

原子力開発の歴史と倫理

Dr. N. Nakae
JNES

2012年12月27日 茨城大学大学院 理工学研究科

講義内容

1. 量子力学の世界を覗いて見よう
2. 核分裂の発見からマンハッタン計画、そして原爆投下へ
3. シカゴパイルから原子力発電へ
4. TMI、チェルノブイル、JCO事故を乗り越えて
5. 原子科学とは何か？原子科学の過去、現在そして未来
6. 核不拡散への取り組み
7. 原子力倫理への取り組み
8. 将来のエネルギー予測と原子力

1. 量子力学の世界を覗いてみよう



L. ボルツマン

ボルツマン定数
気体分子運動論

$$E = kT$$



N. ボーア

ボーア半径
原子モデル

$$a_0 = \frac{0.53 \text{ \AA}}{Z}$$



M. プランク

プランク定数
エネルギー量子

$$E = h\nu$$



E. シュレーディンガー

シュレーディンガー方程式
波動関数を解く
解の二乗が存在確率



A. アインシュタイン

相対性理論
時空間

$$E = mc^2$$

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2 u(x)}{dx^2} + V(x)u(x) = Eu(x)$$

物理学の歴史と人類への貢献

1600年代	1700年代	1800年代	1900年代	2000年代
--------	--------	--------	--------	--------

力学



$$F = ma$$

万有引力の法則

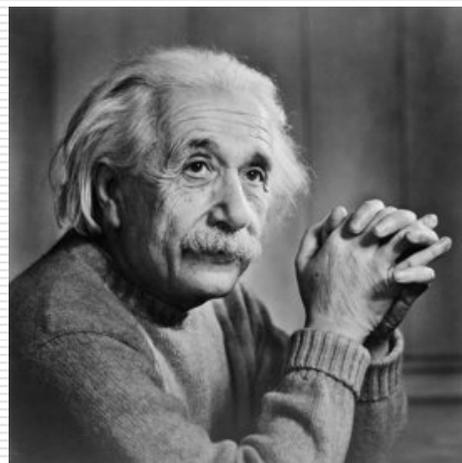
電磁気学



$$V_r = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

電磁誘導

量子力学



$$E = mc^2$$

特殊相対性理論

人類の発展は科学技術の進歩によって支えられてきている。

2. 核分裂の発見からマンハッタン計画、そして原爆投下へ

□ 歴史的背景

19世紀後半から20世紀の初頭にかけては、ニュートンの力学、マックスウェルの電磁気学、ボルツマンの統計熱力学等が確立されており、「これらの理論でどんな現象も説明できもう物理学でやることはないだろう」と考えられていた。

温度の正確な測定という工業的要請 → 「黒体輻射」の問題 → エネルギーの不連続性（プランク定数） → 原子、電子というミクロに関わる現象が未解明 → 原子の姿の追求 → 量子論への挑戦 【古典力学から量子力学へ！】

□ 素粒子の発見

電子 : トムソン (1897年)
陽子 : ラザフォード (1920年)
中性子 : チャドウィック (1932年)

何故、電子→陽子
→中性子の順に
発見されたのか？

□ 核分裂の発見

種々の物質に中性子を衝突させる実験がなされた。
ウランターゲットの実験によりオット・ハーンは
1938年に核分裂現象を発見した。

“核分裂の発見は偶然であったが、それは必然でもあった！”



1932

ジェームズ・チャドウィック 中性子
を発見。この存在が明らかになって、研究
者たちは「中性子星」が白色矮星とは別
に存在しうるのではないかと考えた。

2. 核分裂の発見からマンハッタン計画、そして原爆投下へ



フランクリン・D・ルーズベルト

F.D. Roosevelt,
President of the United States,
White House
Washington, D.C.

Sir:

Some recent work by E.Fermi and L. Scillard, which has been communicated to me in manuscript, leads me to expect that the element uranium may be turned into a new and important source of energy in the immediate future. Certain aspects of the situation which has arisen seem to call for watchfulness and, if necessary, quick action on the part of the Administration. I believe therefore that it is my duty to bring to your attention the following facts and recommendations:

In the course of the last four months it has been made probable - through the work of Joliot in France as well as Fermi and Scillard in America - that it may become possible to set up a nuclear chain reaction in a large mass of uranium, by which vast amounts of power and large quantities of new radium-like elements would be generated. Now it appears almost certain that this could be achieved in the immediate future.

This new phenomenon would also lead to the construction of bombs, and it is conceivable - though much less certain - that extremely powerful bombs of a new type may thus be constructed. A single bomb of this type, carried by boat and exploded in a port, might very well destroy the whole port together with some of the surrounding territory. However, such bombs might very well prove to be too heavy for transportation by air.



アルベルト・アインシュタイン

-3-

The United States has only very poor ores of uranium in moderate quantities. There is some good ore in Canada and the former Czechoslovakia, while the most important source of uranium is Belgian Congo.

In view of this situation you may think it desirable to have some permanent contact maintained between the Administration and the group of physicists working on chain reactions in America. One possible way of achieving this might be for you to entrust with this task a person who has your confidence and who could perhaps serve in an unofficial capacity. His task might comprise the following:

a) to approach Government Departments, keep them informed of the further development, and put forward recommendations for Government action, giving particular attention to the problem of securing a supply of uranium ore for the United States;

b) to speed up the experimental work, which is at present being carried on within the limits of the budgets of University laboratories, by providing funds, if such funds be required, through his contacts with private persons who are willing to make contributions for this cause, and perhaps also by obtaining the co-operation of industrial laboratories which have the necessary equipment.

I understand that Germany has actually stopped the sale of uranium from the Czechoslovakian mines which she has taken over. That she should have taken such early action might perhaps be understood on the ground that the son of the German Under-Secretary of State, von Weizsäcker, is attached to the Kaiser-Wilhelm-Institut in Berlin where some of the American work on uranium is now being repeated.

Yours very truly,

A. Einstein
(Albert Einstein)

2. 核分裂の発見からマンハッタン計画、そして原爆投下へ

【1938年】 ウランに中性子をぶつける実験
核分裂の発見 (オット・ハーン)

【1940年】 $^{238}\text{U}(\text{d},2\text{n})^{238}\text{Np} \rightarrow ^{238}\text{Pu}(\beta\text{崩壊})$
プルトニウムの発見 (グレン・シーボーグ)

【1942～1945年】 核兵器の開発 (マンハッタン計画)
ウラン濃縮技術、再処理技術の確立
原爆の製造、核実験の実施

【1942年】 シカゴ大学構内で連鎖反応実験
世界初の原子炉の誕生 (エンリコ・フェルミ)

【1945年】 原爆投下 (広島、長崎)
第2次世界大戦の終結

【1953年】 国連総会
アイゼンハワー大統領の演説「ATOMS FOR PEACE」



軍事利用から
平和利用へ

3. シカゴパイルから原子力発電へ

原子炉の分類	原子炉
マンハッタン計画時	Chicago Pile 1 Graphite Reactor X-10 Hanford 305 Test Reactor Chicago Pile 3 Low Power Water Boiler Hanford 100 Reactor Los Alamos Water Boiler Zero Energy Experimental Pile
Pu生産炉	Windscale Reactors Reactor 6-1
研究炉、試験炉	Graphite Low Energy Experimental Pile National Research Experiment British Experimental Pile Zero Energy Oxydebd'U Eau Lourde Heavy Water Reactor TR Reactor for Physics & Technical Research Material Test Reactor Zero Energy Thermal Reactor Nuclear Examination Reactor Reactor EL-2 Deuterium Moderator Pile Low Energy DIDO Reactor Engineering Test Reactor Pool Critical Assembly Ork Ridge Research Reactor Aerojet General Nuclear Reactor Gas Cavity Reactor Plutonium Recycle Test Reactor Ohio State University Research Reactor TRIGA Reactor Nuclear Effects Reactor High Flux Isotope Reactor Power Burst Facility OSIRIS High Flux Reactor Belgian Reactor-1 Belgian Reactor-2 Halden Boiling Reactor Japan Research Reactor-1,2,3,4 Japan Material Test Reactor Nuclear Safety Research Reactor
高速炉	Los Alamos Fast Reactor Experimental Breeder Reactor Zero Energy Fast reactor Soviet Breeder Reactor-1 Dounreay fast Reactor Los Alamos Molten Salt Plutonium Reactor Experiment Experimental Breeder Reactor-2 Enrico Fermi 1 Rapsodie Reactor BOR-60 Fast Flux Test Facility Phenix Reactor Super Phenix Reactor Prototype Fast Reactor Joyo Reactor Monju Reactor
融体冷却炉	Aircraft Reactor Experiment Submarine Intermediate Reactor-1,2 Santa Susana Sodium Reactor Experiment Molten Salt Reactor Experiment

3. シカゴパイルから原子力発電へ

原子炉の分類	原子炉
水均質炉	Homogeneous Reactor Experiment-1 Los Alamos Power reactor Experiment-1 Homogeneous Reactor Experiment-2
有機材減速炉	Organic Moderator Reactor Experiment Arbus Nuclear Power Station Piqua Nuclear Power facility
炭酸ガス冷却炉	Colder Hall Reactor Windscale Advanced Gas Cool Reactor
高温ガス炉	Ultra High Temperature Reactor Experiment Mobile Low Power Plant-1 Dragon HTGCR Peach Bottom HTGCR-1 AVR Atomic Power Station High Temperature Test Reactor
重水炉	Nuclear Power Demonstration Station Carolias Va. Tube Reactor Douglas Point Nuclear Power Station Advance Thermal Reactor (Fugen)
加圧水炉	Submarine Thermal Reactor-1,2 Atomic Power Station US Naval Research Laboratory Reactor Stationary Medium Power Plant-1 Shippingport PWR Yankee Power Station Npovoronezh Atomic Power Station-1 その他多数基あり
沸騰水炉	Boiling Reactor Experiment Experimental Boiling water Reactor Vallecitos BWR Dresden Nuclear Power Station Beloyarsk 1 Atomic Power Station その他多数基あり

出典 「プルトニウム燃料工学」 1998年1月 「次世代燃料」研究専門委員会 社団法人 日本原子力学会

天然ウラン(金属)燃料、被覆材なし、冷却材なし、黒鉛減速のシカゴパイルでの
エンリコ・フェルミによる実験から原子力平和利用が始まった。

4. TMI、チェルノブイル、JCO事故を乗り越えて

TMI事故

1979年3月28日、米国ペンシルベニア州スリー・マイル原発2号炉で発生
制御用空気系故障 → 給水ポンプ、タービントリップ → 1次系温度・圧力上昇 → 加圧器逃がし弁「開」→ 原子炉自動停止(設計どおり)

1次系圧力低下 → **加圧器逃がし弁「開固着」** → 冷却材流出 → 1次系圧力低下 → ECCS自動起動 → **運転員は系は満水と誤認しECCS流量を絞る**

冷却材ポンプ激しく振動 → **Bループ1次系冷却材ポンプ続いてAループを手動で停止** → 炉心冷却不能(炉心の損傷大)

加圧器逃がし弁元栓「閉」 → 冷却材流出止まる → ECCS起動 → 炉心再冠水

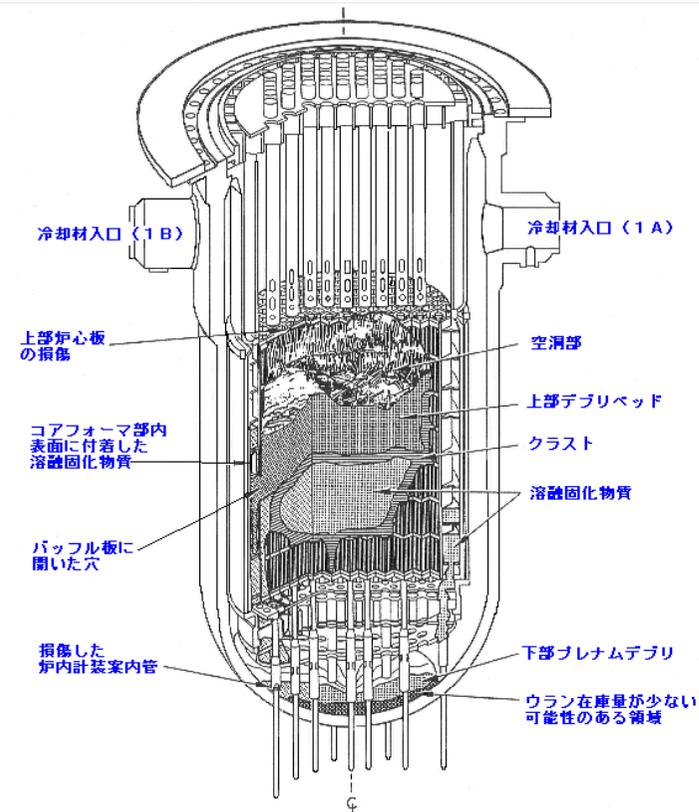


図4 TMI-2炉容器内の最終状況

(炉心物質の約45%(62ト)が溶融し、この内約20トが下部プレナムに落下した。)

[出典] J.M.Broughton, et al.: A Scenario of the Three Mile Island Unit 2 accident, Nuclear Technology, Vol.87, No.1, p.35, 1989

4. TMI、チェルノブイル、JCO事故を乗り越えて

チェルノブイル事故

1986年4月26日、旧ソ連チェルノブイル原発4号炉で炉停止状態で計画された実験中に発生

炉出力を700MW(3.2GW)に低下→**給電指令の延長**→**キセノン蓄積**→炉出力低下→**制御棒引抜(炉心不安定状態)**→出力低下レベルは許容限界→**200MWでの実験を決意**

実験開始→外部電源喪失時を模擬→冷却材ポンプへの給電停止→タービン発電機の慣性による給電→冷却材流量低下→炉心蒸気量増加→**正のボイド反応度による出力上昇**→原子炉停止操作するが間に合わず→核暴走→水蒸気爆発→黒鉛火災→放射性物質放出



チェルノブイル原子力発電所(中央奥)の遠景、



チェルノブイル原子力発電所(中央付近)周辺の衛星画像、1997年撮影



セシウム137の濃度に基づく放射能汚染地域



事故後放棄された村

4. TMI、チェルノブイル、JCO事故を乗り越えて

JCO事故

1999年9月29日、茨城県東海村JCO東海事業所
転換試験棟で臨界事故が発生

高濃縮ウラン硝酸溶液を制限量を超えて沈殿槽
に投入したため臨界発生

許可されたものとは異なる手順による作業
(バケツを使用して核物質を取り扱う)

作業員の臨界に関する知識不足
(制限量を超えて核物質を取り扱う)

臨界を止める対策が施されていない設備
(沈殿槽周りの冷却水を抜き臨界停止)



図2 事故時の作業の様子
(「JCO臨界事故患者の
初期治療」より)

法令・規則の遵守

従業員の教育

適切な設備対応

TMI事故、チェルノブイル原発事故、JCO事故の対応

- 大小の差を問わず事故が起これば、2度と同じような事故が起きないように対策が取られる。
- **INPO(米国原子力発電運転協会)**
TMI事故を受け1979年12月に米国原子力発電事業者で設立
最高レベルの安全性と信頼性の達成を目標
専門家によるプラント評価など各種支援活動
- **OSART(運転管理調査チーム)**
1982年にIAEAが組織化
8分野の専門家調査団の派遣
- **WANO(世界原子力発電事業者協会)**
チェルノブイル事故を受け、1989年5月に世界規模で設立
主な活動はピアレビュー
- **INSAF(世界核燃料安全ネットワーク)**
JCO事故を受け、2000年4月に国内外核燃料サイクル事業者で設立
安全についての情報交換等を目指す
- **NS net(ニュークリアセーフティネットワーク) 現在: 日本原子力技術協会**
JCO事故を受け、1999年12月に国内原子力事業者で設立
主な活動はピアレビュー、安全キャラバン等

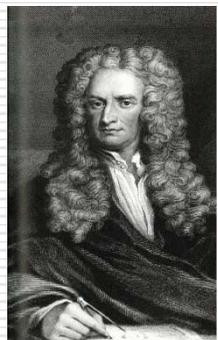
原子力安全の基本3原則

- 核分裂連鎖反応を止める
- 発生した熱を取り除く (冷やす)
- 放射性物質を閉じ込める

	原子炉	再処理	燃料加工
止める	連鎖反応を止める	臨界にしない	臨界にしない
冷やす	発生した熱を取り除く (冷やす)	未臨界のため熱は発生しない	未臨界のため熱は発生しない
閉じ込める	核分裂生成物(FP)を閉じ込める	FP及び核燃料物質を閉じ込める	核燃料物質を閉じ込める

5. 原子科学とは何か？ 原子科学の過去、現在そして未来

原子科学とは何か？



古典力学



1900
マックス・プランク 黒体放射とエネルギー量子の発見。

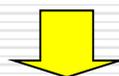
量子力学



1905
アルベルト・アインシュタイン 黒体放射についての論文で、光が光子（光子）と見做せることを示す。

相対性理論

飛び飛びのエネルギー
量子の概念



合体



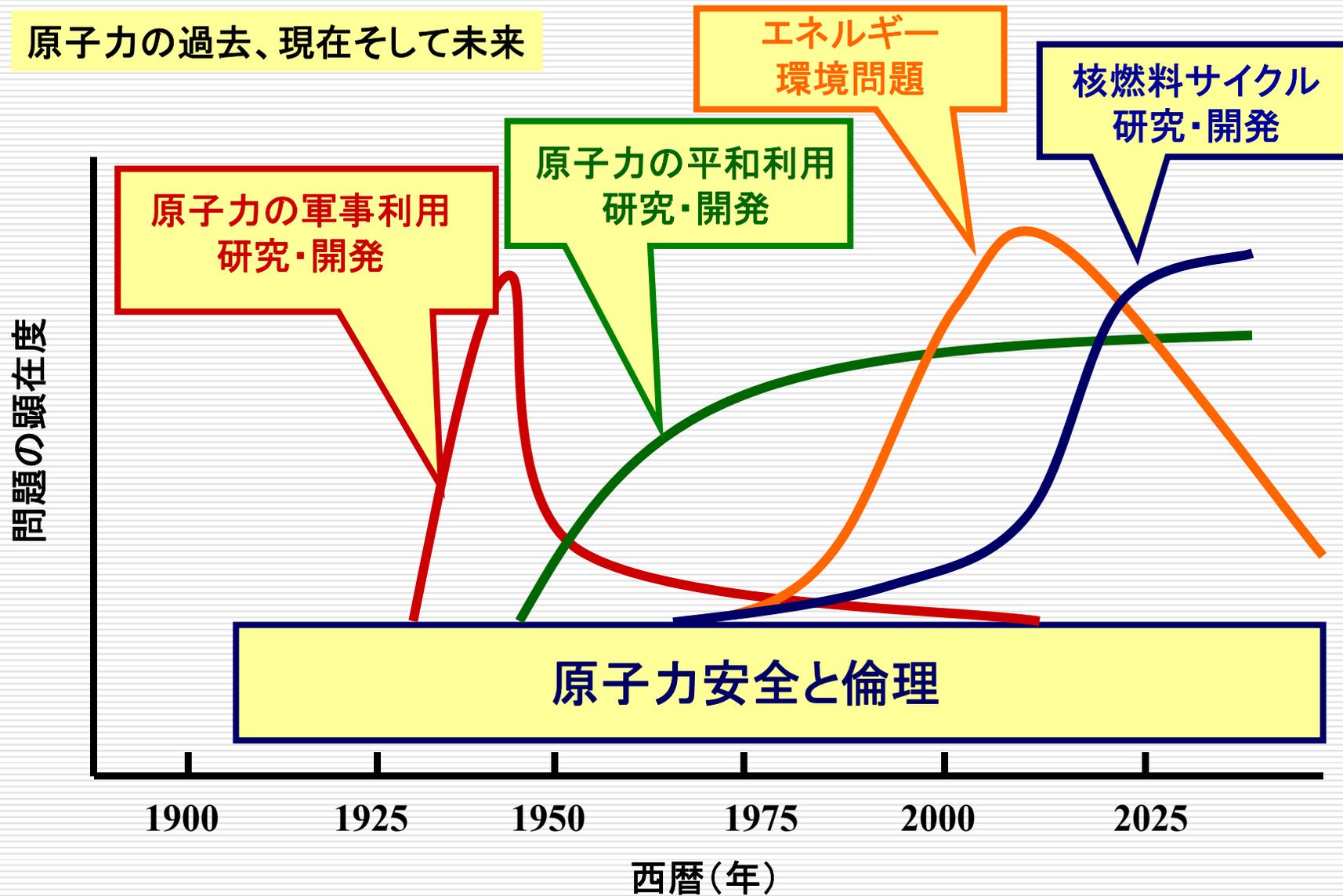
エネルギーは質量

1905年～

原子科学
の
始まり

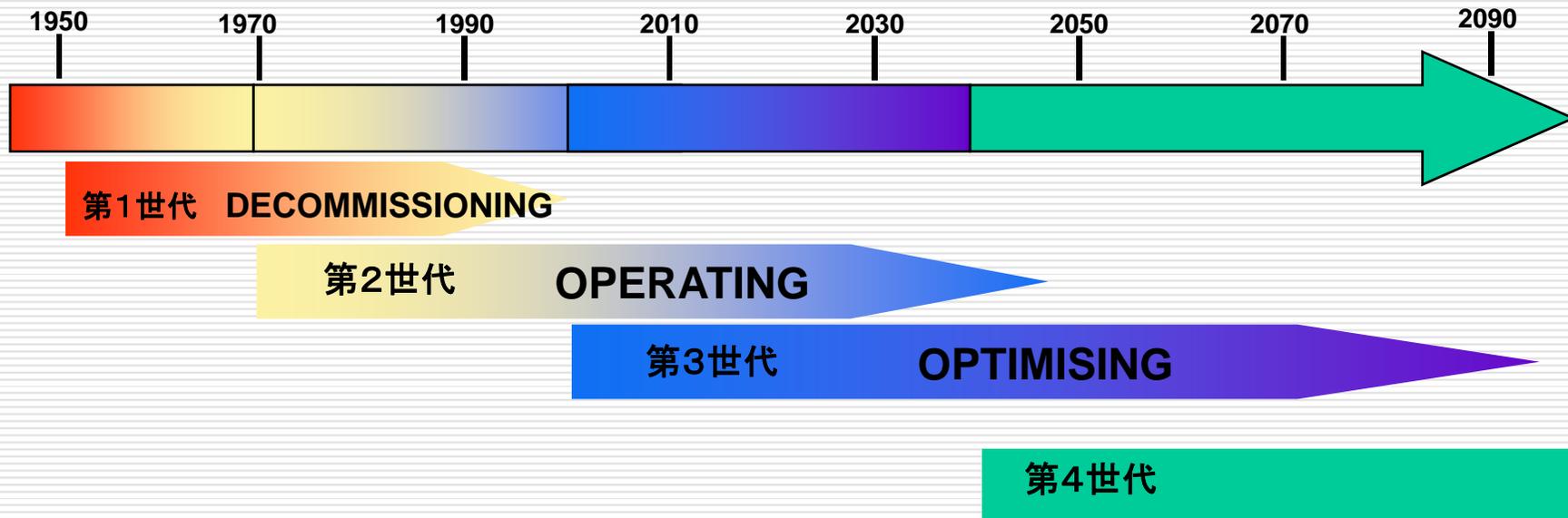
5. 原子科学とは何か？ 原子科学の過去、現在そして未来

原子力の過去、現在そして未来



5. 原子科学とは何か？ 原子科学の過去、現在そして未来

原子科学の過去、現在そして未来



第4世代 (Generation IV)

将来の原子力システムとして何を選択すべきなのか？それが問題である。
ナトリウム冷却高速炉？ ガス冷却高速炉？ 再処理方式は？ 燃料は？

6. 核不拡散への取り組み

平和利用に限定した議論だけでは不十分

国内では、**非核3原則**に則り、平和利用に限定した中で原子力安全を議論

非核3原則:「核兵器を持たず、作らず、持ち込ませず」

国際的な核不拡散への取り組み

NPT (Treaty on the Non-Proliferation of Nuclear Weapons) 核不拡散条約

1968年7月1日 署名開放 1970年3月5日 発効 締結国 189ヶ国

核兵器国(米、露、英、仏、中)以外への核兵器の拡散を防止

各締結国による誠実な核軍縮交渉を行う義務

国際原子力機関(IAEA)の保障措置(核査察)を受諾する義務

CTBT (Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty) 包括的核実験禁止条約

宇宙空間、大気圏内、水中、地下を含むあらゆる空間における核兵器の実験的及び他の核爆発を禁止する。

一部の発効要件国の批准の見通しはたっており、条約は未発効

PTBT (Partial Test Ban Treaty) 部分的核実験禁止条約

地下を除く宇宙空間、大気圏内、水中における核爆発を伴う実験の禁止

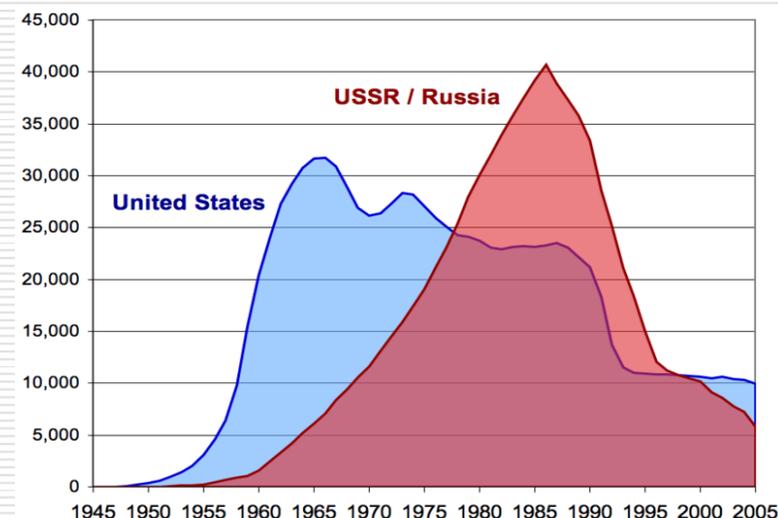
1963年8月5日米、露、英により調印、1963年10月に発効

軍事に転用されない原子力平和利用

核兵器解体・処分

米露の戦略核兵器は、東西冷戦の終結を受けて1994年12月の戦略核兵器削減条約発効以降解体が進められ、冷戦期の半数(約6000発)程度に削減していると言われている。余剰となり処分が計画されているプルトニウム量は米、露ともに約50トンと言われている。

START: Strategic Arms Reduction Treaty



核兵器保有量の推移

<http://ja.wikipedia.org/wiki/>より引用

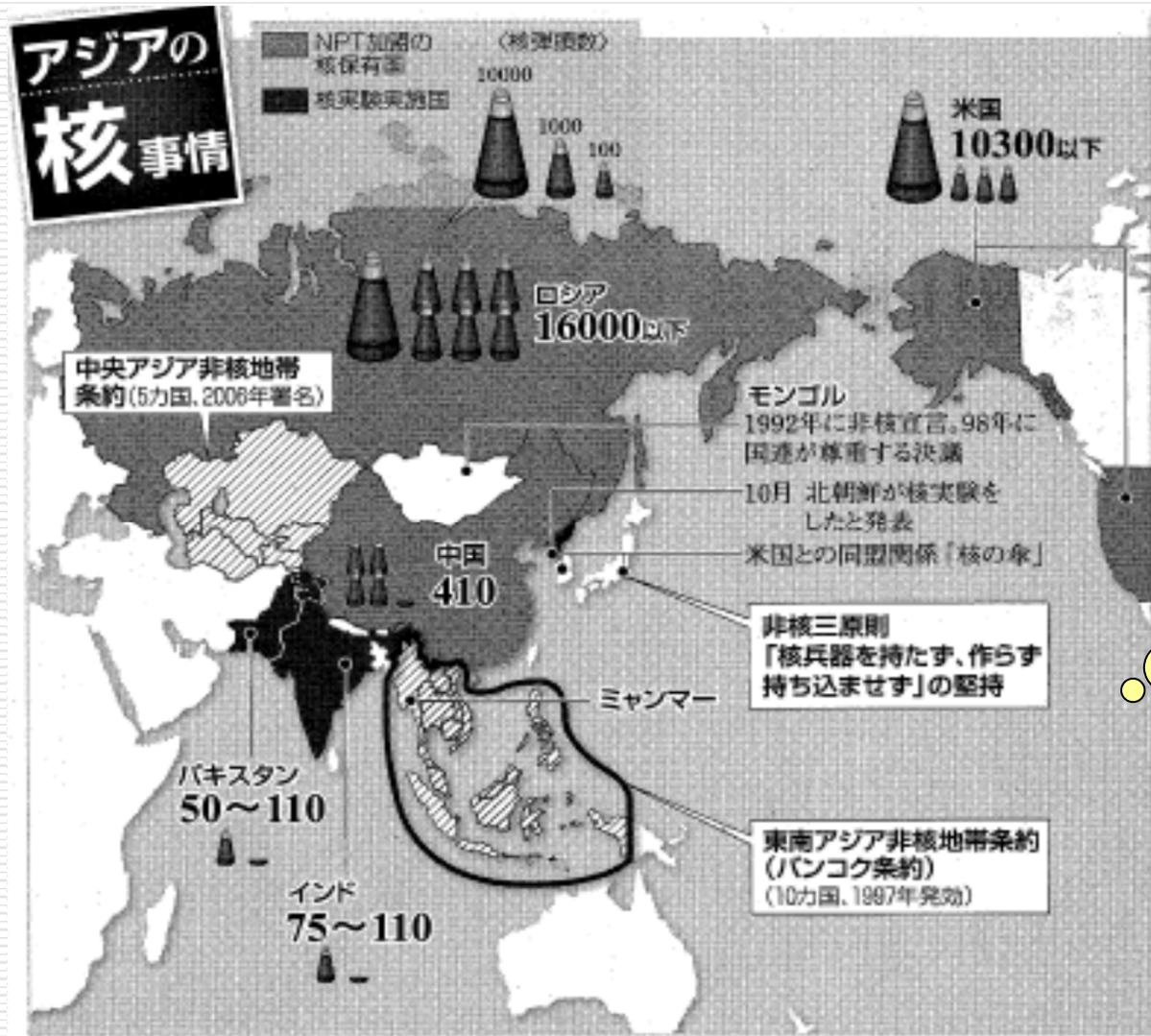
JAEAは積極的に協力

核拡散抵抗性を有する原子力システムの開発

1. アクチニドリサイクルを採り入れた高速炉システム
2. 超長期間燃焼可能な原子炉システム(超高燃焼度)

ウラン濃縮及びプルトニウムを単独抽出する再処理プロセスを含まない核燃料サイクルを持つ原子力システムの開発

アジアの核事情



「核武装ドミノ」を防ぐために、日本が先頭に立って不拡散体制の徹底を図る必要がある。

朝日新聞朝刊2006年11月4日より引用

「非核」は最良の選択

- 核に核で対抗することで「恐怖の均衡」を保つ。これが東西冷戦時の核抑止の論理であった。
- 米、露という正しい倫理を持つ2つの大国間であるからこそ成立し得た論理である。

キューバ危機の回避(ケネディー大統領とフルシチョフ書記長)
- 北朝鮮の場合は、核大国からの強硬な態度や脅威に対し「核兵器を保有して国を守る」という考え方によるものと思われる。この論理が危険きわまりないものとなる。

(強硬な態度や脅威の原因は北朝鮮側にあるのでは?)
- 日本が核を保有すれば、核保有ドミノが中東に広がる、中東石油への依存度の大きい日本経済は危うくなる、米国から核燃料に対する規制が強化され原子力発電に支障をきたしエネルギー危機が現実味を帯びてくる。

(核保有は自らの生存の基盤を掘り崩す恐れが大きいものと考えられる。)

7. 原子力倫理への取り組み

倫理: 人として守るべき道、道徳(広辞苑)

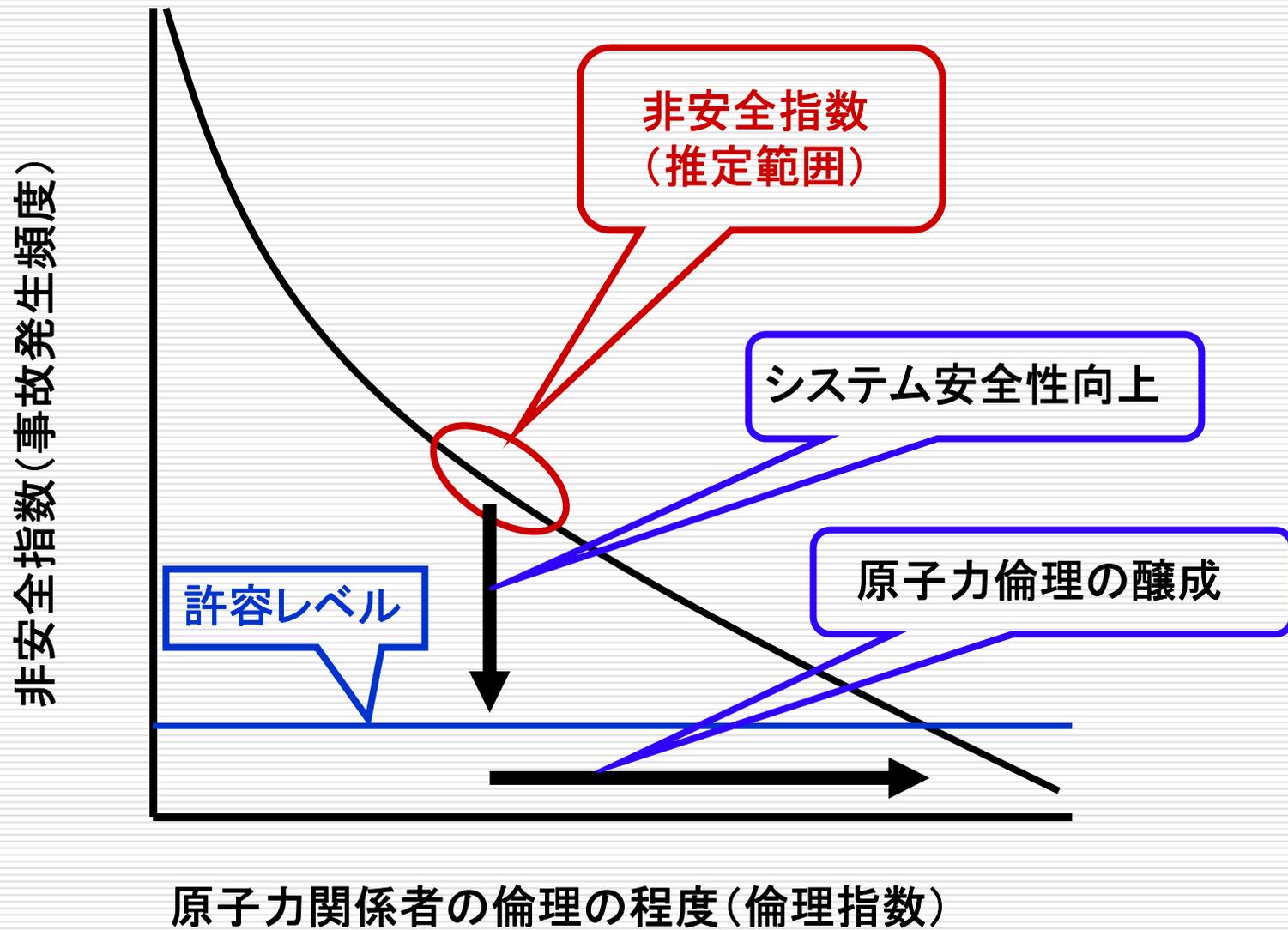
倫理: Science of Conduct(行動の科学)(英語の辞書)

日本原子力学会倫理規定憲章

1. 会員は原子力の**平和利用**に徹し、人類の直面する諸課題の解決に努める。
2. 会員は、**公衆の安全**を全てに優先させてその職務を遂行し、自らの行動を通じて**社会の信頼**を得るよう努力する。
3. 会員は、自らの専門能力の向上に図り、あわせて関係者の専門能力も向上するように努める。
4. 会員は、自らの能力の把握に努め、その能力を超えた業務を行うことに起因して社会に重大な危害を及ぼすことがないよう行動する。
5. 会員は、自らの有する情報の正しさを確認するよう心掛け、**公開**を旨とし説明責任を果たし、**社会的信頼性**を得るよう努める。
6. 会員は、事実を尊重し、公平・公正な態度で自ら判断を下す。
7. 会員は、あらゆる法や社会の規範に抵触しない範囲で、みずからの業務に係る契約を尊重して誠実に行動する。
8. 会員は、原子力業務に従事することに誇りを持ち、その業務の社会的な評価を高めるよう努力する。

原子力技術は人類に**著しい利益をもたらすだけでなく、大きな災禍をも招く**可能性がある。このため、原子力倫理は不可欠である。

非安全指数と倫理指数との相関



原子力倫理の醸成

- どうすれば現状より優れた行動が取れるのかを論理的、合理的に検討する能力を伸すこと。
- 危機管理、品質保証、ヒューマンエラー、リスク管理等といったすでに行われている取り組み・研修と共通すると思われるので、これらに積極的に参加すること。
- 倫理の活動には「浮世」のものである以上、「優れている」はあっても「完全である」はない、終わりのない旅だという認識が必要である。

大場恭子、原子力学会誌、「倫理つれづれ」より引用

8. 将来のエネルギー予測と原子力

21世紀のグローバルエネルギー予測での解析ケースおよび境界条件

解析ケース名	Case A1 低経済成長 環境保全	Case A2 低経済成長 経済原則	Case B1 高経済成長 環境保全	Case B2 高経済成長 経済原則
全エネルギー-Q1(t)	$Q_{(2000)} = 1.4 \text{ toe}$ $P_{(2000)} = 70 \text{ 億人}$	$Q_{(2100)} = 2.0 \text{ toe}$ $P_{(2100)} = 120 \text{ 億人}$	$Q_{(2000)} = 1.4 \text{ toe}$ $P_{(2000)} = 70 \text{ 億人}$	$Q_{(2100)} = 4.0 \text{ toe}$ $P_{(2100)} = 120 \text{ 億人}$
省エネルギー-Q1(t)	$Q1_{(2000)} = 5 \text{ 億toe}$		$Q1_{(2000)} = 5 \text{ 億toe}$	
再生可能エネルギー-Q3(t)	$Q3_{(2000)} = 5 \text{ 億toe}$ $Q3_{(2100)} = 120 \text{ 億toe}$	$Q3_{(2000)} = 5 \text{ 億toe}$ $Q3_{(2100)} = 60 \text{ 億toe}$	$Q3_{(2000)} = 5 \text{ 億toe}$ $Q3_{(2100)} = 120 \text{ 億toe}$	$Q3_{(2000)} = 5 \text{ 億toe}$ $Q3_{(2100)} = 60 \text{ 億toe}$
化石エネルギー-Q4(t)	$Q4_{(2000)} = 73 \text{ 億toe}$ $Q4_{(2100)} = 0 \text{ 億toe}$	$Q4_{(2000)} = 73 \text{ 億toe}$ $Q4_{(2000)} = 120 \text{ 億toe}$ $Q4_{(2100)} = 30 \text{ 億toe}$	$Q4_{(2000)} = 73 \text{ 億toe}$ $Q4_{(2100)} = 0 \text{ 億toe}$	$Q4_{(2000)} = 73 \text{ 億toe}$ $Q4_{(2000)} = 120 \text{ 億toe}$ $Q4_{(2100)} = 30 \text{ 億toe}$

ロジスティック関数を用いた非常に簡単な数式により解析した。
但し、境界条件を正確に入力する必要がある。

解析結果：できる限り原子力の導入を控えた条件でも原子力は必要

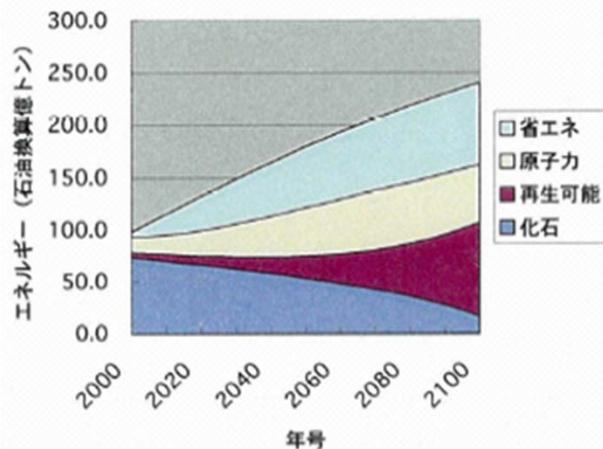


図5-1(1) 21世紀のグローバルエネルギー予測解析結果
(低経済成長で環境保全型とした解析ケース)

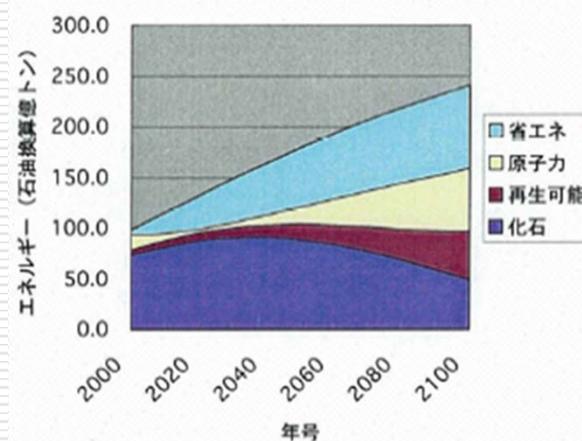


図5-1(2) 21世紀のグローバルエネルギー予測解析結果
(低経済成長で経済原則型とした解析ケース)

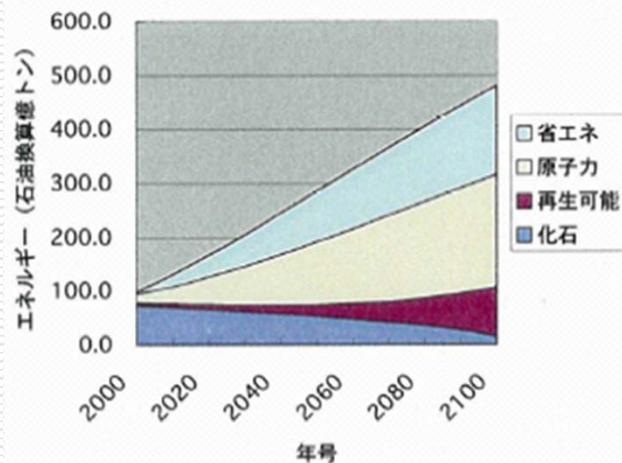


図5-1(3) 21世紀のグローバルエネルギー予測解析結果
(高経済成長で環境保全型とした解析ケース)

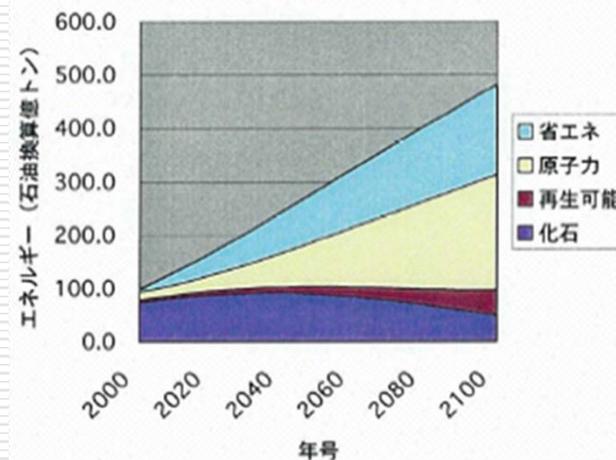


図5-1(4) 21世紀のグローバルエネルギー予測解析結果
(高経済成長で経済原則型とした解析ケース)

省エネルギーの構成比率

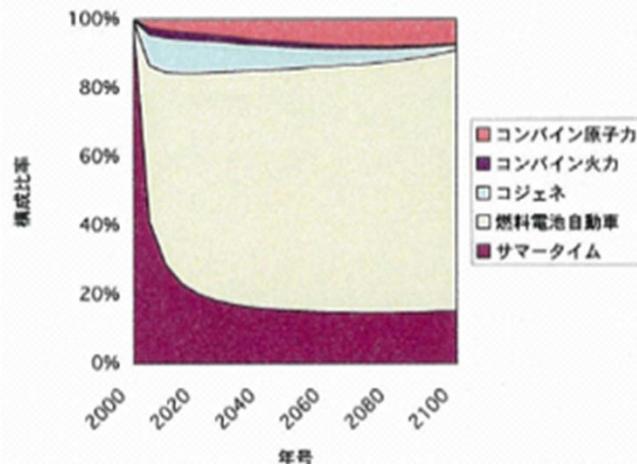
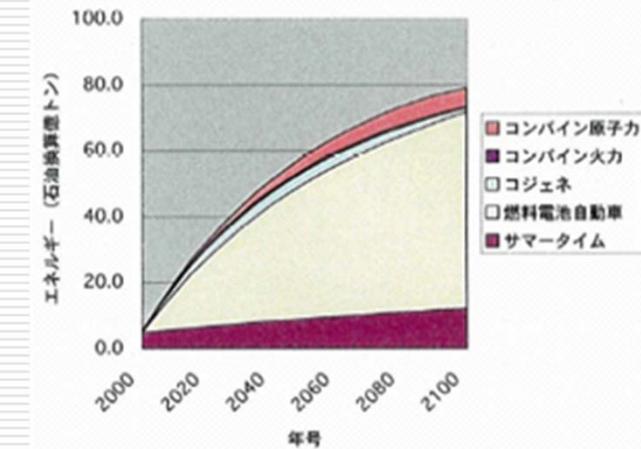


図5-2 省エネルギーの構成比率
(低経済成長で環境保全型とした解析ケース)

省エネルギーの占める割合がかなり大きい。そこで、省エネルギーとして、サマータイム、燃料電池自動車、コージェネ、コンバインド火力、コンバインド原子力の5要素で分担するとしてそれらの分担割合を予測した。

結果は左図に示すように燃料電池自動車の寄与が圧倒的に大きい。

つまり、運輸部門のエネルギー供給はほとんど全て燃料電池によって賄われる必要があると言える。

すなわち、水素エネルギー利用が必要となってくることを示唆している。

21世紀のエネルギー問題解決の鍵は、原子力と水素であろう。