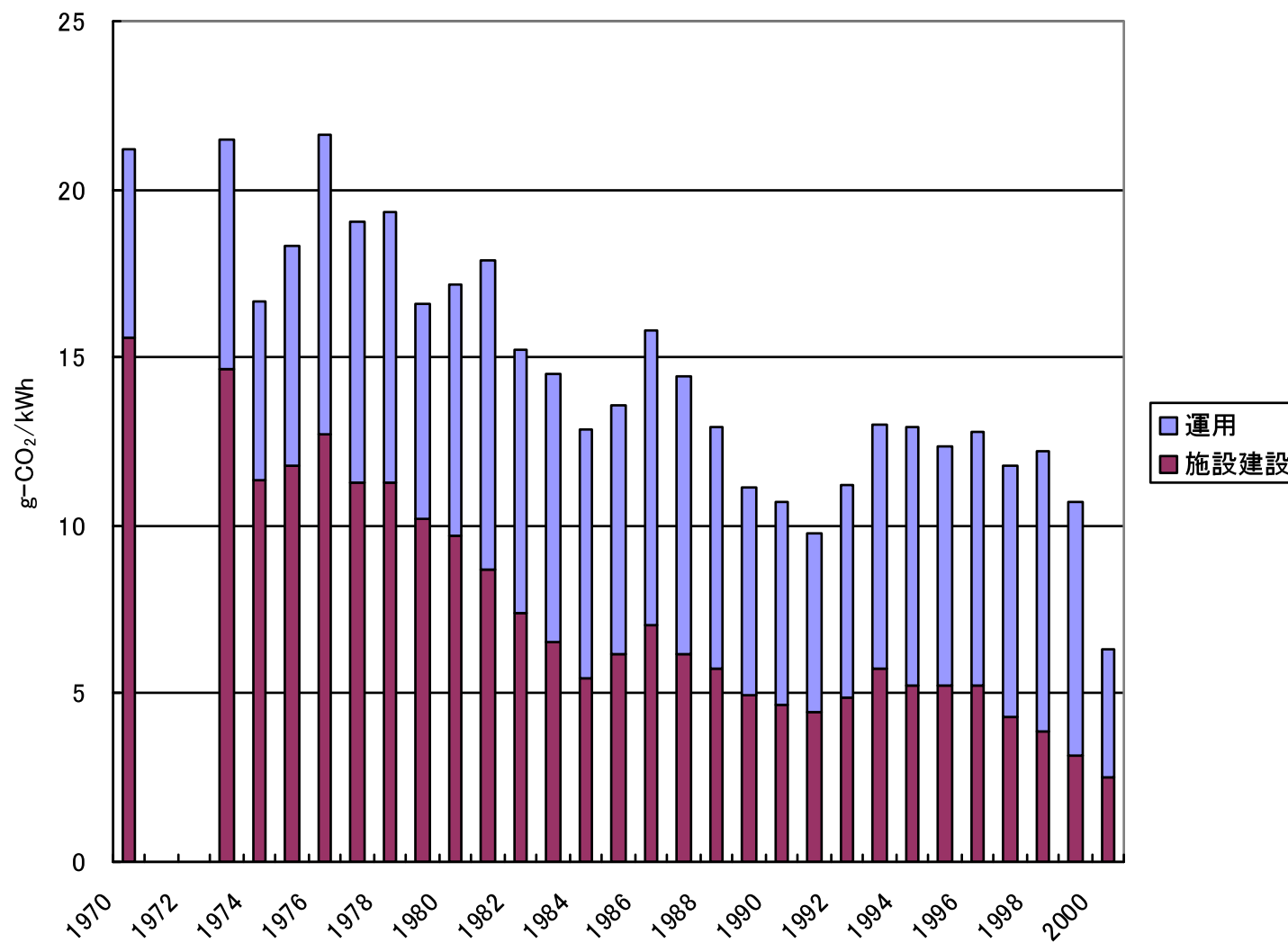
水力:50

参考:電力中央研究所研究報告:
Y94009

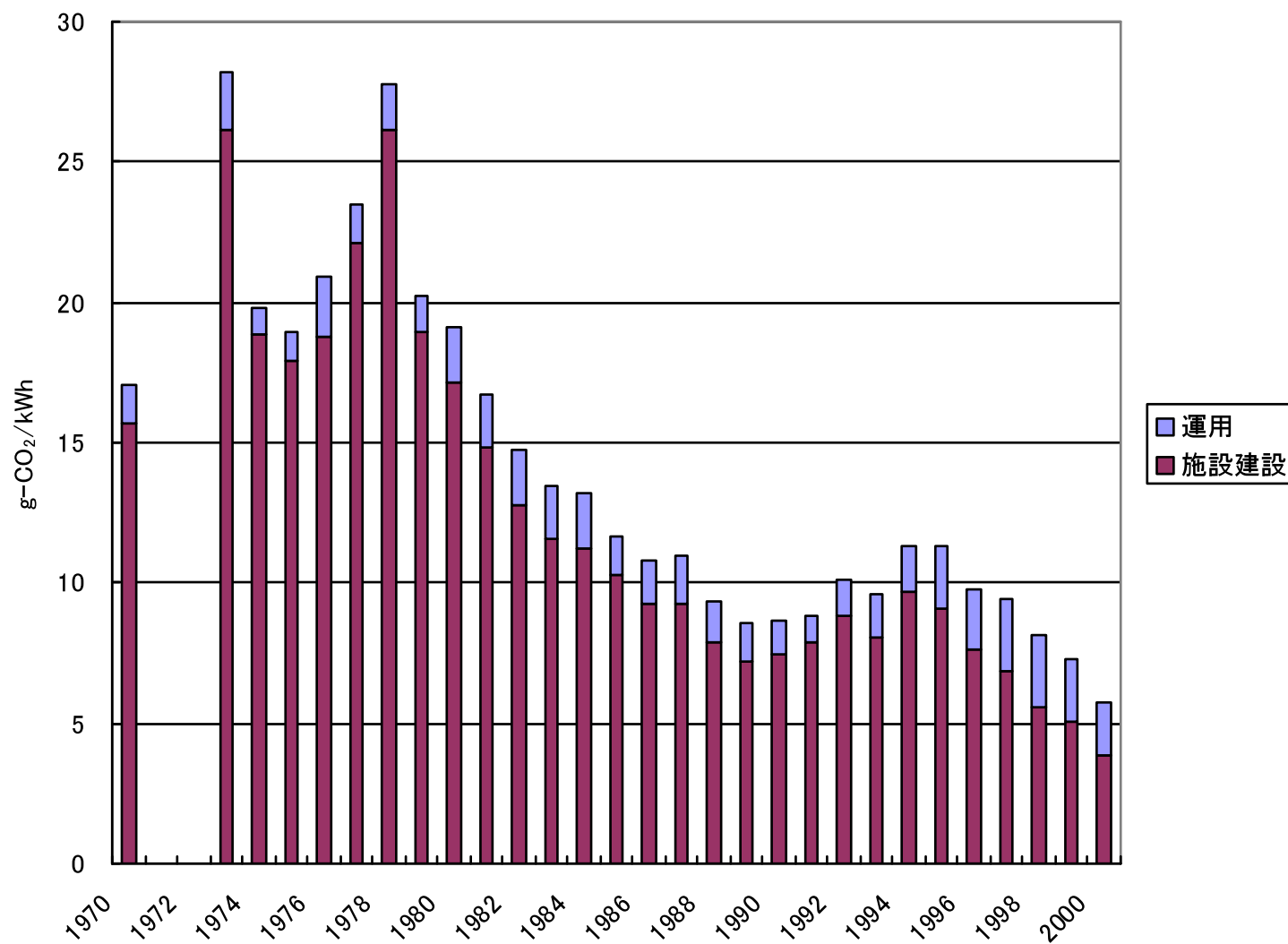
発電電力量あたりのCO₂排出量（原子力）



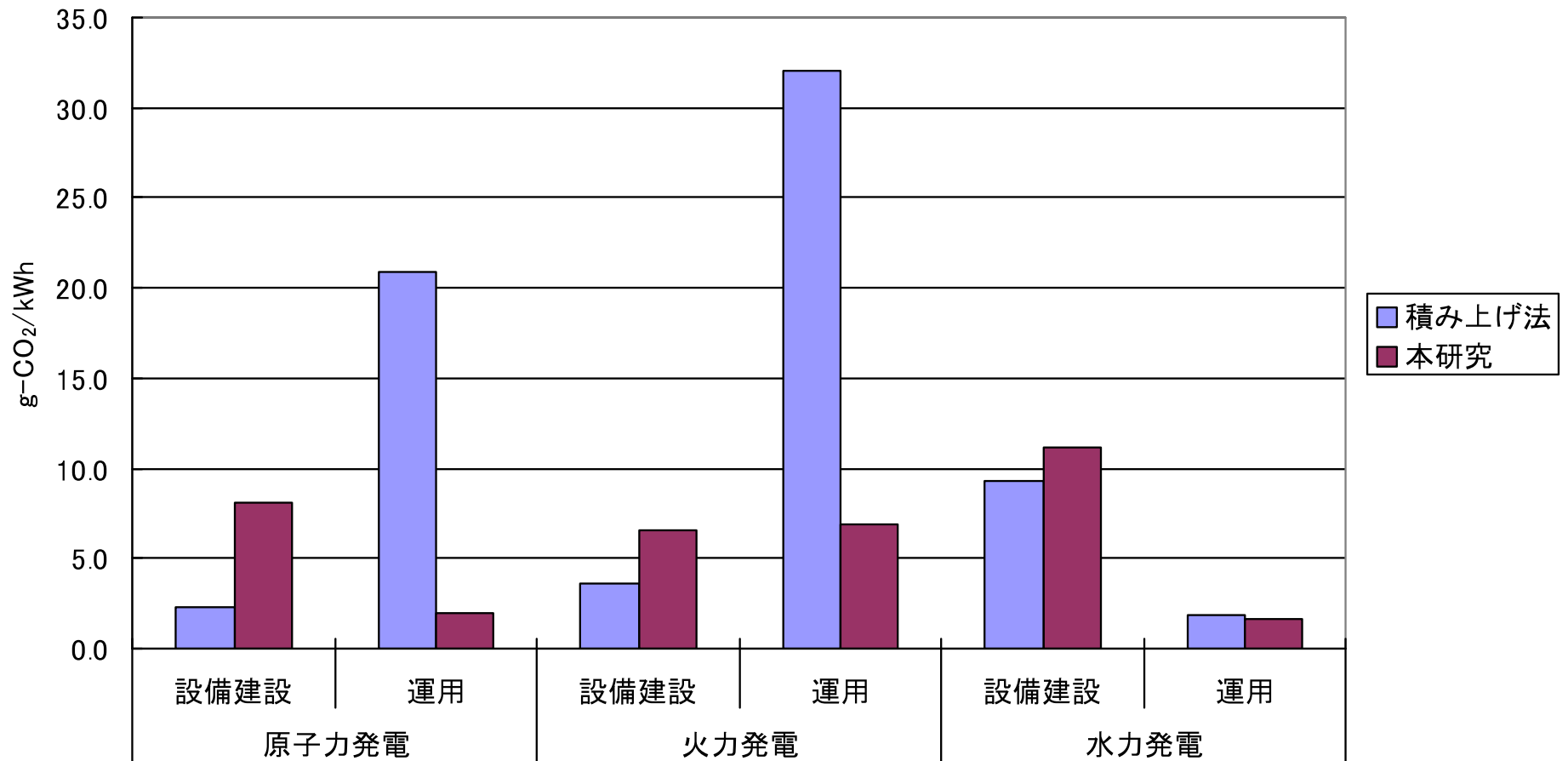
発電電力量あたりCO₂排出量（火力）



発電電力量あたりのCO₂排出量（水力）



積み上げ法との比較



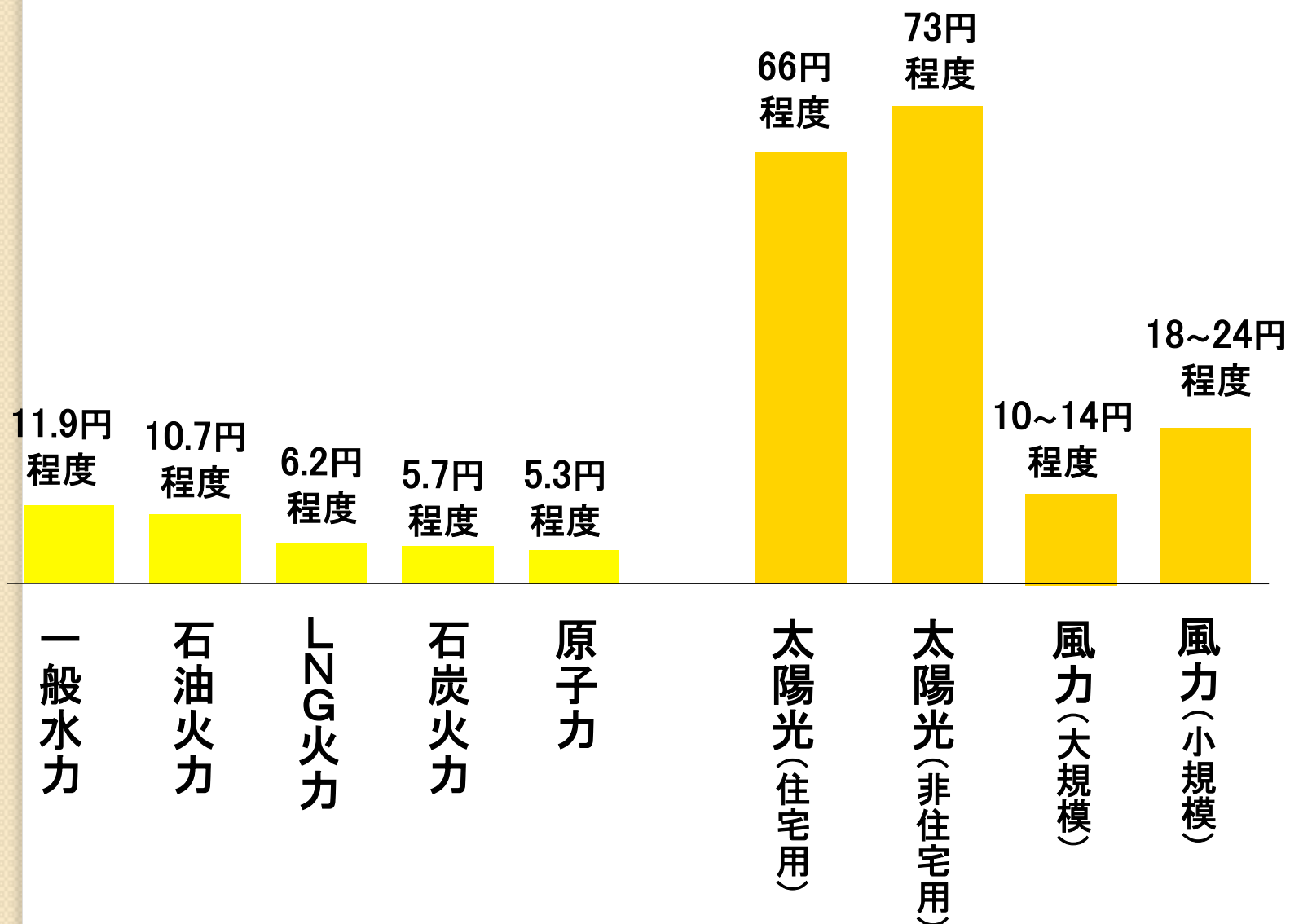
間接影響を30年分もれなく評価した成果

参考: 電力中央研究所研究報告: Y01006
Y99009

発電プラントの経済性は変動が大きい

- ★ L C A とは異なる経済性の結果
- ★ 建設費は国や場所が変わる
- ★ 燃料価格に大きな影響を受ける発電コスト

1 kWh 当たりの電源別発電コストの比較



(出所)総合資源エネルギー調査会資料

発電プラントの建設：OECD/NEA,2005

	プラント	正味発電容量 [MWe]	熱効率[%]	建設費(除建中利子)	
				MNCU	USD/kWe
フランス	微粉炭火力	900×1	47.1	1,096	1,393
	流動床石炭	600×1	46.1	666	1,270
	天然ガス複合	900×1	59.1	471	599
	原子力(PWR)	1,590×1	36.1	2,163	1,556
日本	微粉炭火力	800×1	42.1	223,500	2,347
	LNG複合発電	1,600	52	246,100	1,292
	原子力(ABWR)	1,330×1	34.5	397,400	2,510

119V/\$

発電プラントの発電コスト見積もり (OECD/ NEA ,discount rate: 5%)

		資本コスト [\$/MWh]	運転保守 [\$/MWh]	燃料 [\$/MWh]	合計 [\$/MWh]
フランス	微粉炭火力	11.9	7.7	13.7	33.3
	流動床石炭	10.9	6.9	14.0	31.7
	天然ガス複合	6.0	5.2	28.0	39.2
	原子力(PWR)	13.91	6.45	5.0	25.36
日本	微粉炭火力	20.6	8.8	20.0	49.5
	LNG複合発電	14.5	4.9	32.8	52.1
	原子力(ABWR)	21.8	14.5	11.8	48.0

原子力発電の建設費と発電コスト

項目	ABWR	AP1000 (WH)	EPR (Areva)	ESBWR (GE)
建設単価[\$/ kW]	2,510(#1) 1,611(#2)	1,000-1,200 (#3)	1,600-2,000 (#4)	1,200(#4) 1,350(#6)
建設期間	5 yrs(#1) 40 month(#2)	42 month (#6)	57 month (#5)	39 month (#7)
発電コスト	48[\$/MWh] (disc.rate:5%)	32-36 [\$/MEh](#3)	29.9[Euro/ MWh](#4)	---

#1:OECD/NEA,Projected costs of generating electricity 2005 update

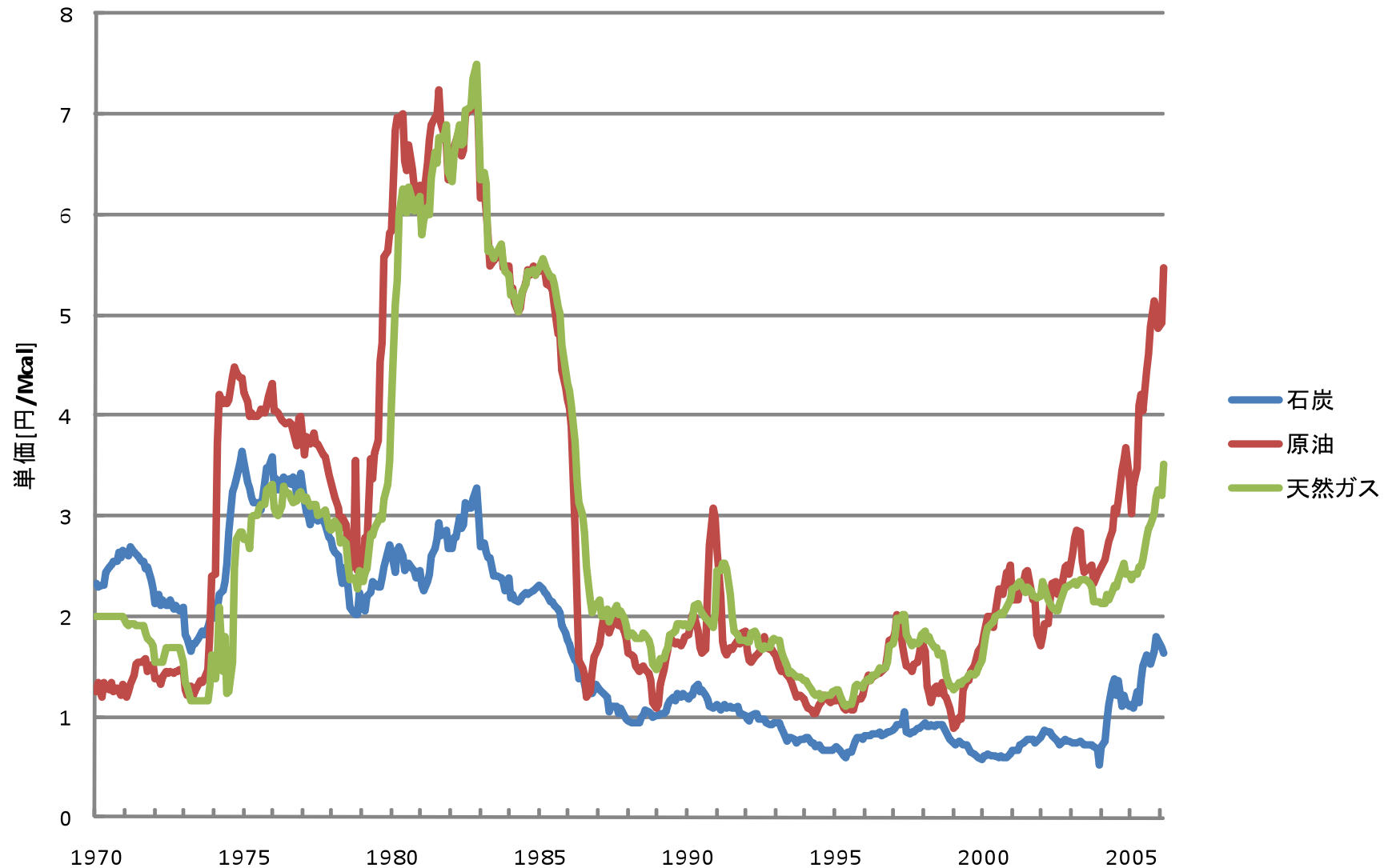
#2:DOE-A107-041D14620,ABWR cost/schedule/COL project at TVA's Bellefonte site(2005)

#3:Nuclear Engineering International(2004) #4: Nucleonics Week(2004/9/16, 2005/9/22)

#5:ICONE-7 #6:Nucleonics Week(2005/9/15)

#7:DOE, NP2010 improved construction technologies, O&M staffing and cost, decommissioning costs, and funding requirements study

輸入化石燃料費の推移



出所：日本貿易月表(1970.1-2006.3)日本関税協会

燃料価格による発電コストの違い

プラント	Heat value	資本費 +運転保守費[V kWh]	ケース1: 低燃料価格 (#1) [discount rate: 2%]				ケース2: 高燃料価格 (平均値: 2007)			
			燃料価格	上昇率 [%]	燃料コスト [VkWh]	発電コスト [VkWh]	燃料価格	上昇率 [%]	燃料コスト [VkWh]	発電コスト [VkWh]
石油	9,126 [kcal/l]	5.05	21,030 [Vkl]	0.20	5.45	10.5	42,210 [Vkl]	0	10.23	15.3
LNG	13,019 [kcal/kg]	2.00	28,090 [Vt]	0.27	4.10	6.1	39,670 [Vt]	0	5.35	7.4
石炭	6,354 [kcal/kg]	3.69	4,330 [Vt]	0.77	1.71	5.4	7,330 [Vt]	0	2.45	6.1
原子力	-	3.57	-	-	1.53 (#2)	5.1	-	-	1.53 (#2)	5.1
水力	-	10.6	-	-	-	10.6	-	-	-	10.6

#1: The cost study subcommittee of electric industry committee (Jan. 2004)

#2: fuel cycle cost

外部性問題が複雑になっている

- ★外部性とは
- ★場所と時間で変動が大きく定量化が難しい
- ★「持続可能な発展」評価に不可欠

外部性とは

- 外部効果 (External Effect)

現実の価格に反映されていないが第三者に影響を及ぼしうる要因

- 外部性 (Externality)

外部効果による影響の大きさ

- 外部費用 (External Cost)

外部性を価格に適切に内部化するために金銭価値換算したもの

【外部経済と外部不経済】

生産者や消費者(政府も含む)というある経済主体の経済行動が市場機構の外で、他の経済主体の行動に影響を与えることをいう。

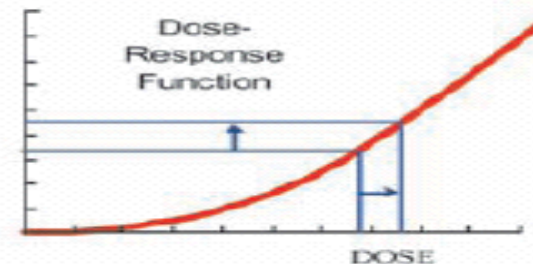
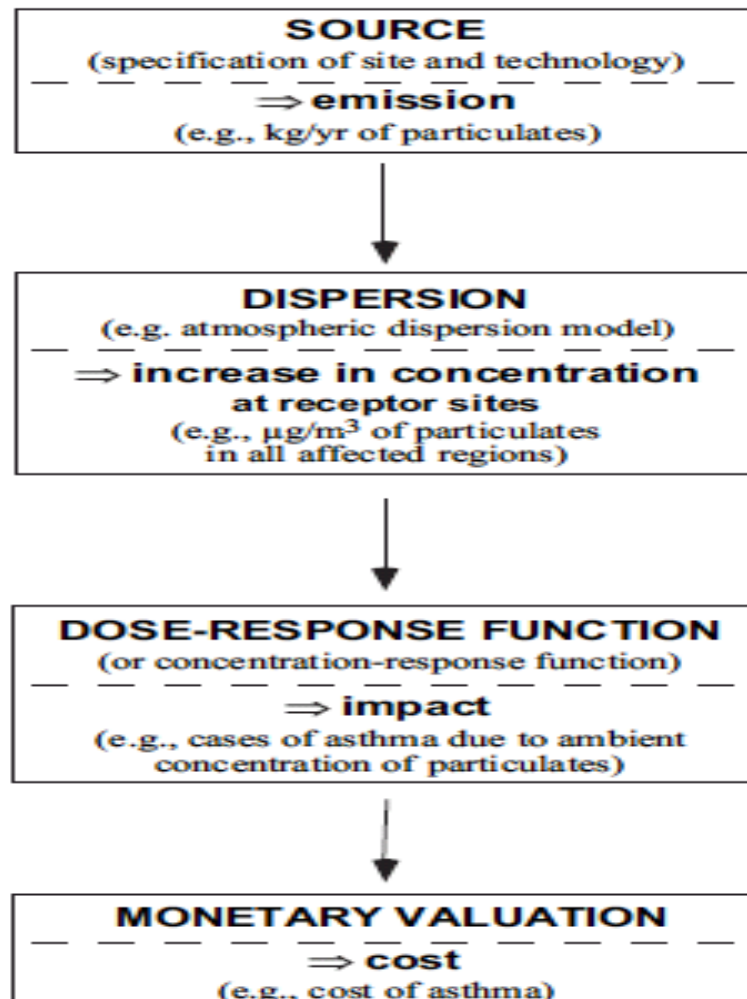
外部経済(正の外部性): ある経済主体の行動が、他の経済主体に対して好ましい(正の)影響を与えること、すなわち他の家計の効用(満足)を増大させるとき、あるいは他の企業の生産増加に寄与するときの外部効果をいう。

外部不経済(負の外部性): ある経済主体の行動が他の家計の効用を減少させたり、あるいは他の企業の生産費用を増大させたりという好ましくない影響を与えることをいう。

エネルギー供給における外部性

- 環境問題に係る外部性
 - 大気汚染物質、温室効果ガス及び放射性物質の排出による環境・健康影響問題
 - ・ 公害問題（大気・水・土壌汚染、廃棄物、騒音）
 - ・ 地球温暖化問題
 - ・ 放射性物質の排出
- 社会経済的な外部性
 - エネルギー安定供給上のリスク、社会的・制度的リスク、核拡散・核テロ等のリスク要因の顕在化による社会経済的な波及影響問題
 - ・ 「市場の失敗」
 - ・ エネルギーセキュリティ問題
 - ・ 重大事故
 - ・ 核拡散問題

EUの外部性研究 (ExternE) : 影響経路法の概要



発電システムにおける優先度が高い外部性項目

外部性の項目		石炭火力	石油火力	リサイクル	天然ガス	原子力	水力	太陽光	風力
大気汚染	健康影響（公衆）	●	●	●	●			●	
	建築素材	●	●	●	●			●	
	穀物	●	●	●	●			●	
	森林	●	●	●	●				
	淡水魚類	●	●	●	●				
	野生生態系	●	●	●	●				
	視界影響								●
温室効果ガス	地球温暖化	●	●	●	●	●		●	●
化学物質	健康影響(職業人)							●	
排水	生態系	●	●	●	●				
土地利用	野生生態系 農業,森林,水資源		●		●		● ●		
放射性物質	健康影響(職業人,公衆)					●			
事故	職業人,公衆影響	●	●	●	●	●			
騒音	健康影響	●	●		●		●		●
採掘処理輸送	個別特有の影響	● 採掘	●	●	●				

石油火力システムの外部コスト見積もり

(単位：mECU/kWh)

国名	サイズ [MW]	燃料供給地 域	発電段階			その他段階		合計
			健康被害	温暖化	その他	温暖化	その他	
デンマーク	156	OPEC	26.7	3-120	0.44	0.3-11	7.9	38-166
フランス	700	OPEC	67.7	2.3-121	0.96	---	---	72-189
ギリシャ	120	イラン	10.0	3-103	0.70	0.14-5.4	1.1	15-120
イタリア	640	北海	17.6	2.7-96	0.52	0.3-11	2.1	23-128
イギリス	528	北海	16.4	2.3-83	0.70	0.2-6.5	0.85	20-108
イギリス	1940	ベネズエラ	17.3	3-103	0.80	0.03-1	---	21-120

ガス火力システムの外部コスト見積もり

(単位：mECU/kWh)

国名	サイズ [MW]	燃料供給地域	発電段階			その他段階		合計
			健康被害	温暖化	その他	温暖化	その他	
オーストリア	116	ロシア	1.6	1.5-56	0.05	0.4-15	0.06	4-73
ベルギー	460	ノルウェイ	3.0	1.5-54	0.12	0.1-3.1	0.07	5-60
ドイツ	780	デンマーク	2.8	1.3-49	0.03	0.2-2.7	1.6	6-60
デンマーク	77	オランダ	3.4	1.8-64	0.16	0.3-11	1.2	7-80
スペイン	624	北海	3.4	1.5-56	0.14	0.02-0.9	1.7-2.0	5-60
フランス	250	アルジェリア	11.3	1.5-56	0.27	0.1-4.5	---	13-71
ギリシャ	550	ロシア	2.5	0.8-28	0.85	0.16	0.06	4.1-31
イタリア	640	ロシア	6.5	1.7-60	0.16	0.1-1.5	0.13	9-69
オランダ	1700	アドリア海	2.2	1.5-57	0.12	0.02-0.9	0.1	3-69
ノルウェイ	652	ノルウェイ	0.3	1.5-57	0.03	Ng	0.01	2-58
ポルトガル	918	アルジェリア	0.25	1.6-60	0.01	0.03-1.1	0.08	2-62
イギリス	652	北海	3.3	1.5-55	0.20	0.04-1.6	0.1	5.2-60

石炭火力システムの外部コスト見積もり

(単位 : mECU/kWh)

国名	サイズ [MW]	燃料供給地 域	発電段階			その他段階			合計
			健康被害	温暖化	その他	健康被害	温暖化	その他	
ベルギー(1)	274	輸入	17.7	4-128	0.6	0.4	0.3-11	0.3	23-157
ベルギー(2)	274	輸入	101.2	3-127	3.8	0.4	0.3-11	0.2	109-240
デンマーク	600	ドイツ	11.9	3-111	0.15	0.19	0.4-1.4	1.3	17-138
スペイン	1050	スペイン*	25.3	4-141	0.88	241	0.04-1.5	0.7	33-172
フィンランド	560	ポーランド	2.5	3-108	0.23	1.2	0.3-12	0.5	8-124
フランス	600	フランス/輸入	48.4	4.1-151	0.84	---	---	---	53-200
アイルランド	880	輸入	35.0	3-128	2.1	1	0.4-3	3.0	45-172
オランダ	600	輸入	8.1	3-126	0.6	2	0.3-11	0.1	12-175
ポルトガル	1200	輸入	19.1	3-107	0.8	6.9	0.4-13	0.3	26-161
スウェーデン	520	ポーランド	0.7	3-102	0.01	0.4	1.5-17	1.4	6-121
イギリス	1800	イギリス	23.4	3-118	1.6	0.9	0.2-7	0.02	29-151

* 露天掘り

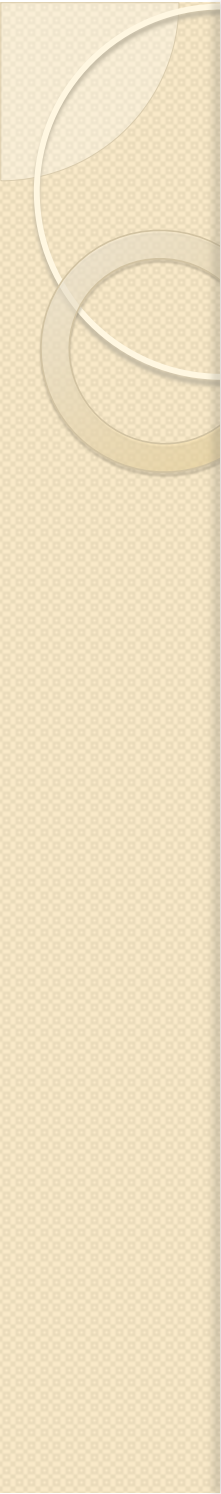
原子力発電システムの外部コスト見積もり

(単位：mECU/kWh)

国名	サイト [MW]	燃料供給地域	発電段階			その他段階			合計
			健康被害	事故	その他	健康被害	温暖化	その他	
ベルギー (1)	Doel	EU外	0.4	0.001-0.35	---	3.5	0.02-0.7	0.12	4.0-4.7
ベルギー (2)	Doel	EU外	0.4	0.001-0.35	---	3.5	0.002-0.6	0.1	3.9-4.6
ドイツ	1375	カナダ	0.18	0.003	---	4.2	0.1-2.7	---	4.4-7.0
フランス	1300	フランス	---	---	---	---	---	---	2.5
オランダ	449	フランス	0.11	---	---	7.2	---	---	7.3
イギリス	1300	EU外	0.08	0.0029	---	2.1	0.04-1.6	---	2.2-3.8

ExternEで推計された外部コストの 最大値と最小値

発電システム	外部コスト (mECU/kWh)		外部コスト(円/k Wh)	
	最大値	最小値	最大値	最小値
石油火力	189	15	23.8	1.9
天然ガス火力	80	2	10.1	0.25
石炭火力	240	6	30.2	0.76
原子力発電	7.3	2.5	0.92	0.32
水力発電	8	0.04	1.0	0.005
風力発電	3.6	0.37	0.45	0.047
太陽光発電	8.1	0.6	1.0	0.076
バイオマス発電	127	1	16.0	0.13
ゴミ発電	405	26	51.0	3.3



おわりに

人間活動とリスクの拡大

拡大かつ極限化する社会活動

- ・都市化 ・情報化 ・グローバル化
- ・大量資源消費と環境問題
- ・巨大技術（原子力、コンビナート、航空機・・・）
- ・極限技術（高速、高温高圧、ナノ・・・）
- ・バイオ技術（遺伝子操作、クローニング・・・）
- ・情報技術（インターネット化、多機能化）

自然現象

- ・気候変動（異常気温、大水、旱魃）
- ・台風・ハリケーン・サイクロン
- ・地震・津波
- ・火山爆発
- ・新型ウイルス

被害の種類と範囲が拡大

テロ行為
地球規模環境問題
（地球温暖化、オゾン層破壊、砂漠化、熱帯林破壊、海洋汚染、越境移動）
水害・旱魃被害、汚染（大気、水質、土壌）、生態系破壊
疫病の流行
重大事故（原子力、航空機、鉄道、・・・）
金融・経済危機、エネルギー危機、サイバー被害

リスクの広がり

- **多様化**

技術事故、自然災害、システム災害、労働災害、テロ、環境、医療・医薬品、生物（伝染病、害虫）、食品、化学物質、金融、情報

- **空間的**

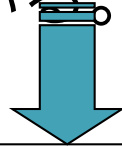
都市、地域、グローバル

- **時間的**

短期、長期、超長期

「リスク社会」に生きている

- 「安全はただ」、「お任せ社会」から「明日にも何か望ましくない事態に遭遇するかもしれない」
- 社会を取り巻く閉塞感と将来への不安が広がり、多くの社会現象を通じてリスクは、われわれの日常の健康・安全問題から経済不況・雇用問題、地域から地球環境問題、高齢化社会の進行と福祉年金制度の破綻への不安、次世代の生存への不安にまで広くかわりをもってきている。



リスクを客観的に認識・分析し事前事後の対策によって安全で安心した社会を築いていく能力を身につける。

「持続可能な発展」に求められる国・企業の対応

社会制約

国連・EU・日本など法規制・条約の変化

温室効果ガスの排出削減

グローバル視点からのCSR経営への要求

家電リサイクル法

NGO/NPOの要求

市民による抗議活動やボイコット運動

国・企業

持続可能な発展

(新成長領域、
持続的価値の創出)

公害・廃棄物問題

生態系の変化

地球温暖化による気候変化

資源価格の高騰

化学物質リスク

鉱物資源の需給逼迫

【持続可能な発展】

現世代のニーズを満たしながら、将来世代の
可能性を脅かさない発展である。

環境・資源制約

エティオ・マンティーニ“Strategic Designモデル”を参考に作成

求められている人材

	学際研究	求められる人材	社会経済の変化
第Ⅰ期 (戦後～1960年代)	理学と工学の融合 (理工学)	I 型	高度経済成長(重厚長大産業) 公害問題 安定したエネルギー供給
第Ⅱ期 (1970～2000年)	工学分野の融合 (総合工学)	T 型 Π 型	安定成長(ソフト産業) 多様な価値観 地域環境問題 石油危機
第Ⅲ期 (2000年以降)	総合工学と社会・人文科学との融合 (エネルギー学、環境学など)	X型 マトリックス 型	ゼロ成長(不動産・金融バブルとその崩壊) グローバル化 地球規模環境問題 持続可能な発展