

2008年7月9日 総合科目「環境・エネルギー問題を考える」

原子力エネルギーの開発と利用

石渡祐樹 ishi@nuclear.jp

工学部システム創成学科環境・エネルギーシステムコース

<http://www.si.t.u-tokyo.ac.jp/ee/>

工学系研究科原子力国際専攻

<http://www.n.t.u-tokyo.ac.jp>

研究室: <http://www.nuclear.jp/~rohonbu/>

講義項目

1. 環境・エネルギー問題における原子力の意義
2. 原子力エネルギー開発の歴史
3. 原子力の安全について
4. 原子力エネルギー利用の将来展望

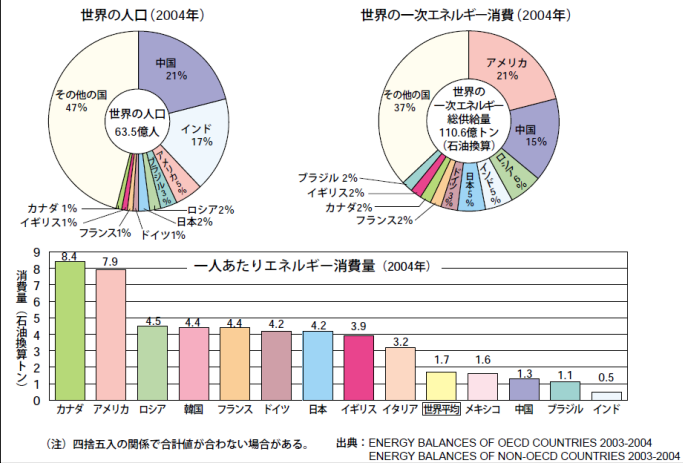
原子力エネルギーの位置づけ



Earth at Night

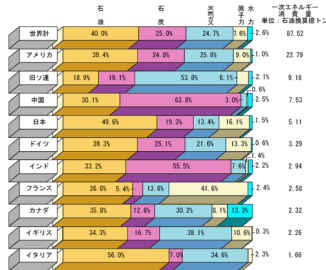
- Reference
Astronomy Picture of the Day
<http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/>

世界の人口とエネルギー消費量



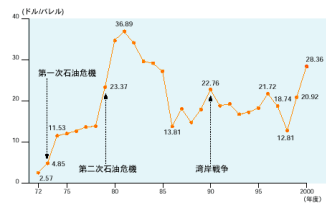
化石燃料への高い依存度と価格高騰

- 世界全体での消費量は石油>石炭>天然ガス>原子力>水力
- 石油の生産は地域的な偏りが大きく、中東地域に集中
- 中東地域の政治情勢などにより、石油価格は大きく変動する可能性がある



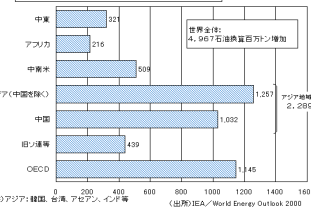
(注) %の合計が100に合わないのは四捨五入の誤差 出所「日本統計」
主要国の一次エネルギー源(2000年)

原油輸入価格の推移 (日本)



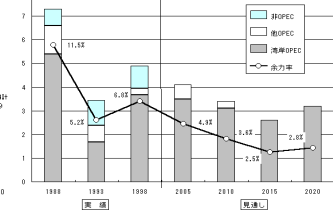
出所「日本統計」

世界各地域における一次エネルギー需要の伸び (1989年→2020年)



(注) アジア: 韓国, 台湾, アセアン, インド等 (出所) IEA/World Energy Outlook 2000

世界の原油余剰生産能力の見通し



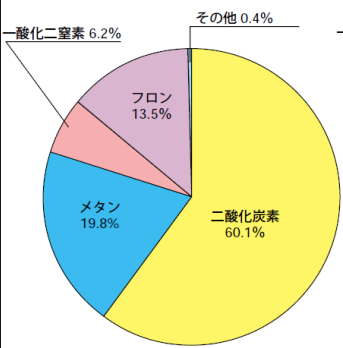
(注) IEA/World Energy Outlook 2000

世界のエネルギー需要の地域別伸び

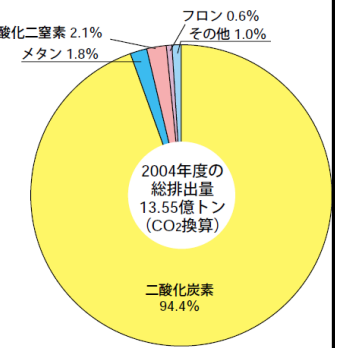
世界の原油余剰生産能力の見通し

温室効果ガスの地球温暖化への寄与度

産業革命以降人為的に排出された温室効果ガスによる地球温暖化への直接的寄与度 (1998年現在)

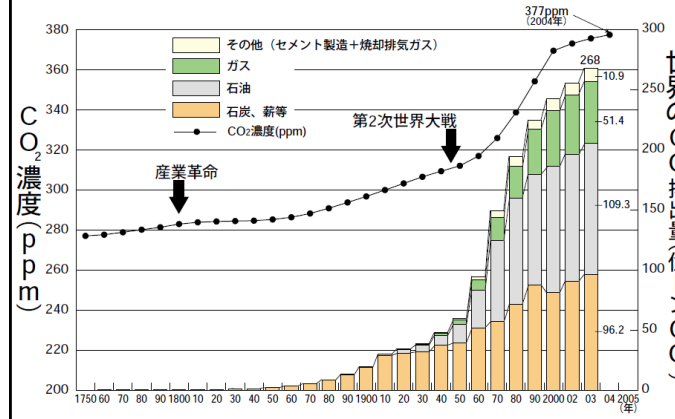


我が国が排出する温室効果ガスの地球温暖化への直接的寄与度 (2004年単年度)

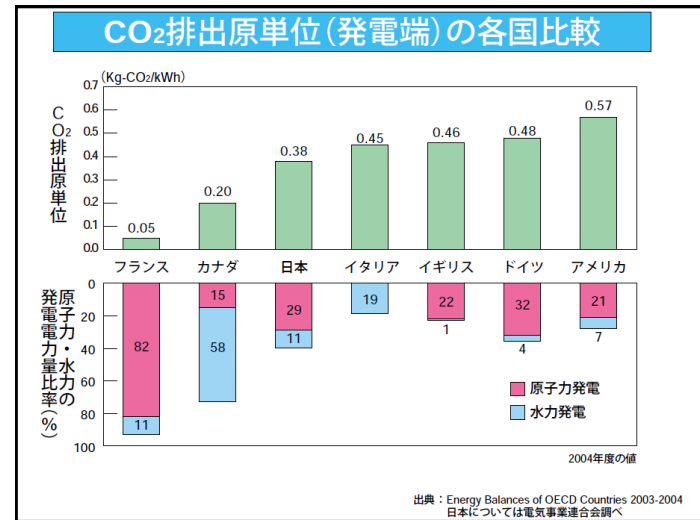
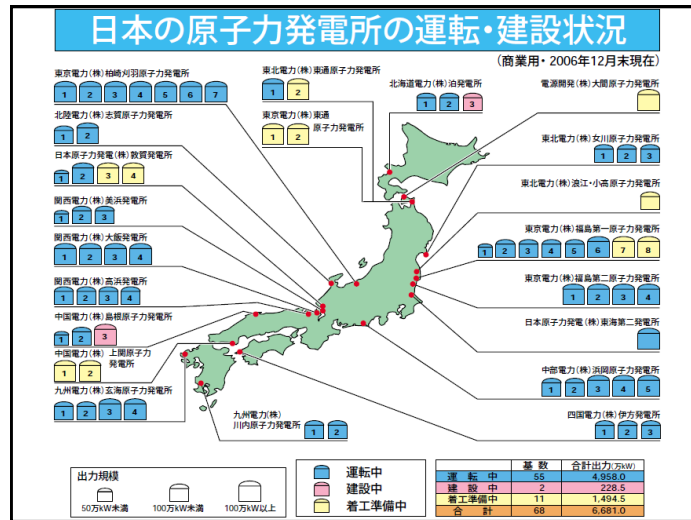
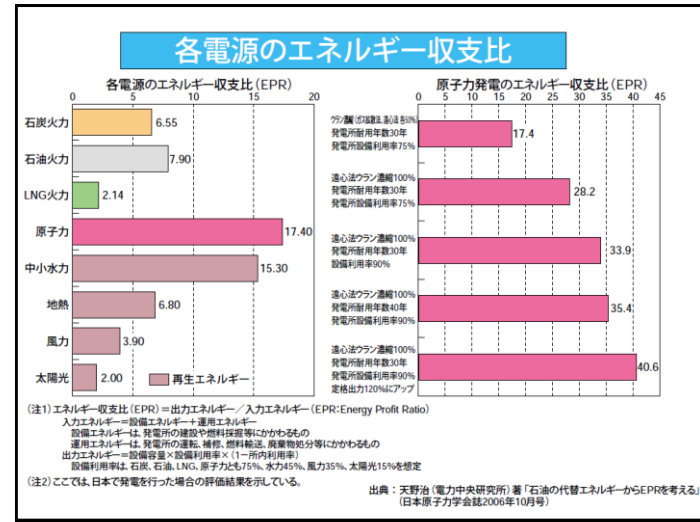
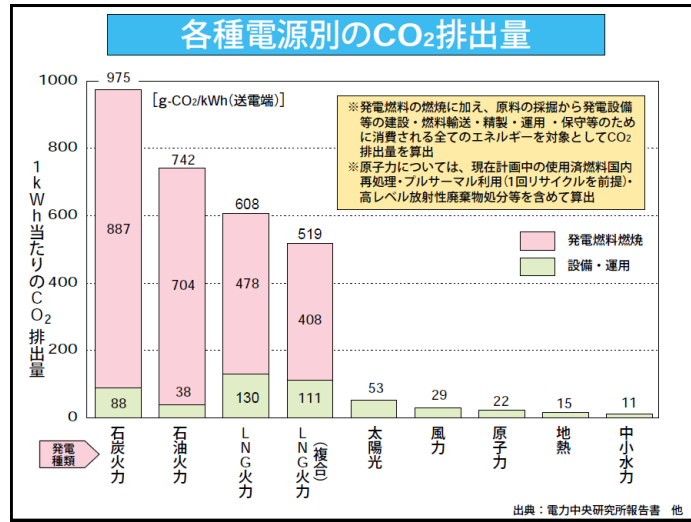


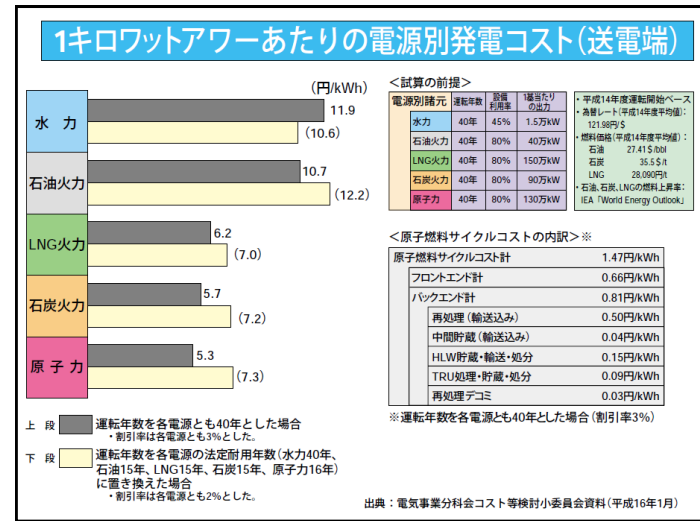
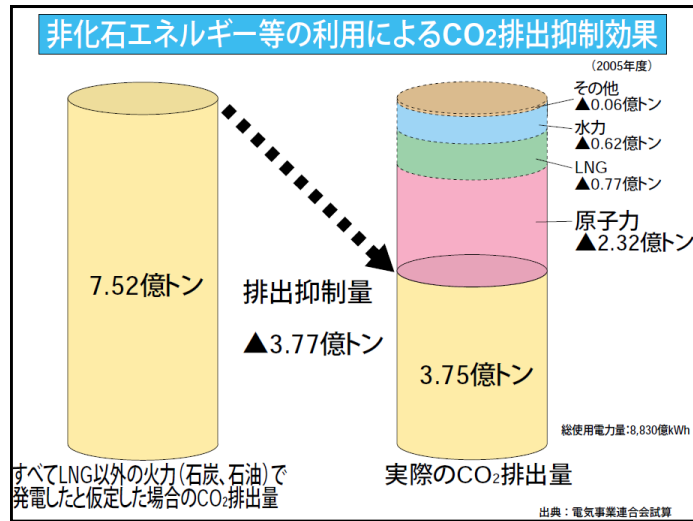
出典：平成18年版環境白書

化石燃料等からのCO2排出量と大気中のCO2濃度の変化



(注) 四捨五入の関係で合計値が合わない場合がある。出典：二酸化炭素情報分析センター (CDIAC, ORNL) -HP

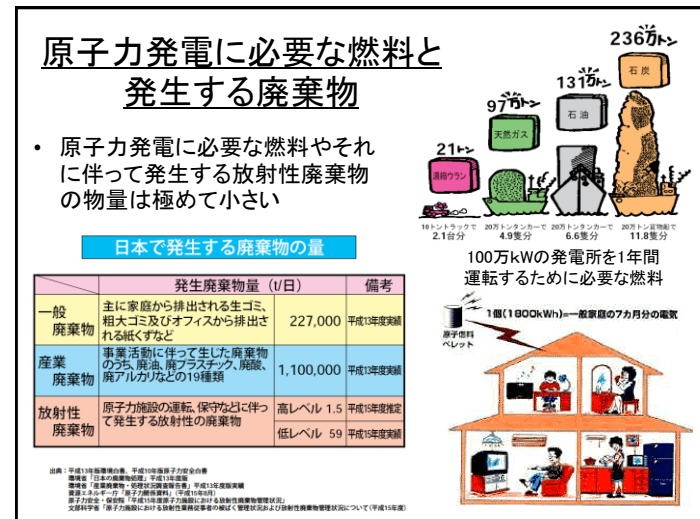




新エネルギーの現状(太陽光・風力)

	太陽光	風力
発電コスト	[住宅用] ・平均値：66円/kWh [非住宅用] ・平均値：73円/kWh	[大規模] ・10~14円/kWh [中小規模] ・18~24円/kWh
必要な敷地面積	100万kW級原子力発電所1基分を代替する場合 ・約67km ² 山手線の内側面積(約70km ²)とほぼ同じ	・約248km ² 山手線の内側面積(約70km ²)の約3.5倍
設備利用率	・12%	・20%

出典：総合資源エネルギー調査会新エネルギー部会報告書(2001年6月) ※
資源エネルギー庁「核燃料サイクルのエネルギー政策上の必要性」(2002年3月) 他 ※ ※



原子力エネルギー開発の歴史

主な出来事

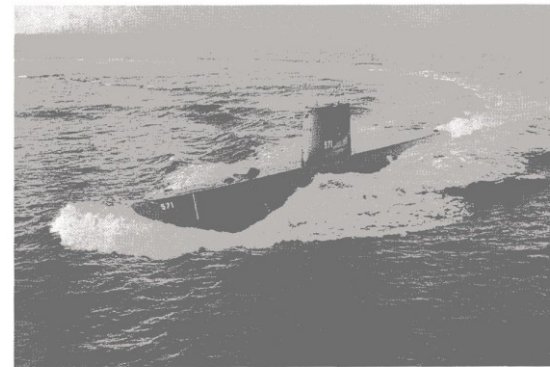
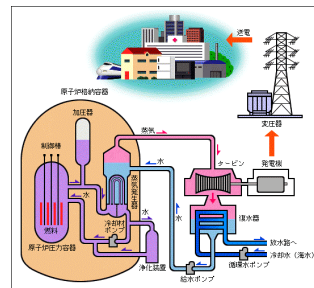
- 1938年: 核分裂現象の発見 (Otto Hahn, Lise Meitner)
- 1939年: 核分裂連鎖反応の予見 (Curie夫妻)
- 1942年: 核分裂連鎖反応の制御に成功 (Enrico Fermi)
- 1945年: 広島、長崎への原爆投下
- 1951年: 原子力「発電」に初成功 (米国)
- 1953年: “Atoms for Peace” (米国 Eisenhower 大統領)
- 1954年: 世界初の原子力潜水艦ノーチラス号進水 (米国)
- 1956年: 世界初の「商用」原子力発電 (英国)、IAEA設立
- 1957年: 世界初の加圧水型軽水炉 (米国 Westinghouse社)
- 1960年: 世界初の沸騰水型軽水炉 (米国 GE社)
- 1963年: 日本初の原子力「発電」
- 1966年: 日本初の「商用」原子力発電

加圧水型軽水炉 (PWR)

- 原子力艦艇用にアメリカのWestinghouse社が開発したものを大型化し、商業炉に実用化したもの
- 高温水の形で原子炉からエネルギーを取り出し、蒸気発生器で二次蒸気を発生してタービンに導く、**間接サイクル方式**である
- 一次系放射能が直接タービンへ行かないが、システムとしては大型化し、系統が複雑になる

世界で最も多く用いられているタイプの原子力発電プラント

日本でも関西電力、九州電力、四国電力、北海道電力、日本原子力発電(株)などが運用中



USS Nautilus at sea and at speed.

PWRの原子炉及び原子炉冷却設備

燃料集合体 **原子炉格納容器** **蒸気発生器**

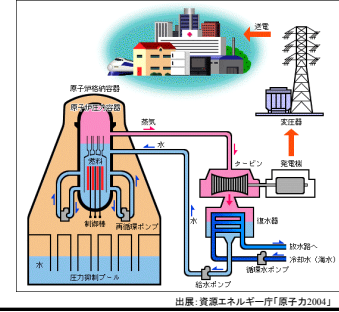
原子炉圧力容器 (PWR)
三菱の原子炉より
<http://www.mhi.co.jp/atom/hq/index.htm>

沸騰水型軽水炉 (BWR)

- 最初から経済的な発電所を目指して、General Electric社が開発
- 炉心で沸騰を起こさせ、その蒸気を直接タービンに導くため、システムとしては小型化し、系統も単純になったが、初期に多くの問題点を解決する必要があった：(原子炉の不安定性、安全性、所用の蒸気量が得られるか、タービン系の放射能)

世界で2番目に多く用いられているタイプの原子力発電プラント (特に日米で多い)

日本でも東京電力、中部電力、東北電力、中国電力、北陸電力、日本原子力発電などが運用中



BWRの原子炉及び原子炉冷却設備

原子炉圧力容器 (ABWR) **燃料集合体** **蒸気乾燥器**

原子炉内臓型冷却材再循環ポンプ

BWRのタービン系

主蒸気配管 **湿分離加熱器** 設置台数: 2台/全長: 32m/内径: 3.7m

約70cm

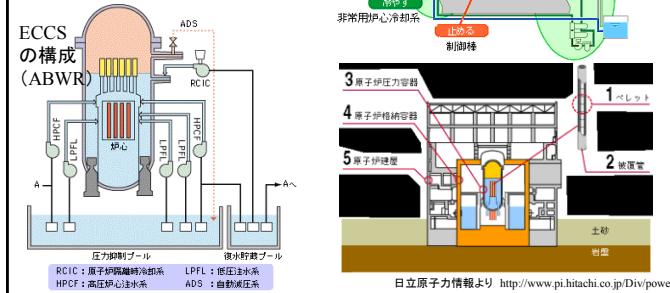
蒸気タービン
最大翼長1.3m/平均直径: 4m

「日立原子力情報」より <http://www.pi.hitachi.co.jp/Div/power/>

原子力の「安全」について

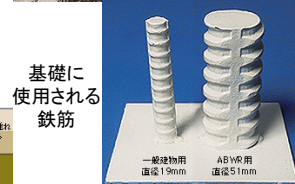
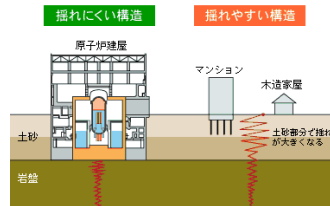
原子力発電所の安全の考え方

- 「止める、冷やす、閉じ込める」の考えのもと、**多重防護**の工夫や、**非常用炉心冷却系 (ECCS)**により安全性を確保している



基礎工事と耐震設計

- 原子炉建屋の基礎は、岩盤の上に直接設置している
- 原子力発電所の建設に際しては、その地域の過去の地震や地質の調査をおこない、建屋の下に活断層が無いことを確認するとともに、考えられる最大級の地震を想定して設計



日立原子力情報より <http://www.pi.hitachi.co.jp/Div/power/>

原子力の安全性の特徴

- 1、原爆を連想する。
- 2、放射能と放射線に対する不安感
- 3、専門的で難解
- 4、開発当初より安全性を重視してきた。

安全確保対策

- 1、原子炉と公衆の適切な距離の確保
- 2、通常運転時の公衆の被曝線量の低減
- 3、多重防護(深層防護)の考え方による安全確保
 - (1)異常の発生防止
 - (2)事故への拡大防止
 - (3)環境影響低減

耐震設計

機器を安全上の重要度に応じAs、A、B、Cのクラスに分ける。それぞれに要求される地震動や地震力に耐えるよう設計する。

As:基準地振動 S_2 に対して安全機能が保持できる。

鉛直方向地震力も考慮する。

A:基準地振動 S_1 または静的地震力(一般建築物の3倍の地震力)のいずれか大きい方に耐える。

B:静的地震力に耐える。共振も考慮する。

C:静的地震力に耐える。(一般建築物並)

下位の分類の機器の破損により上位のものが波及的に破損しないこと

リスクの認知と心理

出典:岡本浩一、リスク心理学入門、サイエンス社

- 1、災害やリスクに関する個人の態度決定や意思決定はどのような認知プロセスでなされているか?
- 2、例えば遺伝的工学に反対の人はその意見をどのように形成したか。
- 3、航空機事故の方が交通事故より何故大問題と思うか。

リスク認知と受容はすぐれて心理的要因によって決まる。自分の形成したイメージに対して反応している。

リスクとは何か

リスク専門技術者の定義;

リスク=確率(事故の発生頻度)

× 結果(公衆の死者数/事故)

経営者の定義;

リスク=経営に影響する不確定要因

リスクの受容基準の例

1. リスクと利得のバランス

利得は例えば節約された時間に時間給をかけて算出する。

2. 自然発生リスクとの比較

自然発生リスクは 10^{-6} /年

疾病リスクは 10^{-2} /年

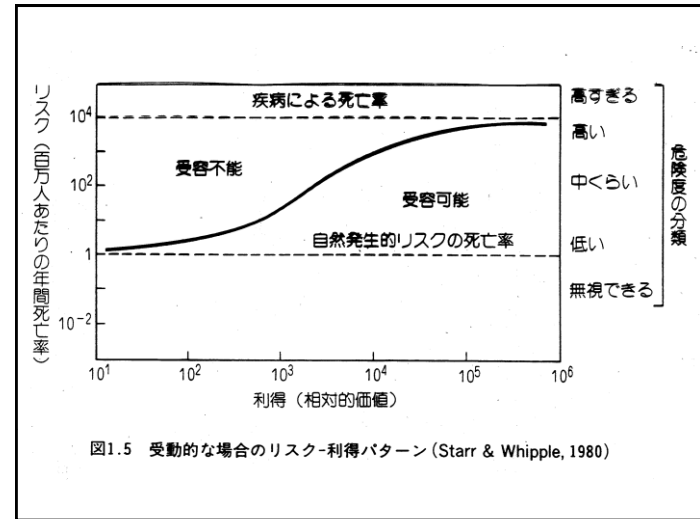


図1.5 受動的な場合のリスク-利得パターン (Starr & Whipple, 1980)

能動的リスクは受動的リスクより1000倍受容される。

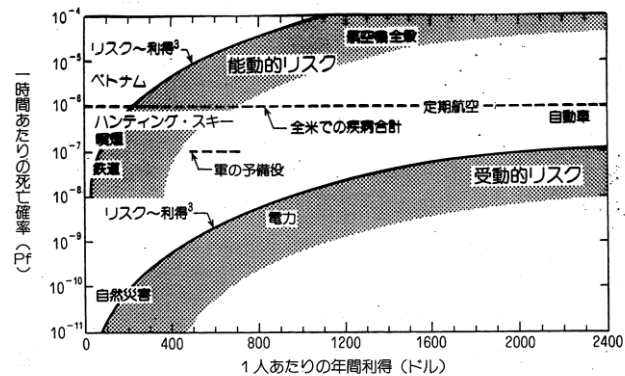


図1.1 リスクと利得のバランス (Starr, 1969)

原子力発電の安全目標(米国の例)

[定性的目標]

- 公衆の個々は、原子力発電所の運転の影響によりその**生命及び健康に有意なリスク増加がない**ように保護されなければならない。
- 原子力発電所の運転によってもたらされる生命及び健康に対する社会的リスクは、他の現実的な代替発電技術によるリスクと同程度もしくはそれ以下であり、かつ他の**社会的リスクに有意な増加をもたらされない**ものでなければならない。

[定量的目標]

- 原子力発電所近傍の平均的個人に関する、原子炉事故により生じるかもしれない急性死亡のリスクは、国民が**一般にさらされている事故による急性死亡のリスクの0.1%**を超えてはならない。(1マイル以内)
- 原子力発電プラント周辺の公衆に対する、原子力発電プラントの運転により生じるかもしれないガン死亡のリスクは、**他の全ての原因によるガン死亡のリスクの0.1%**を超えてはならない。(10マイル以内)

原子力の安全性

1. 西欧型の原子力発電では(急性)死亡した公衆なしの素晴らしい実績
2. 原子力発電は安全性やその評価(環境アセスメント)を開発初期から取り入れた最初の産業
3. 放射線被曝の影響は大線量ではよくわかっている。自然放射線被曝程度の低線量被曝の心配をすることは不合理。
4. 放射線廃棄物はきちんと管理されており処理処分できる。

原子力の安全性は実績に比較して騒ぎすぎでは？

リスクコミュニケーション専門家(公衆)によるリスクの定義:
リスク = 危険 + 強い怒り

怒りの原因

- 恐怖
- 自分自身や家族に向けられた脅威
- 失望
- 無力感
- 軽く見られているという気持ち
- 無視されているという気持ち

「未知性」と「恐ろしさ」によるリスク認知の分布

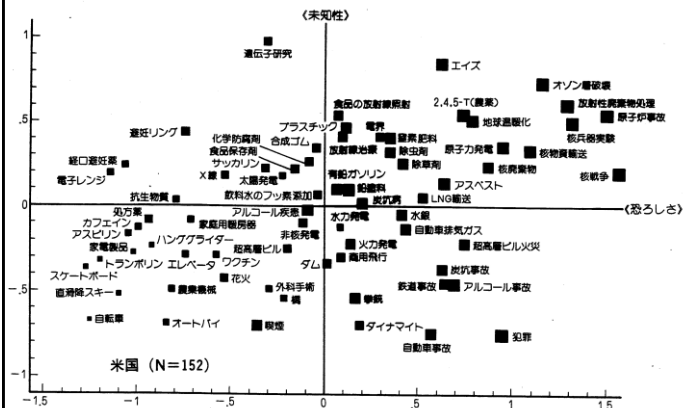


図2.6a 日米同一尺度によるリスク認知地図：アメリカ人のリスク認知 (Kleinheselink & Rosa, 1991)
■の大きさ(7段階)は、規制を緩和程度に対応している。

「未知性」因子を構成する尺度 (Slovic, 1987)

観察不可能—観察可能
身近な人が知らない—身近な人が知っている
影響が遅延的—影響が速効的
新しい—古い
科学的に不明—科学的に解明されている

「恐ろしさ」因子を構成する尺度 (Slovic, 1987)

制御不可能—制御可能
恐ろしい—恐ろしくない
世界的にカストロフィックだ—世界的にカストロフィックでない
結末が致命的—結末が致命的でない
不公平—公平
カストロフィック—個人的
将来の人類にとってリスクが大きい—将来の人類にとってリスクが小さい
リスクの軽減が容易でない—リスクの軽減が容易
リスク増大傾向—リスク減少傾向
受動的—能動的

リスクイメージの構成因子

1. 恐ろしさ因子
2. 未知性因子
3. 災害規模因子

・イメージの形成過程は個別的に見えるが、この3因子の複合による。色覚の三原色の様なもの。
・恐ろしさ、未知性の高いものには合理的と考えられる以上に高い行政期待が形成されがち

確率認知の理論

リスク忌避的なバイアスがある。

A: 確実に8万円獲得できる選択肢
B: 0.85の確率で10万円獲得できる選択肢

Aを選ぶ人が多い

ギャンブル的認知バイアス

A: 確実に8万円失う選択肢
B: 10万円失う確率が0.85あるが全く失わない確率が0.15ある選択肢

Bを選ぶ人が多い

- ・損失がなくてすむ可能性を過大視する。
- ・表現で情報操作が可能になる恐れ。

マスコミ報道のバイアス(実勢頻度との差)

- ・報道されやすい事象
殺人、溺死、火災、竜巻等
- ・報道されにくい
疾病、凍死
- ・リスク認知は実際の頻度より報道の頻度の影響を強く受ける

リスクの認知と心理

1. 能動的リスクは受動的リスクより1000倍受容される。
2. リスクのイメージは恐ろしさ因子、未知性因子により形成される。
恐ろしさ因子の高いものには合理的と考えられる以上に高い行政期待が形成されがち。
3. 生起確率の低い事象の正しい認知は困難。
4. リスク認知は実際の頻度より報道の影響を強く受ける。(逆に公衆のリスクイメージを報道が反映している)

低摂取量、低被爆量の発ガンリスク推定

方法論・問題点とその影響

発ガンリスクと摂取量、被爆量との低摂取量での直線関係は管理や規制の保守性のため用いられるが本当のところは科学的には不明。

発ガンリスクを考慮しているものが恐れられがち。

例; 農薬や環境ホルモンなどの化学物質、放射線など

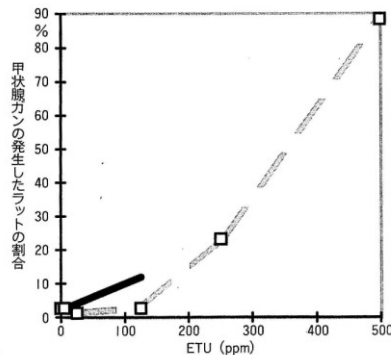


図126: エチレンオキシド(ETU)の発ガン性についてのラット研究。1日あたり摂取量(ppm)と実験後に甲状腺腫瘍を起こしたラットの割合(各グループ約70匹)。黒い直線はアメリカ環境保護局の少量投与時におけるリスク相関推定を示す。出所: Rodricks 1992: 133, EPA 1996c: 117。 出典:「環境危機をあおってはいけない、地球環境のホントの実態」ビヨルン・ロンバーク著 文芸春秋、2003年

少量摂取量、低被爆量による発ガンなど 晩発性リスク推定の困難さ

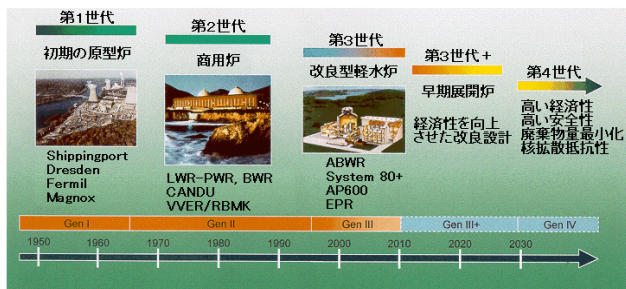
- 推定の方法論: 投与群と非投与群の発症例の統計的比較、或いは 被爆群と非被爆群の統計的比較(疫学調査)による
- 低投与量、低被爆量ではノイズ(統計的不確定性)以下の差しか出ない。
- 動物実験では致死量寸前の大量投与をしがちだが大量投与と少量投与の影響の差が不明。
- 結論としては少量摂取量、低被爆量による発ガンリスクは科学的には「わからない」

少量摂取量、低被爆リスクの規制や管理と リスク回避資源有効利用の問題

- 規制や管理の点では保守性のため少量摂取でも、摂取量とリスクに直線関係を仮定する
- 少量摂取のリスク係数を大集団に用いると大きい発ガン死者数となる。それをメディアが報道する
- 公衆は少量でも危険と思い込む。様々なリスク回避のための政府支出が適正に行われなくなる
- アルコール、コーヒー、天然物質なども発がん物質を含み、同じリスク係数を用いると多数の発ガンとなる。低線量放射線も同様

原子力エネルギー利用の将来展望

原子力技術の「世代」



第3世代原子炉(改良型軽水炉)の開発

- ABWR: GE/日立/東芝
- APWR: 三菱重工
- AP1000: Westinghouse
- ESBWR: GE/日立
- EPR: AREVA

日本の原子力事業の国際化

- 東芝によるWestinghouse社の買収
- 三菱重工とAREVA社の提携
- GE社と日立製作所の提携
 - 中国、米国等での原子力ビジネスの展開
新型原子炉の開発(途上国向け小型炉など)

BWRからABWRへの改良設計例

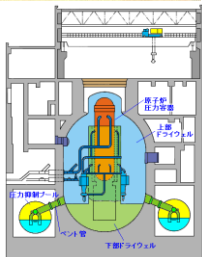
BWR中央制御盤の様子



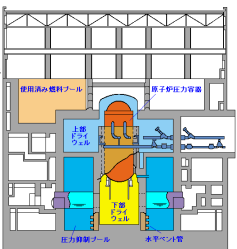
ABWR中央制御盤の様子



BWR Mark-I
改良型
格納容器



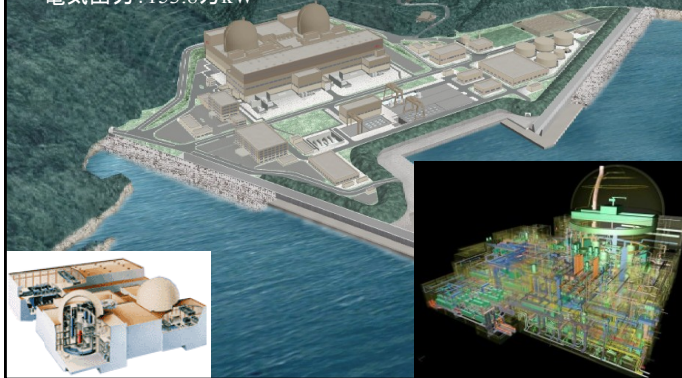
ABWR
格納容器
(RCCV)



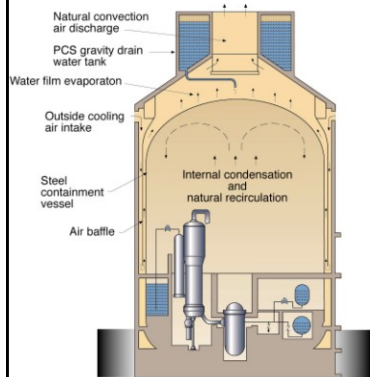
「日立原子力情報」より <http://www.pi.hitachi.co.jp/Div/power/>

大型軽水炉の開発(APWR)

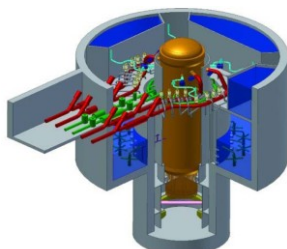
- 原子炉型式: 改良型加圧水型軽水炉 (APWR)
- 電気出力: 153.8万kW



受動安全システムを備えた新型軽水炉



AP1000



ESBWR

軽水炉の出力増強と長寿命化

- 熱出力増強 (運転経験の反映による)
- 運転保守の効率化、保全・信頼性工学
- 高経年化対策
- 運転経験データベースの作成と利用

第4世代原子炉 (GEN-IV)

第1世代
初期の原型炉

第2世代
商用炉

第3世代
改良型軽水炉

第3世代+
早期商用炉

第4世代
高い経済性
高い安全性
廃棄物発生量最小化
核拡散抵抗性

第4世代国際フォーラム (GIF)

2001年7月 憲章発行

2003

2006

米国エネルギー省原子力エネルギー科学技術局が提唱した次世代原子炉の一般的な概念

持続可能性、安全性／信頼性、経済性、核拡散抵抗性

第4世代原子炉の概念

超臨界圧軽水冷却炉

ナトリウム冷却高速炉

鉛合金冷却高速炉

超高温ガス炉

ガス冷却高速炉

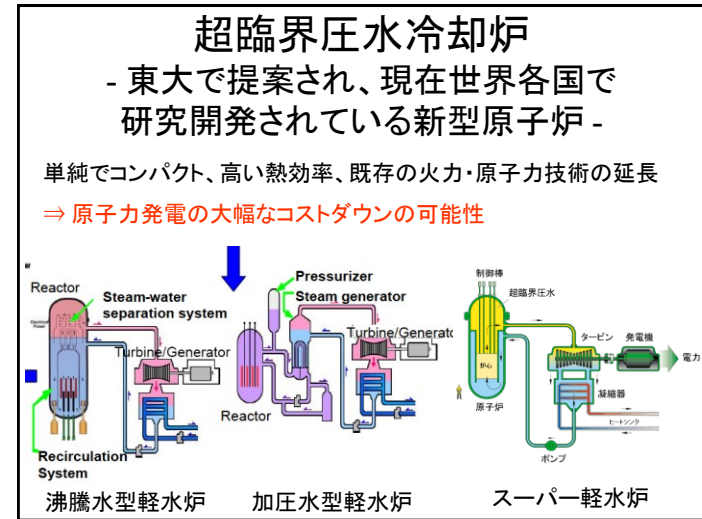
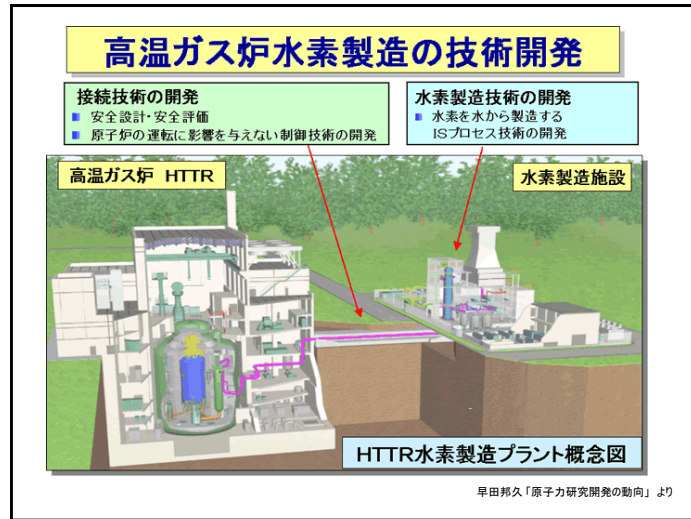
溶融塩炉

高速増殖炉「もんじゅ」

- ナトリウム冷却高速増殖炉
- 所在地: 福井県敦賀市
- 熱出力: 714MW / 電気出力: 280MW
- 1994年4月初臨界
- 1995年12月8: 2次系ナトリウム漏洩事故
- 2005年2月7日: 「もんじゅ」改造工事を承

高温工学試験研究炉 (HTTR)

- 所在地: 茨城県大洗 (日本原子力研究所)
- 熱出力: 30MW
- 冷却材: ヘリウムガス (4MPa, 395/850-950°C)
- 平成10年: 初臨界
- 平成15年: 原子炉出口冷却材温度950°C達成



- ## まとめ：原子力発電の役割
- **温暖化防止**を図りつつ、途上国の人口増加に対応し生活水準の向上を図るのは21世紀の課題。
 - **BRICSを含む途上国の経済発展**に伴い、域外エネルギーの奪い合いが生じつつある。
 - 原子力発電は**エネルギー安定供給**と豊かな生活に寄与。
 - 原子力発電は温暖化ガスを放出せず、**化石燃料資源を後世に残せる現実的エネルギー**。
 - 原子力技術は**世界中どこでも利用可能であるべき**。
 - 安全性、環境負荷低減性、経済性、はもとより原子力に織り込み済みだが、今後ますます向上すべく開発が進められている(第3世代+、第4世代)。
 - 原子力発電の公衆・社会への**リスクは十分低い**。パブリック・コミュニケーションによる**「安心」と「ポジティブなイメージ」**の形成が鍵