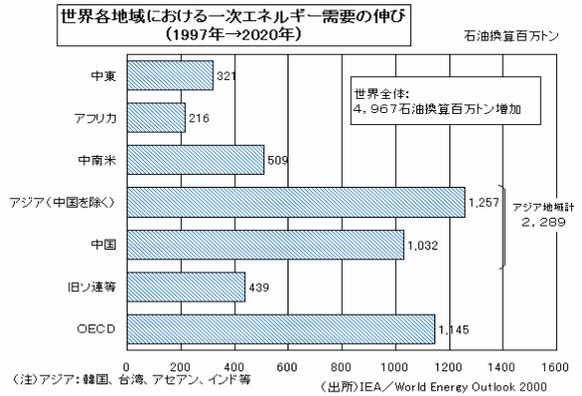
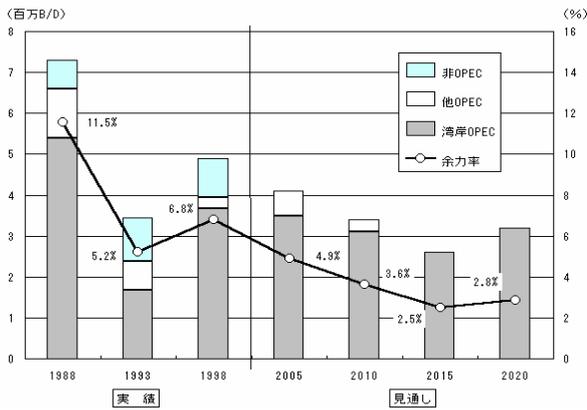


# 原子力エネルギーの開発と利用

工学部システム創成学科環境・エネルギー (E&E) 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/>  
原子力専攻; <http://www.nuclear.jp/professional/>  
岡 芳明; [oka@utnl.jp](mailto:oka@utnl.jp)、岡 研究室; <http://www.utnl.jp/~rohonbu/>



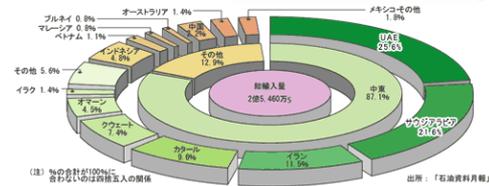
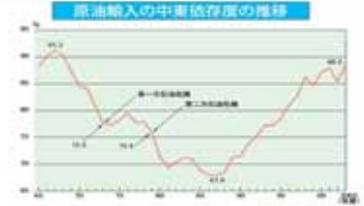
【世界のエネルギー需要の地域別伸び】



【世界の原油余剰生産能力の見通し】

## 中東依存性の高い石油

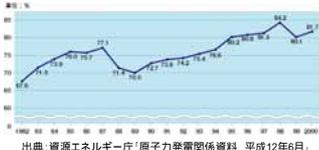
- 産油国への経済協力などの国際協調や、石油の輸入先の分散化が必要



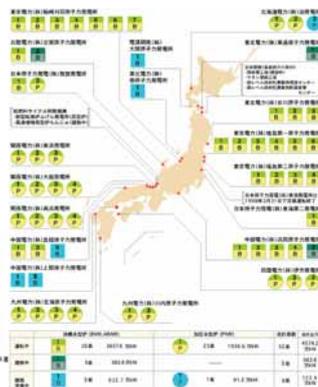
日本の石油の地域別輸入比率 (2000年度)

## 原子力エネルギー

- 資源に乏しい日本では非化石エネルギーの中核
- 準国産エネルギー
- 52基、4,574.2万kWが運転中(2002年1月現在)
- 発電電力量は全体の約34% (2000年度)
- 設備利用率は定期検査期間を除けばほぼ100%

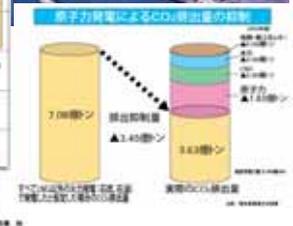
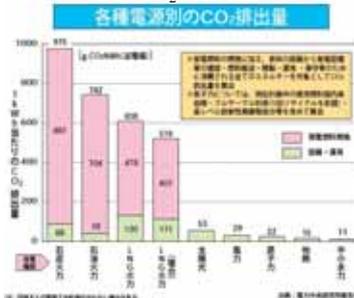


原子力発電の設備容量と設備利用率 (電気事業用) 日本の原子力発電所 (2002年1月現在)



## 原子力発電の導入によるCO2排出量削減

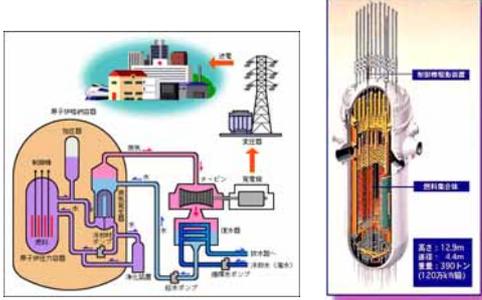
- 原子力については、現在計画中の使用燃料国内処理・プルスーマル利用 (1回リサイクル前提) 高レベル放射性廃棄物処分を含めてCO<sub>2</sub>排出量を算出



## 加圧水型軽水炉 (PWR)

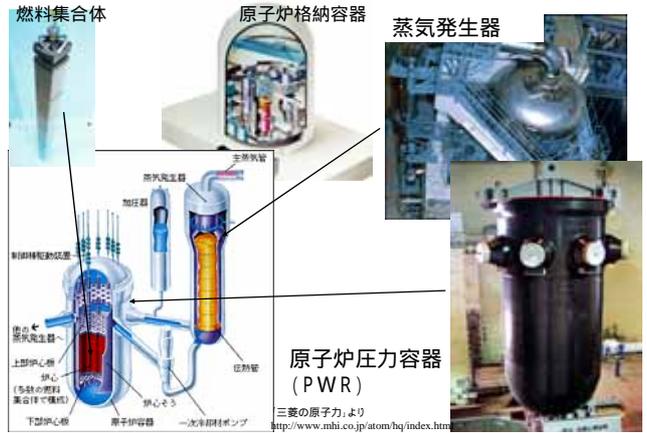
- 元来、原子力艦艇用にアメリカのWestinghouse社が開発したものを大型化し、商業炉に実用化したもの
- 高温水の形で炉心からエネルギーを取り出し、蒸気発生器で二次蒸気を発生してタービンに導く、**間接サイクル方式**である

このため、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



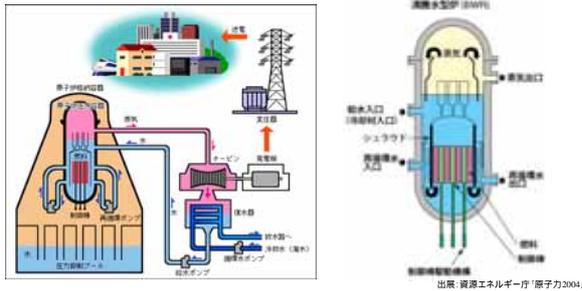
出典: 資源エネルギー庁「原子力2004」

## PWRの原子炉及び原子炉冷却設備



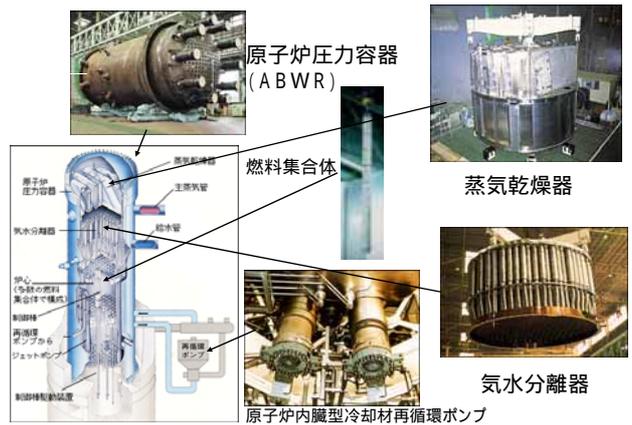
## 沸騰水型軽水炉 (BWR)

- 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)

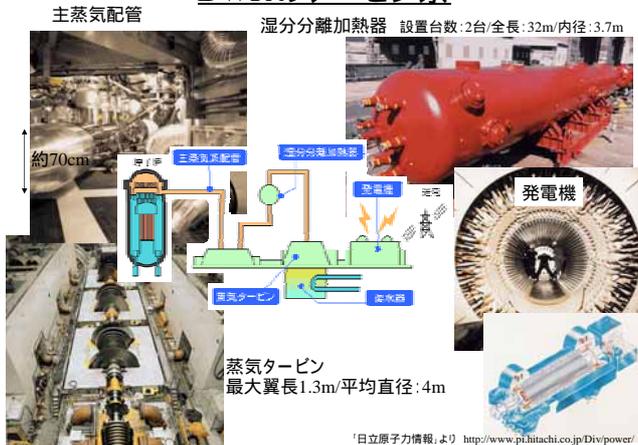


出典: 資源エネルギー庁「原子力2004」

## BWRの原子炉及び原子炉冷却設備



## BWRのタービン系



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

## 原子力発電に必要な燃料と発生する廃棄物

- 原子力発電に必要な燃料やそれに伴って発生する放射性廃棄物の物量は極めて小さい

日本で発生する廃棄物の量		
種類	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	227,000 平均1000トン
産業廃棄物	事業活動に伴って生じた廃棄物のうち、金属、プラスチック、紙類、廃アルミが大部分の種類	1,100,000 平均1000トン
放射性廃棄物	原子力施設で運転、保守に伴って発生する放射性の廃棄物	高レベル: 1.5 平均1000トン 低レベル: 10 平均1000トン



## 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

## 異常の発生防止

- 1、原子炉に自己制御性があること  
負の出力係数(負のフィードバック特性)を持つ設計
- 2、余裕のある設計  
許容応力、設計外力、電流量などに余裕をとる
- 3、高い信頼性を持つ機器を用いる  
品質保証、技術基準・規格、保守点検
- 4、誤操作や誤動作を防止する設計  
fail safe(故障しても安全側に作動、例:重力落下制御棒)  
fool proof(誤操作防止、インターロック)
- 5、運転が容易なシステム  
マン・マシン・インターフェースの改良(例:制御盤の表示法)

## 事故への拡大防止

- 1、安全保護系の設置  
異常を検知し、警報や緊急停止信号を出す
- 2、原子炉停止系の設置  
異常な過渡変化時に原子炉を停止し、燃料等を保護する
- 3、非常用炉心冷却系の設置  
冷却水喪失時に燃料棒の過熱を防止する
- 4、独立な多重系統とする(共通原因故障の防止と信頼度向上策)  
上記の安全上重要な系統は、独立に二重、三重に設ける  
出来るだけ異なる原理のものを用いる  
各系統を物理的に離して設置する

## 安全性に関する実験(反応度事故)

米国は1950年代～60年代にアイダホ国立原子炉試験場で軽水炉開発のための多くの原子炉実験を行った。  
BORAX-1:固有の安全性(負のフィードバック特性)の実証/確認  
暴走実験(超臨界反応度投入による原子炉破壊実験)  
中程度の化学工場の爆発エネルギー程度であることが判明。  
原子炉と原爆は異なることの実証がなされた。  
これ以降、暴走時のエネルギー発生より原子炉の放射能をどうやって閉じ込めるかに安全性研究の重点が移った。  
SPERT、PBF:反応度事故時の安全性の研究  
NSRR(日本原子力研究所):反応度投入時の燃料破損機構の研究

## 冷却材喪失事故の模擬実験装置(代表的なもの)

LOFT :4ループPWRの冷却材喪失事故挙動を試験する小型PWR(55MWt)、1976年開始、アイダホ国立研究所  
Semiscale:電気加熱模擬燃料棒を用いた冷却材喪失事故時挙動の実験装置、1974年開始、アイダホ国立研究所  
FLECHT :炉心再冠水過程の実験装置、ウイスチングハウス社  
ROSA :電気加熱模擬燃料棒を用いた冷却材喪失事故時挙動の実験装置、日本原子力研究所  
UPTF :炉心再冠水時の炉心上部プレナム付近の熱流動挙動の試験装置。火力発電所からの水蒸気で発熱を模擬。ドイツ。

これらの実験により非常用炉心冷却系の有効性が確かめられ安全評価に用いられるコードが検証された。

## PWRの開発

PWRは米国海軍が潜水艦用に開発したものを大型化して実用化した。  
ノーチラス号(1954年進水、1958年北極海航海)  
Shipping port PWR(ウイスチングハウス社、1957年発電用の工学試験炉、60MWe)  
Yankee Rowe(1961年実用化初代、185MWe)  
Saxton(1960年動力試験炉、20MWt、経済性向上の研究、ケミカルシム)  
美浜1号(1970年日本の実用化1号、340MWe、大阪万博の年)

## BWRの開発

BORAX- ;固有の安全性、暴走時発生エネルギーの実証  
BORAX- ;加圧、不安定性の研究  
BORAX- ;発電試験  
BORAX- ; $UO_2$ 燃料使用、安定性、水の放射線分解、タービン放射能の検討  
BORAX- ;高出力密度炉心、核過熱の検討  
EBWR(アルゴン国立研究所、5MWe);動力試験、故障トラブル経験の蓄積  
VBWR(GE社);経済性向上試験、自然/強制循環、直接/間接サイクル、材料試験  
Dresden- (工学的試験炉、180MWe、1959年、ジルカロイ燃料、制御棒折損トラブル)  
JPDR(日本原子力研究所、動力試験炉、12.5MWe、1963年)  
Dresden- 、Oyster Creek(実用化初代1965年型BWR)  
敦賀1号(357MWe、1969年 日本原電)、福島1号(460MWe、1970年東電)

## リスクイメージの構成因子

1. 恐ろしさ因子;制御不可能、致命的、カストロフィック、リスク大、リスク軽減困難、受動的
  2. 未知性因子;観察不可能、知人も知らない、影響が遅延的、新しい、科学的に不明
  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

## 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)

## リスクの認知と心理

- 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。

参考文献:岡本浩一、リスク心理学入門、サイエンス社

## 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

## リスクの定義？安全の定義？

1. 専門技術者
2. 社会心理学者(公衆)
3. 経営者・投資家

## 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) X 結果  
(公衆の死者数/事故)

リスク・コミュニケーション専門家(公衆)の定義;

リスク = 危険 + 強い怒り

経営者の定義;

リスク = 経営に影響する不確定要因

## 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

## 原子力発電経営者・投資家の定義(米国)

- Waste disposal (Yucca); 放射性廃棄物処分
- Disaster (Price-Anderson); 大規模事故(国の賠償法)
- Regulatory (NRC / DOE); 規制に伴う不確定要因
- Technology / Design; 技術、設計
- Development / Plant siting; 開発、発電所の立地
- Transmission availability; 送電線の有無
- Construction; 建設遅延
- Commissioning; 性能確認・合格証取得
- Operating; 運転
- Fuel price / supply; 燃料価格・供給
- Demand; 電力需要
- Dispatch; 配電

## 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

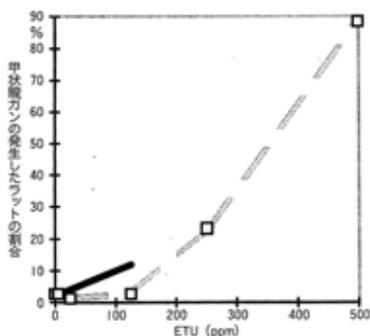


図1.14.1: エチレンチオ尿素(ETU)の発ガン性についてのラット研究。1日あたり摂取量(ppm)と実験後に甲狀腺腫瘍を起こしたラットの割合(各グループ約700匹)。黒い直線はアメリカ環境保護局の少量投与時におけるリスク相関推定を示す。出所: Rodricks 1992: 133, EPA 1996c: 117。  
出典: 『環境危機をあらわすはいいない、地球環境のホトの実態』ピョロン・ロンパーク著 文芸春秋、2003年

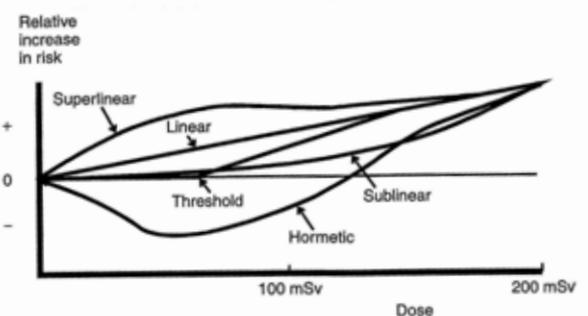


Fig. 1.14.2 Risk models at low dose

低線量放射線のリスク曲線に関する諸説

出典: Don Lawson "Engineering Disasters" ASME, 2005

少量摂取量、低被曝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数の統計的比較、或いは被曝群と非被曝群の統計的比較(疫学調査)による

低投与量、低被曝量ではノイズ(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。

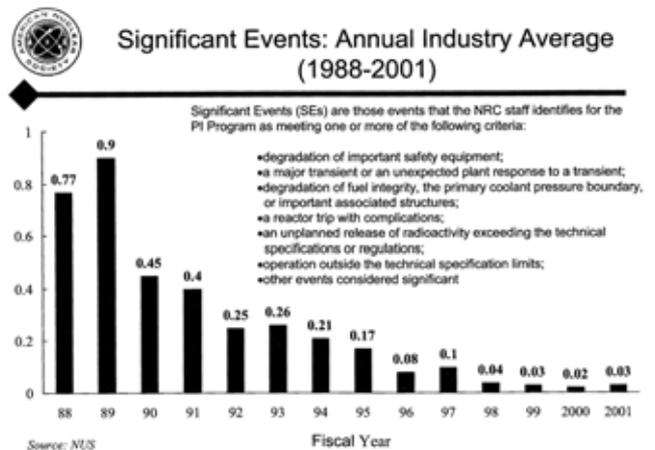
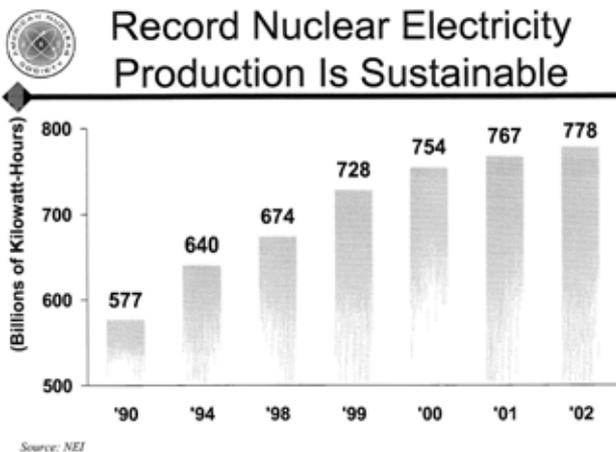
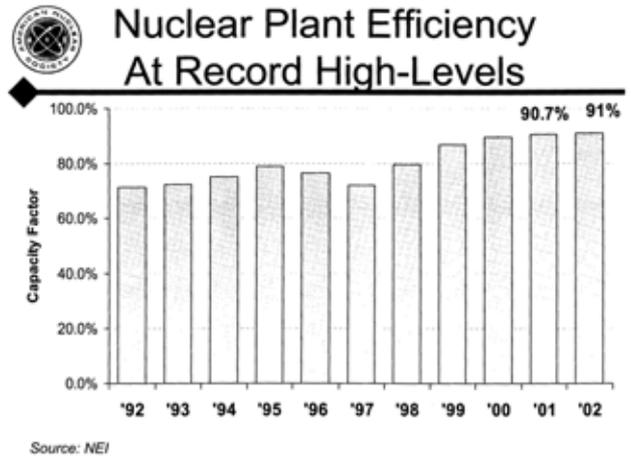
・結論としては少量摂取量、低被曝量による発ガンリスクは科学的には「わからない」

少量摂取量、低被曝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

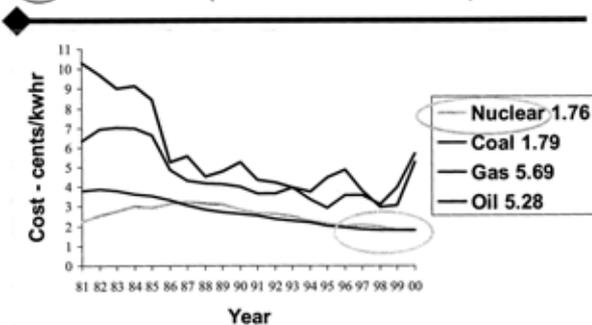
米国の原子力発電の高稼働率、  
出力増強

出典; Larry Foulke ICAPP'03国際会議発表





US Electricity Production Cost Estimates (1981-2000)  
(in constant 2000 cents/kWh)



Source: Pre 1993: EIA, Post 1993: RMI Modified Production Cost

## 結言 (原子力発電の役割)

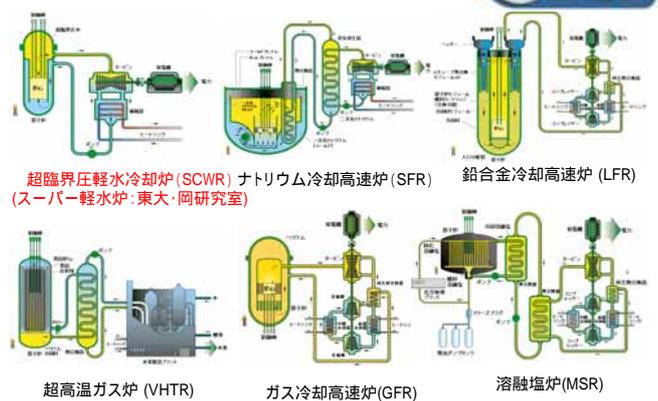
1. 温暖化防止を図りつつ、途上国の人口増加に対応し生活水準の向上を図るのは21世紀の課題。
2. 日本のエネルギー自給率は極めて低い。
3. アジアの経済発展に伴い、域外エネルギーの奪い合いが生じる可能性。
4. 原子力発電は日本のエネルギー安定供給と豊かな生活に寄与している。
5. 原子力発電は温暖化ガスを放出せず、化石燃料資源を後世に残せる現実的エネルギー。
6. 原子力発電は経済的。

## 第4世代原子炉 (GEN-IV)



- 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で2030年までに導入可能なもの
- 持続可能性、安全性 / 信頼性向上、経済性向上、核拡散の抑制など
- 米国、日本、英国、韓国、南アフリカ、フランス、カナダ、ブラジル、アルゼンチン、スイスの10か国で推進

## 第4世代原子炉の概念

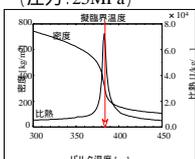


## スーパ-軽水炉 (超臨界圧軽水炉; SCWR)

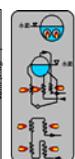


- 冷却材に高温高压の超臨界水を用いた原子炉
- 火力発電におけるボイラの発展と類似
- 1989年に岡研究室で発案
- 従来の原子炉と比較して、高性能(高熱効率)で且つ、小型化により高い経済性と安全性を可能とする新しい原子炉の概念

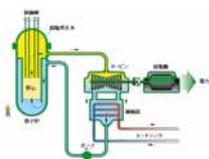
超臨界水の物性 (圧力: 25MPa)



火力のボイラの発展とLWRから Super LWRへの発展



シンプルでコンパクトなプラントシステム



## 粒子法の開発(革新的計算科学技術)

- 粒子法は計算点の集合で微分方程式を計算機上に表現する画期的計算方法。分裂・飛散、大変形が計算できる。流体力学、熱流動、固体力学、流体・構造連成など工学の広い分野の問題に適用されている。(考案者の越塚誠一先生は17年度日本学術振興会賞受賞)
- ハイブリッド粒子法は気液二層流の実験に依存しない数値解析のため開発中。蒸気の流れを格子法で、液滴の分裂飛散を粒子法で計算する。

### 適用例

1. 粒子法; 水柱の崩壊、甲板への波の打ち込み、円筒タンクのスロッシング、プール沸騰、蒸気爆発
2. ハイブリッド粒子法; 気液二層流

## 甲板への海水打ち込みの解析

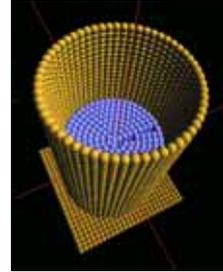
- 波浪衝撃による船舶の損傷事例は多い。
- Derbyshire号が甲板冠水によるハッチカバーの破損のため沈没(1980、沖縄沖)
- 水塊の分裂や合体を扱う必要がある。



粒子法による解析手法の開発



## 円筒タンク内スロッシング



## 沸騰のシミュレーション



流体: 水  
 圧力: 大気圧  
 壁温: 110  
 バルク水温: 96

初期気泡半径: 0.3 mm  
 接触角: 45°

## 気液二相流問題

二相流動様式

気泡流	スラグ流	チャーン流	環状噴霧流

- 気体と液体が混在する流れである。
- 流体工学, 熱工学, エネルギー工学, 機械工学の様々な分野に応用。
- 特徴: 気体と液体の界面が存在。
- 気液界面が様々に変形するため、流れの構造(流動様式)が現れる。
- 単相流は数値計算で実験を代替でき、設計の最適化が可能になった。水車、タービン翼の3次元形状の最適化が可能になり効率が上昇した。
- 二相流は実験無くしては計算だけでは現在は予測不可能、これを可能に!

## 原子力の特徴

- 原子力は総合工学。工・理の境界、文・理の学際。新フロンティアは境界領域にある
- 技術革新は総合、境界、学際の原子力から
- 21世紀は応用科学(複雑科学)の時代  
 経験的な工学、医学、生物学等の革新の時代  
 原子力はその先兵
- 地球環境保全、エネルギー安全保障は原子力から

岡芳明担当分課題

次のいずれかについてA4レポート用紙3-5ページで論述せよ。

- (1) エネルギー安全確保、地球温暖化防止において原子力発電が果し得る役割
- (2) リスクの定義とリスクの社会的受容について  
 講義の感想や原子力に対する賛否の意見を書く必要はない。  
 可能なら信頼できる統計や事実にもとづいて根拠を挙げて論述ください。

参考:

原子力立国計画; 経済産業省資源エネルギー庁

<http://www.enecho.meti.go.jp/policy/nuclear/nuclear00.htm>

リスク心理学入門、岡本浩一、サイエンス社

<http://www.soc.nii.ac.jp/aesj/division/sed/pbnc2004/pbnc2004.1-5.pdf>

提出先・期限などは別途の指示に従ってください。