

原子力発電の役割と安全性

於 長岡技術科学大学
2010年12月9日(木)
石井正則

m_ishii@flamenco.plala.or.jp

プロローグ

いま世界全体が原子力発電を必要としている！

背景

- **急速なエネルギー需要の増大**
 - 経済成長著しい途上国・特にアジア
 - 生活レベルの向上
 - 人口の増大
- **エネルギー供給の制約**
 - 化石資源の枯渇・・・ピークオイル到来
- **地球温暖化**
 - 温室効果ガスの増大

これらのことから

地球温暖化とエネルギー問題の同時解決が必要

原子力はゼロエミッション資源として需要に対応可能

目次

プロローグ

- 1 地球環境問題とエネルギー問題
- 2 これからのエネルギー利用のあり方
- 3 原子力発電の基礎
- 4 原子力発電の安全性と地震対策
- 5 放射線と放射能
- 6 期待される原子力発電 原子力カルネサンス
- 7 まとめ

1 地球環境問題とエネルギー問題

	地球環境問題	エネルギー問題
現象	地球温暖化 世界各地で気候変動	資源の争奪戦・価格上昇 世界の一次エネルギー 約8割が化石燃料
要因	温室効果ガス増大 人為起源の温室効果ガスが主因	資源の枯渇・供給量に限界 ピークオイル 需要の増大 生活向上、人口増大
対策	温暖化への対応策	—
	温暖化の抑制策 エネルギー起源CO2低減	エネルギー使用量低減 省エネ、節エネ、効率向上 代替資源の活用 化石燃料から低炭素資源へ

1.1 地球環境問題

地域レベルから地球規模へ！

地球温暖化・・・世界全体で解決に取り組む問題！

現象

- 気温上昇 氷雪や凍土融解、氷河後退
- 海面上昇 高潮危険地域増大、水没地域発生、干潟減少等
- 農業・漁業への影響 病害虫被害、適地の变化、産卵場変化・減少等
- 水不足・渇水・豪雨
- 健康影響・死亡率上昇 熱中症、デング熱等のリスク増大
- 大気・水質汚染加速、海洋酸性化

気温上昇の実績と予想

- 実績 世界 **100年あたり0.66℃上昇**
日本 **100年あたり1.06℃上昇**
- 予想 世界 **21世紀末に20世紀末に比べ1.1～6.4℃上昇**
日本 **21世紀末には20世紀末に比べ2～4℃上昇**

地球温暖化 その要因と対策

IPCC第4次報告より(2007年11月)より

- **温暖化は疑う余地がない**
 - 温度上昇、雪氷融解、海面上昇
- **20世紀半ば以降の世界平均気温上昇のほとんどは人為起源の温室効果ガスの増加**による可能性が高い
 - 人間活動の影響は海洋昇温、大陸平均気温、極端な気候といった面にも影響
- **将来予測**
 - 21世紀中の気温上昇1.1~6.4°C、海洋酸性化、北極海氷減少、熱波・台風・洪水頻発
- **気温上昇を2°C以内にするには気候政策の追加が必要**

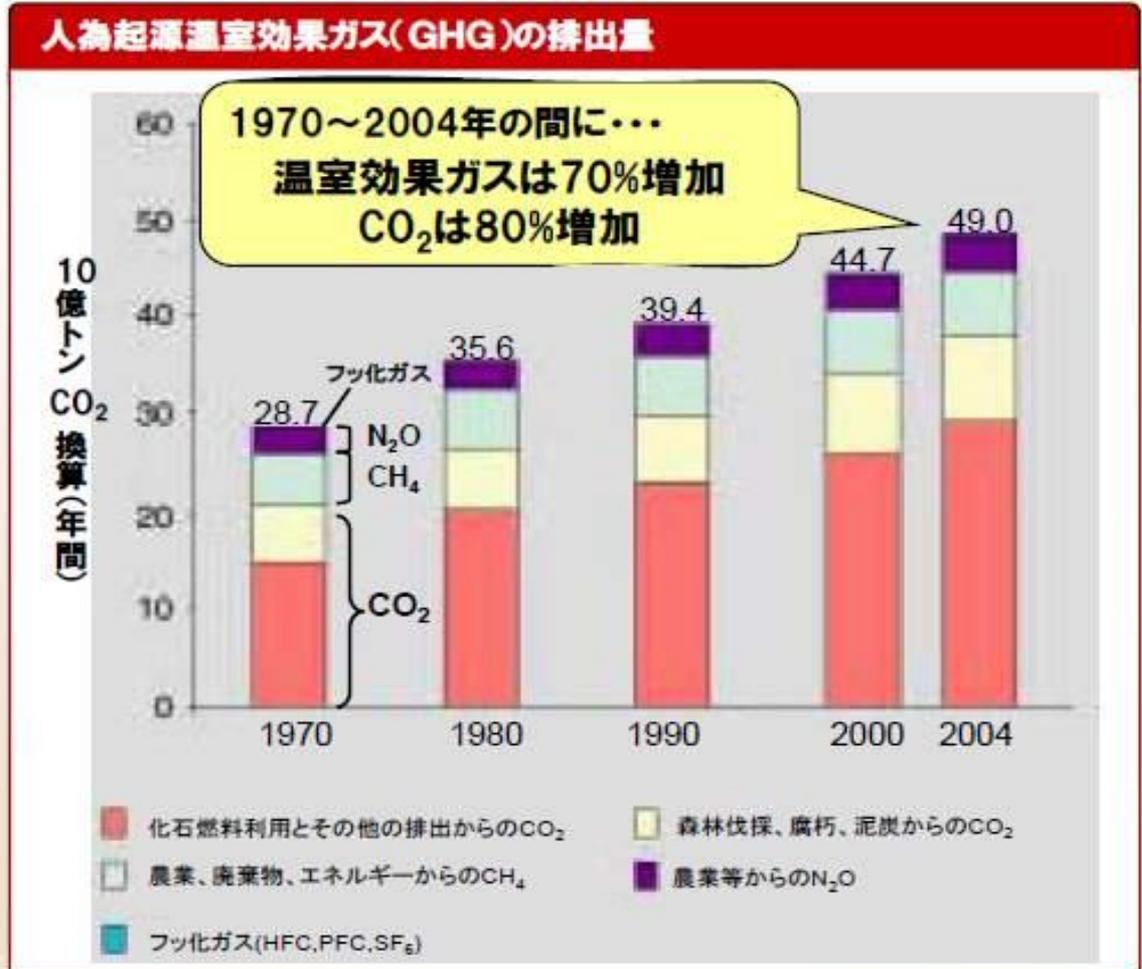


化石エネルギーから排出されるのCO2削減
地球環境問題はエネルギー問題！

主因は人為期限の温室効果ガス

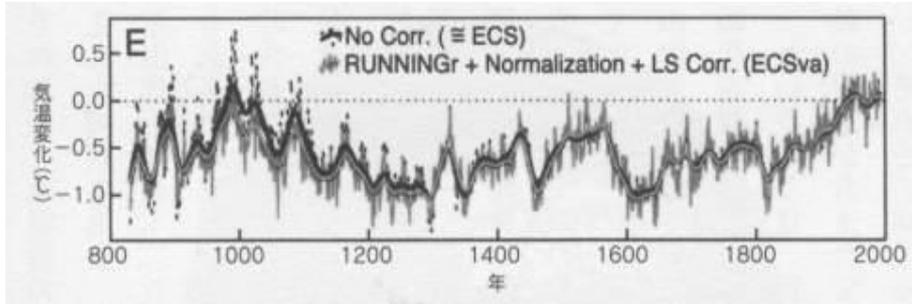
- ・ 人間活動が原因となって排出された温室効果ガスの総排出量は、1970～2004年の間に70%増加した。
- ・ CO₂の排出量は、1970～2004年の間に約80%増加した。

出典：AR4 SYR SPM

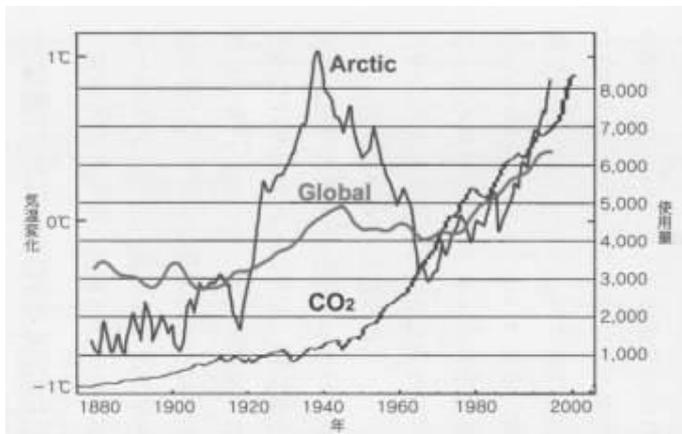


出典：AR4 SYR SPM 図SPM3

参考 地球温暖化の原因 自然変動の大きいという説もある



木の年輪から推定した気温変化。1800年頃から氷河期が回復



世界平均と北極圏の温度。CO2の上昇は1946年頃から。

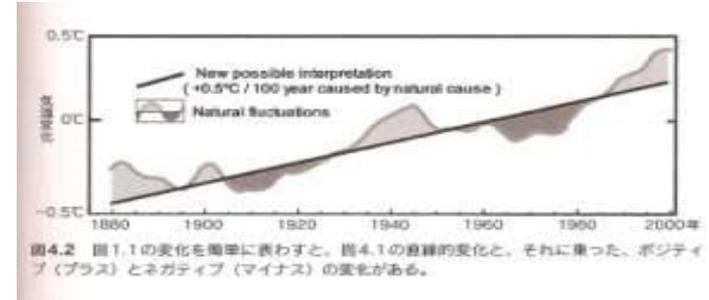


図4.2 図1.1の変化を簡単に表わすと。図4.1の意図的変化と、それに集った、ポジティブ(プラス)とネガティブ(マイナス)の変化がある。

1880年頃からの温度変動は直線の上昇

- 現在は小氷河期の回復期
- 1880年頃から直線的に温度上昇
→温暖化は自然変動
- 1920-1970年の温度変動はCO2と無関係
- 北極圏の1950~2000年の温暖化は消えた
- IPCCの100年間で0.6°Cは過大
- 1900年以降の温暖化は自然変動が主因→CO₂の影響は1/6程度

1.2 深刻化するエネルギー問題

- 資源の枯渇と需要の増大
 - 世界の石油の半分は取りつくした
 - アメリカは今や輸入国
 - 生産量は今がピーク → **ピークオイル**
在来型石油は2006年に生産量のピークを迎えた可能性大(IAEA)
 - 需要の増大
 - 人口増大と生活レベルの向上
 - 資源獲得競争
 - 石油価格上昇
 - 石油は各種原料としても重要
- 日本のエネルギー問題
 - 輸入に頼ってきた日本の発展

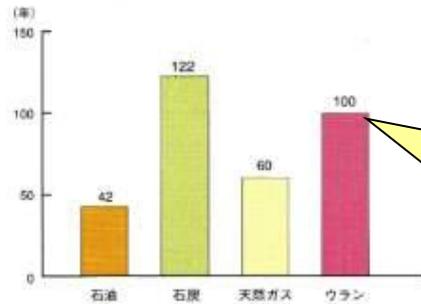
エネルギー争奪戦に生き残るには！

化石燃料はいつまで！

化石燃料資源の枯渇

世界の石油の半分は取り尽くした
生産量は今がピーク

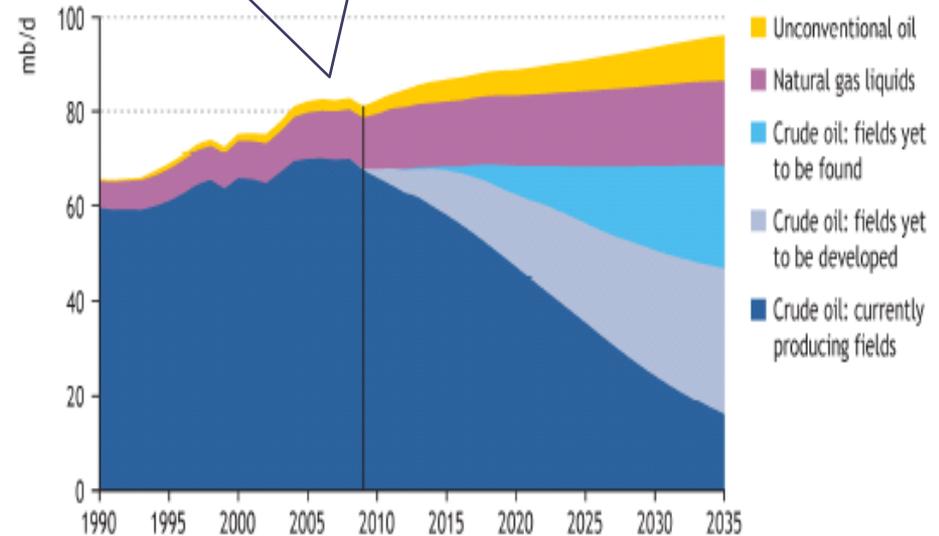
ピークオイル



高速増殖炉により1000年以上
(海水からのウラン採取も)

出典：BP統計2009、OECD/NEA「Uranium2007」

ピークオイル



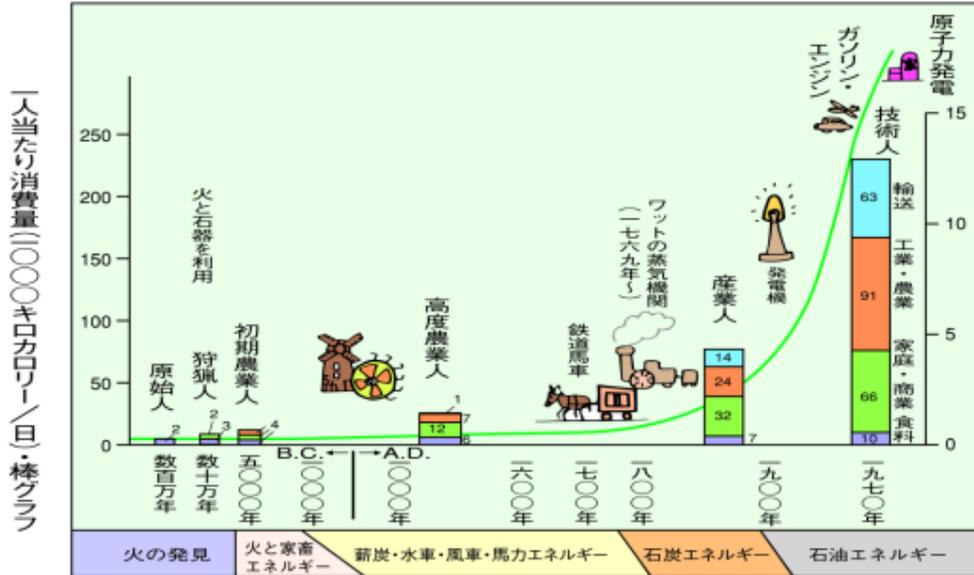
需要の増大

生活水準（エネルギー消費/人）向上
エネルギー消費/人（A）
人口の増大（人口 B）
需要 = A × B

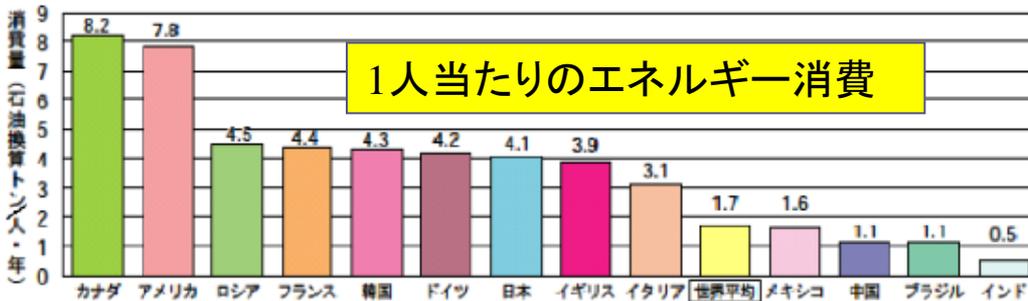
資源獲得競争
価格上昇
国際紛争

エネルギー使用で支えられてきた文明

人類とエネルギーのかかわり



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 約5000年の近東(小麦、穀物と家畜)の農業。
 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 1774年のイギリス、蒸気機関の発明。
 技術人 1875年のドイツ、電燈の発明。



生活水準の向上と人口増大が
 エネルギー消費増大に拍車
 途上国の経済成長

中国は世界第2に
 エネルギー消費急増！

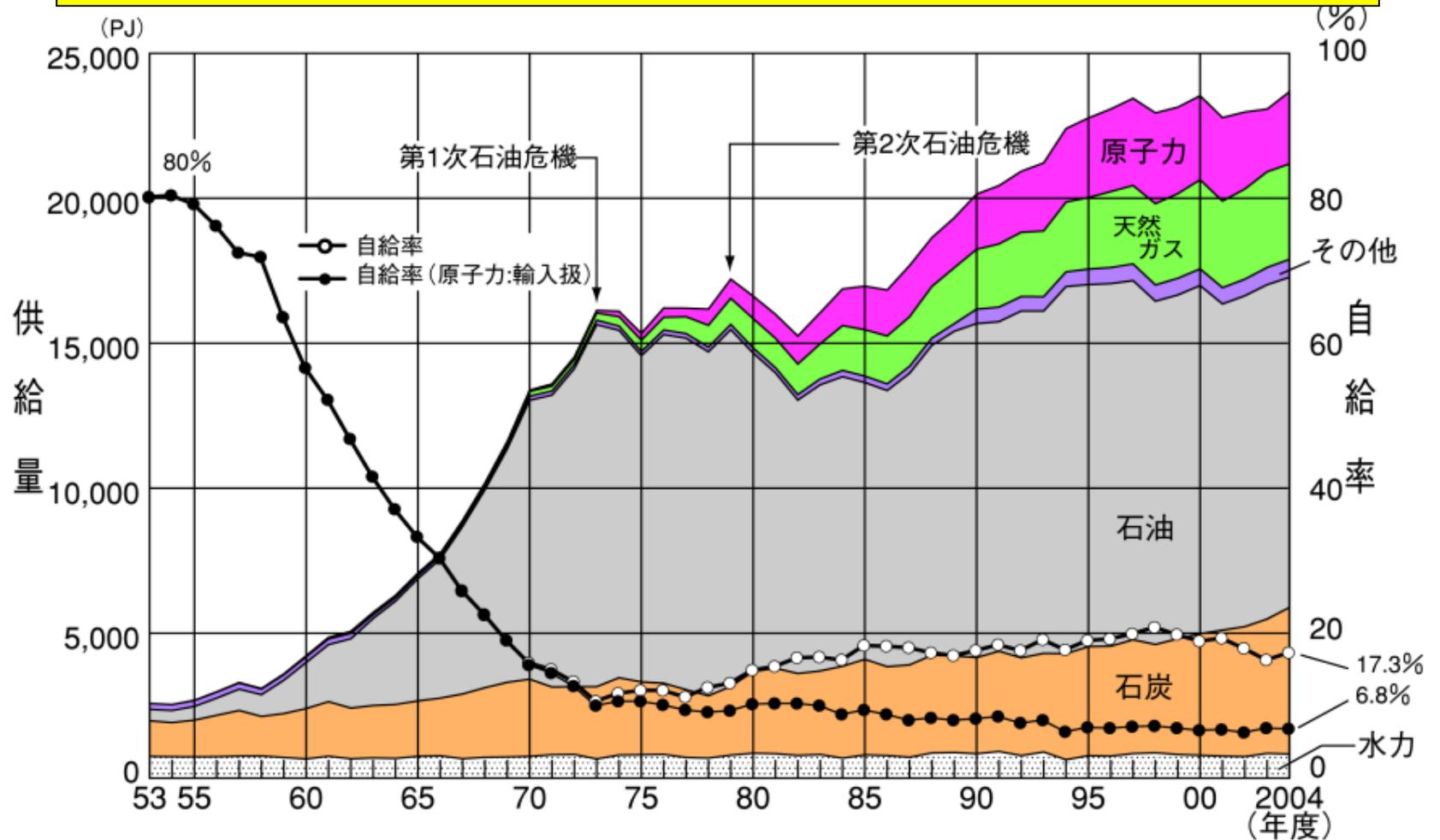
人口増大

1950年 25億人
 1999年 60億人
 2050年 92億人の予想
 → 人口爆発！

一人あたりのエネルギー消費
 生活レベル、保険医療向上
 → 寿命延長、乳幼児死亡率低下

どうする 過去の生活水準に
 戻せないとしたら！

日本の一次エネルギー供給実績

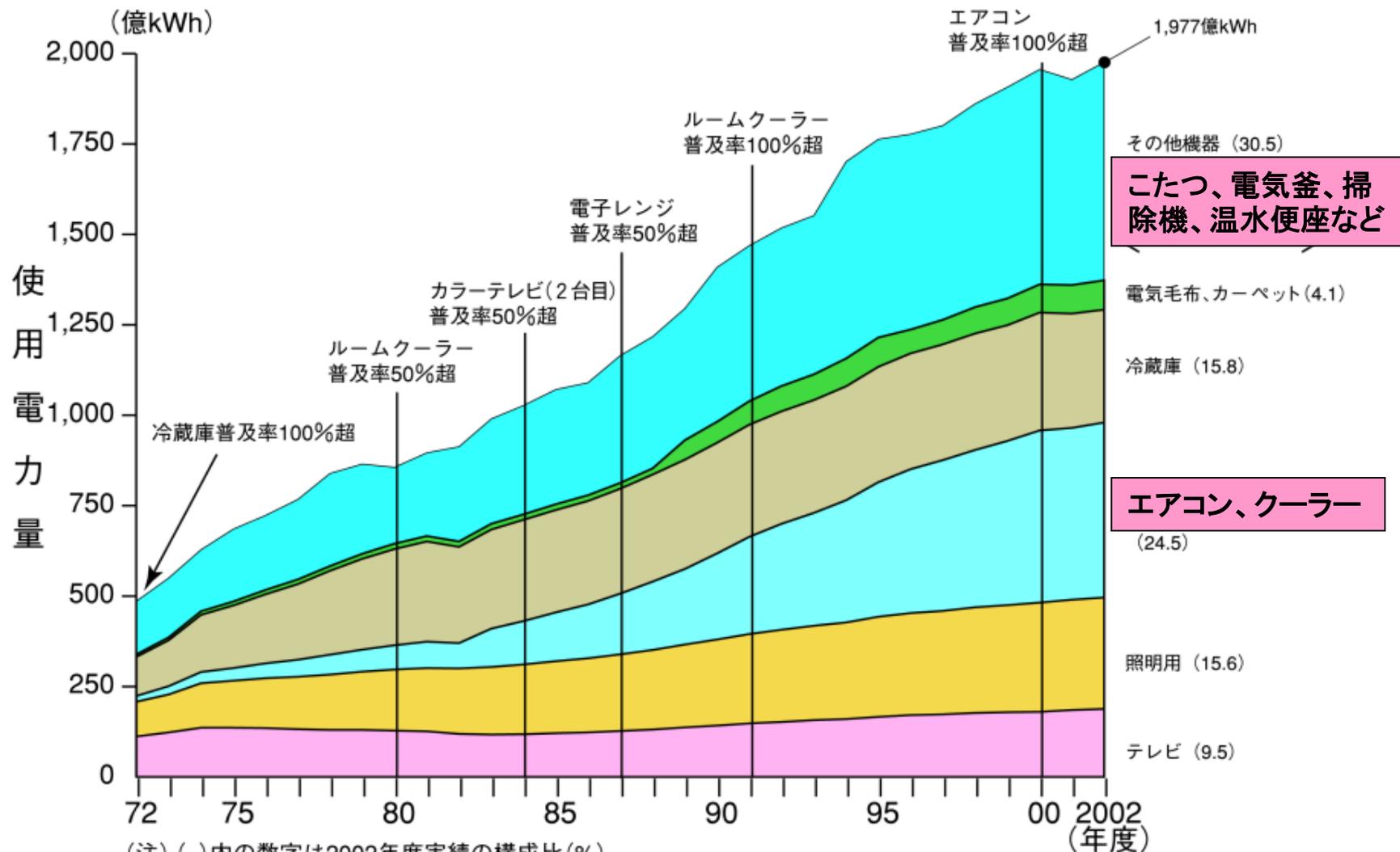


(注) 1PJ(=10¹⁵J)は原油約25,800klの熱量に相当(PJ:ペタジュール)

出典：総合エネルギー統計(平成16年度版)

資源エネルギー庁「2004(平成16)年度におけるエネルギー需給実績について」

家庭用電力の伸び

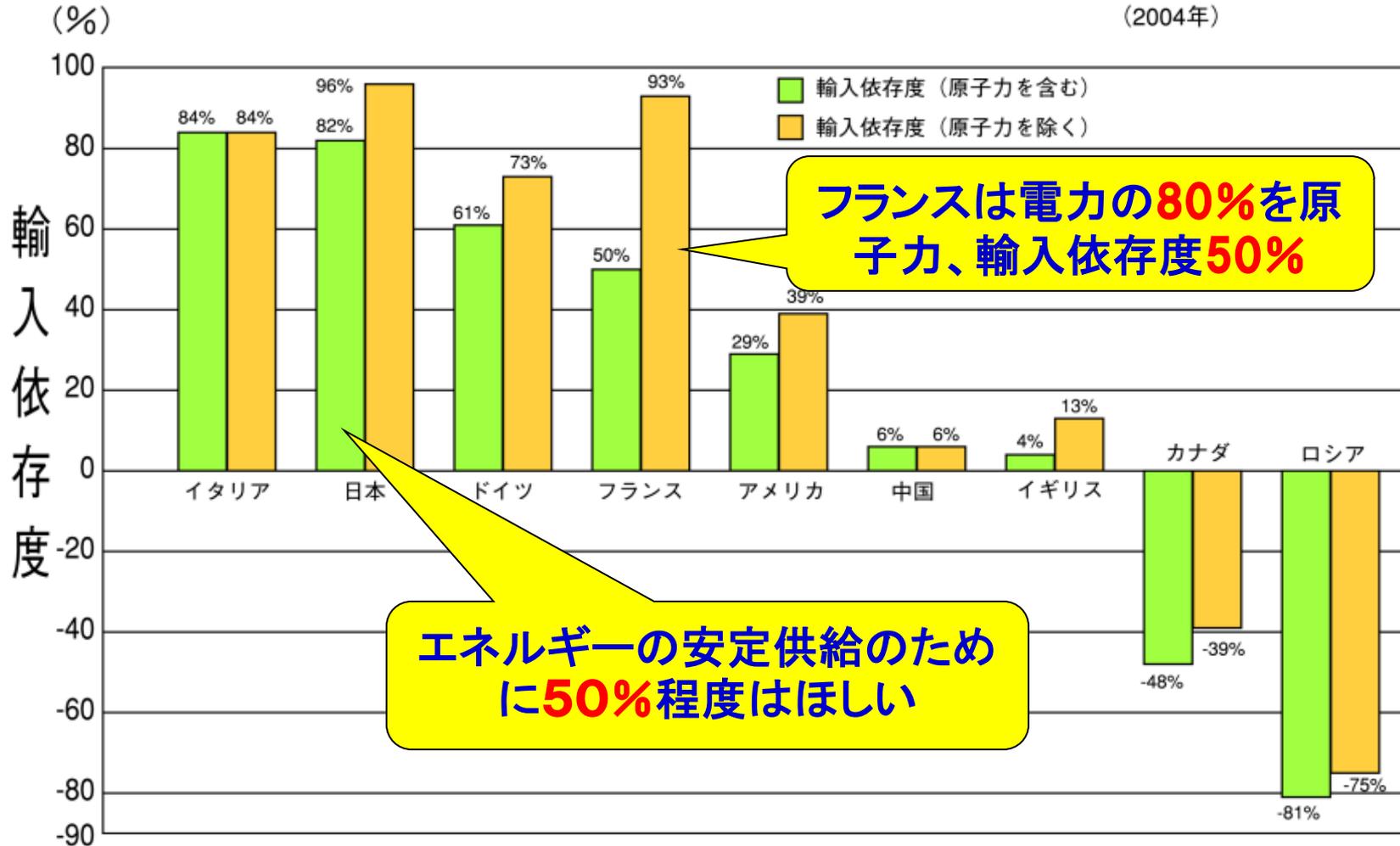


(注) ()内の数字は2002年度実績の構成比(%)
四捨五入の関係で合計値が合わない場合がある。

出典：電力需給の概要(2004)

脆弱な日本のエネルギー 主要国のエネルギー輸入依存度

(2004年)



(注) カナダ、ロシアはエネルギーの純輸出国

出典：ENERGY BALANCES OF OECD COUNTRIES 2003-2004
ENERGY BALANCES OF NON-OECD COUNTRIES 2003-2004

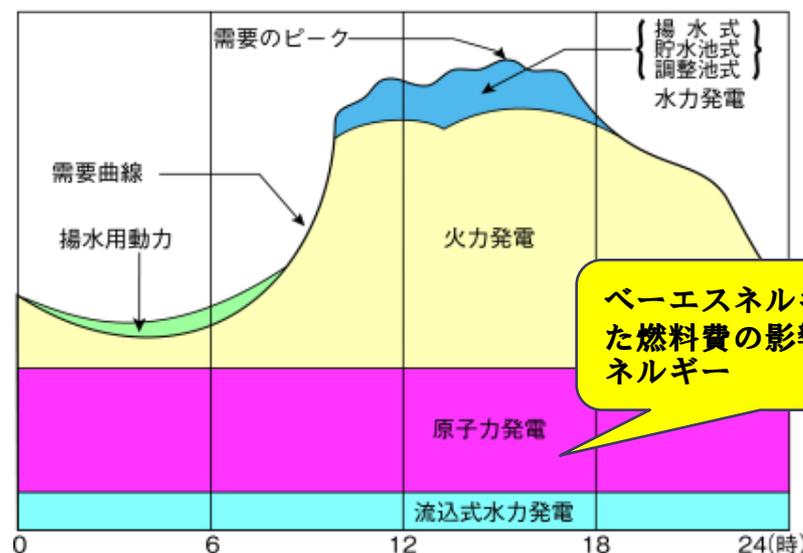
2 これからのエネルギー利用のあり方

エネルギー問題と地球環境問題の同時解決 → 賢いエネルギー資源の選択と使い方

- 安定供給
 - 自給率向上
 - 多様化
- 経済性
 - 国際競争力・市場原理
- 地球温暖化の抑制
 - 低炭素エネルギー
 - **ゼロエミッション資源**

⇒ 効率的な使用と
ベストミックス

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)

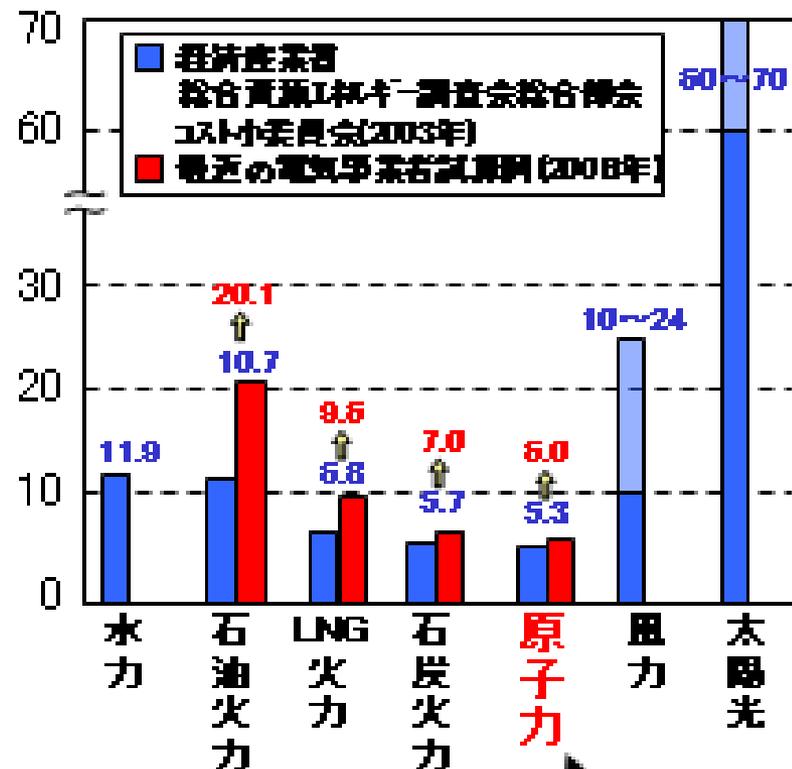


ベースエネルギーは安定した燃料費の影響が少ないエネルギー

出典：資源エネルギー庁「原子力2008」

資源別コスト 目標は市場原理

(円/kWh)



条件

耐用年数 : 40年

設備利用率 : 80% (水力45%)

燃料価格 :

石油 = 27.4 → 90.7 \$/バレル

石炭 = 35.5 → 76.5 \$/トン

LNG = 2.8 → 5.3 万円/トン

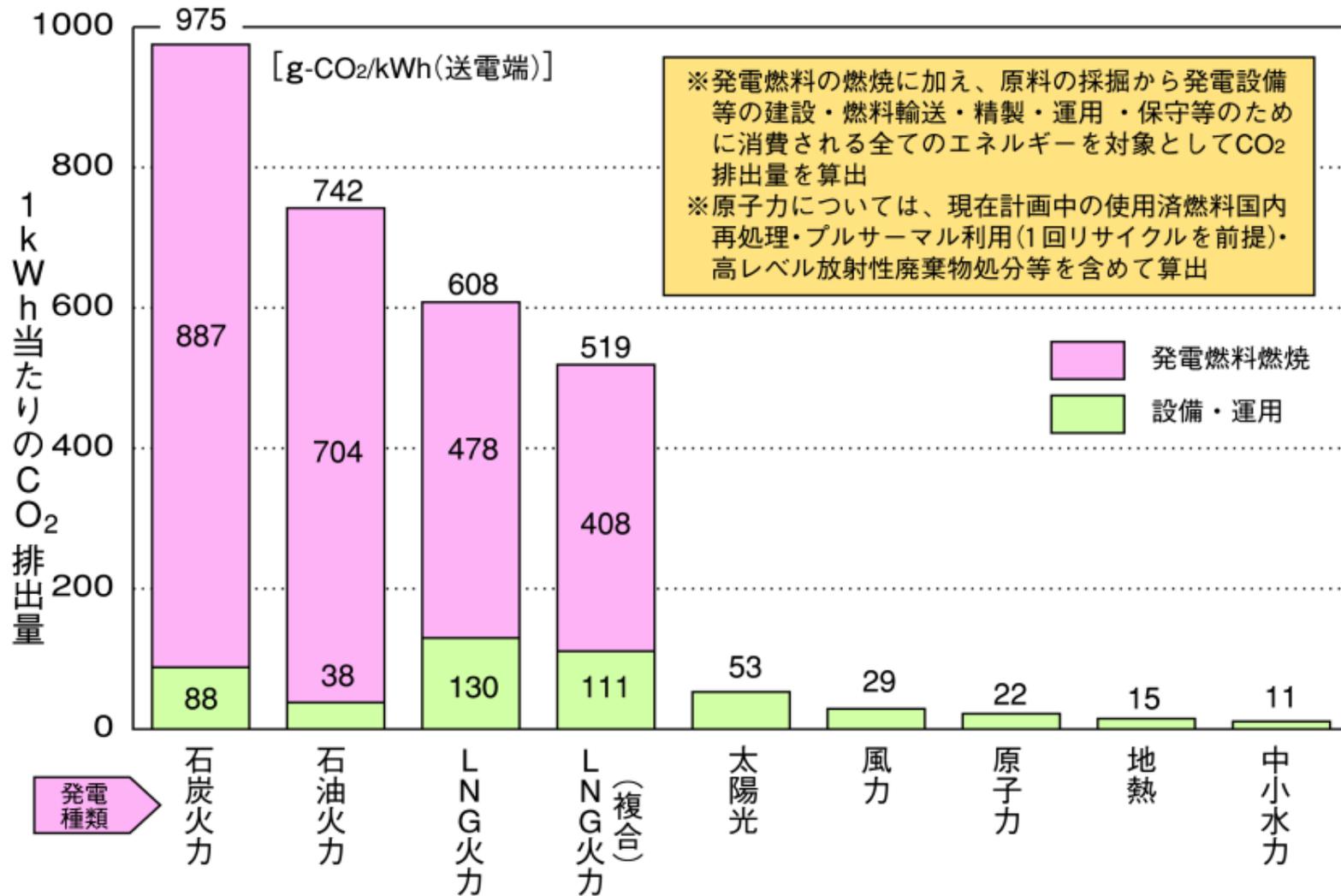
ウラン = 10.1 → 95.0 \$/lbU308 (鉱石)

2002年度平均
(コスト小委のベース)

2008年2月
(試算例のベース)

原子力: 再処理費用、再処理設備廃止費用、
高レベル廃棄物処理・処分費、廃炉等含む

各種電源別のCO₂排出量



出典：電力中央研究所報告書 他

各種エネルギーの比較

	原子力	化石エネルギー			再生可能エネルギー		
		石油	石炭	天然ガス	水力	太陽光	風力
プラント容量	～140万kWe	数10万kWe			数千kWe	～1万kWe	～数100万kWe
発電所容量	～800万kWe	～300万kWe			～数10万kWe		
平均利用率(%)*1	約75	-			約47	約10～15	約17～20
既存サイト例	柏崎刈羽	御坊	苫東厚真	袖ヶ浦	-	松山太陽光発電所	ウィンドパーク美里
出力(万kWe)	821	180	165	360		0.43*3	1.6
面積(km ²)	4.20	0.36	0.58	1.12		0.067*3	0.15
建設期間	4～6年	1.9～3.3年	2.4～4.2年	1.9～3.3年	-	-	-
リードタイム*2	概ね20年以上	-	概ね10年程度		-	-	-
備考(用途等)	●主に基幹電源	●主にピーク供給	●主に基幹電源	●基幹電源・ミドル供給、及び、分散型エネルギー	●揚水等はピーク供給 ●流込式水力は基幹電源	●天候等により出力が変動しやすくバックアップ電源等が不可欠。 ●電源系統との連携システム必要。 ●主に分散型電源	

※1 原子力はH18原子力白書、'98～'05の平均より。水力、太陽光、風力はNEDO、H17エネルギー関連データ集より。

※2 立地申入れから運用開始までの期間。

※3 増設計画（平成32年完成予定）。現在は300kWeの出力。

100万kW級1基分：太陽光だと山手線内側と同程度、風力だとその3.5倍の面積要

賢いエネルギー資源の選択

- **無駄にならない地球温暖化抑制対策**
 - 自然変動の影響もあるとしても数億年かけて固定したCO₂を、数百年で開放するのは望ましいことではない
 - 世界全体で効果のある対策が必要
- **文明の維持・発展を阻害しない資源選択と活用**
 - 市場原理で安定的な供給の確保



- **有効な資源選択**
 - 後で後悔しない対策から！
 - 化石資源の利用削減
 - 市場原理でゼロエミッション資源利用拡大

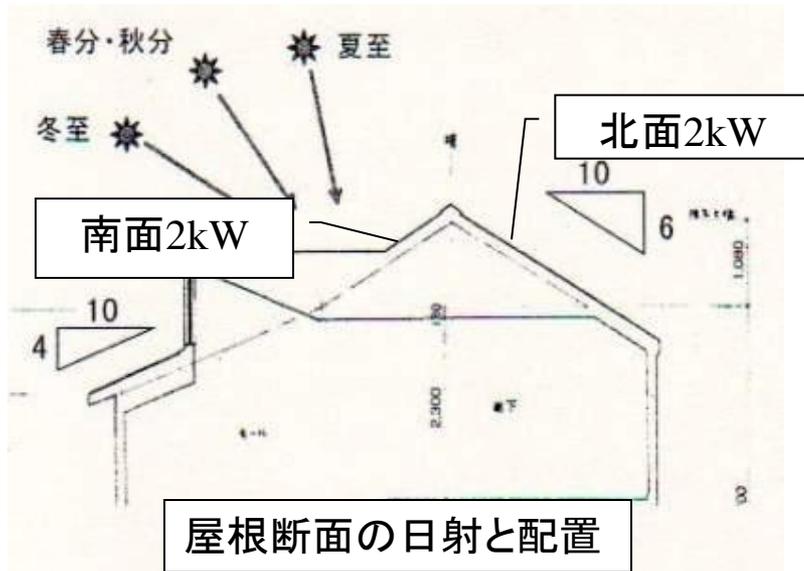


基幹的な役割を果たせるのは原子力

いま世界が原子力を必要としている！

原子カルネサンス

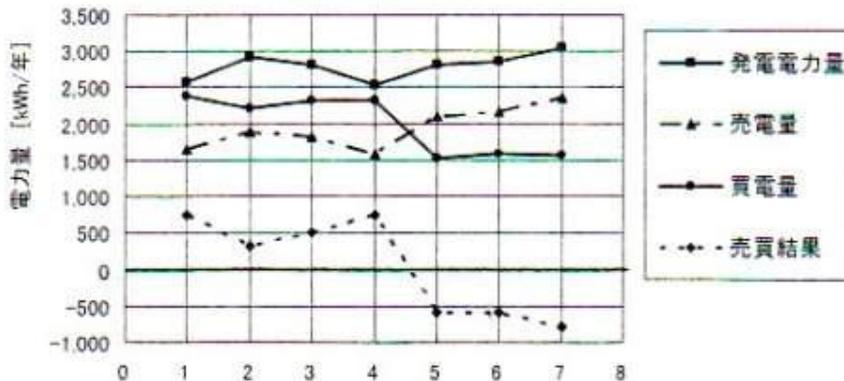
事例 家庭における太陽光発電使用の例



- 設備容量 4kW
 - 南面2kW・北面2kW
 - 設備利用率 7.95%/年 (7年平均)
 - 年間収支 +1.8~2.6万円
 - 2007年以降省エネの成果
 - 年間利得 12万円程度
 - 投資回収期間 27年程度
- 買ってもえる値段にもよる

その他

- 発電量最大は4~入梅の間
- 夏季は高温で電池効率低下
- 4~8月は北面も南面なみ



年間収支の変化

投資回収には期間がかかる！

3 原子力発電の基礎

原子力発電の特徴

- 大電力の供給が可能 → 基幹電源
 - リサイクルによりウランの有効利用が可能
 - 備蓄性が高く少ない資源での大電力供給
 - 炭酸ガスの排出が少なく経済性高
- 市場原理のゼロエミッション電源
- } 準国産資源

課題は！

- 国民の安全の懸念 → 課題は安全から安心へ
- 放射性廃棄物の処分 → 国民の理解が必要
- 核不拡散への対処
- 高品質・低稼働率 → 稼働率向上が課題

現状

- 運転中 54基 4886万kW
- 建設中 2基
- 工事準備中 12基

世界は

- 運転中 432基 29044万kW
- 計画中 114基

日本の原子力開発と技術

1953 アイゼンハワー大統領、原子力平和利用呼びかけ **Atoms for Piece**

1953 10.26 IAEA加盟

1955 原子力基本法（民主、自主、公開）

1956 原子力委員会設置

1956 原子力研究所・原燃公社発足

1963 10.26 JPDR運転開始

10月26日原子力の日に（1964）

1966 東海1号炉（商業炉）運転開始



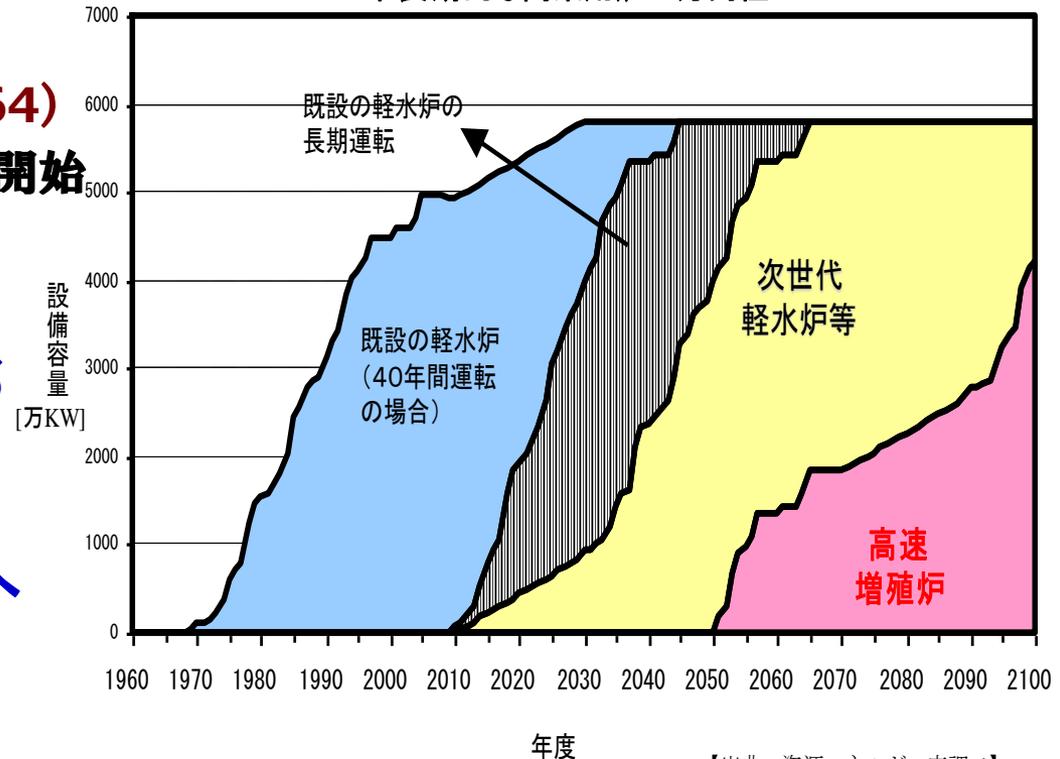
現在 54機

約4900万kW 発電量の30%

21世紀中庸には

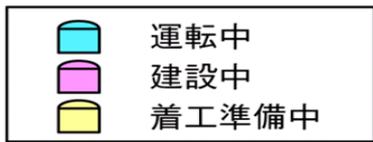
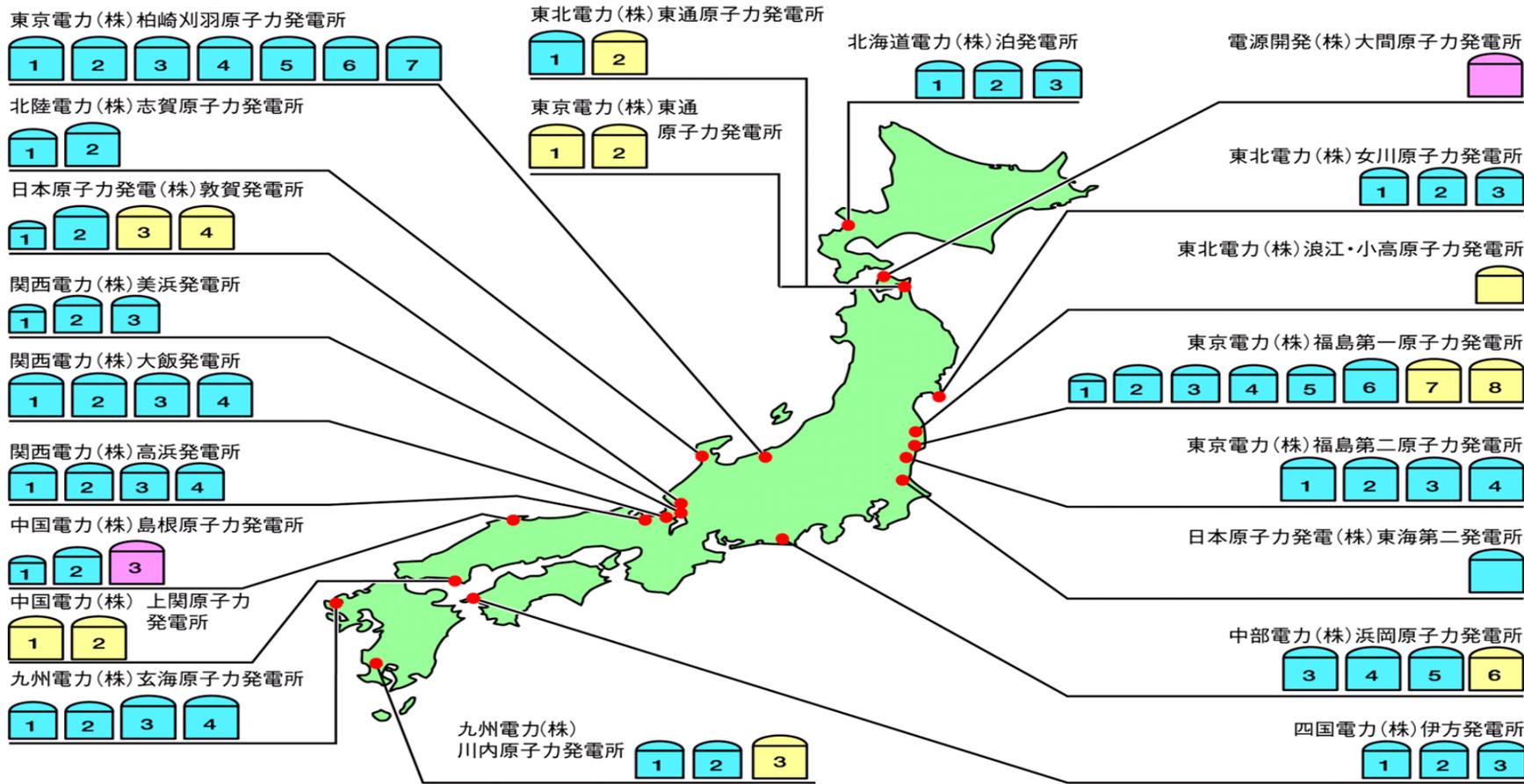
次世代軽水炉から高速増殖炉へ

中長期的な商業用炉の方向性



【出典：資源エネルギー庁調べ】

わが国の原子力発電所の現状と建設計画



	基数	合計出力(万kW)
運転中	54	4884.7
建設中	2	275.6
着工準備中	12	1655.2
合計	68	6815.5

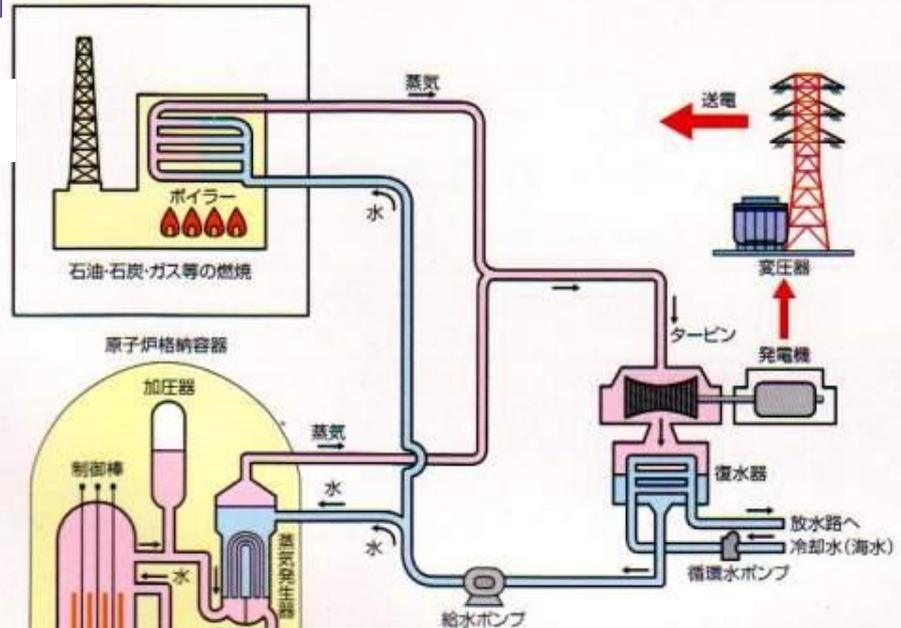
原子力発電のしくみ

火力発電との比較

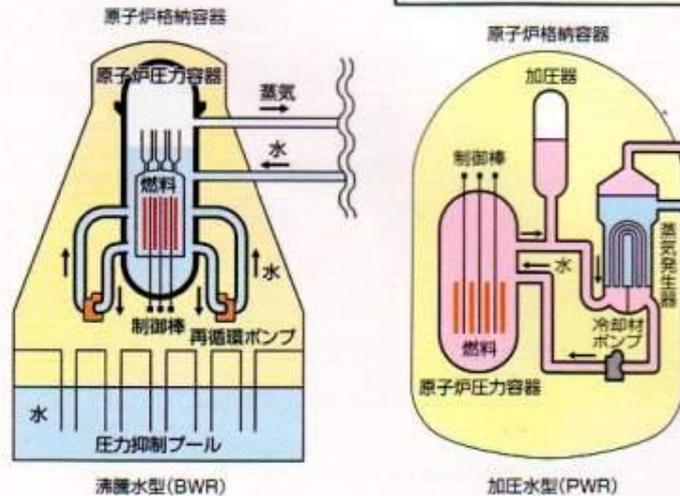
火力は熱源が化石燃料の燃焼
原子力は核エネルギー

同じ

火力



原子力



原子力発電における核エネルギーの利用

原子力発電と原子爆弾の違い

	ウラン235とウラン238の割合と核分裂連鎖反応	核分裂数の制御の方法
原子力発電	<p>ウラン235の割合が低く、中性子がウラン238に吸収されるなどの理由により核分裂が一定の規模で継続する。</p> <p>核分裂しやすいウラン235 (3~5%) 核分裂しにくいウラン238 (95~97%)</p> <p>1回目 2回目 3回目</p>	<p>制御棒が多数設置されており、また自己制御性があるため急激に核分裂数が増加することはない。</p>
原子爆弾	<p>ウラン235の割合がほぼ100%と高いため、中性子が他の物質に吸収されず、核分裂が次々起こり、一瞬のうちに爆発的にエネルギーが放出される。</p> <p>ウラン235 (ほぼ100%)</p> <p>1回目 2回目 3回目</p>	<p>制御棒が設置されておらず、自己制御性がないため、急激に増加する核分裂を止める事は出来ない。</p>

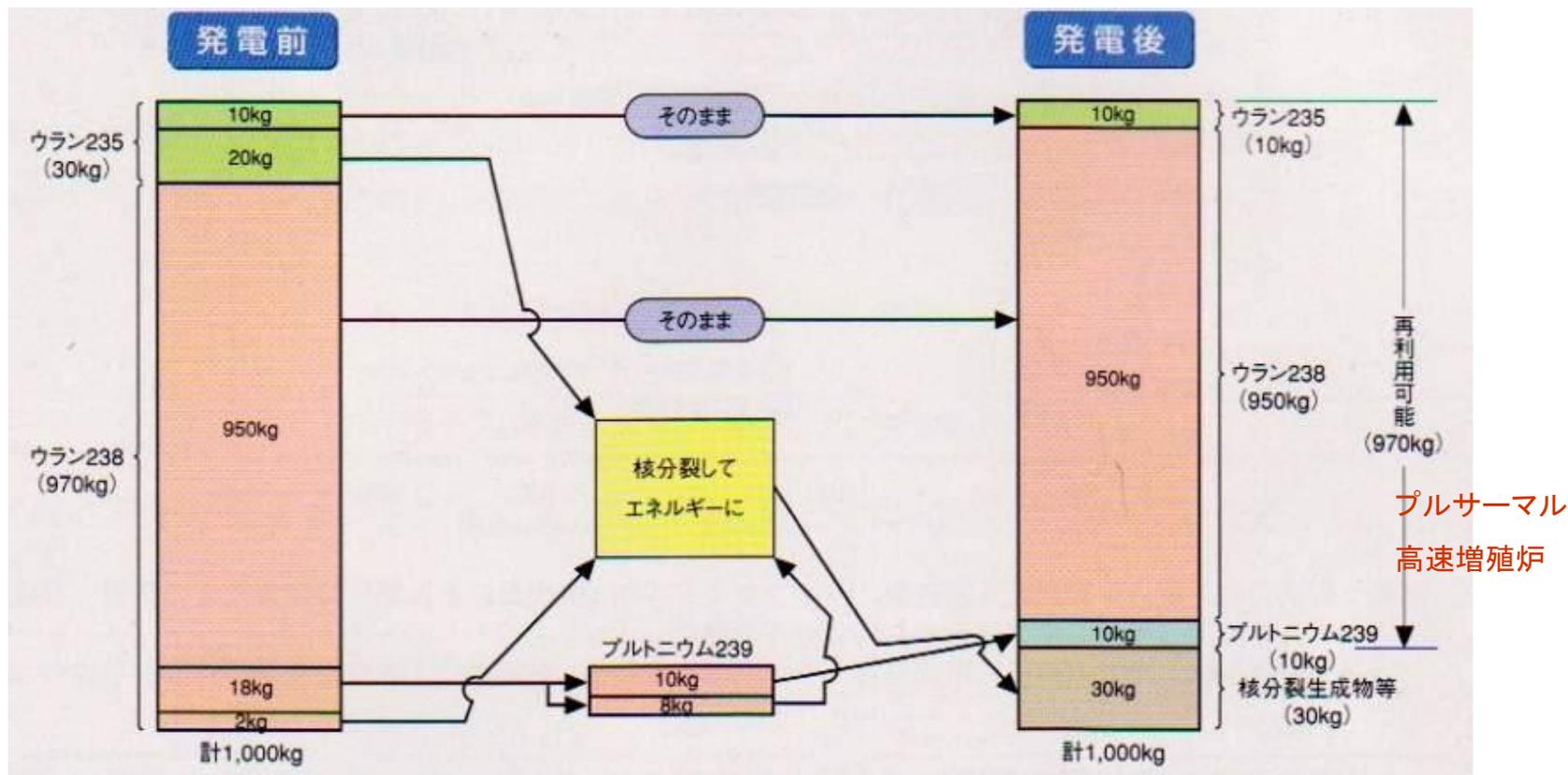
発電では急激な核分裂は起きないので安全

核エネルギーは燃焼(化学反応)エネルギー数100万倍
→少ない資源で大きなエネルギーが得られる

出典：資源エネルギー庁「原子力2008」

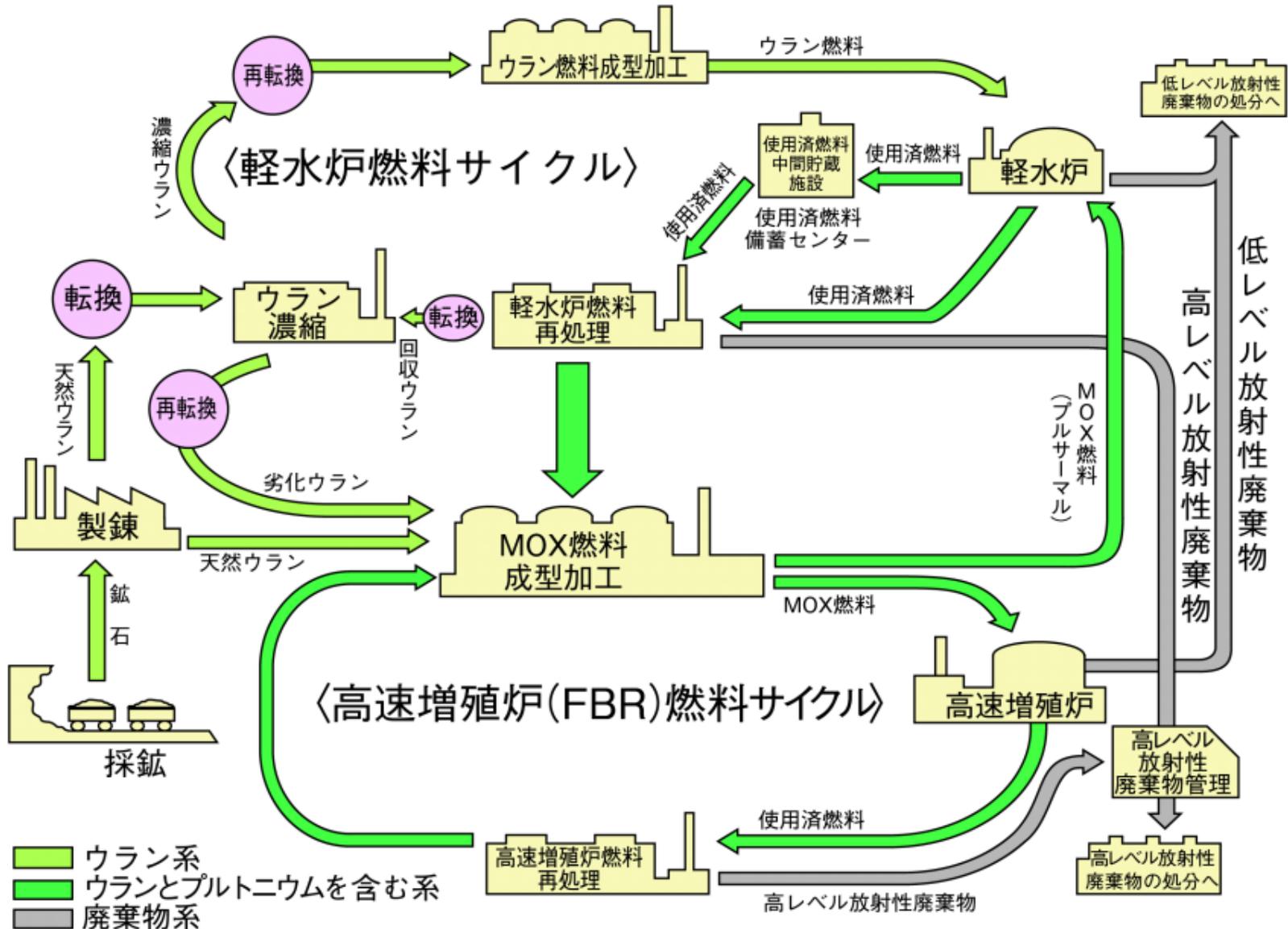
ウラン資源の有効利用

プルサーマルと高速増殖炉に向けて



高速増殖炉:天然ウランの99.3%を占める燃えにくいU238をプルトニウムに変換、利用することにより、60%程度が利用可能となる。

ウランのリサイクル利用 原子燃料サイクル



放射性廃棄物の管理と処分

- 放射性廃棄物の量
 - 一般の廃棄物とくらべ量が少ない → 管理が容易
- 廃棄物の処分は受益者負担が原則
 - 高レベル廃棄物の処分場の決定

NIMBYから**PIMBY**へ

NIMBY : Not In My Back Yard

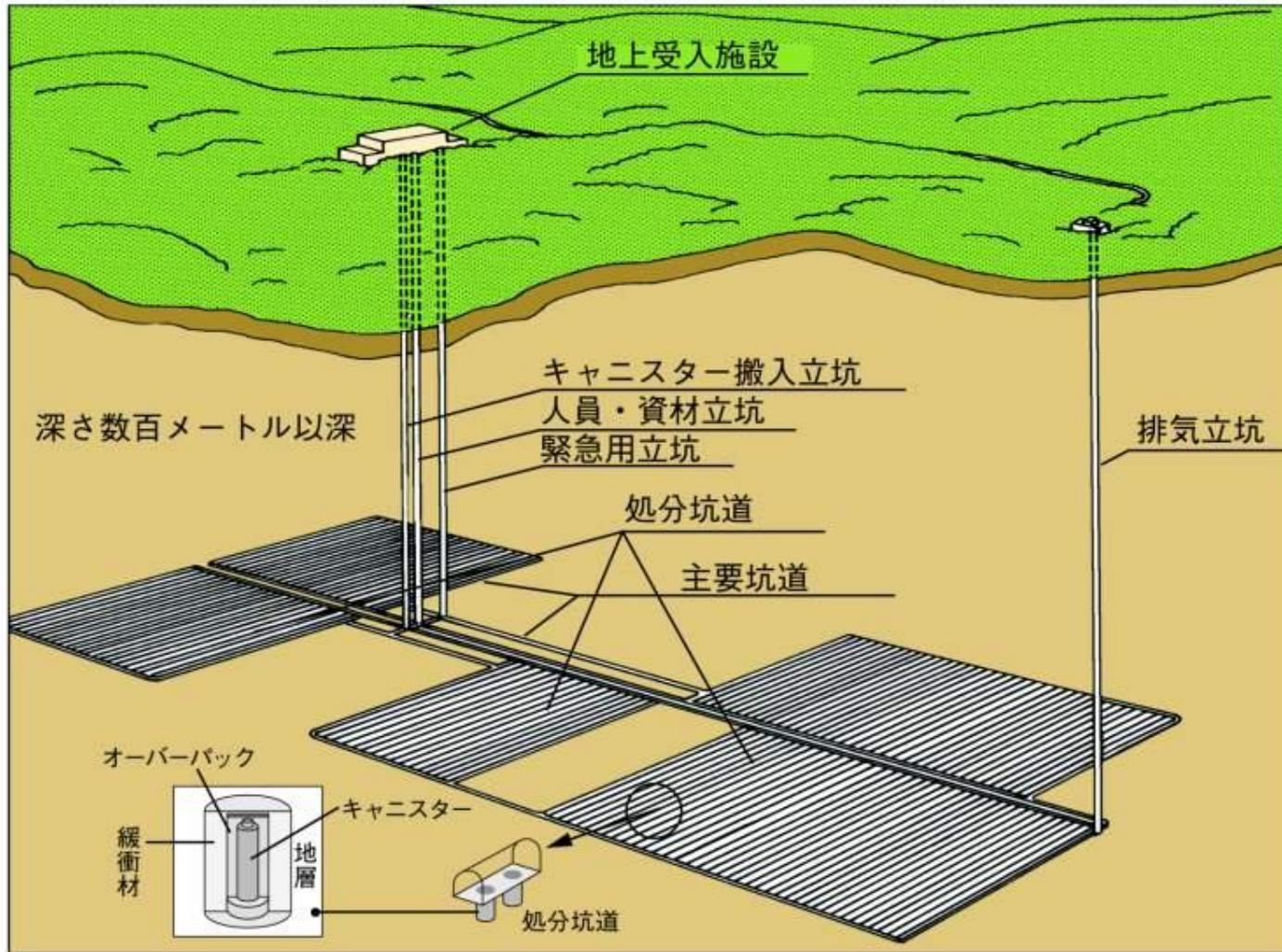
PIMBY : Please In My Back Yard

日本で発生する廃棄物の量

	発生廃棄物量 (t/日)		備考
一般 廃棄物	主に家庭から排出される生ゴミ、粗大ゴミ及びオフィスから排出される紙くずなど	138,600	平成16年度実績
産業 廃棄物	事業活動に伴って生じた廃棄物のうち、廃油、廃プラスチック、廃酸、廃アルカリなどの19種類	1,142,000	平成16年度実績
放射性 廃棄物	原子力施設の運転、保守などに伴って発生する放射性的の廃棄物	高レベル 1.4	平成12~16年度実績より推定
		低レベル 65	平成17年度実績

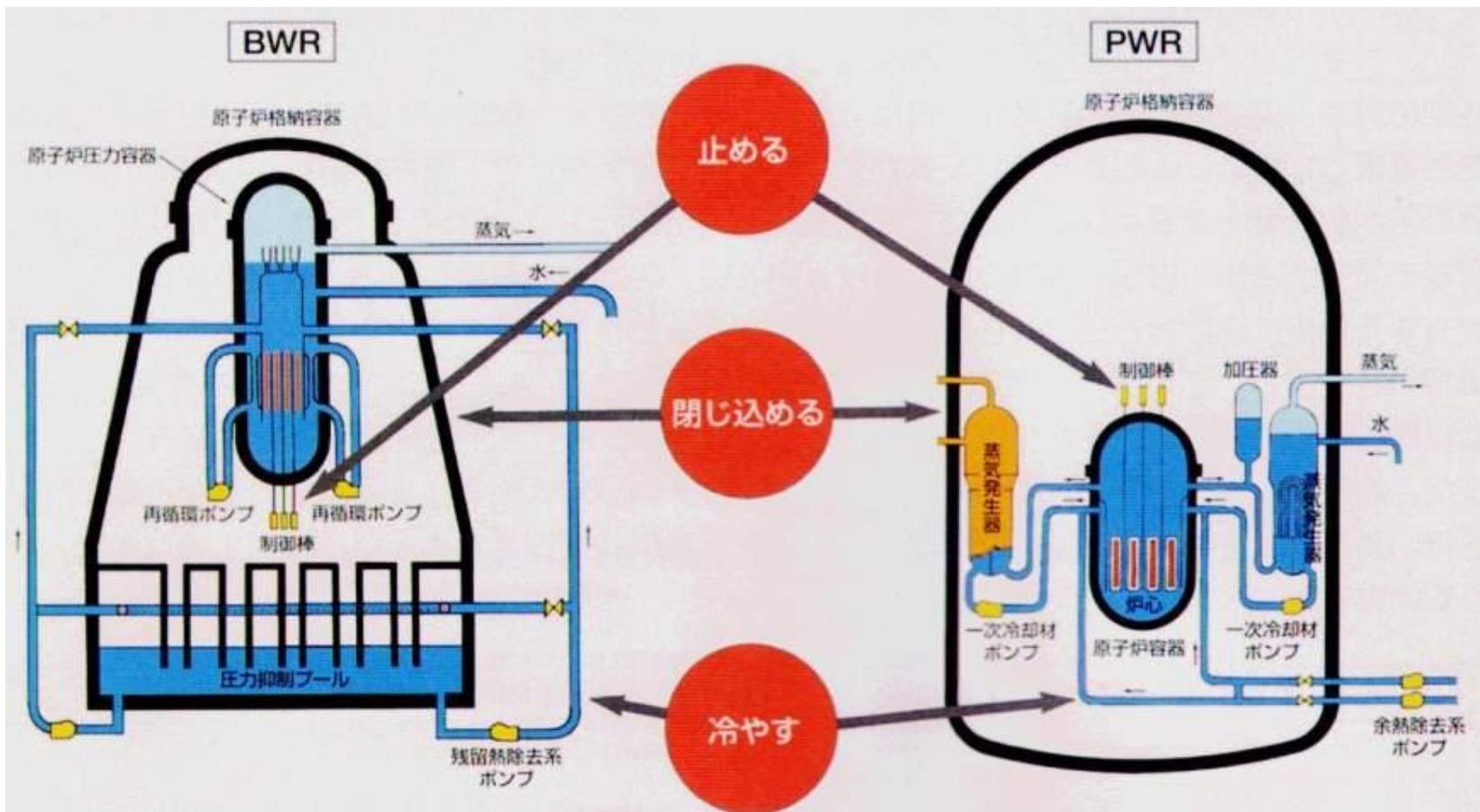
出典：環境省「一般廃棄物の排出及び処理状況（平成16年度実績）」について（平成18年6月）
 環境省「産業廃棄物の排出及び処理状況（平成16年度実績）」について（平成19年1月）
 資源エネルギー庁 総合資源エネルギー調査会 原子力部会放射性廃棄物小委員会 第2回資料（平成17年8月）
 平成17年度 原子力施設における放射性廃棄物管理状況等（経済産業省、文部科学省）平成18年報告

高レベル放射性廃棄物の地層処分の概念図



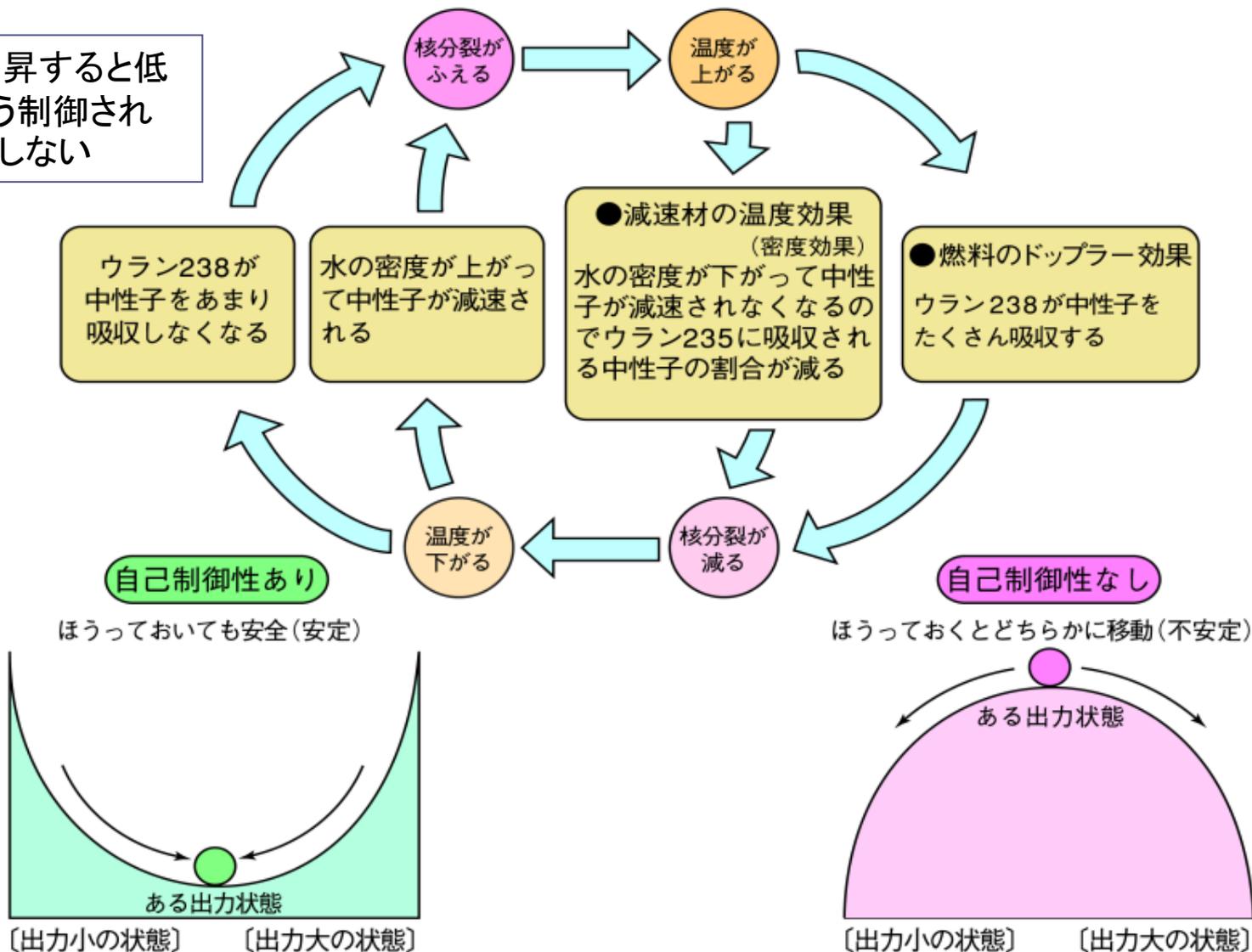
4 原子力発電の安全性と地震対策

安全性の基本 止める・閉じ込める・冷やす



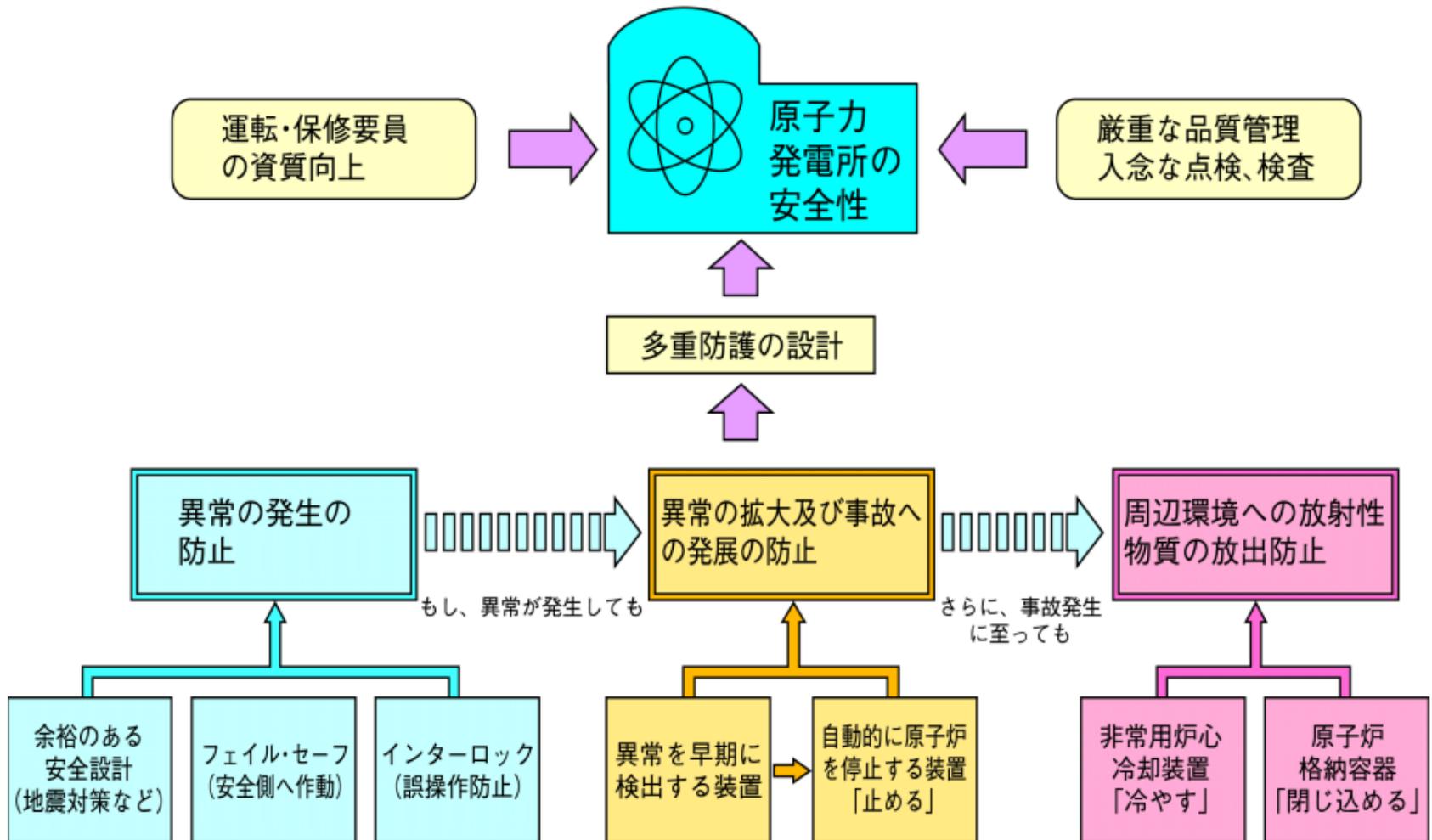
原子炉は固有の安全性をもっている **自己制御性**

出力が上昇すると低下するよう制御される→暴走しない

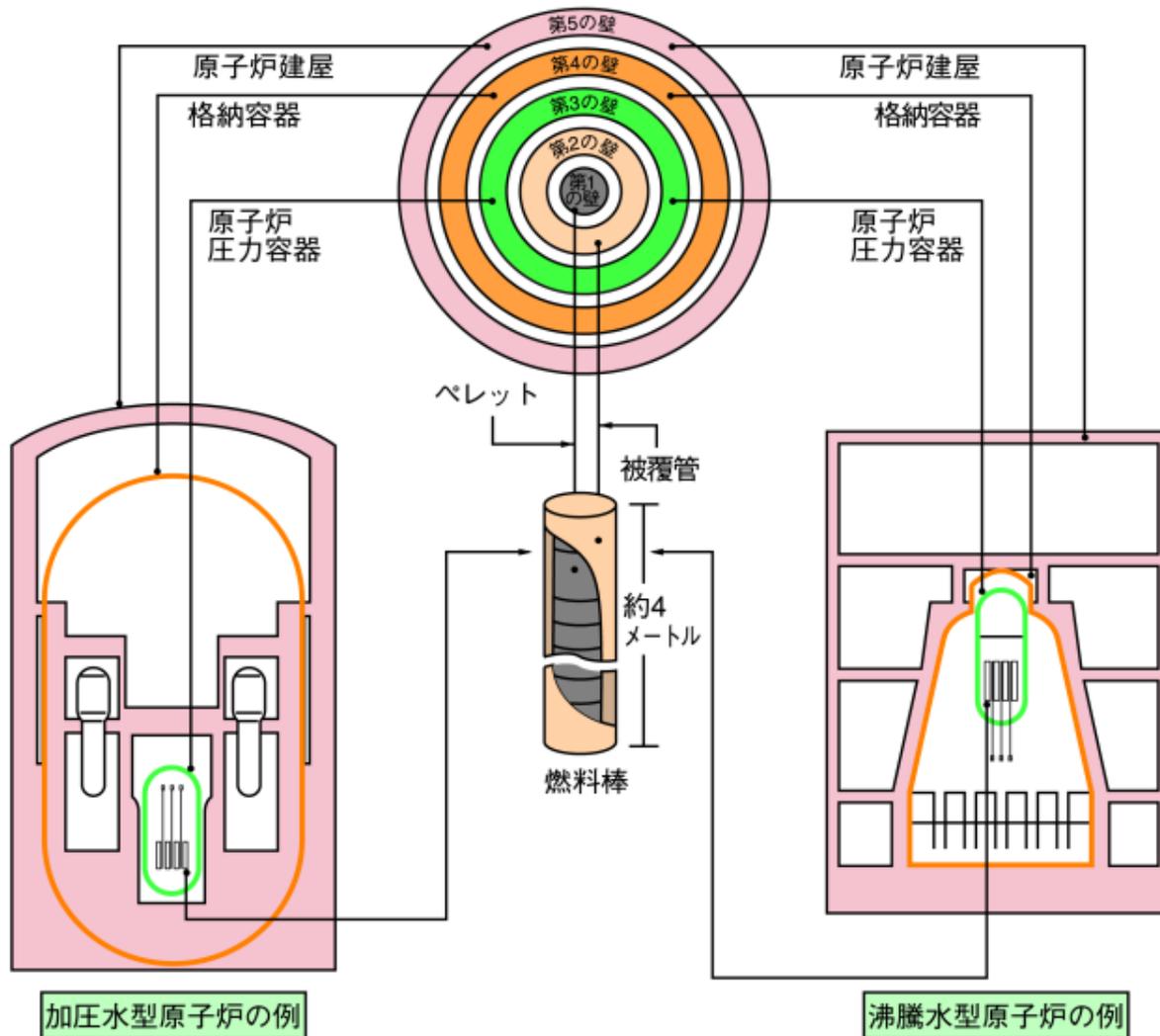


安全確保の仕組み

「機械が故障」「人間がミス」しても多重防護で異常発生防止・異常が発生しても早期検出・自動停止・「閉じ込め」機能で外部への影響防止



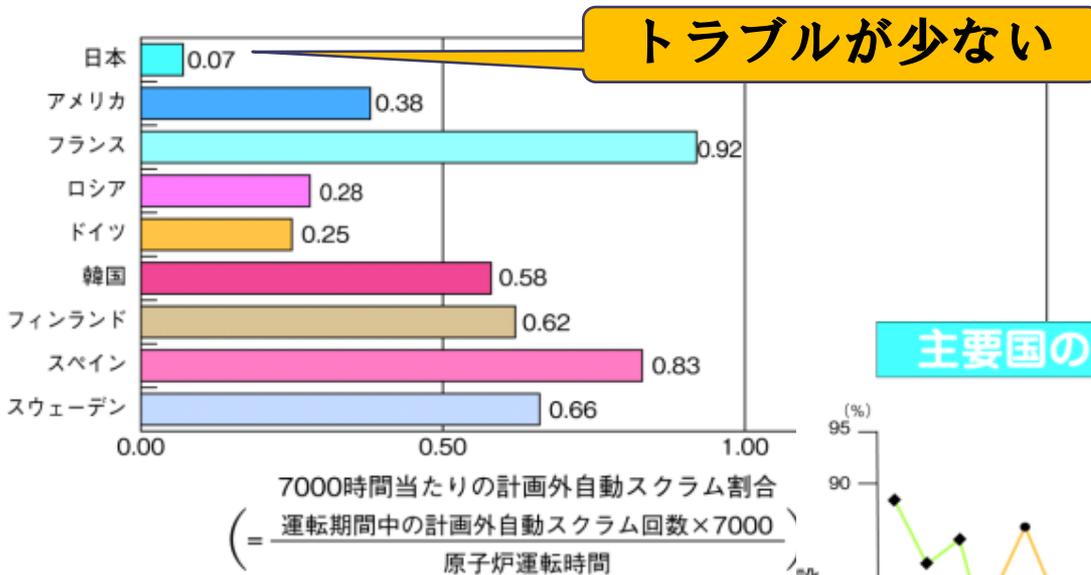
放射能を閉じ込める5重の壁



参考 日本の原子力発電所の品質は世界1流

主要国の原子力発電所の計画外自動スクラム割合

(2007年)

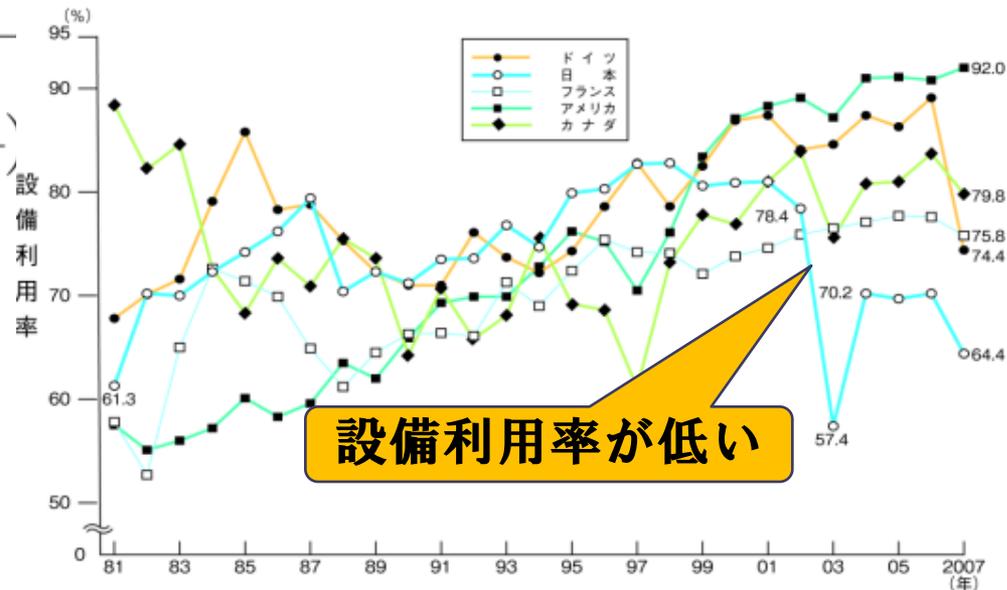


トラブルが少ない

**原子力発電の有効利用
には、設備利用率向上が課題**



主要国の原子力発電所設備利用率の推移



設備利用率が低い

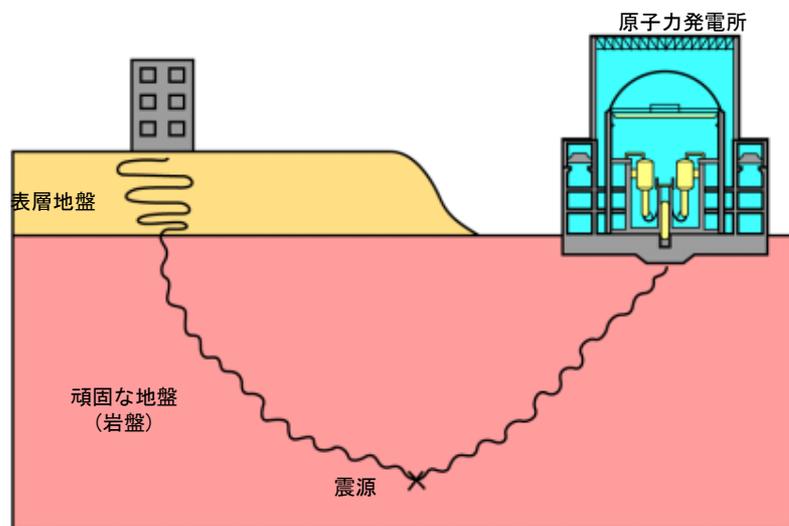
日本は計画外停止(トラブル)は少ない→高品質

にもかかわらず設備利用率が低い

地震に対する安全性

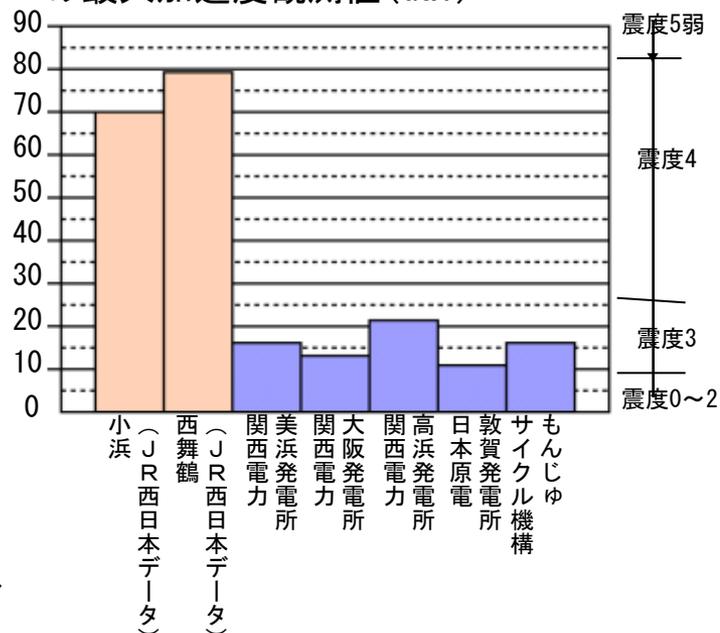
原子力発電所と一般建物の揺れの差

堅固な地盤（岩盤）上に設置した原子力発電所と一般の建物の揺れの伝わり方



堅固な地盤（岩盤）での揺れは表層地盤に比べ1/2～1/3程度

兵庫県南部地震による若狭湾周辺の最大加速度観測値 (Gal)



建物・構築物の設計

Sクラス Cクラスの震度3倍と動的解析の大きな値

Bクラス Cクラスの震度の1.2倍

Cクラス 建築基準法の震度

機器・配管は建物・構築物の1.2倍、Bも重要なものは動的解析

事例 1 柏崎刈羽原子力発電所への中越沖地震の影響と対策

中越沖地震

想定を超える地震動 (M6.8) ・ 設計を超える地震加速度

発電所への影響

重要機能は維持された結果、原子炉は安全に停止

重要機器は損傷なし 設計余裕の範囲内

一般設備は損傷

普及に時間を要し、エネルギー供給や経済的損害は大

プール水、排気筒から微量の放射能が漏れた

周辺への影響

漏れた放射能は微量で影響なし

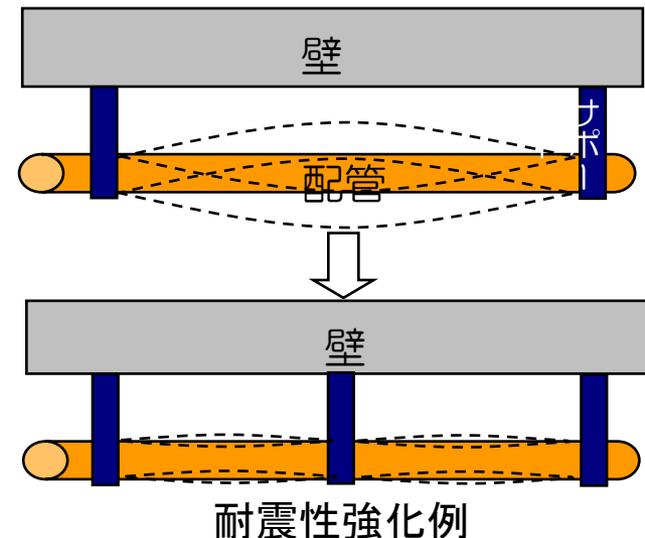
耐震安全性の強化

安全性の向上と設備損傷の低減

を目指した耐震安全対策を実施

耐震性強化、消化設備強化、

連絡網強化等



事例2 中越沖地震の影響 国内外の報道に見る微量放射能の漏洩

間違えではないが心配を煽りやすい内容、風評被害発生！

国内報道された微量の放射能

漏れたプールの水 1.2m³、9万ベクレル(Bq)

この値を読者はどう感じるか？

この値は人体の放射能より低い値！

1kg当たりだと 漏れた水 : 75Bq/kg

人体 : 120Bq/kg

仏ルモンド紙の報道例 (7月18日付記事)

最も地震の影響を受けた地域に立地する柏崎刈羽原子力発電所は損傷がなかった。初期的な火災が発生したものの迅速に消し止められ、漏洩は環境が汚染されるレベルをはるかに下回っていた

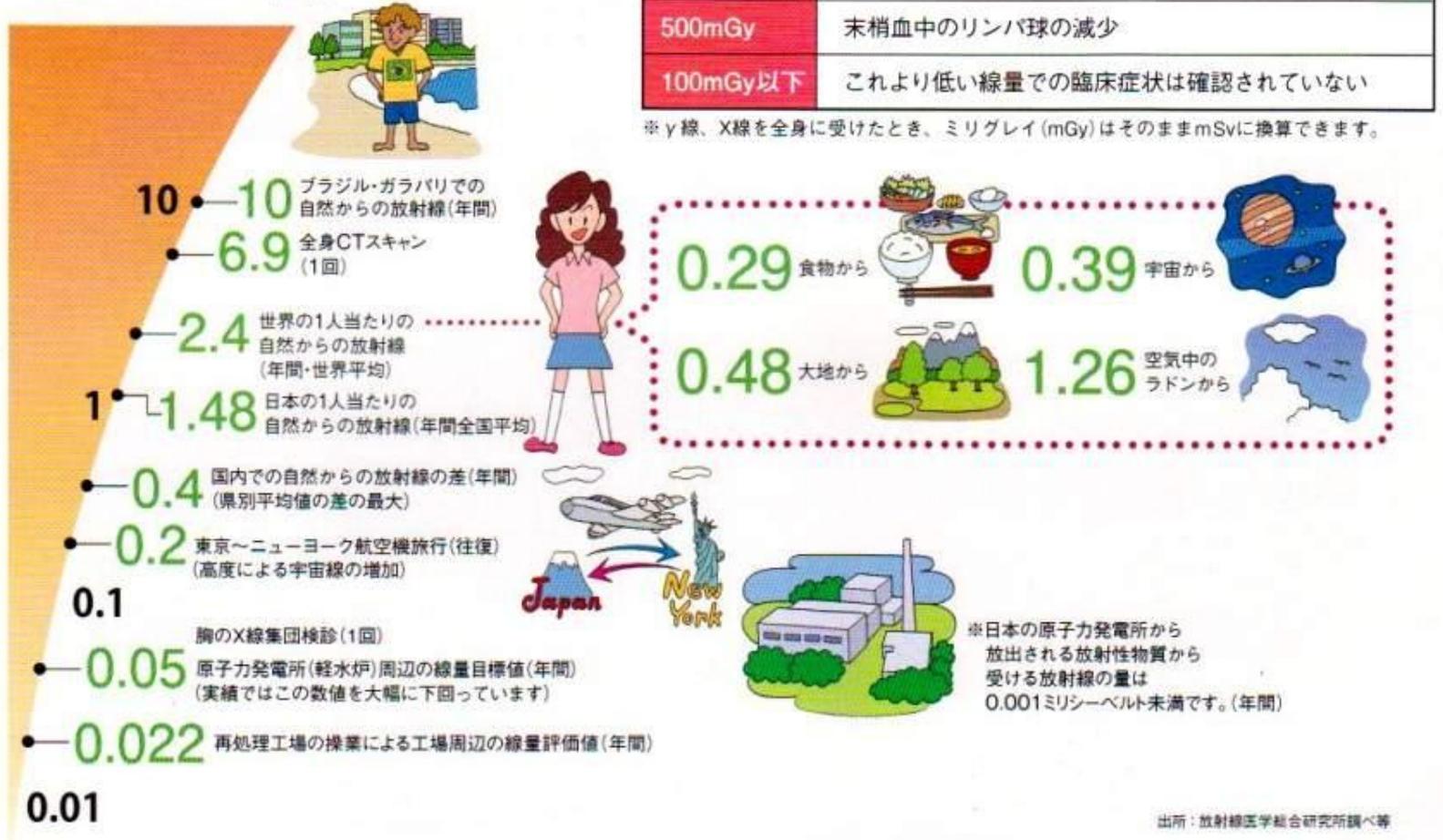
5 放射線と放射能

- 薬 少量では薬 ⇔ 大量に飲めば毒
- 放射線は？
 - 一度に大量の放射能を受けると危険
少量では体によい影響もある
- 放射能温泉 (放射能温泉)
 - 放射線ホルミシス現象
- 放射線は自然界にもある
 - 人は常に放射線を受けている 約2.4mSv/年
 - 人体にも放射能がある 約7000Bq(120Bq/kg)
- 放射線はいろいろなところで利用されている
 - 医療、検査、品種改良、食品保存、材料性質改良など

日常生活と放射線

◆放射線の量

(単位：ミリシーベルト(mSv))



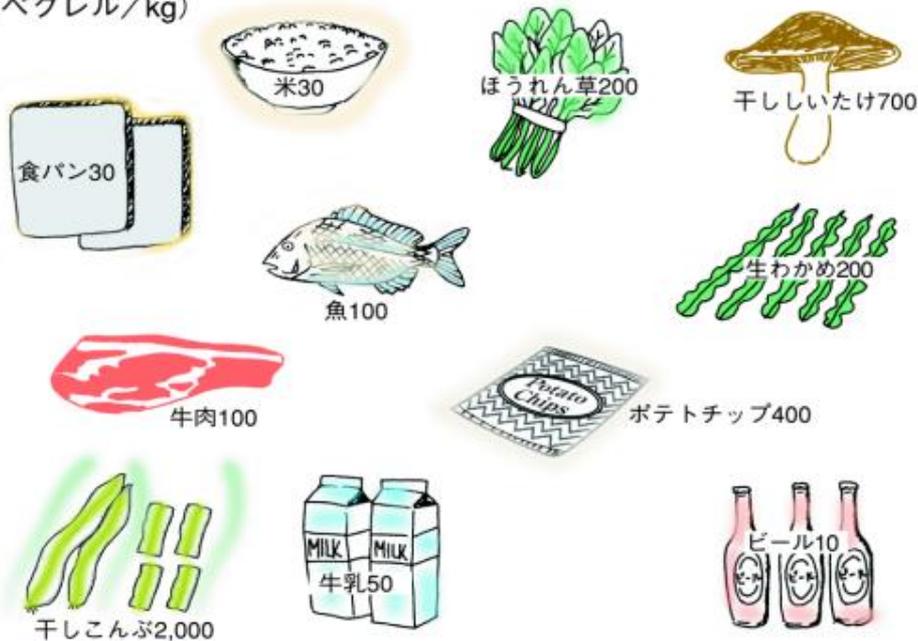
体内、食物中の自然放射性物質

- 体内の放射性物質の量
(体重60kgの日本人の場合)

カリウム40	4,000ベクレル
炭素14	2,500ベクレル
ルビジウム87	500ベクレル
鉛210・ポロニウム210	20ベクレル

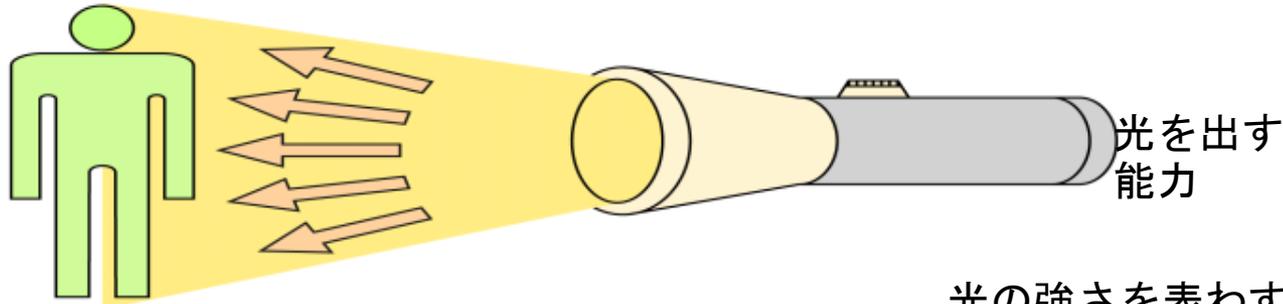
体内には約7000Bqの放射能がある。
約**120**Bq/kg

- 食物中のカリウム40の放射能量(日本)
(ベクレル/kg)



出典：旧科学技術庁パンフレット

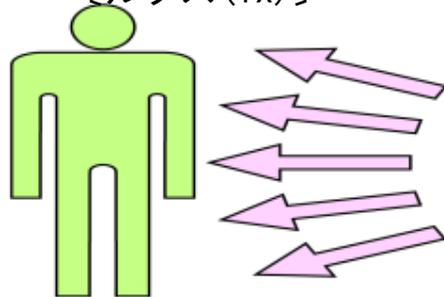
放射線と放射能



光を出す
能力

光の強さを表わす単位
〔カンデラ (cd)〕

明るさを表わす単位
〔ルクス (lx)〕



放射線を出
す能力
(放射能)*

放射能の強さを
表わす単位
〔ベクレル (Bq)〕

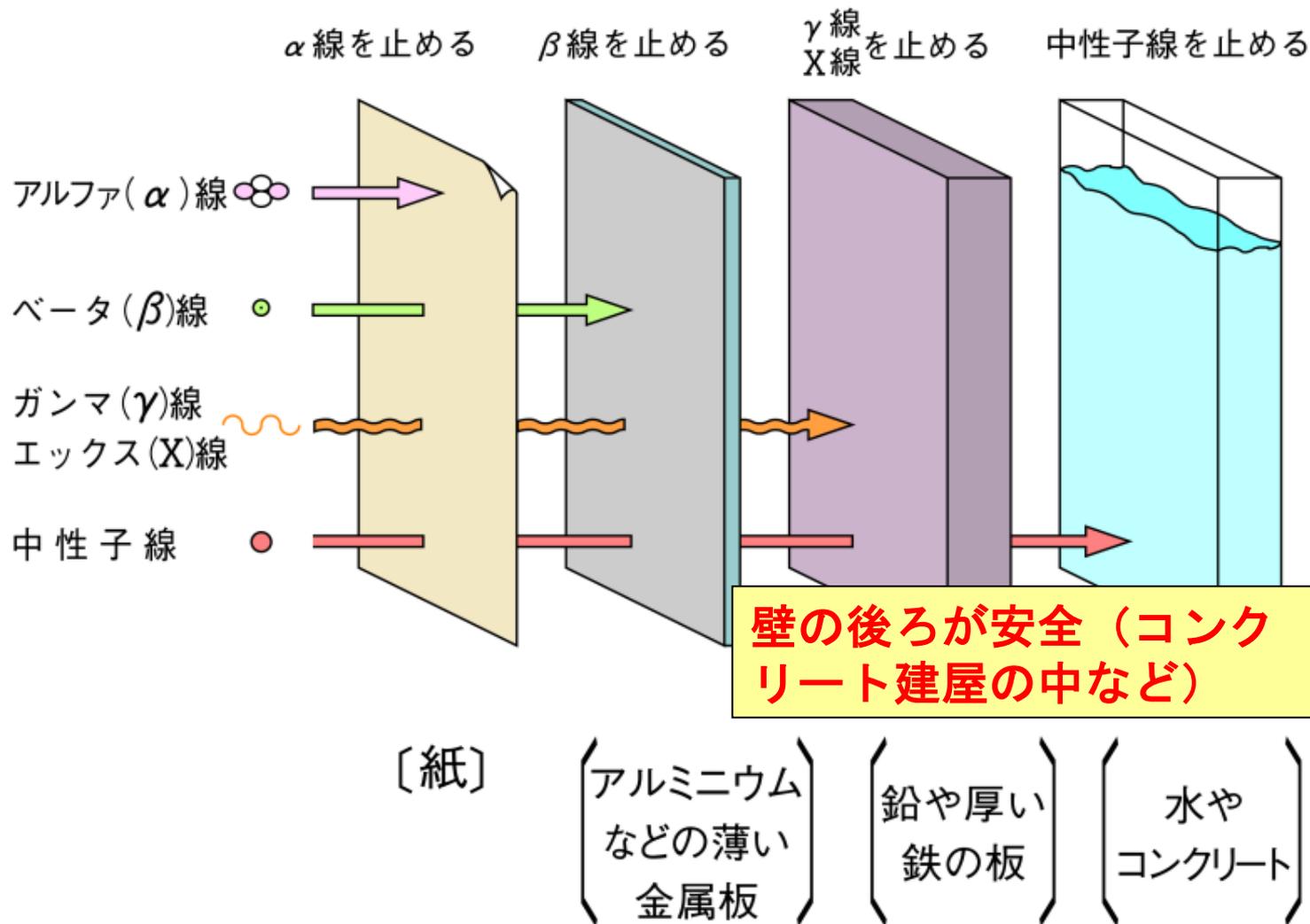
人が受けた放射線影響
の度合を表わす単位
〔シーベルト (Sv)〕

出典：資源エネルギー庁「原子力2008」

距離が離れれば減少 距離の二乗に反比例

照射される時間が短ければ減少 時間に比例

放射線の種類と透過力



放射線のいろいろな利用

農業

食品照射

品種改良

害虫の駆除

工業

半導体の加工や評価

性質の改良

非破壊検査

ゲージング(非接触測定)

病気の診断

病気の治療

医療用具の滅・殺菌

医療

年代測定

環境保全

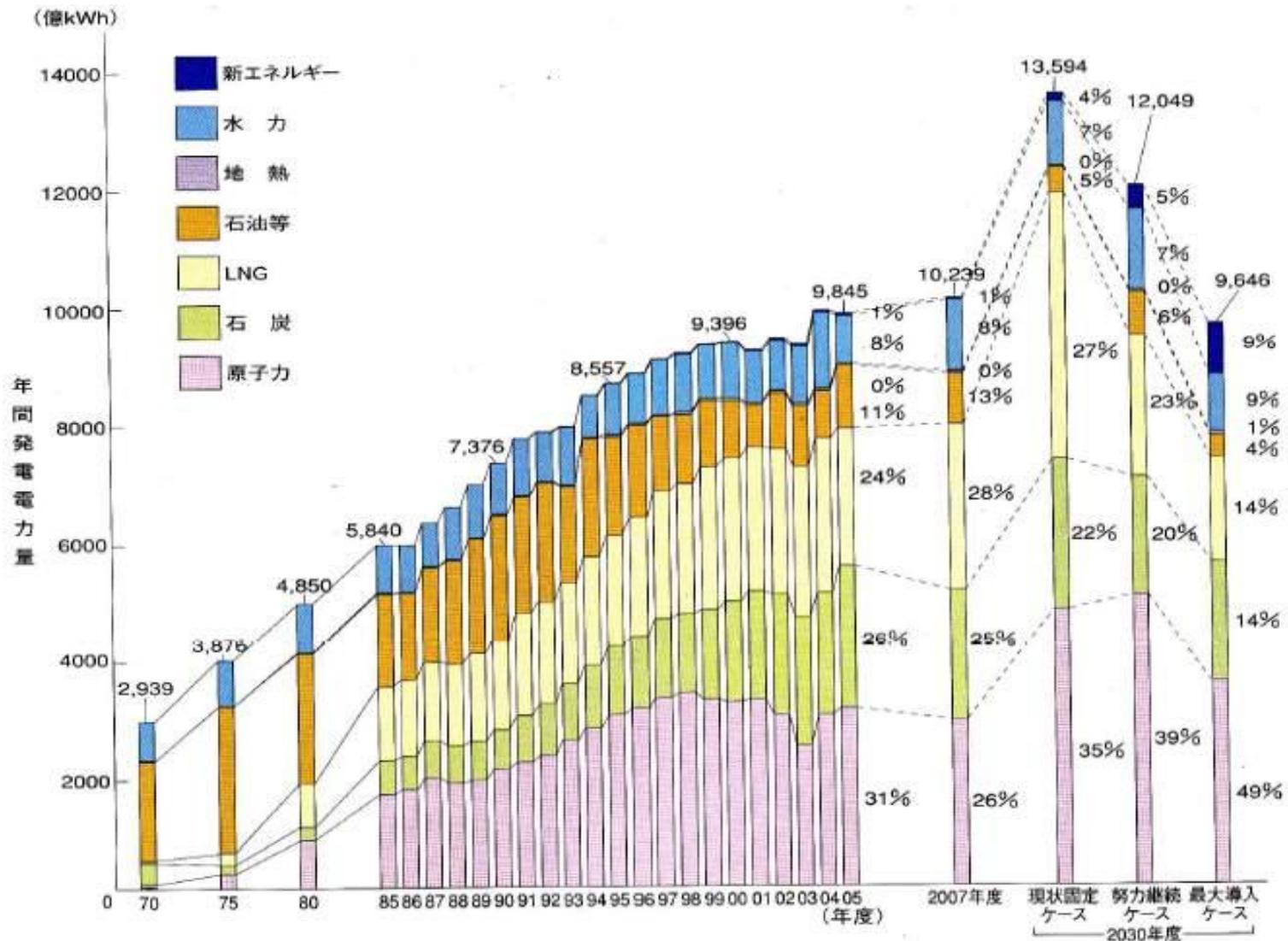
その他

放射線のいろいろな利用

6 期待される原子力

- 日本のエネルギー政策の骨子
 - 2030年目標
 - エネルギー自給率倍増 (現状18%)
 - ゼロ・エミッション電源70% (2020年50%) (現状38%)
ゼロエミッション電源：原子力と再生エネルギー
 - 暮らしのエネルギー消費によるCO2 半減
 - 産業部門は世界最高のエネルギー利用効率維持強化
 - 原子力の役割
 - 2020年 新規建設 9基 既設稼働率向上 85%
 - 2030年 新規建設 14基以上 既設稼働率向上 90%
- 世界は原子力ルネサンス

電源別発電電力量 実績と予測



世界の動向 原子力発電

エネルギーの安定供給と地球温暖化対策のため原子力に回帰

世界の原子力発電所

運転中433基 建設中・計画中は見直すたびに増加

(2009年1月1日現在)

各国の状況

米国

30年ぶりに新設計画

中国、インド

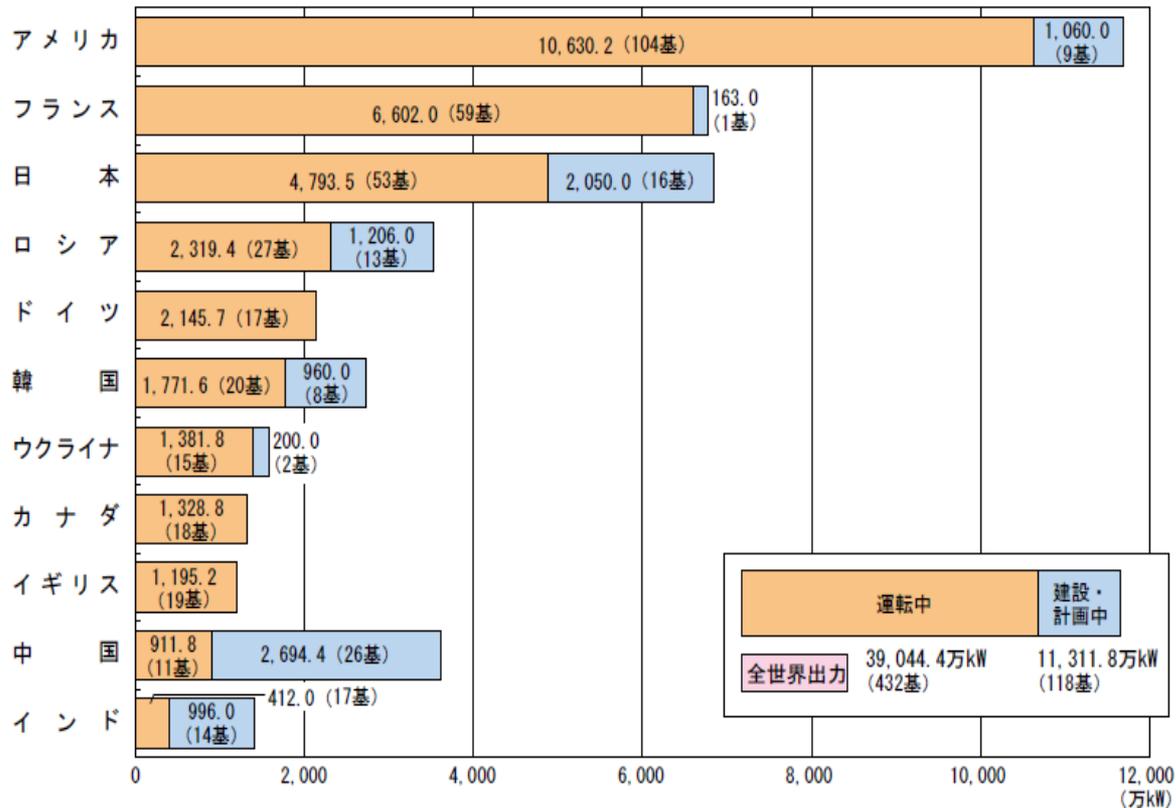
数10基の新設計画

途上国の建設受注合戦

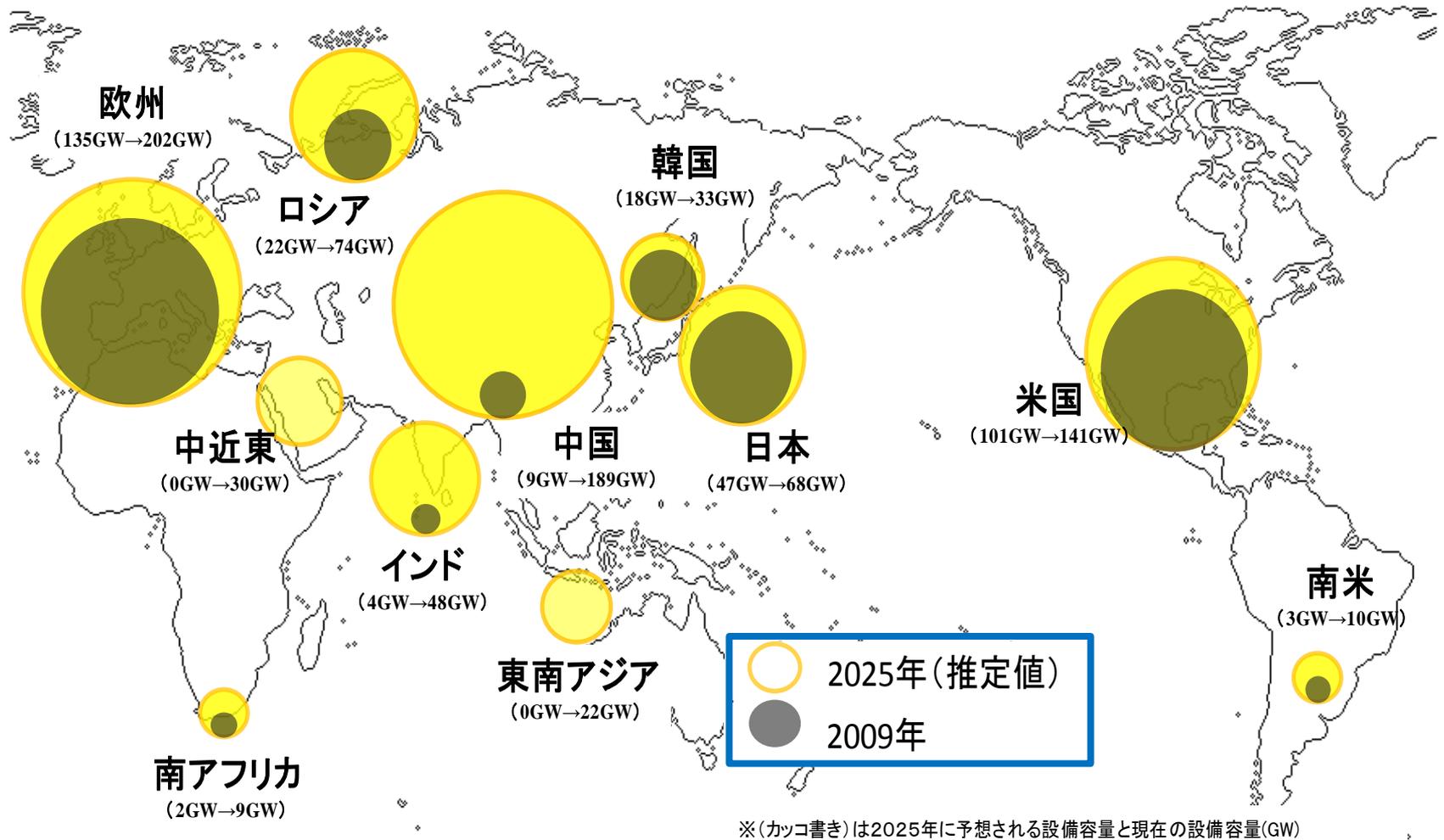
UAE: 韓国

ベトナム第1期: ロシア

ベトナム第2基: **日本**



世界各国の原子力発電所建設計画



※(カッコ書き)は2025年に予想される設備容量と現在の設備容量(GW)

世界原子力協会(WNA)2010年1月のデータを基に作成

6 まとめ

- エネルギー消費は人間活動による一暮らしが原点
 - まずは省エネルギーと効率向上
- 地球温暖化問題とエネルギー問題は同時解決は必要
 - 化石資源からゼロエミッション資源へ
 - 基幹エネルギーは原子力
 - 再生資源の賢い活用
- 原子力の活用
 - 国民の理解がかなめ
 - 報道のあり方 正確な情報・受け手が理解し判断できる表現
- 放射線を正しく理解しよう
 - 毒にも薬にもなる
 - いろいろな分野で利用されている