



原子炉工学特論

国立大学法人筑波大学
大学院システム情報工学研究科
構造エネルギー専攻

阿部 豊



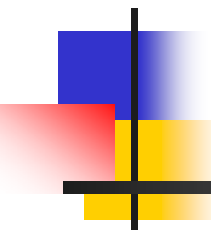
実施要領

- 実施時期： 第1学期
- 実施日時： 金曜日 1・2限 (8:40-11:25)
- 単位： 2単位
- 担当： 阿部豊
- 使用参考書：
 - (1) 原子核工学概論、理工学社、岐美格著
 - (2) 原子炉の初等理論(上、下)、吉岡書店、
ラマーシュ著、 武田充司・仁科浩一郎訳



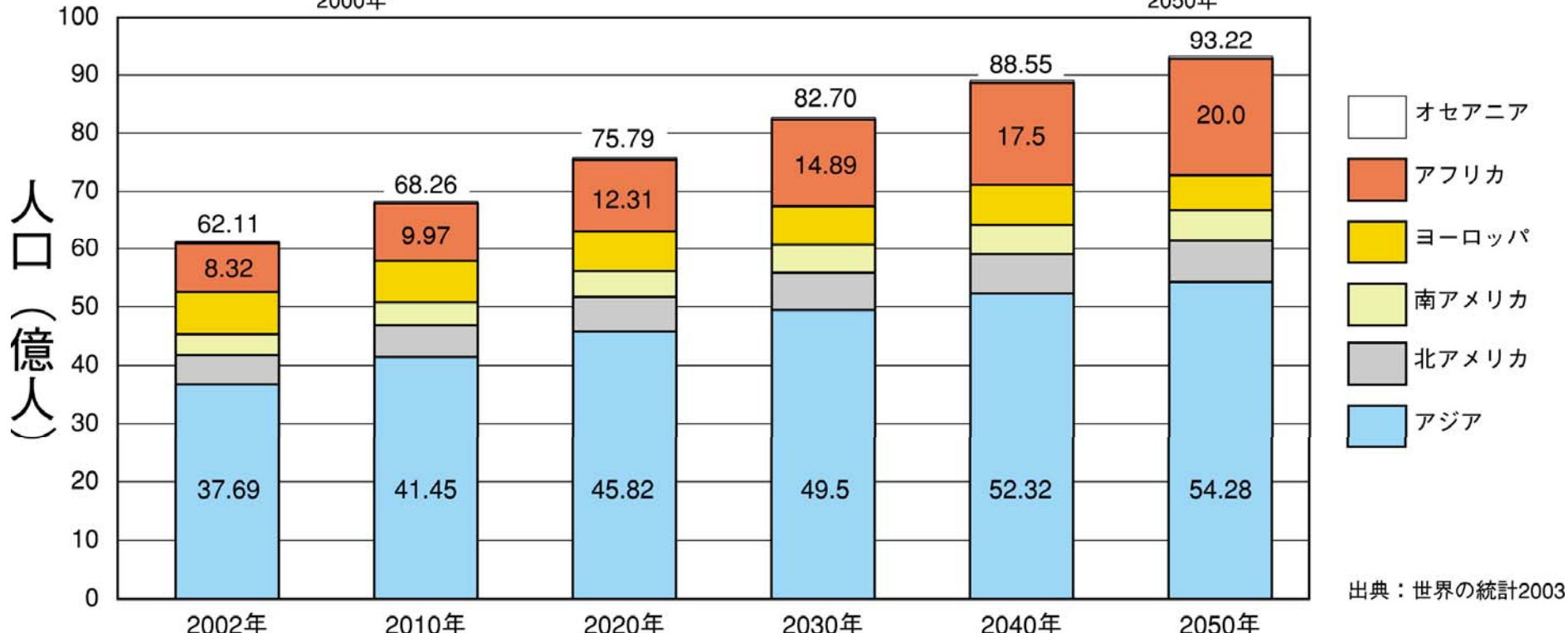
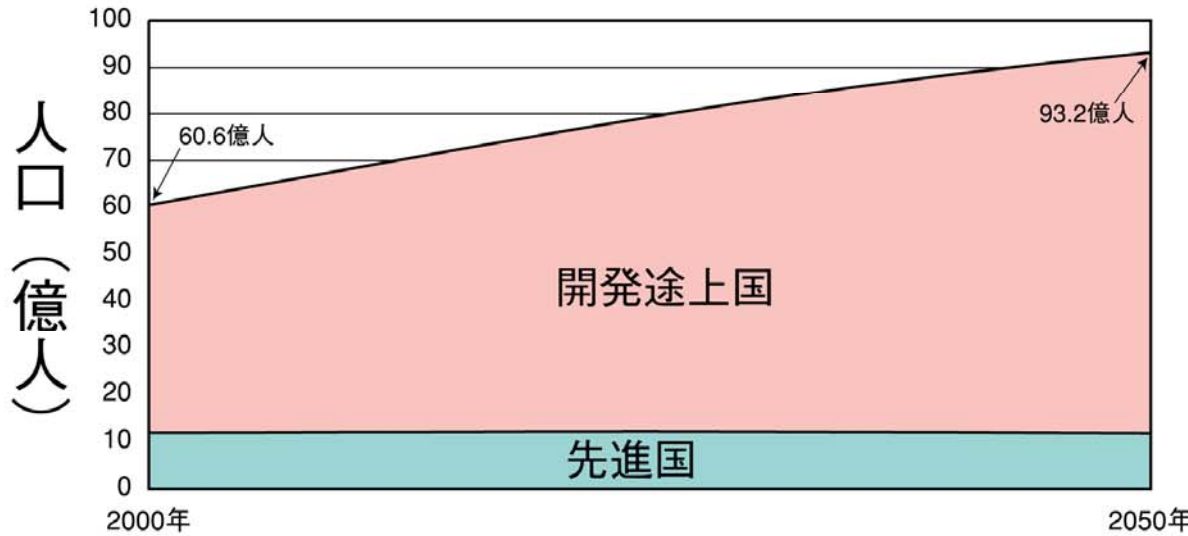
平成22年度年間予定表

- 第1週 原子核と結合エネルギー、質量欠損
- 第2週 放射性崩壊と放射能
- 第3週 中性子と原子核の反応
- 第4週 反応断面積
- 第5週 臨界状態と中性子経済、6因子公式
- 第6週 中性子空間ふるまい
- 第7週 中性子拡散方程式
- 第8週 中性子の減速
- 第9週 原子炉の臨界、臨界方程式と原子炉方程式
- 第10週 原子炉の動特性と制御、反応度、妨害作用
- 第11週 期末試験



世界と日本のエネルギー事情

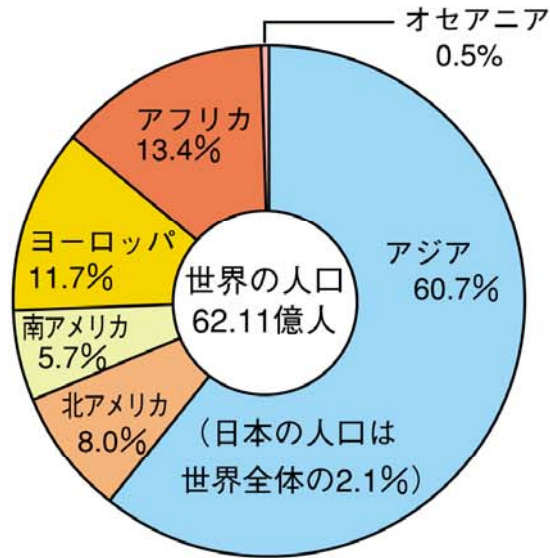
世界の人口予測



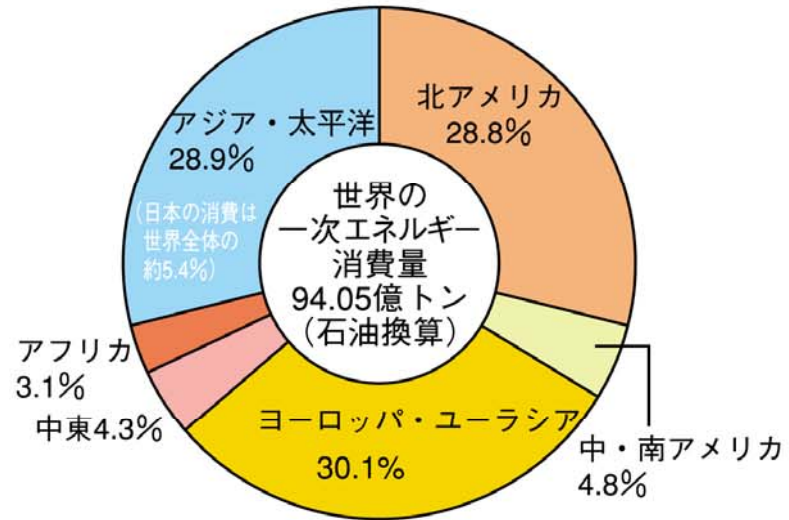
世界の人口とエネルギー消費量

(2002年)

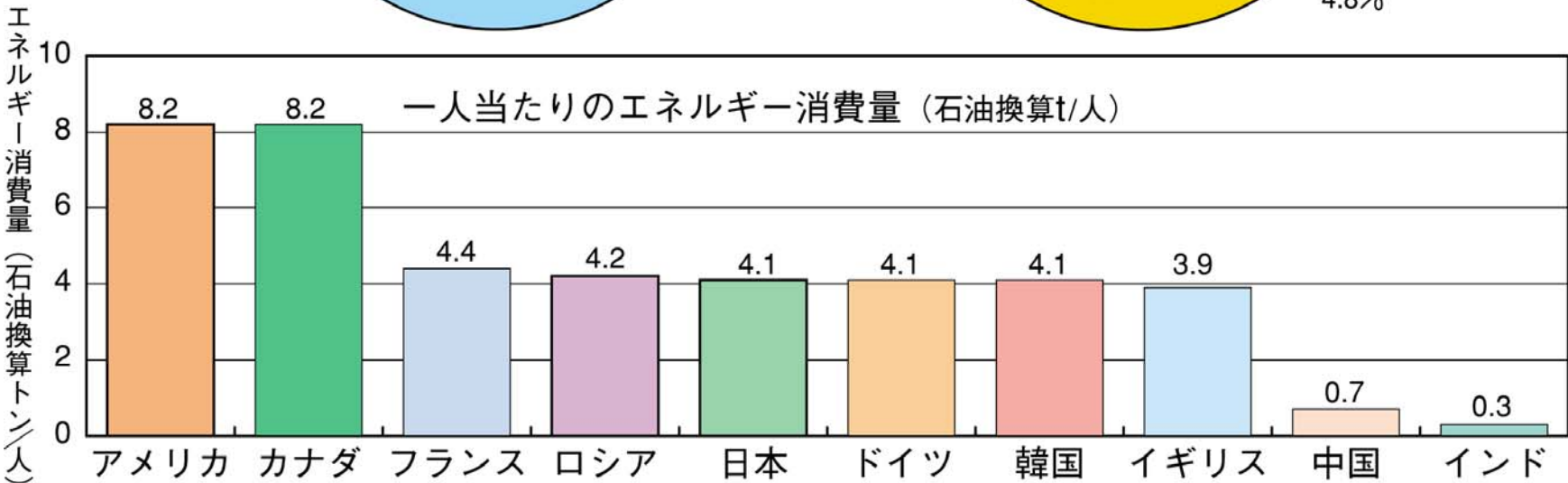
地域別人口分布



地域別エネルギー消費分布



一人当たりのエネルギー消費量 (石油換算t/人)

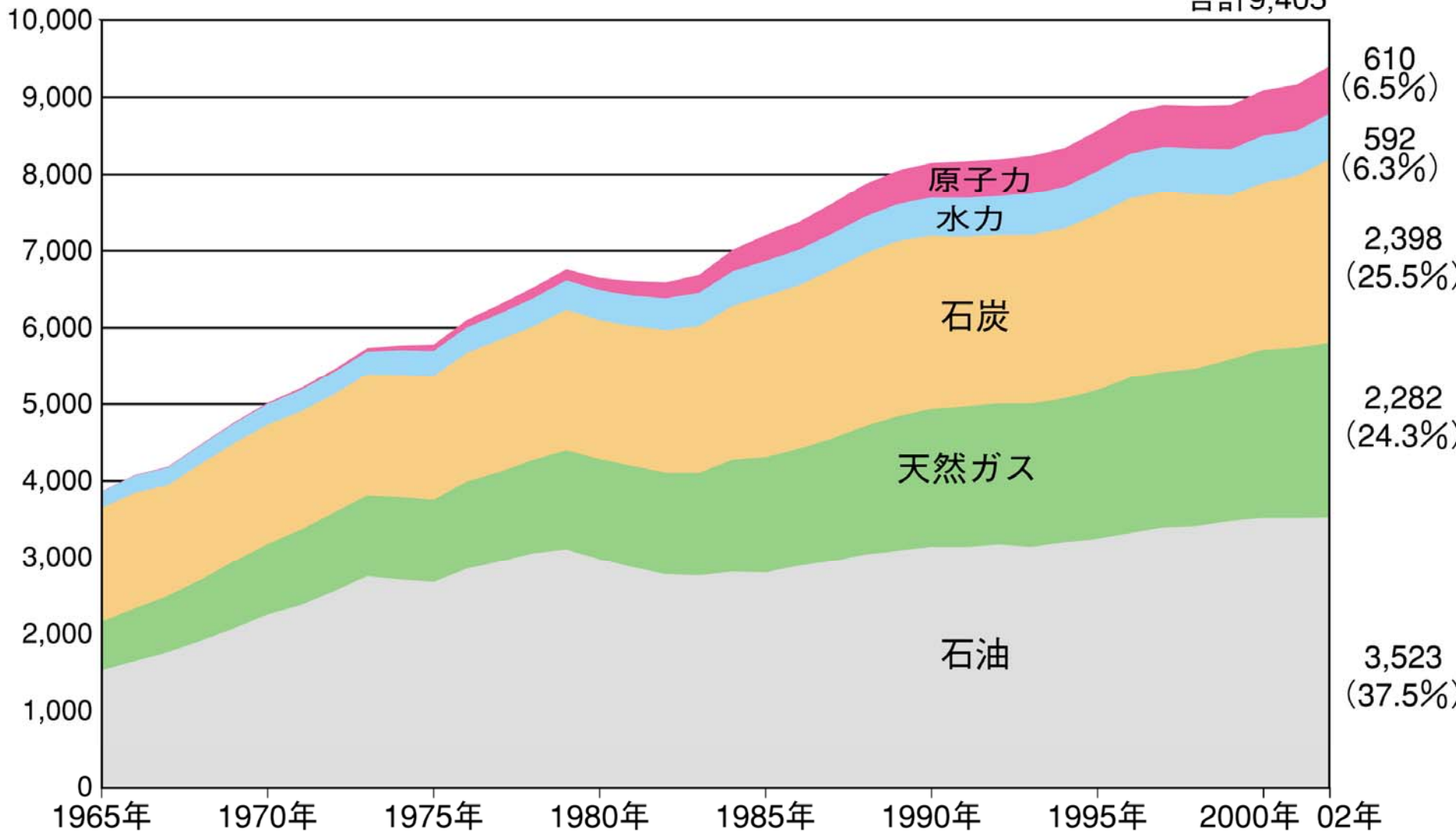


(注) 四捨五入のため合計は100%にならない。
出典：BP統計2003、世界の統計2003

世界の一次エネルギー消費の推移

百万トン
(石油換算)

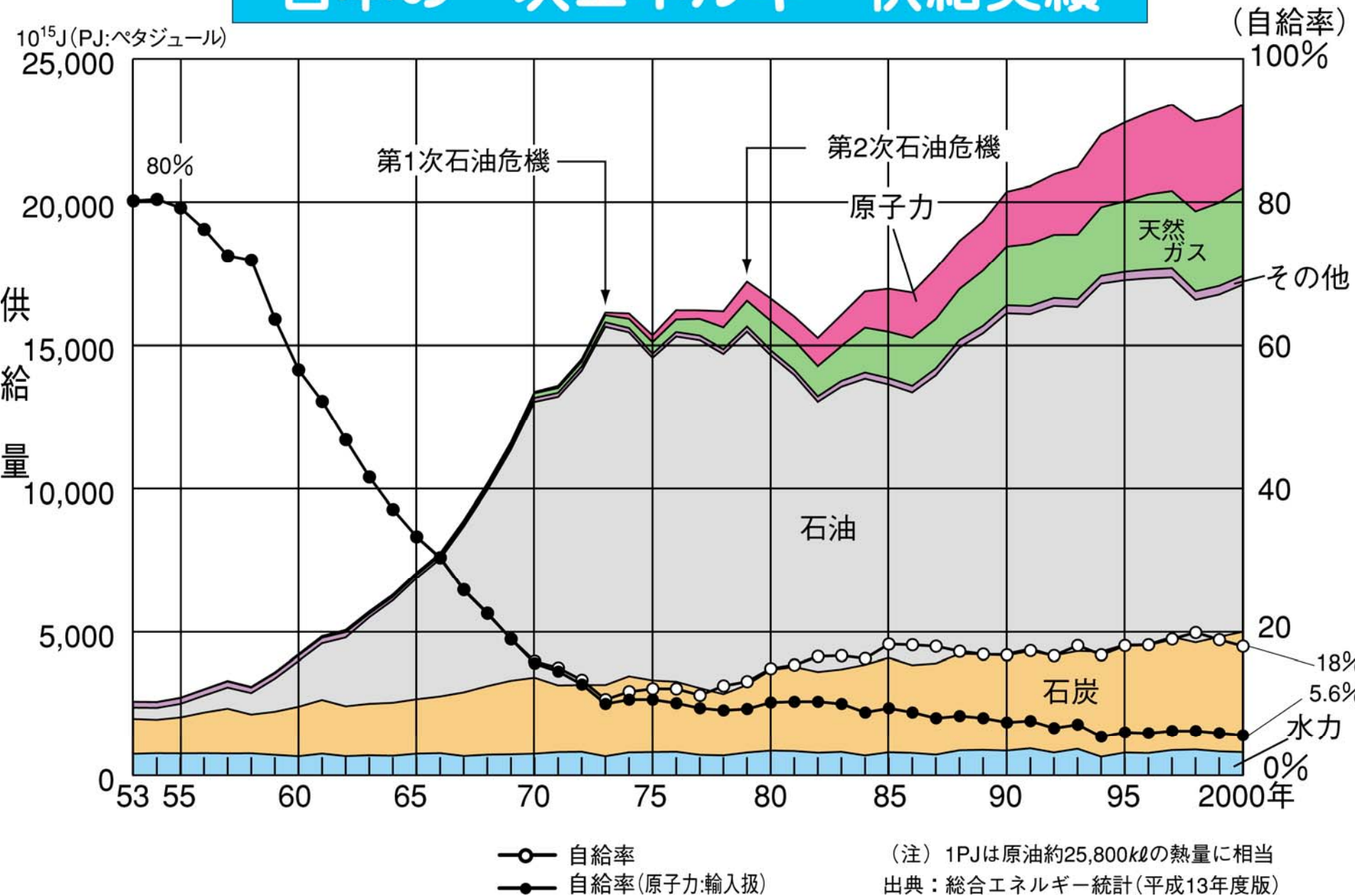
合計9,405



(注) () 内は2002年構成比

出典：BP統計 (2003)

日本の一次エネルギー供給実績

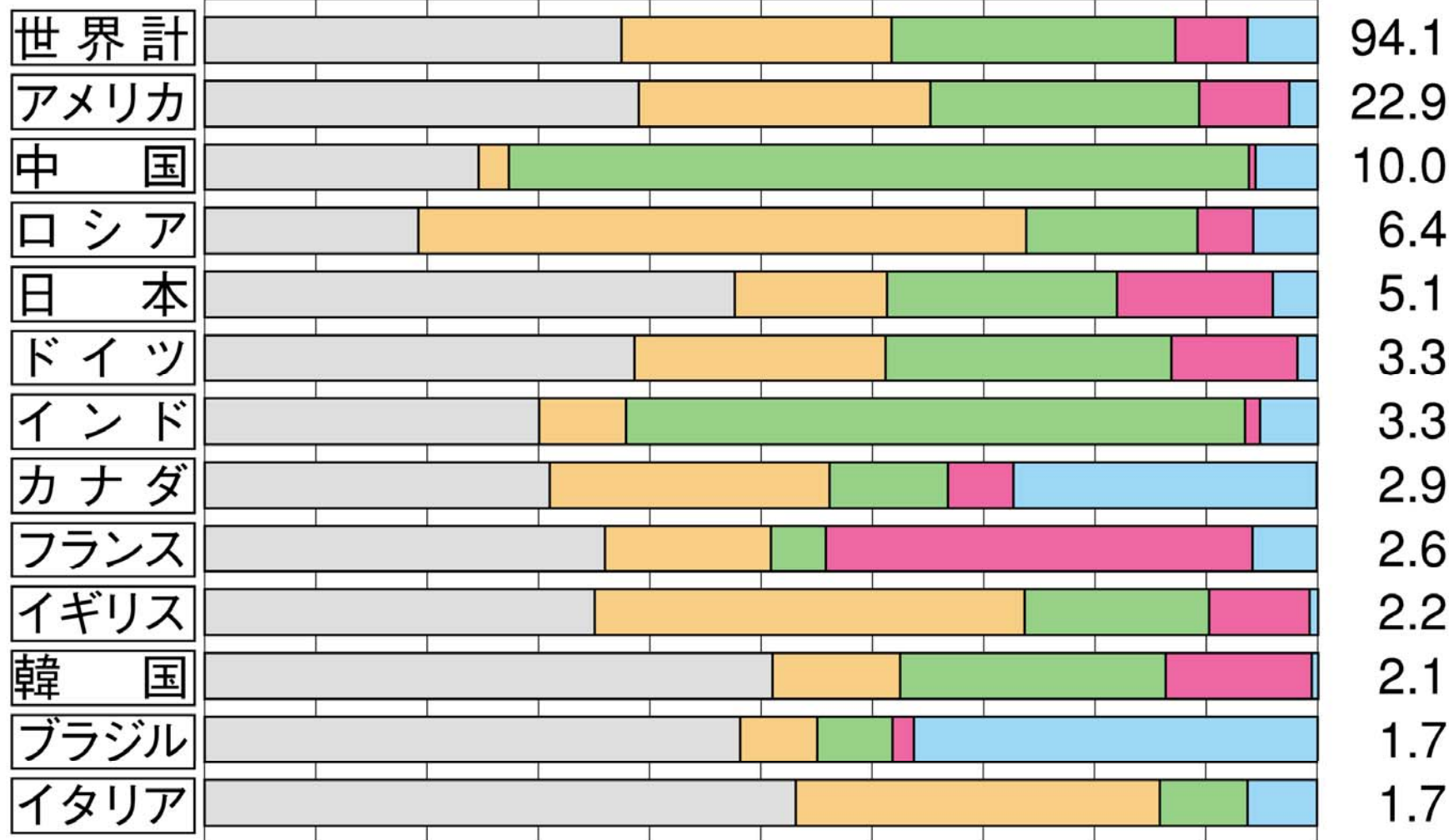


主要国の一次エネルギー構成

石油
 石炭
 天然ガス
 原子力
 水力

(2002年) 一次エネルギー消費量 (石油換算：億トン)

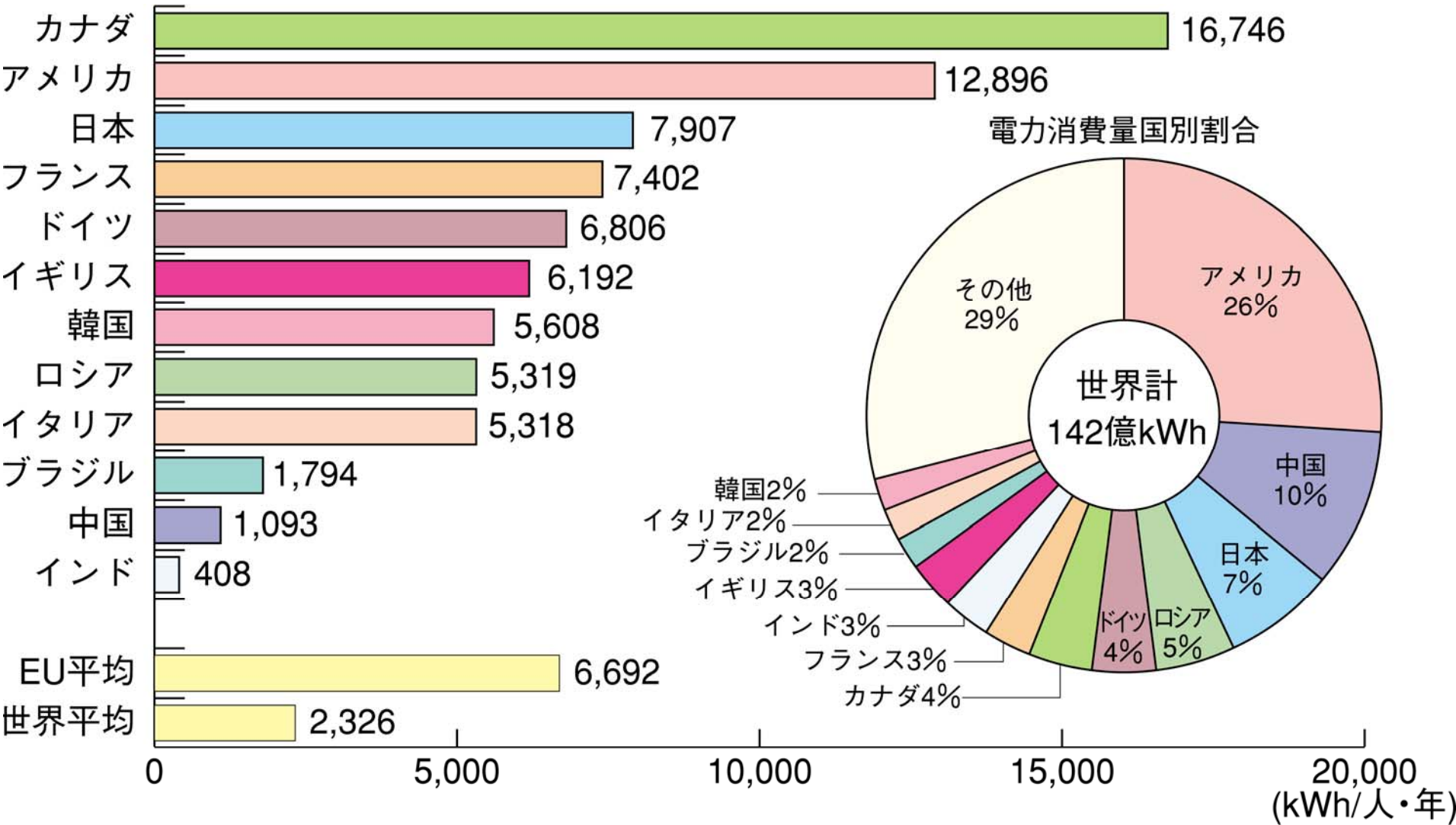
0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100%



(注) 四捨五入のため合計は100%にならない場合がある。

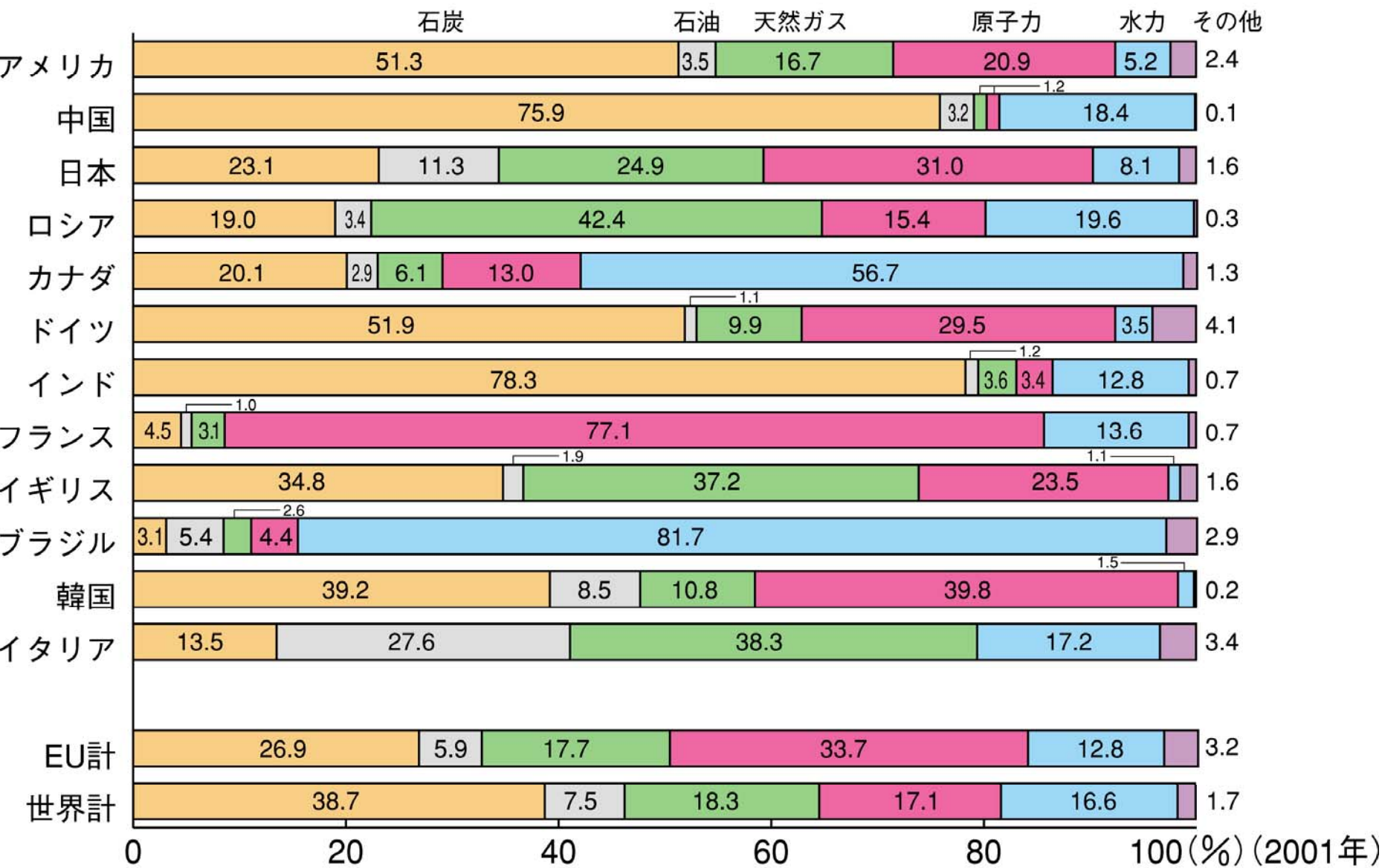
出典：BP統計(2003)

主要国の一人あたり電力消費量



出典：ENERGY BALANCES OF OECD COUNTRIES 2002-2001 他

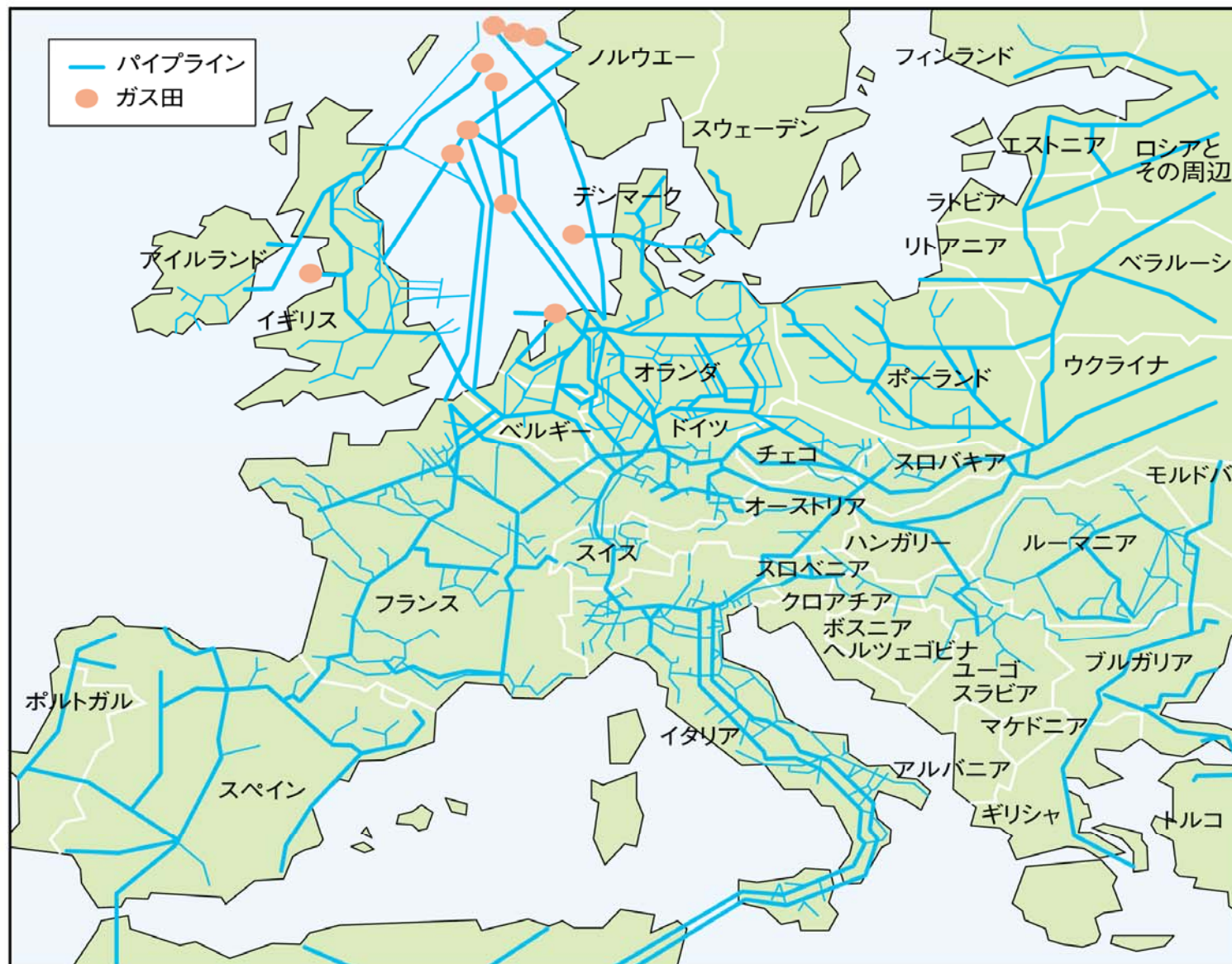
主要国の電源別発電電力量の構成比



四捨五入のため合計は100%にならない場合がある。

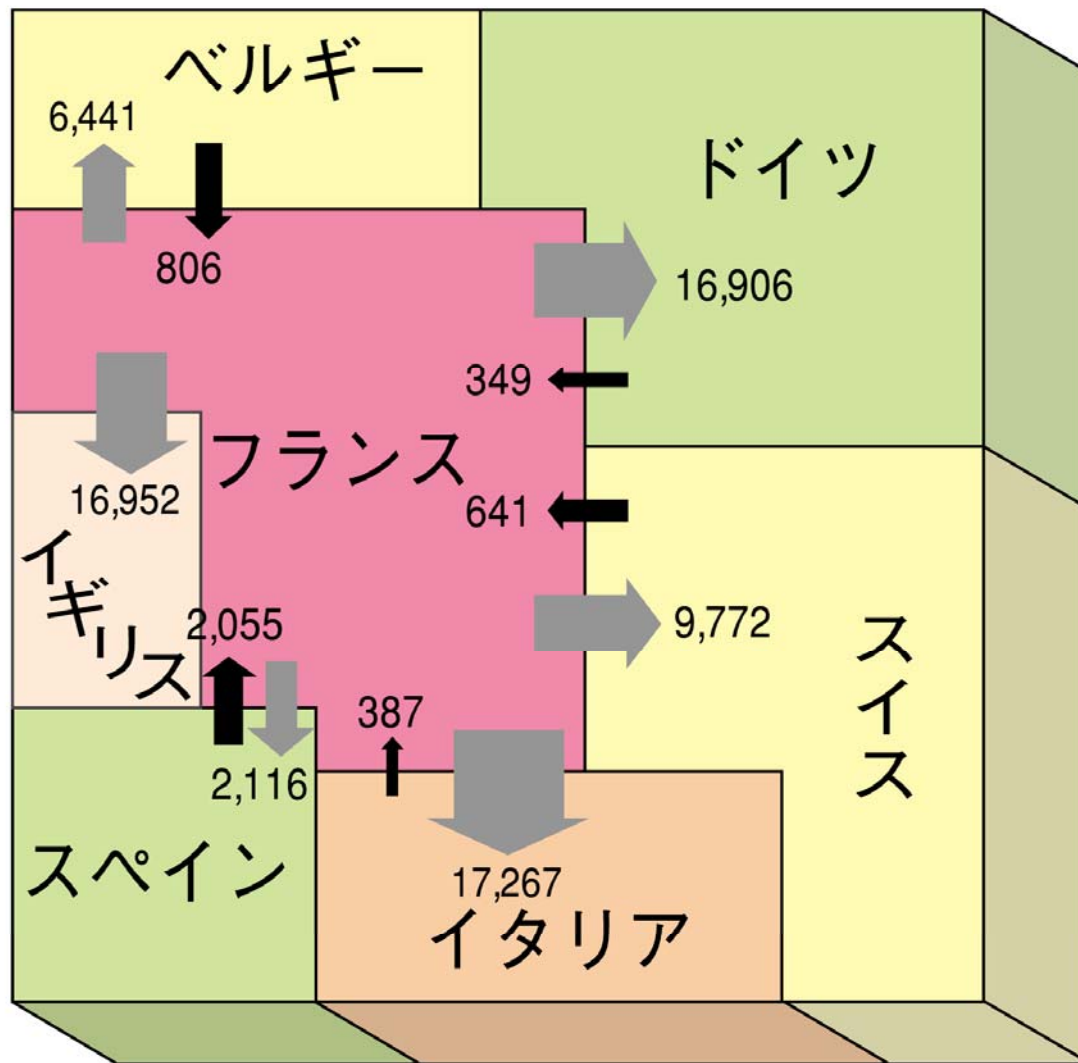
出典：ENERGY BALANCES OF OECD COUNTRIES 2000-2001 他

ヨーロッパにおける天然ガスのパイプライン網



フランスを中心とした電力の輸出入

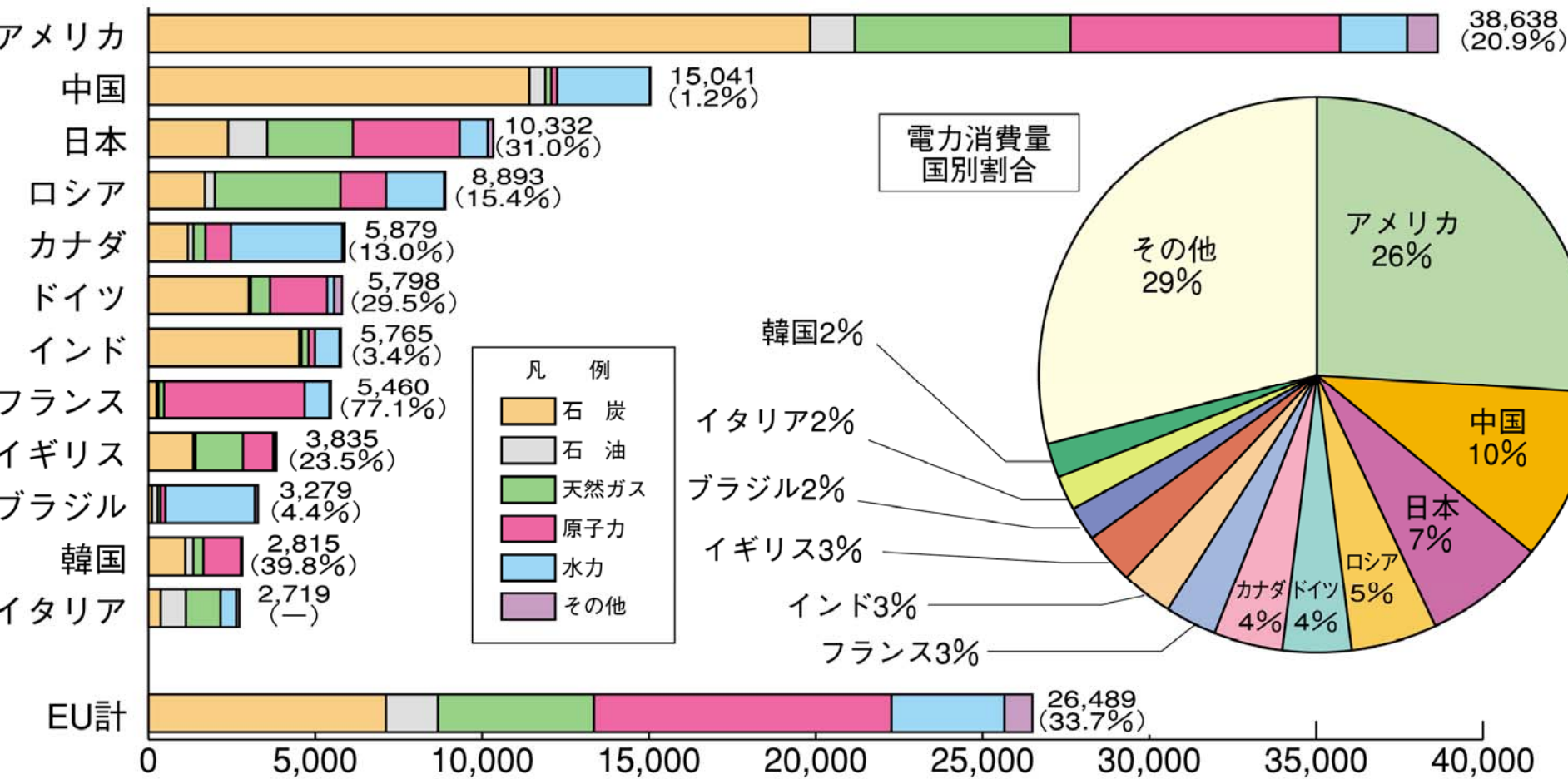
(1997年)



単位：100万kWh

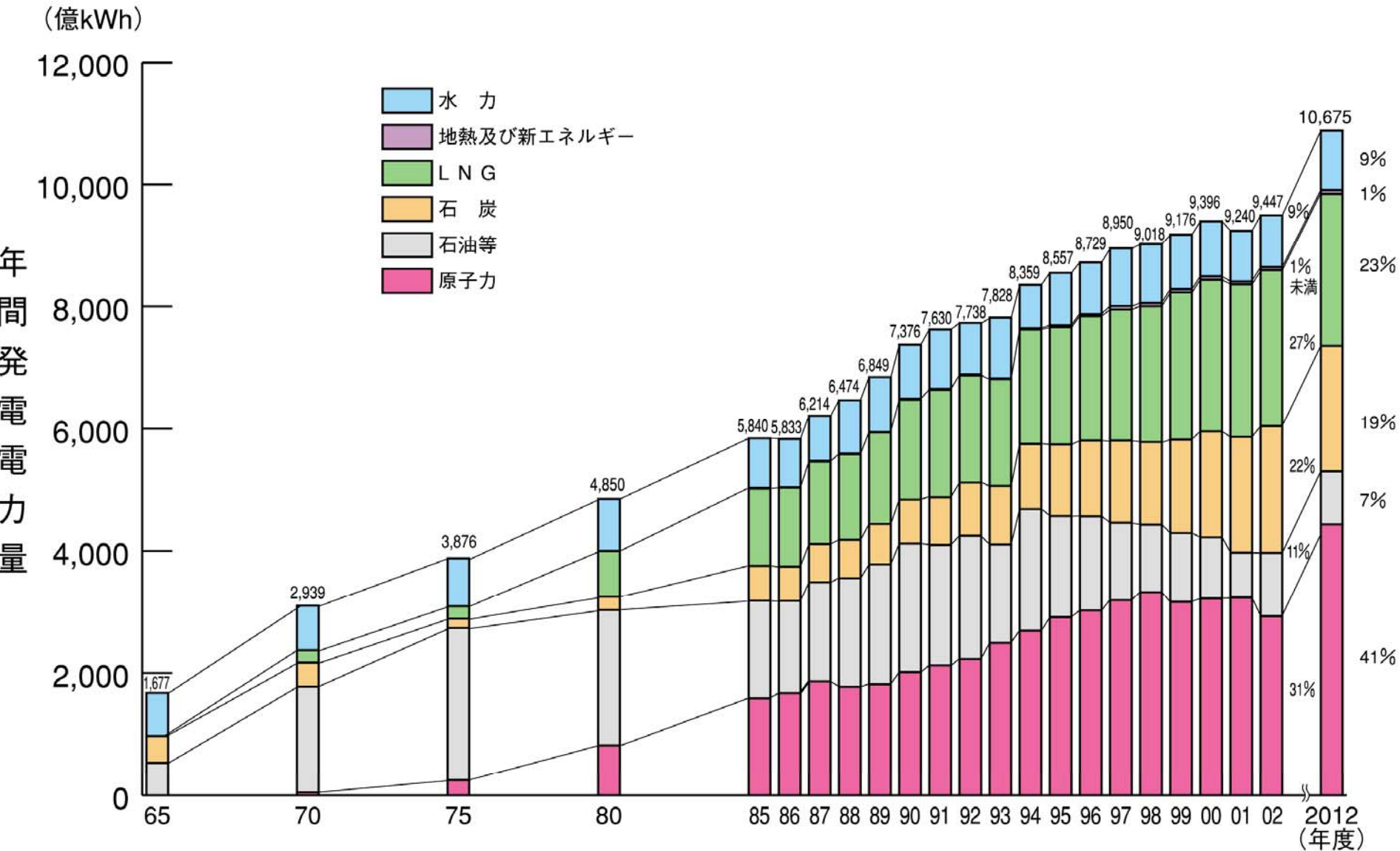
出典：「海外電気事業統計(1999)」

主要国の発電電力量と原子力発電の割合



上段：発電電力量 (億kWh)
 (下段)：(原子力発電比率)

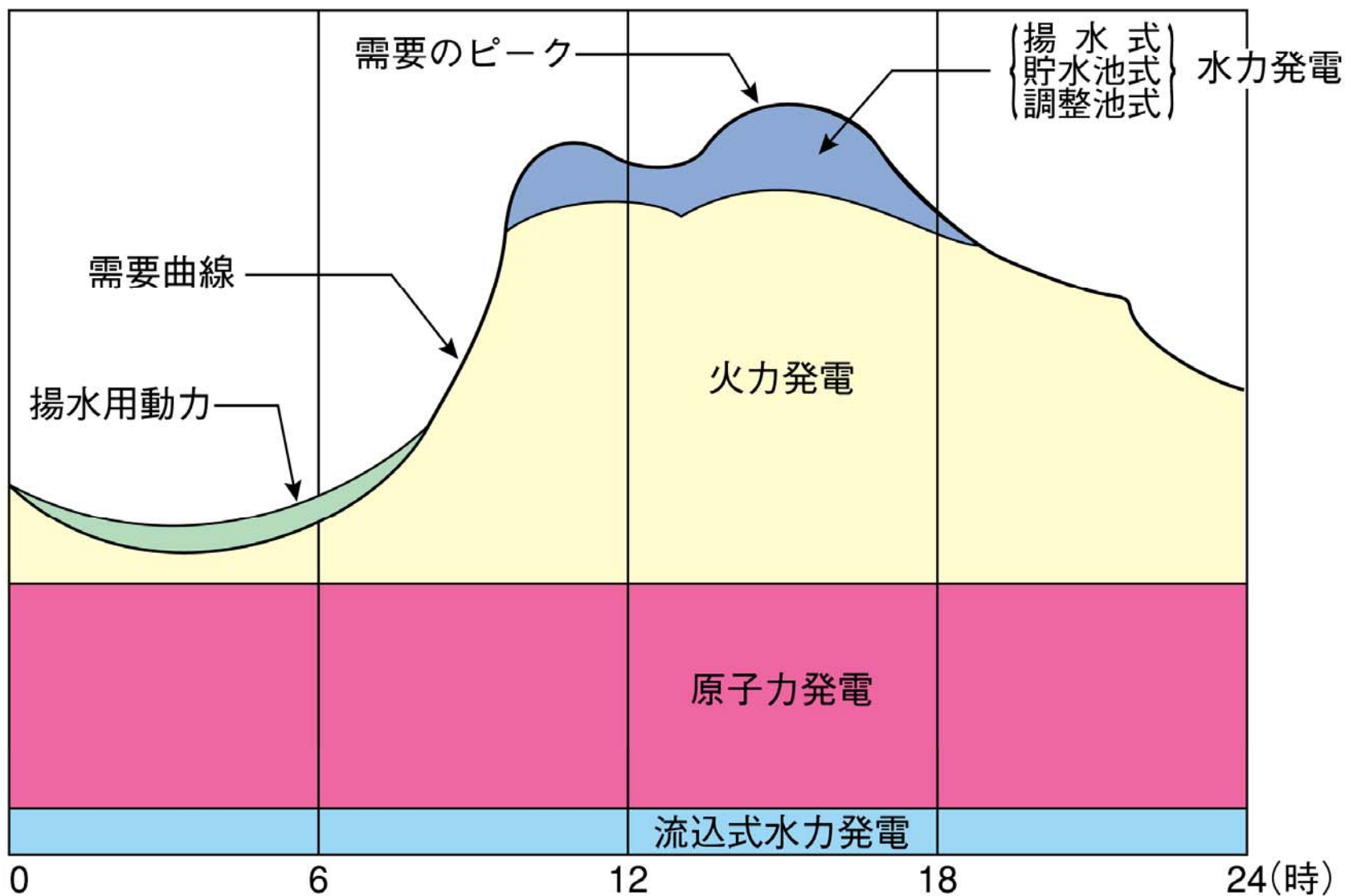
電源別発電電力量の実績および見通し



(注) 1.石油等にはLPG、その他ガス及び瀝青質混合物を含む。
 2.構成比の各欄の数値の合計は四捨五入の関係で100%にならない場合がある。

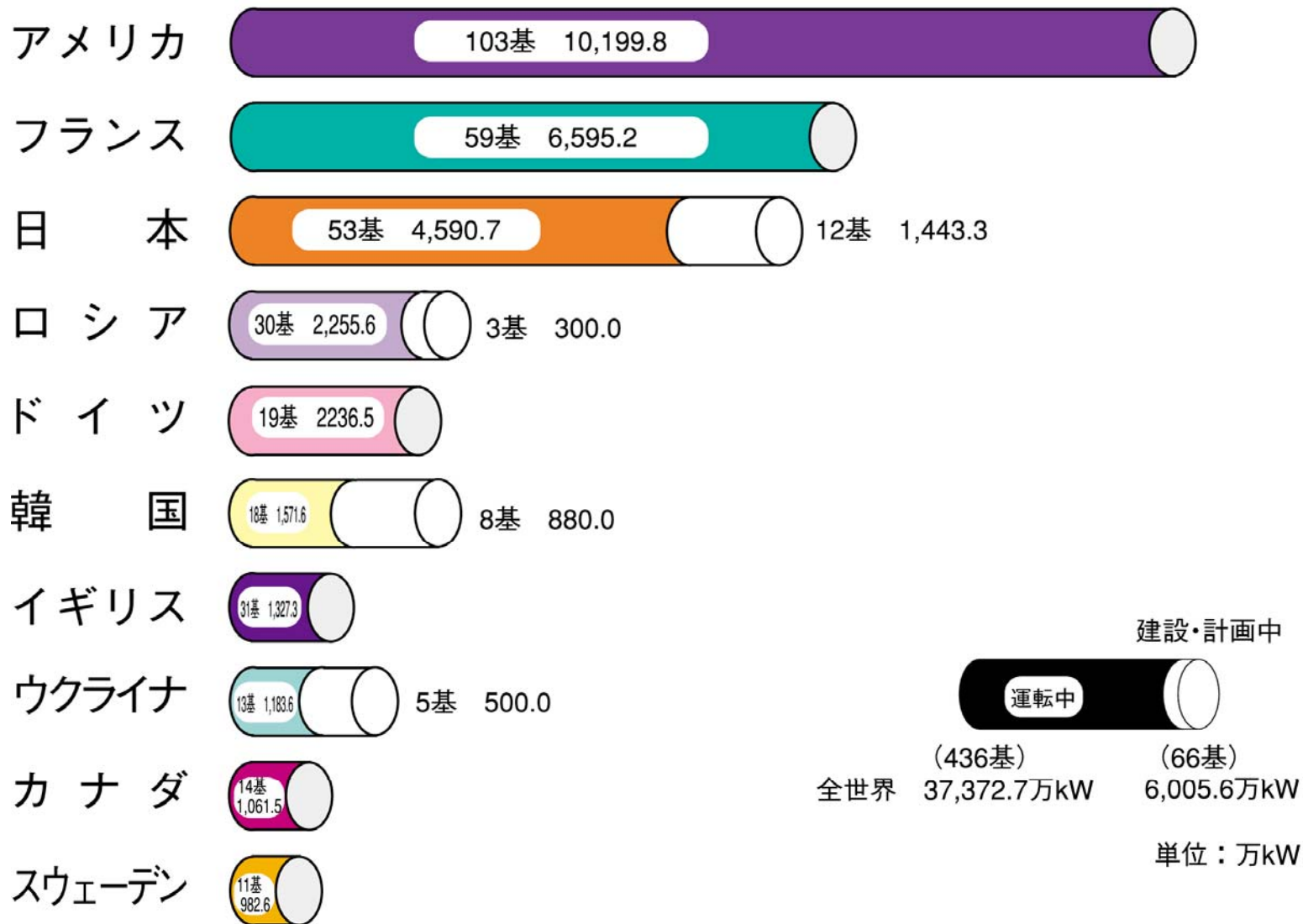
出典：平成15年度供給計画の概要（平成15年3月）他

需要の変化に対応した電源の組み合わせ(ベストミックス)



主要国の原子力発電設備

(2002年12月末現在)

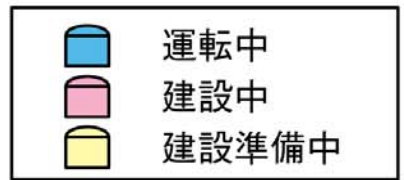
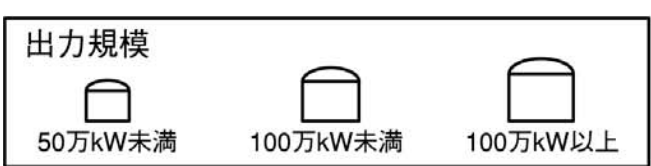
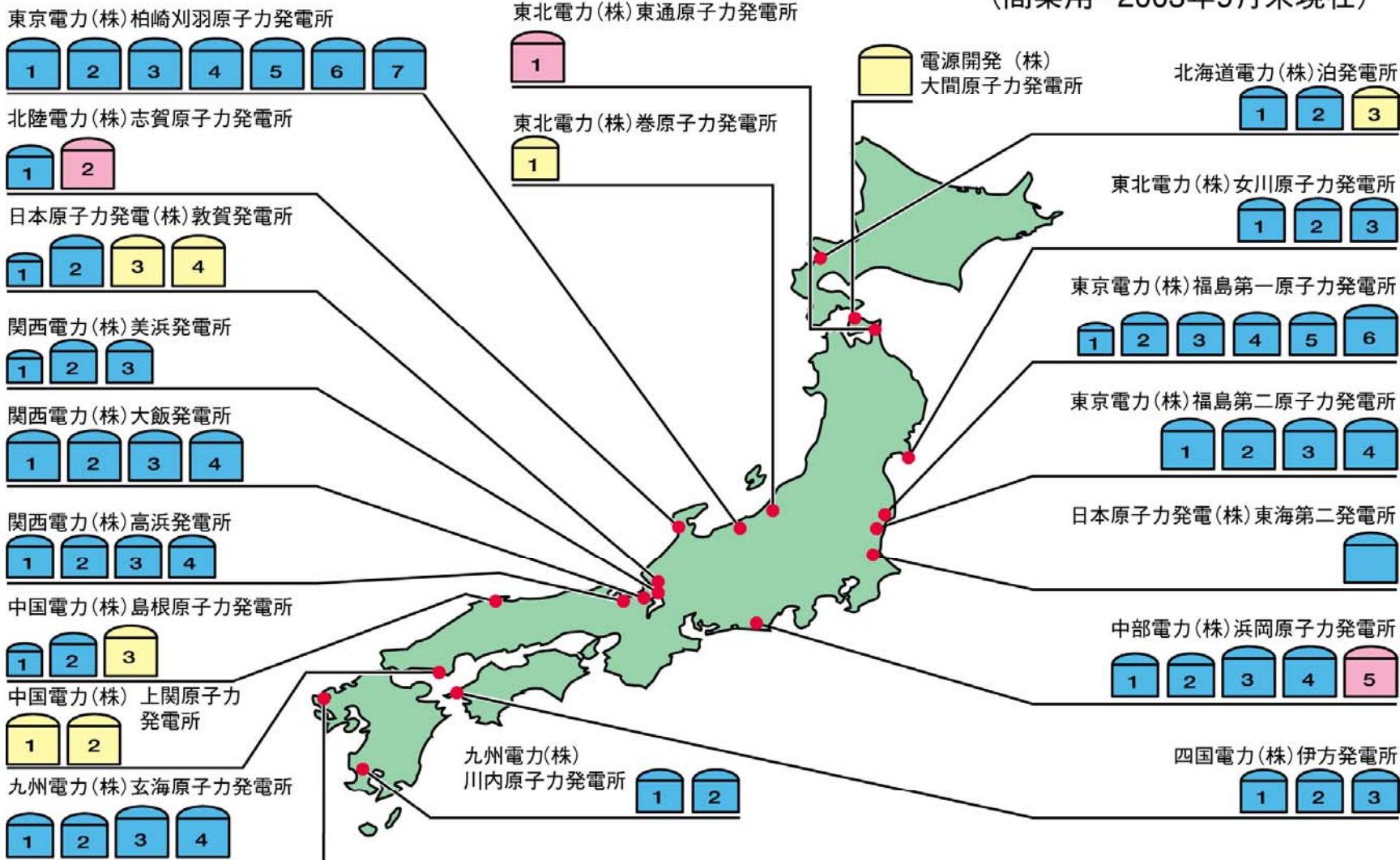


(注) 日本は原型炉のふげん(運転中)、原型炉のもんじゅ(建設中)を含む

出典：日本原子力産業会議「世界の原子力発電開発の動向2002年次報告」

日本の原子力発電所の運転・建設状況

(商業用・2003年9月末現在)



	基数	合計出力(万kW)
運転中	52	4,574.2
建設中	3	383.8
建設準備中	8	1,031.5
合計	63	5,989.5



自然が創り出した原子炉

天然原子炉(オクロ原子炉)

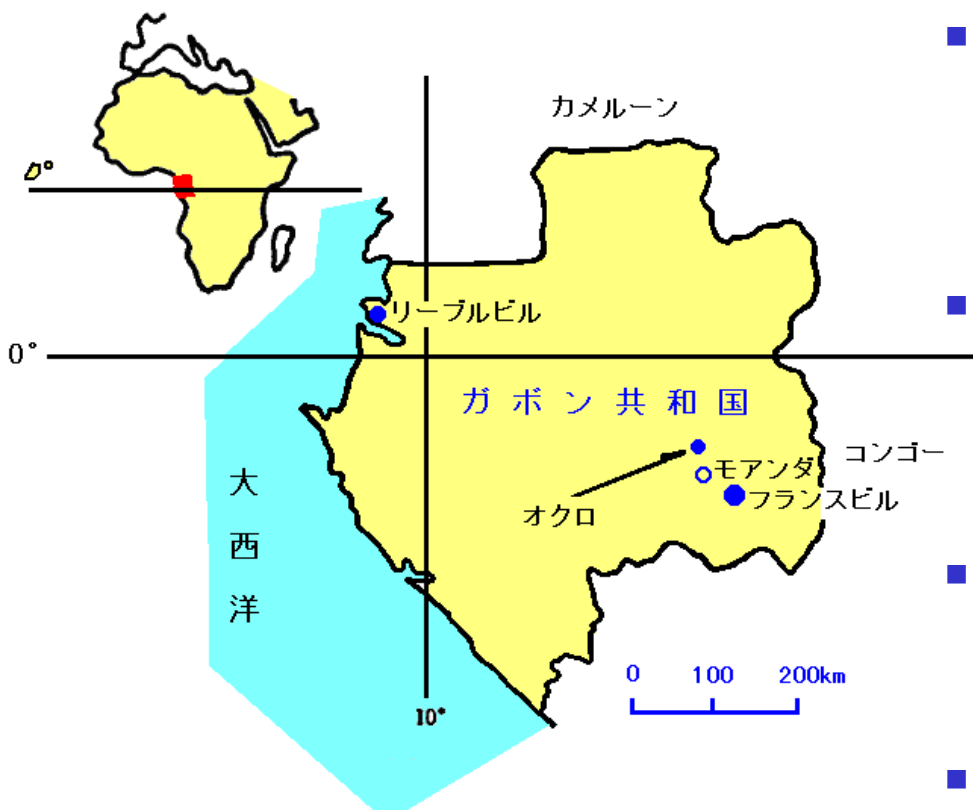


図1 ガボン共和国とオクロ

[資料提供] フランスビル・ウラン鉱山会社 (COMUF)

- フランス原子力庁は、ガボン共和国のオクロ鉱床中で天然原子炉が作動していた証拠を発見したと1972年9月に、公表した。
- 発見の発端は、オクロ鉱床で採掘された試料中のU-235の同位体存在比が、天然ウラン中の値よりも低かったことである。
- その原因は、ウラン鉱石にあることが明らかになり、天然原子炉の存在の可能性が証明された。
- オクロ鉱床以外には天然原子炉が発見されていないから、オクロ原子炉とも呼ばれている。

(すでに知られていたNo. 1～No. 9に加えてA, B, C)
およびDが発見されている。

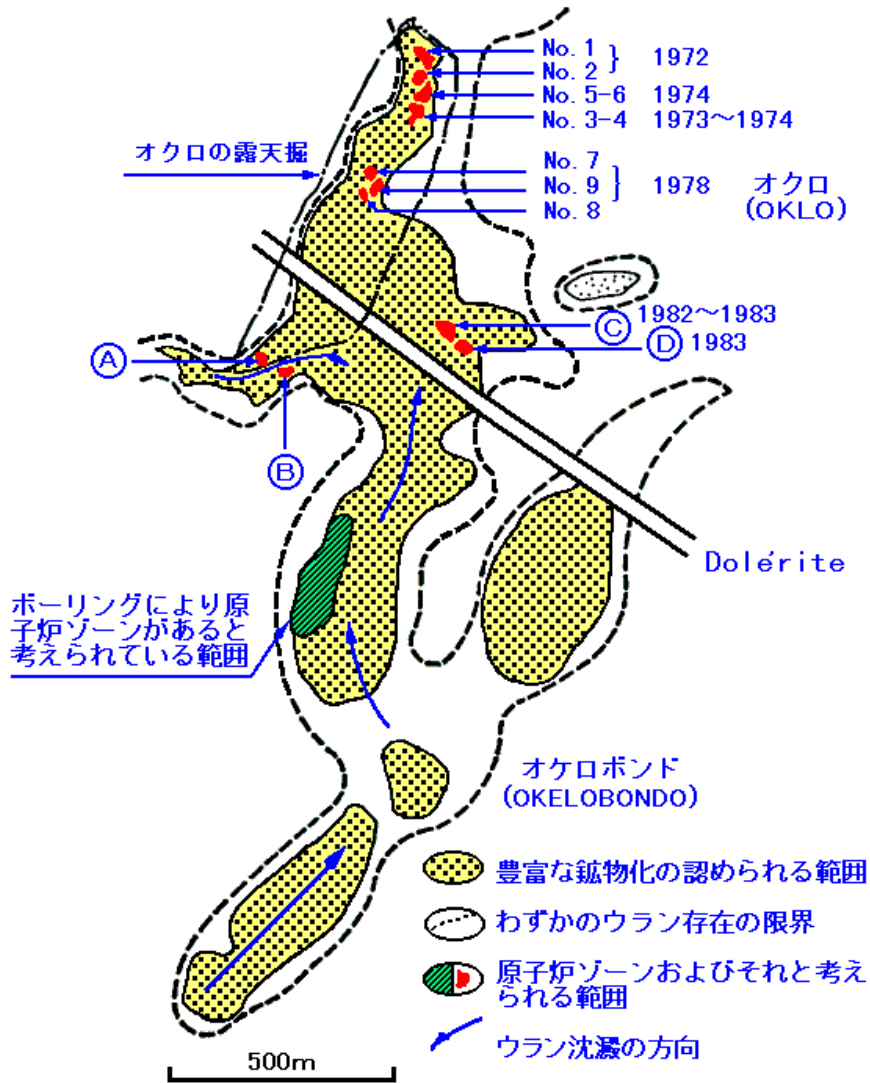
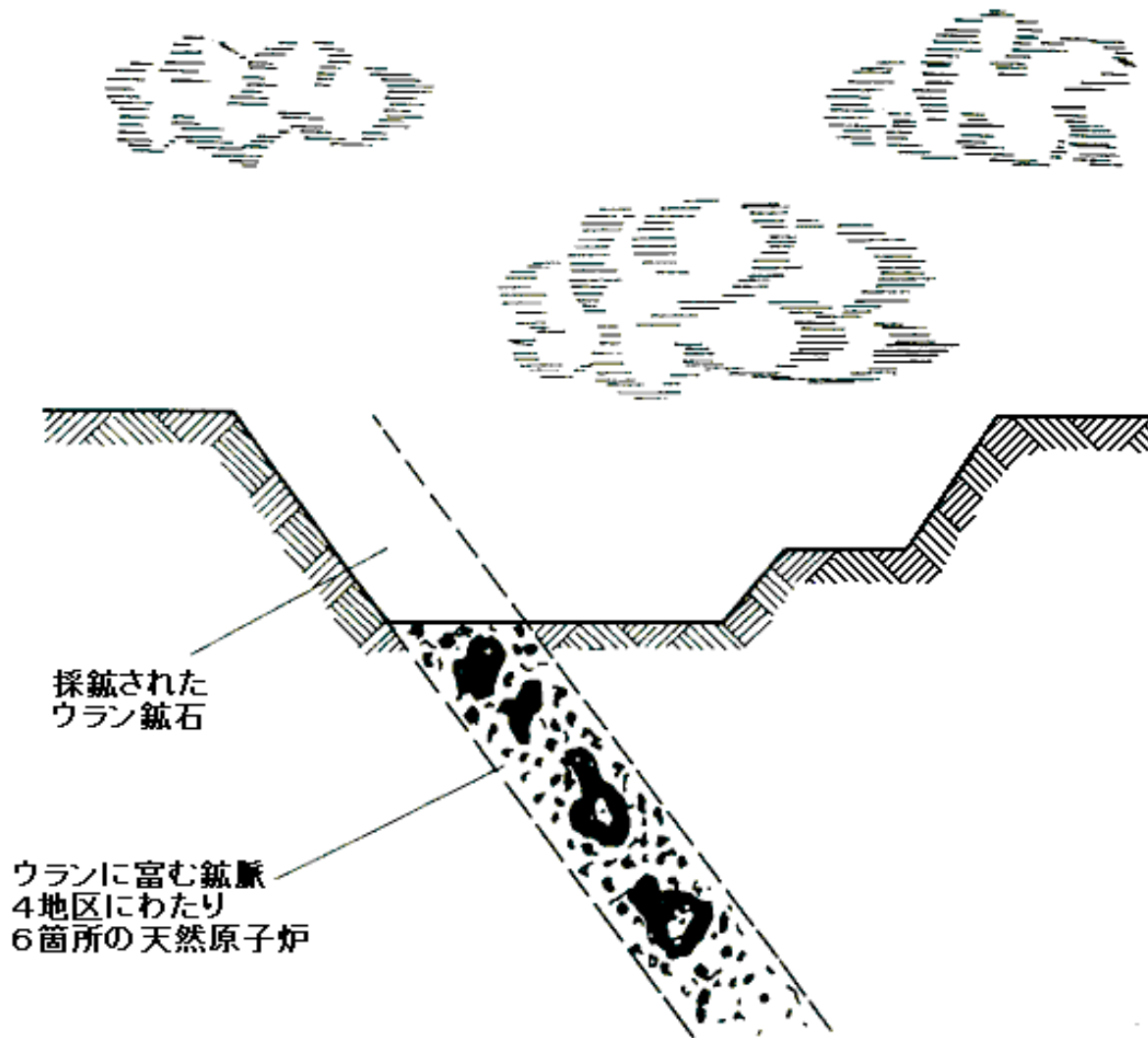


図2 オクロとオケロボンドのU鉱床における原子炉ゾーンの分布 (1984年現在)

[資料提供] フランスビル・ウラン鉱山会社 (COMUF)

- 天然原子炉は1985年までにオクロ鉱床で12個発見されている。
- No. 1～No. 6までの天然原子炉が放出したエネルギーは、約6,000,000MWd。
- 天然原子炉が機能していた期間は約60万年間
- 誕生した時期はおよそ20億年前と思われる。
- 天然原子炉の中で生成したPu-239や核分裂生成物は殆ど散逸せずに、当時のままの状態が保持されていたことが明らかになった。



・オクロ天然原子炉のうち No. 1～No. 6までの原子炉ゾーン(図3 参照)で放出された合計のエネルギーの計算値は、約6,000,000MWdあるいは16,500MW・yrである。

・この値は、現在の100万kW級の原子力発電所の原子炉5基を全出力で1年間運転したときに発生する熱エネルギーにほぼ等しい。

オクロ原子炉跡、ここには6ヵ所の天然原子炉炉心が4つの反応帯に分かれて存在する。

図3 オクロ原子炉跡

[出典] Ivan. G. Draganic (ほか) (松浦辰男(ほか)訳):放射線と放射能、学会研究センター(1996. 1), p149

表 1 オクロ試料の同位体分析結果

試料		Oklo M	Oklo 310	天然の ネオジウム等	Oklo M ^(*)	Oklo 310 ^(*)	核分裂起源のネオジウム等 (²³⁶ U)
元素中の 同位体組成 (atom%で表示)	²³⁵ U	0.4400 ±0.0005	0.592 ±0.001	0.7202			
	¹⁴² Nd	1.38	5.49	27.11	0	0	0
	¹⁴³ Nd	22.1	23.0	12.17	22.6	25.7	28.8
	¹⁴⁴ Nd	32.0	28.2	23.85	32.4	29.3	26.5
	¹⁴⁵ Nd	17.5	16.3	8.30	18.05	18.4	18.9
	¹⁴⁶ Nd	15.6	15.4	17.22	15.55	14.9	14.4
	¹⁴⁸ Nd	8.01	7.70	5.73	8.13	8.20	8.26
	¹⁵⁰ Nd	3.40	3.90	5.62	3.28	3.46	3.12
相対精度	2~3%	1%	0.2%				0.5%
同位体	¹⁵¹ Eu	0.145	0.852	0.916			2.58
	¹⁵³ Eu						
	¹⁴⁰ Ce	1.57		7.99			1.06
	¹⁴² Ce						
	¹⁴⁹ Sm	~0.003		0.924			0.475
	¹⁴⁷ Sm						

[出典] 藤井 勲 : オクロ天然原子炉とその現状、原子力誌, 27(4), 307(1985)

表2 天然原子炉の機能していた期間

試料	τ (n·cm ⁻²)	c	機能していた期間 (年)
KN 50-3548	1.23×10^{21}	0.47	640,000
KN 50-323	1.02×10^{21}	0.42	630,000
SC 36-1413-3	1.32×10^{21}	0.37	540,000
SC 36-1418	0.81×10^{21}	0.58	580,000

τ : 中性子フルエンス, c : U-235の再生係数

[出典] R. Hagemann et al. : Estimation de la durée de la reaction-Limitation imposees par less donness neutroniques, IAEA-SM-204/28, A(1975)

天然原子炉が機能していた期間は、約60万年間である。
 この計算では、一定の中性子束のもとで連鎖反応が持続していたとしているが、実際には反応は間欠的であった可能性がある。
 いずれにしても、この原子炉の放出エネルギーの総和から考えると、これらの原子炉は、非常に低い出力を維持していたと想像される。



天然原子炉の状態

- 天然原子炉は、ウラン鉱床の中に自然に形成されたもので、U-235が約3%の同位体存在比を持つウランが存在していた頃の約20億年前に、同鉱床のウランが自然発生的に連鎖反応を起こした後、U-235の濃度が臨界の達成に必要な水準以下となったため自然に停止し、化石となったのではないかと推定されている。
- 天然原子炉の化石は、約20億年前の非常に古い時期に持続した核反応によるものであるが、その状況をほぼ維持していると思われる。したがって、天然原子炉は、その保存状態が良好で、原子炉として機能していた当時のままの状態が保持されていたことが明らかになった。

表3 原子炉の年齢の測定結果

試料	用いられた核種	N_{F5} / N_8 (%)	N_2 / N_8 (%)	T 原子炉の年齢(10億年)
KN 50-3548	Nd	2.96	5.55	1.99
	Sm	3.03		2.02
	Ru	2.78		1.93*
	Th			2.03
KN 50-323	Nd	2.63		2.04
	Sm	2.59		2.02
	Ru	2.74		2.08
SC 36-1408-4	Nd	1.82		1.91
	Sm	1.98		1.99
SC 36-1410-3	Nd	2.43	4.29	1.97
	Sm	2.32		1.92
	Th			1.92
SC 36-1413-3	Nd	3.07	6.03	2.01
	Sm	3.20		2.06
	Ru	2.01		1.58*
	Th			2.11
SC 36-1418	Nd	2.17	4.50	2.00
	Sm	2.08		1.95
	Th			2.03
SC 36-1423	Th		4.49	2.28*
	平均値			2.00

(注) 試料は、すべて原子炉ゾーンNo. 2から採取されたもの。
T欄の*しるしを付したデータは平均値を計算するに当って除外してある。

N_{F5} : U-235の原子数、 N_8 : U-238の原子数、 N_2 : Th-232の原子数

表4 オクロ鉱床における超ウラン元素と核分裂生成物の移動

元素	“ふるまい”
Kr	痕跡程度残留, 0.01~1%
Rb	痕跡程度残留, 1%以下
Sr	痕跡程度残留, 10%以下
^{90}Sr (現在は ^{90}Zr)	少量が移動、大部分がその場で壊変
Zr	大部分、その場で再配分
Nb	大部分が残留
Mo	90%程度散逸
^{99}Tc (現在は ^{99}Ru)	Tcとして移動、再配分
Ru	大部分が残留、再配分
Pd、Ag	大部分が残留
Cd	90%程度が散逸
Te	大部分が残留
I	大部分が散逸
Xe	痕跡程度残留, 0.01~1%
Cs	痕跡程度Baとして残留、大部分は散逸
Ba	大部分が散逸
希土類元素 (Ce, Nd, Sm, Gd)	非常に僅かの部分のみ移動
Pb	再配分、約2/3が炉心から失われた
Th(^{236}U , ^{240}Pu)	大部分が残留
Bi(^{237}Np , ^{241}Pu)	大部分が残留
^{235}U (^{239}Pu)	^{239}Pu は ^{238}U から分離されていない
U	恐らく大きな移動はなかった 一部が再配分

【出典】 C.Devilliers et al. : Age la mineralisation de l'uranium et date de la reaction nucleaire, IAEA-SM-204/26, A(1975)

【出典】 藤井 勲 : オクロ天然原子炉とその現状、原子力誌, 27(4), 323(198)



演習問題1-0

- 日本と世界のエネルギー事情と将来展望について、考えるところを述べよ。



人類が作った原子炉の歴史

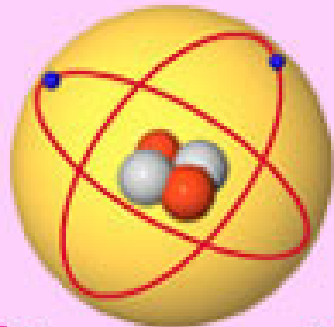


原子と原子核

- 原子： 中心にある正に帯電した原子核とその周りを回る電子から構成される。
- 原子の大きさ： ほぼ 10^{-8} cm
- 原子核の大きさ： ほぼ 10^{-13} cm
- 原子核： ほぼ等しい重さの陽子と中性子から構成
- 原子の質量の大部分： 原子核
- 原子核の中の陽子の数 = 周りの電子の数（中性）
- 原子核の中の陽子の数： 原子番号 (atomic number)、 Z
- 陽子と中性子の数の和： 質量数 (mass number)、 A
- 中性子の数： $N = A - Z$

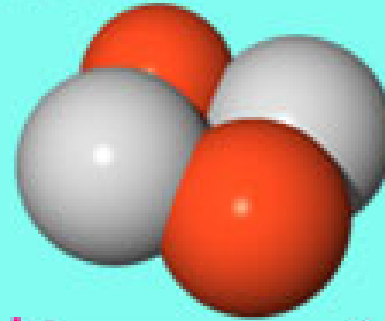
原子と原子核の大きさ

酸素原子



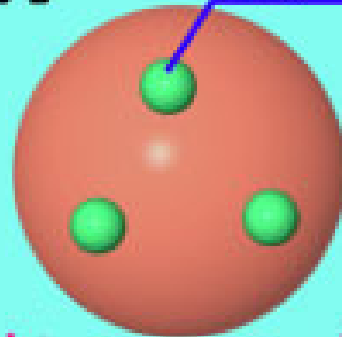
10^{-8} cm

原子核



10^{-13} cm

陽子



10^{-13} cm

クォーク

クォーク



10^{-16} cm以下



同位元素

- AとZの組合せの異なる原子核

原子番号:Z、 原子記号:X、 質量数:A

A_ZX (または単に AX)

- 同位体 (isotope): Zが同じでAの数の異なる核種 (すなわちNの異なる核種)

- たとえば、

天然ウラン: 質量数が234、235、238

${}^{234}_{92}\text{U}$ 、 ${}^{235}_{92}\text{U}$ 、 ${}^{238}_{92}\text{U}$



天然ウランの同位体組成と質量

核種	質量数 A	原子番号 Z	中性子数 N	原子数比 (%)	同位体質量 (u)
${}^{234}_{92}\text{U}$ (${}^{234}\text{U}$)	234	92	142	0.0055	234.0410
${}^{235}_{92}\text{U}$ (${}^{235}\text{U}$)	235	92	143	0.720	235.0439
${}^{238}_{92}\text{U}$ (${}^{238}\text{U}$)	238	92	146	99.274	238.0508



原子質量単位 (atomic mass unit)

- 原子の質量：陽子6個、中性子6個、電子6個から成る中性の炭素原子 $^{12}_6\text{C}$ の質量の1/12を1単位として、相対的に表す。
- これを原子質量単位 (atomic mass unit) uという
- 1個の陽子の質量： 1.007276 u
- 1個の中性子の質量： 1.008665 u
- 1個の電子の質量： 0.000549 u
- 原子の質量 = 核内の陽子の質量 + 中性子の質量



アボガドロ数

- 1モル: 任意の物質の原子量(または分子量)を含む物質の量(グラム単位)
- アボガドロ数: 1モルの中に含まれる原子(または分子)の数は常に 6.022×10^{23} 個になる。

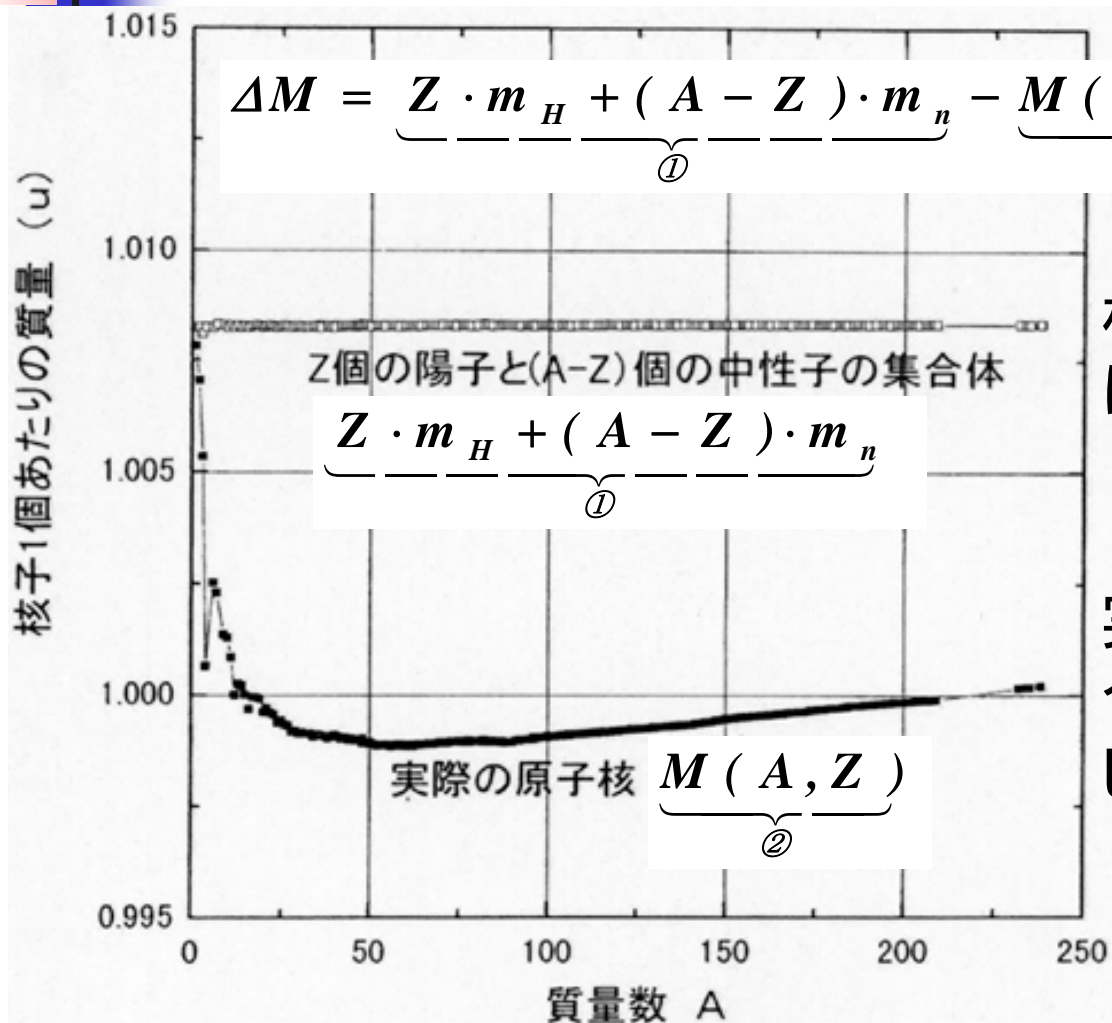
$$N_A = 6.022 \times 10^{23}$$

- $1 \text{ u} = 12 / 6.022 \times 10^{23} \times (1/12) = 1.661 \times 10^{-24} \text{ g}$
- 陽子の質量: $1.673 \times 10^{-24} \text{ g}$
- 中性子の質量: $1.675 \times 10^{-24} \text{ g}$
- 電子の質量: $9.11 \times 10^{-28} \text{ g}$

中性原子の質量評価

- いま、 m_p 、 m_n 、 m_e を、陽子、中性子、電子の質量、また M_A 、 $M(A,Z)$ を原子核の質量および中性原子の質量とする。
- 「質量不変」の物理法則によれば、[実際の原子核の質量： $M(A,Z)$]は、[その原子核を構成する陽子と中性子の質量の和： $Z(m_p + m_e) + (A - Z)m_n$]と等しくならなければならないはず。
- そこで、 $(m_p + m_e)$ を中性の水素原子の質量 m_H ($1.007825 u$)で置き換え、 Z 個の水素原子と $(A - Z)$ 個の中性子の単なる集合体の質量を計算してみる。
- その上で、得られた知る量と、実際の中性原子の質量 $M(A,Z)$ を比較する。

核子一個当たりの質量



核子1個当たりの質量は
ほぼ1.008で一定。

実際の質量M(A,Z)は、
合計計算値に比べて軽く、
しかも質量数に伴って変化



質量欠損

- [実際に存在する原子核の質量]は、[その原子核を構成する陽子と中性子の質量の算術和]よりも小さいことが分かった。
- すなわち、質量がいずれかに失われていることになる。この差を、**質量欠損** ΔM と呼ぶ。

$$\Delta M = (Z(m_p + m_e) + (A - Z)m_n) - M(A, Z)$$

- では、この失われた質量は、いったいどこへ行ってしまったのか？



アインシュタインの相対性理論

- v という速さで運動している粒子のエネルギー:

$$E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} = m c^2$$

ここで、 m_0 は静止質量であり、 c は光速。ただし原子炉物理学で扱う範囲では普通 v は c に比べてはるかに小さいので $m_0 c^2$ として計算して良い。



エネルギーと質量の等価性

- 質量欠損は、 Z 個の陽子と $(A-Z)$ 個の中性子から原子核を構成するときに解放されるエネルギーと考えることができる
- また、逆に原子核をその構成要素である Z 個の陽子と $A-Z$ 個の中性子にばらばらに分解するために必要なエネルギーとも考えることができる。
- そこで、この質量欠損に相当するエネルギーを**結合エネルギー**と呼ぶ。



結合エネルギーの評価

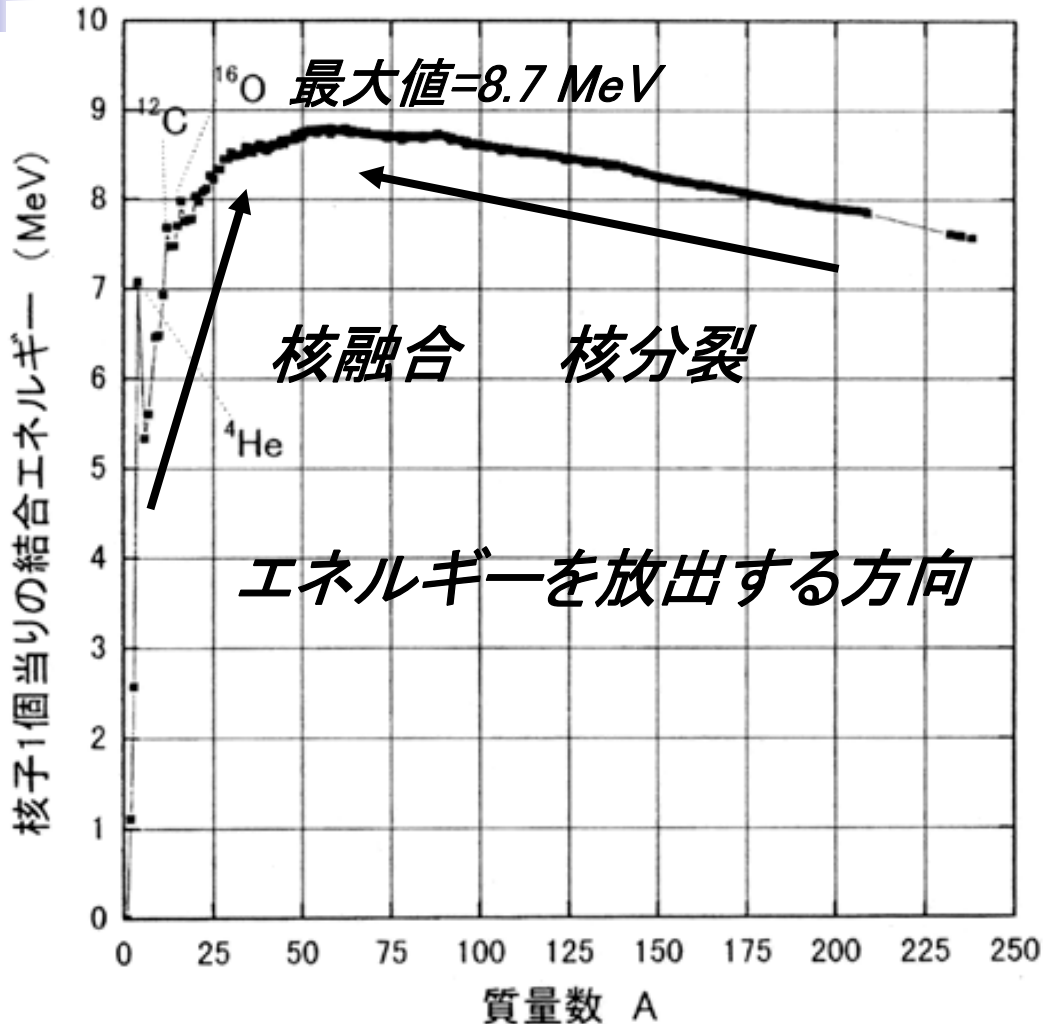
$$E (J) = mc^2 = m (g) \times 10^{-3} \times (2.998 \times 10^8)^2 = m (g) \times 8.998 \times 10^{13}$$

$$\downarrow \quad 1u = 1.661 \times 10^{-24} g$$
$$E (J) = m (u) \times 1.492 \times 10^{-10}$$

$$\downarrow \quad 1MeV = 1.602 \times 10^{-13} J$$
$$E (MeV) = m (u) \times 931.5$$

$$\downarrow$$
$$\frac{B_E}{A} = \frac{931.5}{A} (1.007825 Z + 1.008665 (A - Z) - M(A, Z))$$

結合エネルギーの変化





エネルギー発生機器としての原子炉の開発 → 出発はシラードの発想

- 1932年： チャドウィックの中性子の発見。
- 1933年： シラードは次のように考えた。「もし中性子によって割れる元素があり、割れた際に2個以上の中性子が放出されるならば、このような元素を大量に集めることによって原子核連鎖反応が起こせることになる」。



ウラン原子の核分裂

- 1938年： ハーン、シュトラスマン、マイトナー、フリッシュによる核分裂現象の発見
- ボーアの原子核の液滴理論(1936年)による予想
 - ① 中性子によって引き起こされる重い核の分裂では、核分裂片のでき方は多様であり、種々の原子番号、質量数を持ったものが生ずる。
 - ② 実験データによれば、高いエネルギーの中性子入射ではウランもトリウムも同程度の確率で核分裂を起こしたが、低エネルギー中性子入射ではウランの核分裂は起こりやすくなるが、トリウムでは全く核分裂は起こらなくなる。このことは、ウランにはウラン-235(0.7%)とウラン-238(99.3%)があり、低エネルギー中性子入射で核分裂可能なのはウラン-235のみであり、これは低エネルギーの中性子で極めて核分裂を起こしやすいためである。一方、トリウムはトリウム-232のみから成り、低エネルギーの中性子入射では核分裂を起こさない。
 - ③ ウラン-238は、特定のエネルギーの中性子を極めて高い確率で吸収する(現在、共鳴吸収と呼ばれる)。



核分裂連鎖反応の発見

- フランスのジョリオ (Frederic Joliot、仏、1900～58、イレーヌ・キュリーの夫) は、核分裂によって生じた分裂片は安定核に比べると著しく中性子の数が過剰であり、中性子を放出するに違いないと考え、ハルバン、コワルスキーと共同で実験に着手した。
- ジョリオたちは硝酸ウラニルと硝酸アンモニウムの溶液について、源から放出された中性子の拡がり方を比較した。実験の結果、ウランを含んだ溶液の方が中性子が遠方まで拡散することがわかった。
- このことより、ウランが分裂するたびに次々に中性子が発生し連鎖反応を起こしながら、中性子は遠くまで拡散していくことが明らかになった。
- 1939年の4月になると、分裂によって発生する中性子は2個以上はあり、中性子源がなくても連鎖反応が自立することも確認された。
- これにより、1933年以来のシラードの発想は現実となった。

最初の原子炉の設計

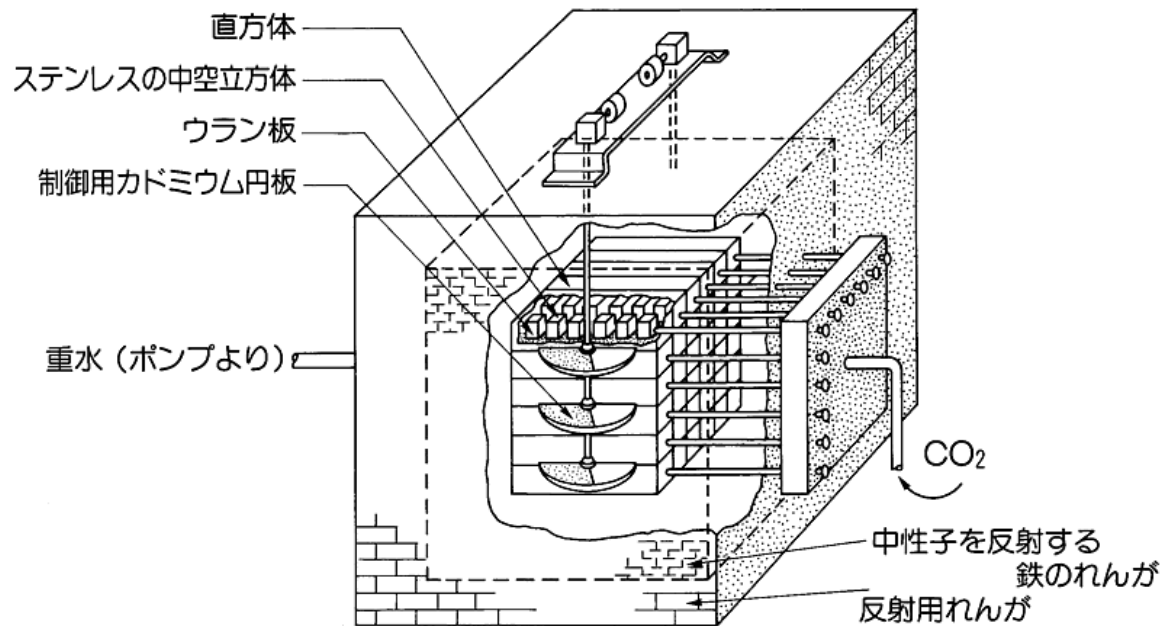


図1 ジョリオ、ハルバン、コワルスキーが設計した原子炉

(Ref. 9)



マンハッタン計画

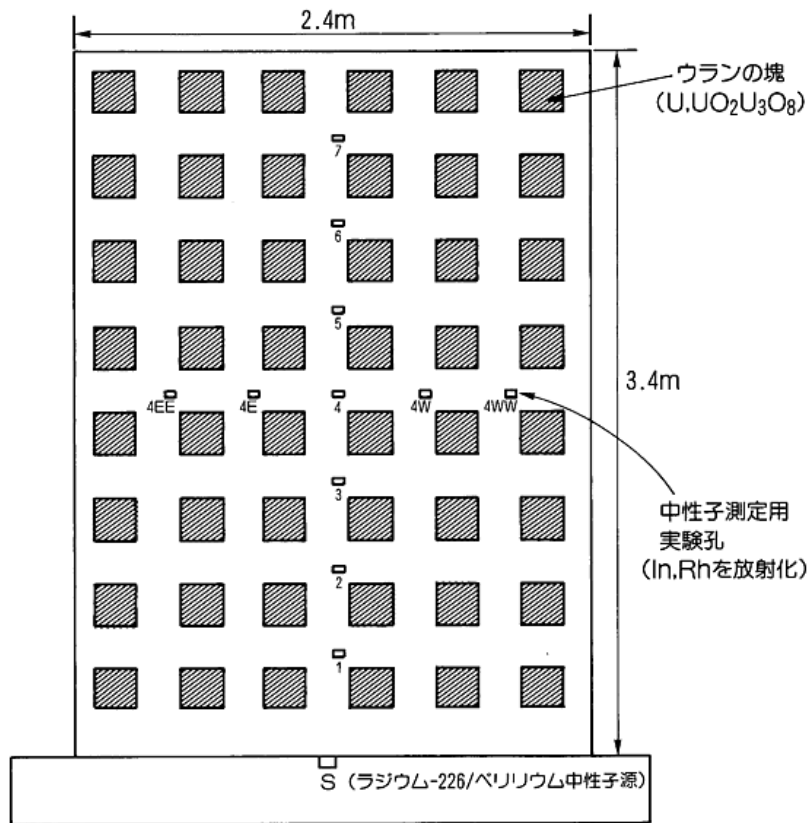
- ヒットラーが台頭すると、アインシュタイン、フェルミ、ボーア、シラード、フリッシュなど、優れたヨーロッパの物理学者がヒットラーの迫害を逃れるため米国に渡った。これらの人々はヒットラーが原子爆弾を独占し世界を支配することを極度に恐れた。特にシラードは熱心で、アインシュタインを説得して当時の米国の大統領ルーズベルト宛に原子爆弾開発を要請する手紙を出させることに成功した。米国の原爆開発計画は暗号名でマンハッタン計画と呼ばれた。

エンリコ・フェルミ(Enrico Fermi, 1901–1954)

- エンリコ・フェルミは、現代の最も偉大な科学者の一人であり、熱力学、宇宙物理学、電気力学、原子物理学の分野に多大な貢献を果たした。
- 1938年、ノーベル賞を受賞すると、フェルミはアメリカに移住した。フェルミは核の「連鎖反応」がもつ途方もない力と、原子エネルギーの応用の可能性について最初に気づいた一人である。
- エンリコ・フェルミが行った原子炉「シカゴパイル1」における中性子量の測定は、人類最初の原子エネルギーの誕生の証拠と考えられている。



フェルミによる指数実験



・原子炉を設計するための基礎データを得るため、フェルミは 図2 に示す指数実験装置を考案した。

・黒鉛のブロックを積み上げた直方体の体系であり、ウランの塊が周期的に配置されている。

・中性子源が一番下に置いてあり、ここから発生した中性子はウランの塊に入射して核分裂を起こし、増殖しながら上方へ拡散していく。

・黒鉛は減速材であり、この中を拡散するうちに中性子のエネルギーは下がり、ウラン-235の核分裂を起こしやすい条件になる。

図2 指数実験装置

(Ref. 6)



最初の原子炉CP-1

- 指数実験で得たデータに基づき、最初の原子炉CP-1が組み立てられた。原子炉は最初の計画ではシカゴ郊外のアルゴンヌの森の中に建設されることになっていたが、建物の完成を待てなかったため、シカゴ大学のフットボール場のスタンドの下を利用した建設を急いだ。1942年11月4日に炉の組み立てが始まり、一か月後の12月2日に試運転が行われた。

CP-1の試運転

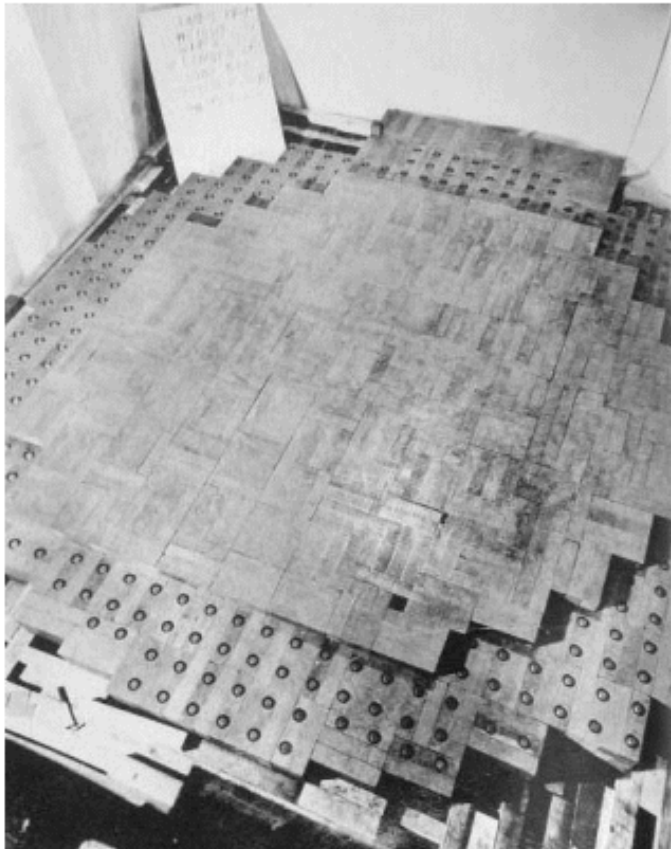
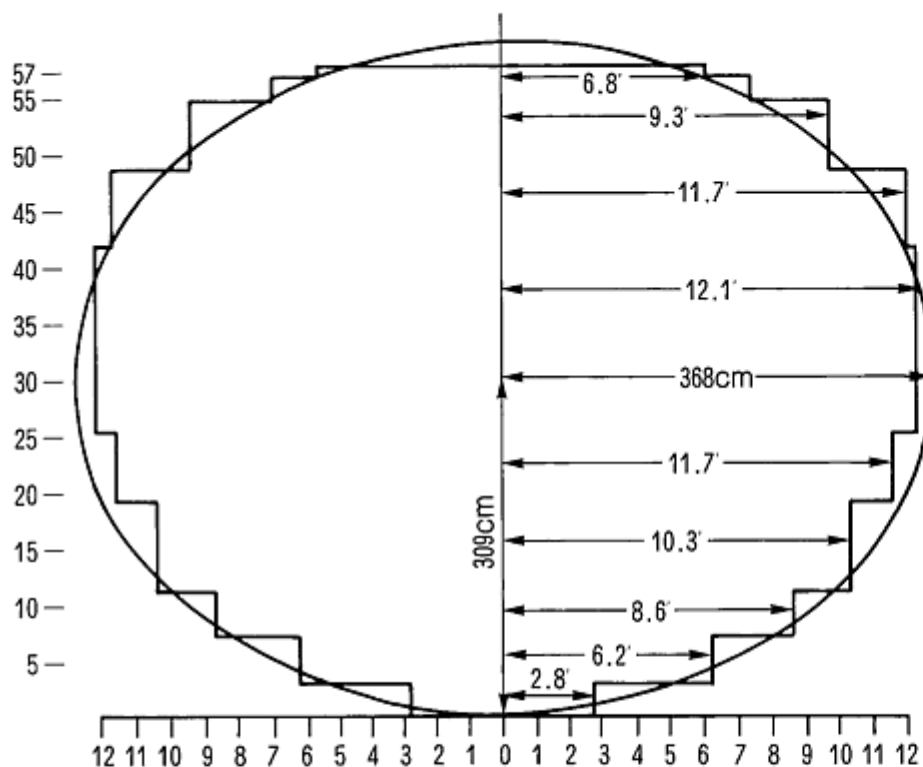


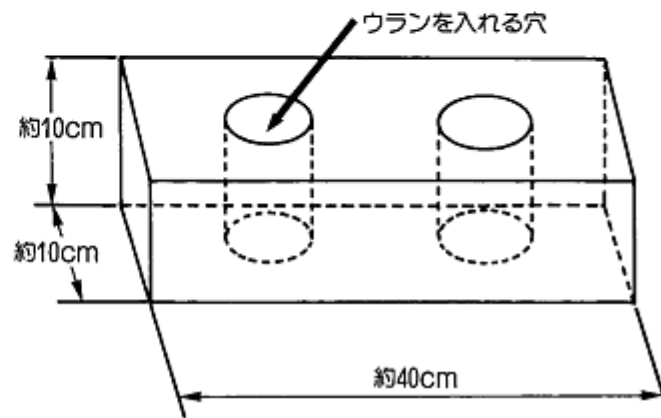
図2 人類最初の原子炉CP-1

[出典] Daniel Cohen: The Manhattan Project,
Millbrook Press, Inc., 1999

- ウラン燃料約42トン、黒鉛減速材350トン、制御棒にはカドミニウム板とボロン含有鋼鉄板が用いられた。
- 原子炉の開発に参加した43人が試運転に立ち会った。フェルミを始め、コンプトン、シラード、ウィグナー、ジンなど有名な学者も含まれていた。試運転はフェルミの総指揮の下に行われた。



(a) 断面図

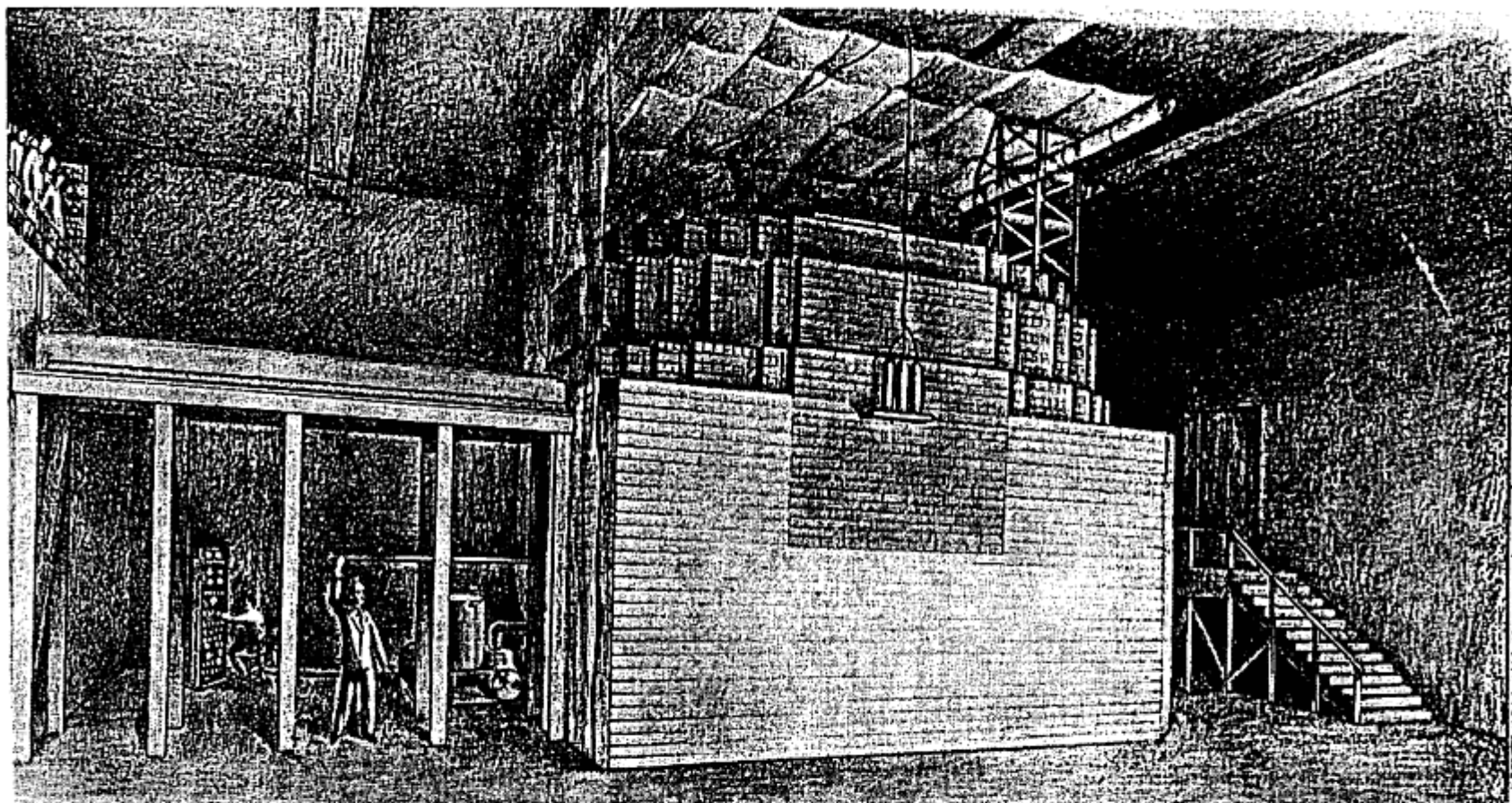


(b) フェルミの使った黒鉛ブロック

ウランを埋め込んだ黒鉛ブロック[(b)に示す]を扁平球状[(a)に示す]に積上げる。

図3 CP-1の構造図

(Ref. 6)

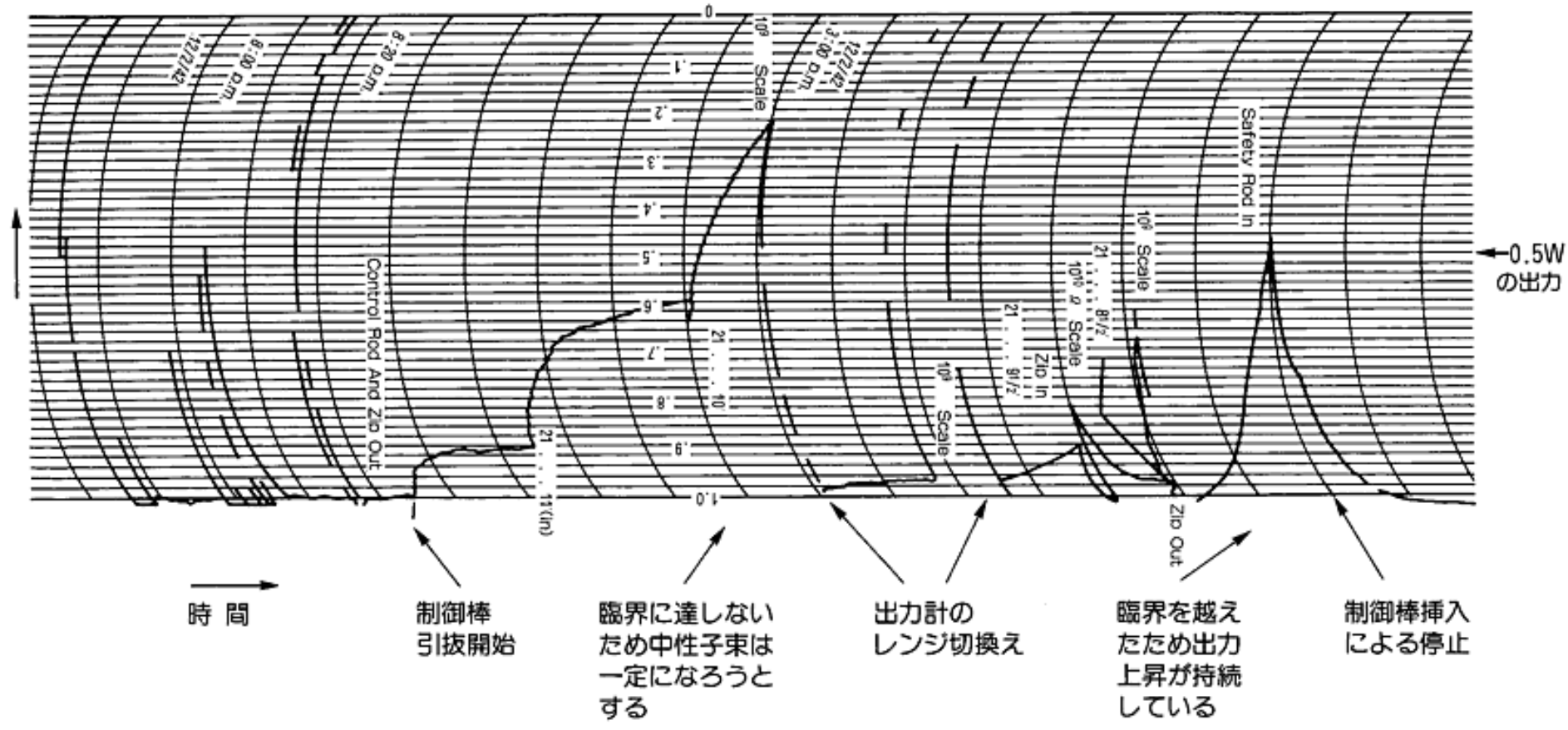


左側の人動かそうとしているのが制御棒。
天井から吊り下げられている三本の棒状の
ものが中性子束測定用検出器。

図4 CP-1の見取り図

(Ref. 6)

エンリコ・フェルミが行った原子炉「シカゴパイル1」 における中性子量の測定記録(1942年12月2日)



連鎖反応が持続し得る条件に達した状態を臨界という。

図5 CP-1の初起動時の運転記録



フェルミの助手アンダーソンの手記(1/2)

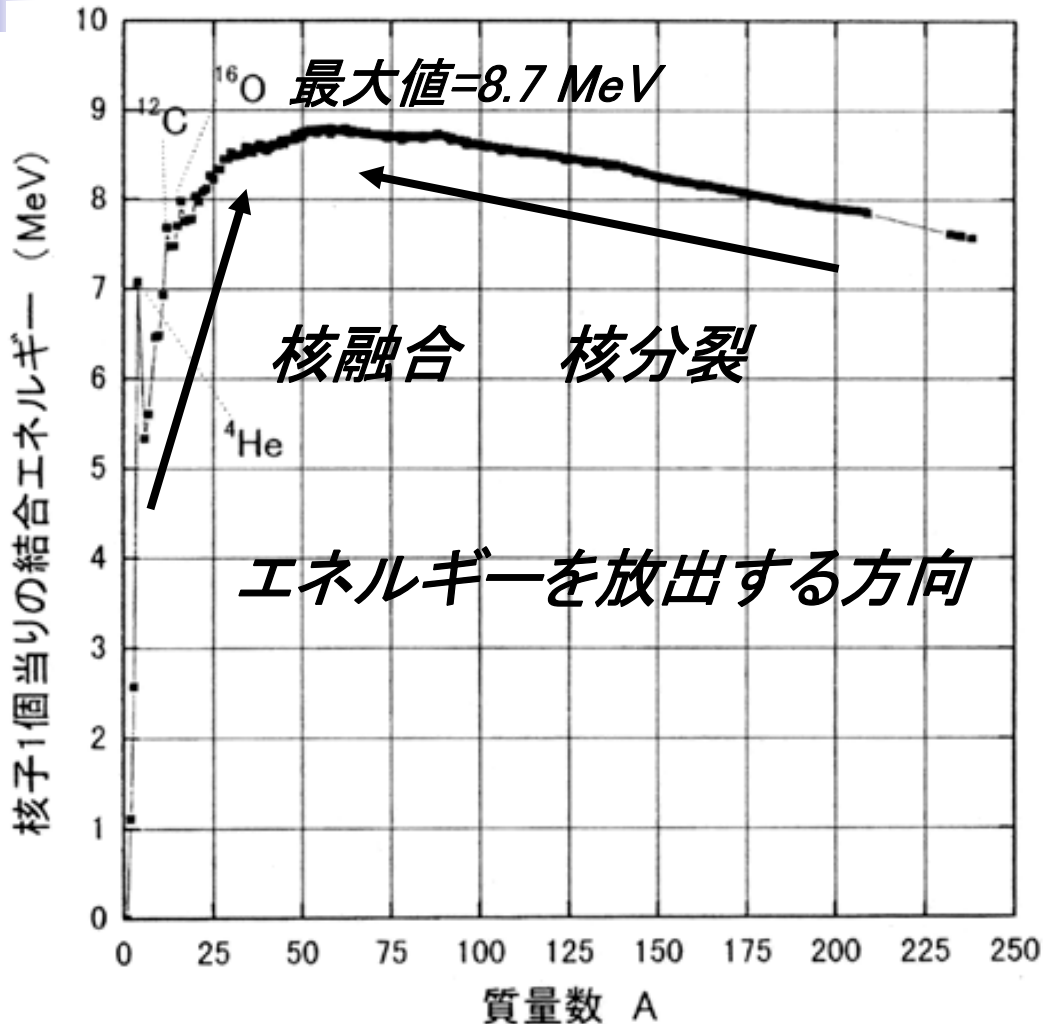
- 「カドミニウムの制御棒は一段一段ゆっくりと引き抜かれた。-----最終段階に到達したとき、次の段でフェルミは原子炉が臨界に達する確信を得た。カドミニウム棒を必要な位置まで引き出したとき、中性子強度の増加は目に見えて早くなった。最初、計数管の音はチクタク、チクタクと聞こえていたが、この音は急速に増え、しばらくするとゴウゴウとうなるような音になった。計数管はもはやこれに追従できない。この瞬間グラフを描くスイッチが入る。すべての人は急に押し黙り、記録のペンが山なりに振れるのをじっと見つめた。それは恐ろしいような沈黙であった。だれもがスイッチの意義を理解していた。あまりに高い強度の領域を相手にしているので、もはや計数管はこれ以上対応できないのである。



フェルミの助手アンダーソンの手記(2/2)

- 何度も何度も記録計の目盛りを切り換えねばならなかった。ますます急増する中性子の強度に呼応する必要があったからである。急にフェルミが手を上げた。そして、「炉は既に臨界に達した。」と宣言した。そこにいる人はだれもそれを疑わなかった。そして、どうしてフェルミが炉を停止させないのかと皆がいぶかり始めた。しかし、フェルミは全く冷静そのものだった。彼はその後1分、そしてまた1分待った。皆の心配が頂点に達したように見えたとき、彼は命令した。「ジップをおとせ。」ジーンがジップのロープをゆるめた。制御棒が落下して炉に挿入され、中性子の強度は突如として低下した。----- だれも笑わなかった。だれもが興奮していた。彼らは歴史の中の偉大な瞬間の証人となったのである。」

結合エネルギーの変化





相対性理論に基づく核分裂からの放出エネルギーの評価

- 仮に質量数238のウランを2つに分割
- 質量数119付近原子核を2つ作るとする
- 質量数238のウランの結合エネルギーは7.6 MeV、
- 質量数119付近の核子当りの結合エネルギーは8.5 MeV程度
- その差に相当するエネルギー、核子1個あたり $(8.5 - 7.6) = 0.9$ MeV
- 全核子238個で $0.9 \times 238 = 214$ MeVのエネルギーが放出される

核分裂による放出エネルギーの評価

- ウラン原子1個中には、全核子238個が含まれており、214 MeVのエネルギーが放出される。
- $1\text{eV}=1.6 \times 10^{-19}\text{J}$ であるから、214 MeVのエネルギーとは、 $214\text{ MeV}=(214 \times 10^6) \times (1.6 \times 10^{-19})=3.424 \times 10^{-11}\text{J}$ に相当する。
- ウラン238gには、アボガドロ数(6.02×10^{23})の原子が含まれているから、1gの原子に含まれる原子数は、 $6.02 \times 10^{23} \div 238=2.53 \times 10^{21}$ 個である。従って、
- ウラン**1g**が消費する際に放出するエネルギーは、
 $(3.424 \times 10^{-11}\text{J}) \times (2.53 \times 10^{21}\text{個})=8.66 \times 10^{10}\text{J}$
- このエネルギーが**1日**($=24 \times 60 \times 60$ 秒)で発生するとすると、
 $(8.66 \times 10^{10}\text{J}) \div (8.64 \times 10^4\text{秒})=1.00 \times 10^6\text{W}=1\text{MW}$
- これは、良質の石炭約**3トン**からの発生エネルギーに相当する。

100万kWの発電所を1年間運転するために必要な燃料

