

CIGS 原子力安全 ワークショップ
「原子力のリスクと対策の考え方 - 社会との対話のために -」
キヤノングローバル戦略研究所、2016年3月4日(金)

「合理的な安全の考え方による 社会との対話」

氏田 博士

キヤノングローバル戦略研究所

ポストノーマルサイエンス

□ 環境・安全問題の多くは、もはや科学的合理性基準だけでは決着がつけられない

- 結果が出るまで待てない
- 科学的実証ができない
- 科学者の間でも見解が一致しない
- 価値観の関る問題に科学は答えられない

□ 「科学による真理の独占の解体」(ベック)

□ 環境問題(特に長期の)

- 予測の学問; 神のみぞ知るに英知を集める
モデルと仮定と不確かさを明示する
- 警鐘の学問; 社会に発信
- 政策科学; 利害関係者に知見を与え、政策決定に資する

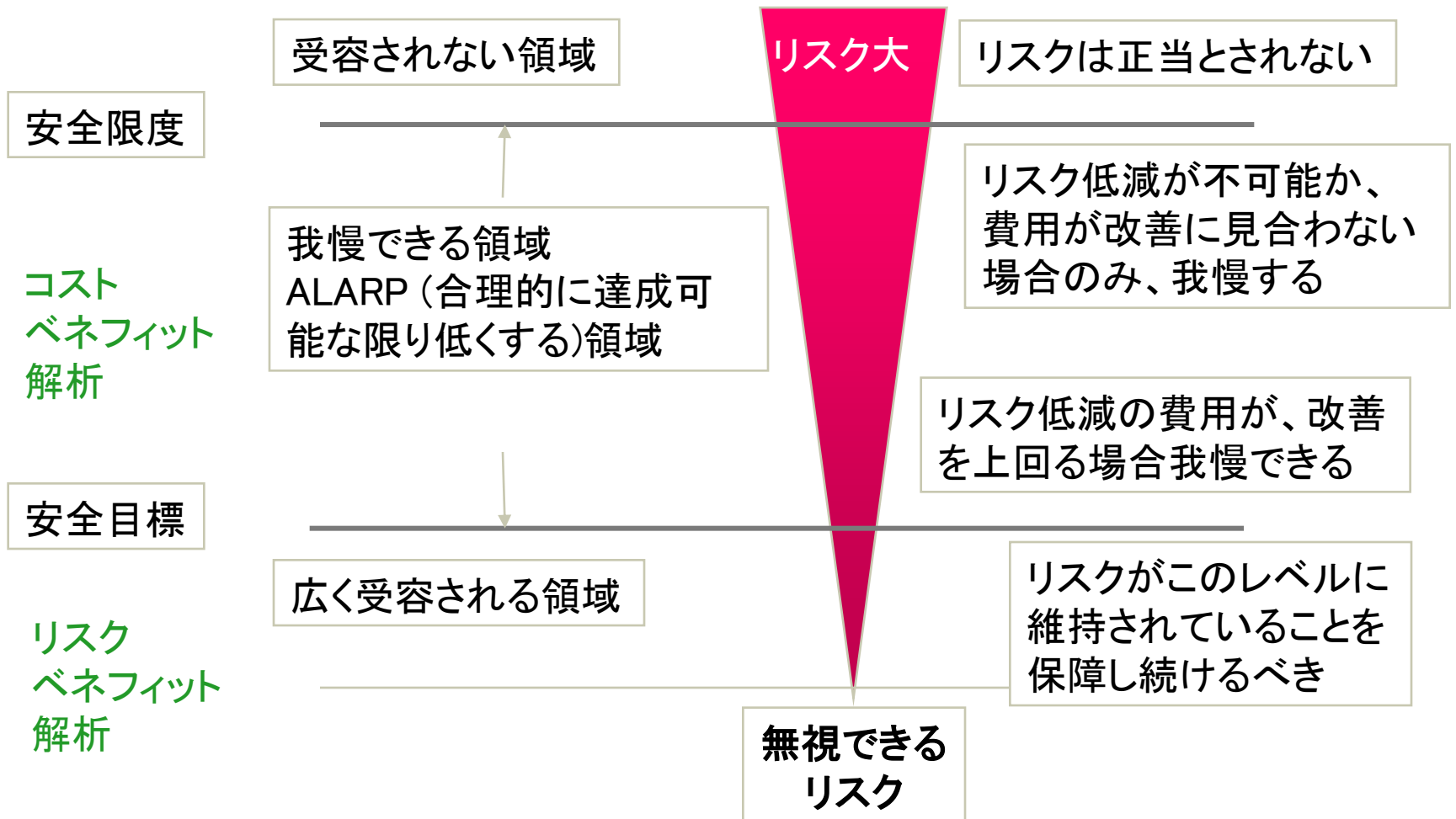
□ 技術者と社会のかかわり

- システムの巨大化・複雑化・高度化に伴い、**環境・安全問題**が社会化する現象があらゆる技術分野で発生している。もはや、技術システムの開発には、最初から社会との関係性を前提としなければならない
- 「**社会 - 技術システム**」が国民的合意の下で発展していくには、人々の**価値観・倫理観**や**行動様式(安全文化)**だけでなく、**社会的受容**や**事故による社会・環境への影響**も、考慮することが不可欠
- 「**社会 - 技術システム**」の社会的受容は、**安全目標**と**実際のリスク**との比較で議論される
- さらに**リスク**だけでなく、**必要性、社会的意味**など (**ベネフィット**) が総合的に評価される
- 専門家以外の人々も**科学・技術**に関するある程度のリテラシーを身につける必要がある
- 同様に、**科学技術者**も**社会や経済**などの**価値**に関する**学問分野**の幅広い知識が不可欠
- **国民的合意**の形成に**科学技術者**も参加しなければならない。**技術が発展**するか否かはそこにかかっている

HOW SAFE IS SAFE ENOUGH?

英国の安全目標の基本的考え方

UKHSE, 1992



□ リスクとベネフィットの比較 エネルギー起源**CO2**の削減

茅の式：地球環境産業技術研究機構,RITE理事長茅陽一（東京大学名誉教授）が主張した式

- CO2排出量
= $\text{CO2排出量} / \text{エネルギー消費量 (エネルギーの種類)} \#$
 $\times \text{エネルギー消費量} / \text{GDP (生産のエネルギー効率性)}$
 $\times \text{GDP} / \text{人口 (豊かさ)}$
 $\times \text{人口}$

$\text{CO2排出量} / \text{CO2発生量 (炭素回収隔離、CCS)}$
 $\times \text{CO2発生量} / \text{エネルギー消費量 (化石燃料の種類)}$

3種類の一次エネルギー

市民のための環境学ガイド <http://www.yasuienv.net/>

ヒトが使える一次エネルギーは、**たった3種**

- **化石燃料** = 石油、石炭、天然ガス
 - 樹林、植物、藻類などが起源
 - 数1000万年から数億年前か
 - 元は、かつて地球に降り注いでいた**太陽エネルギー**
- **核燃料** = もともと**地球の元素**
 - 質量とエネルギーの変換によって作られる
 - $E=mc^2$ (アインシュタインの式)
- 自然(再生可能)エネルギー
 - 基本的に現時点の**太陽エネルギー**の利用
 - 他の2種が**ストック型**に対し、**フロー型**

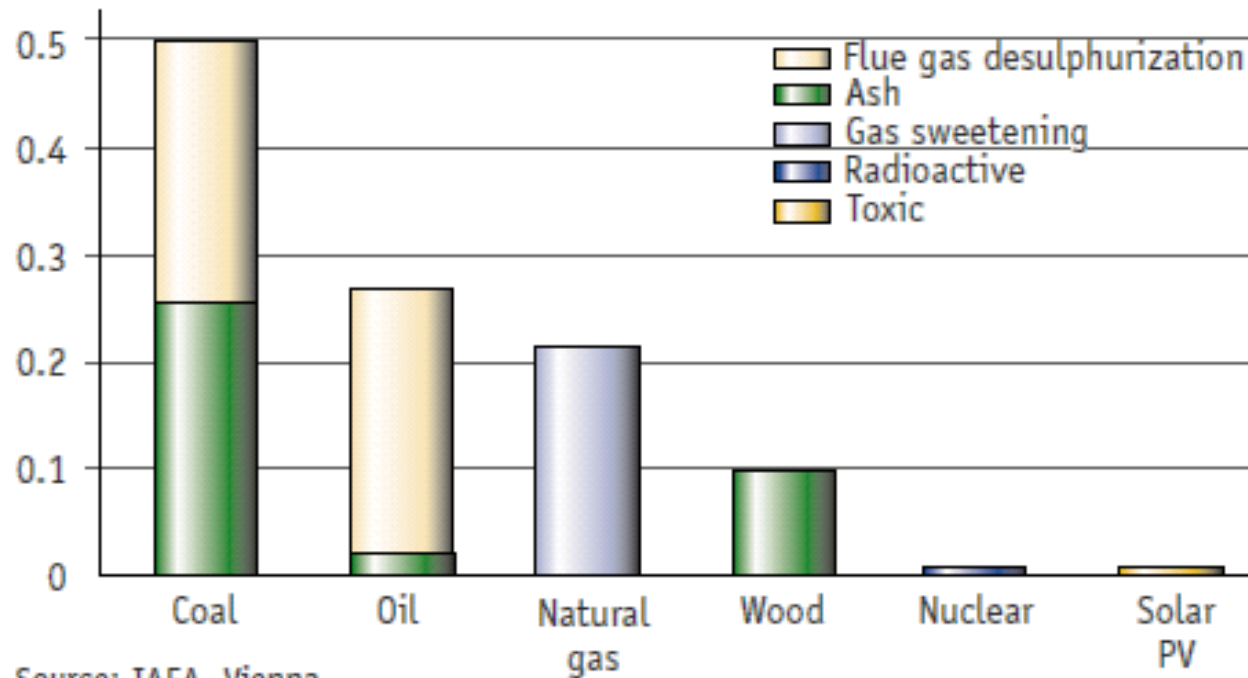
核融合

ビッグバン、超新星爆発

核分裂

廃棄物発生量の比較

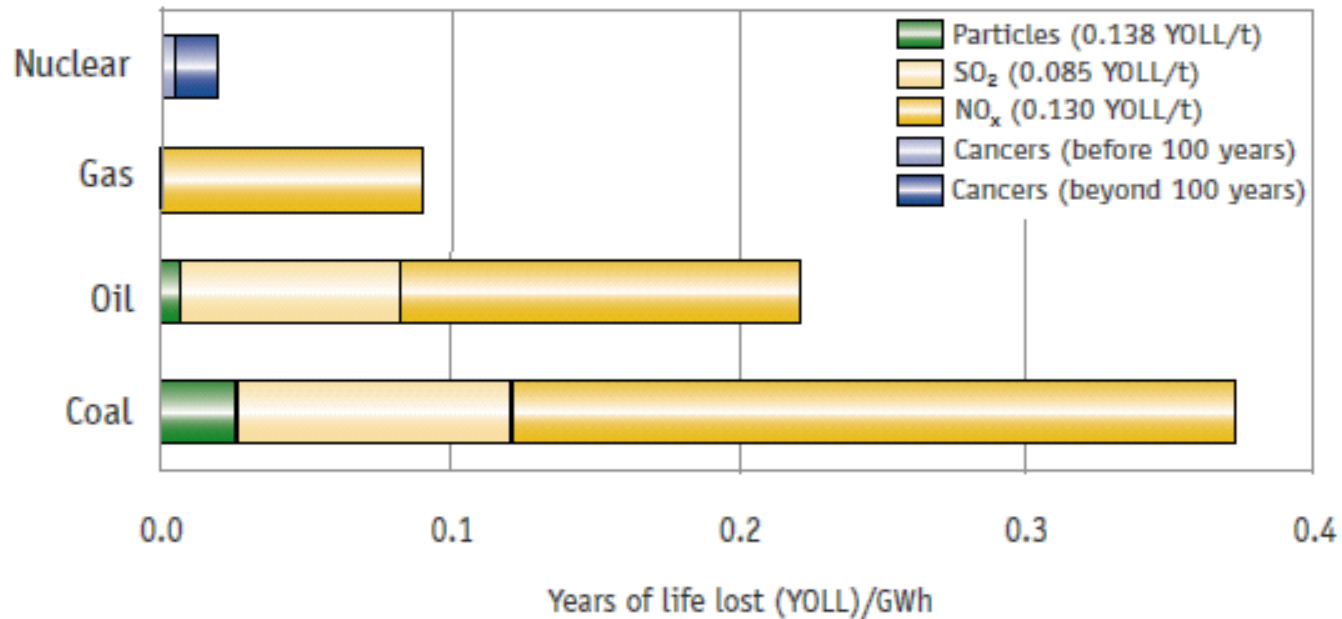
Million tonnes
per GWe yearly



Source: IAEA, Vienna

Nuclear Energy Today, OECD/NEA, 2002

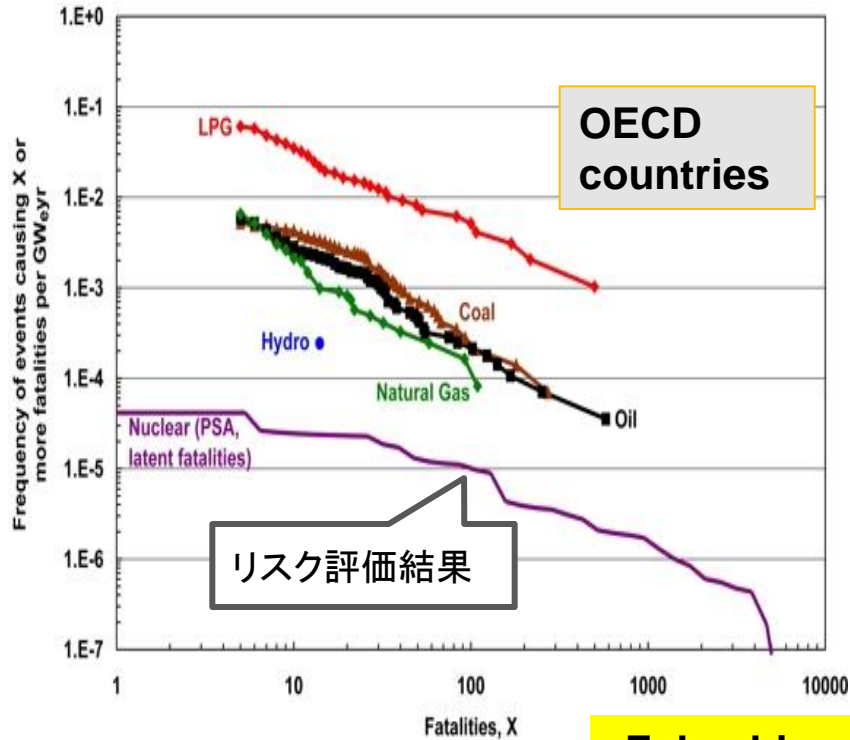
健康リスクの比較



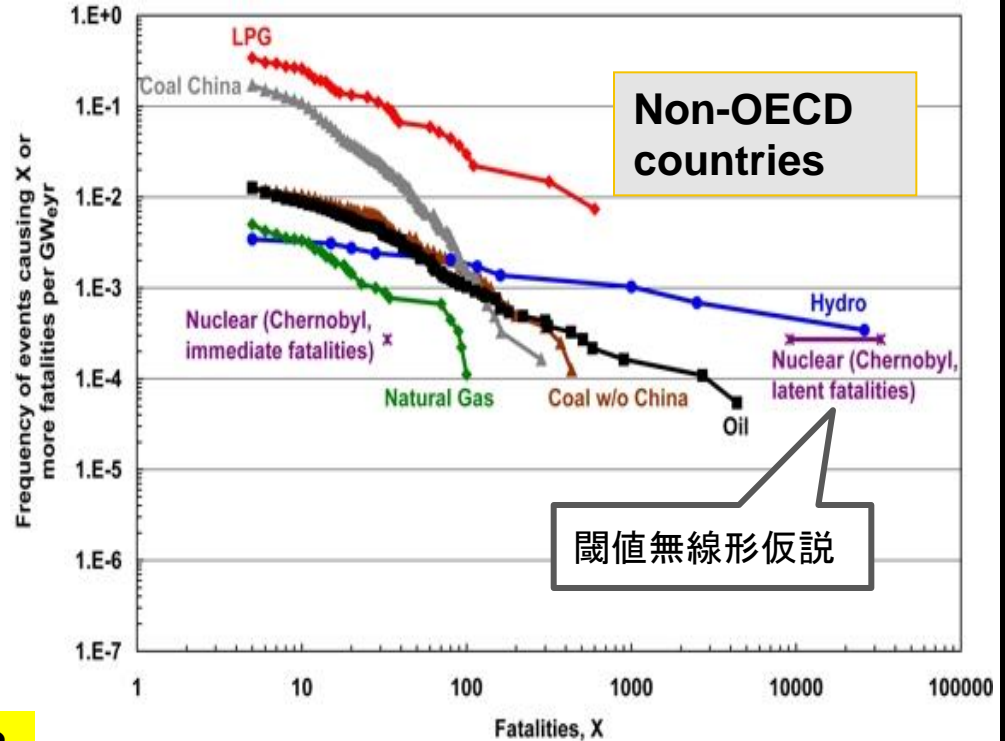
Source: "Comparative Assessment of Emissions from Energy Systems", IAEA Bulletin, 41/1/1999.

Nuclear Energy Today, OECD/NEA, 2002

エネルギー産業の事故のリスク比較



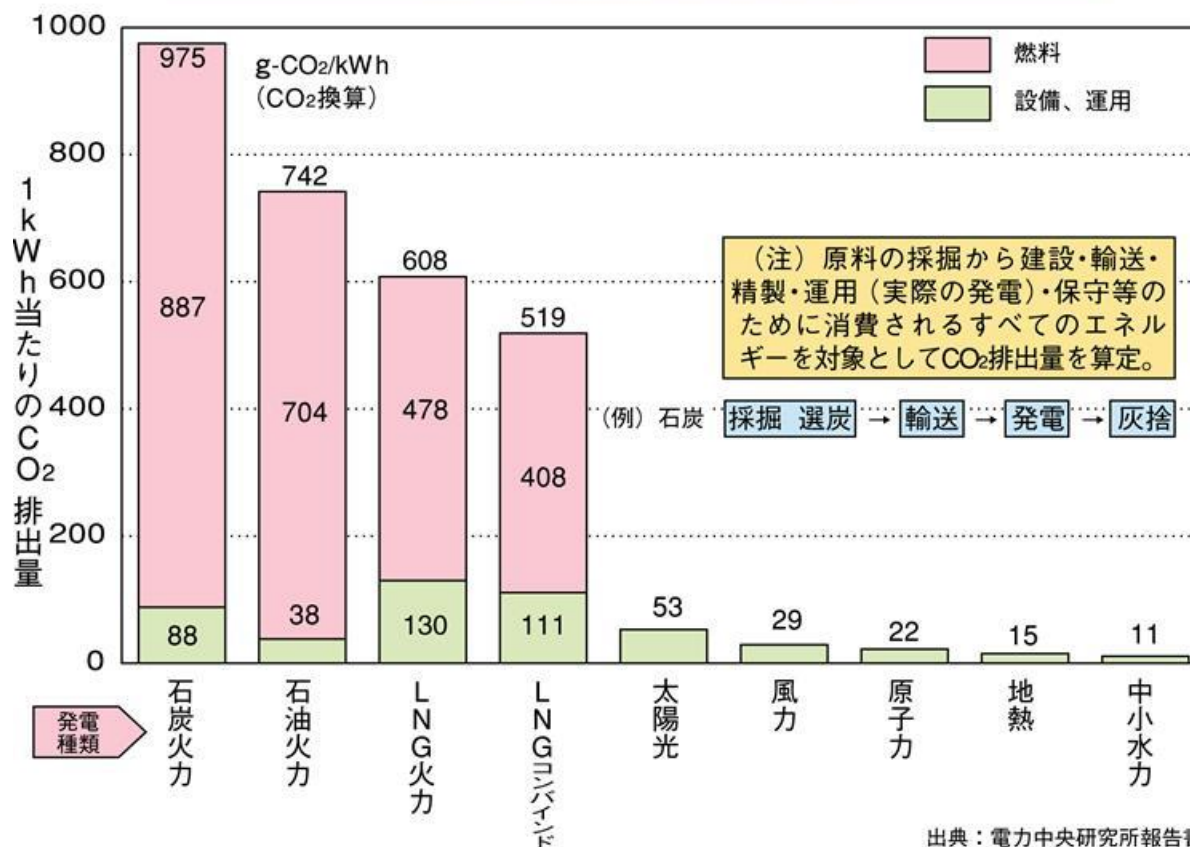
•Fukushima?
•TMI?



1969年から2000年の間に様々なエネルギー生産手段により世界で発生した死亡者数の大きい事故(5人以上)の発生頻度の比較(急性死亡のみ考慮)

OECD/NEA6862, 2010 by Swiss Paul Scherrer Institute

CO2排出量



各種電源のエネルギー密度

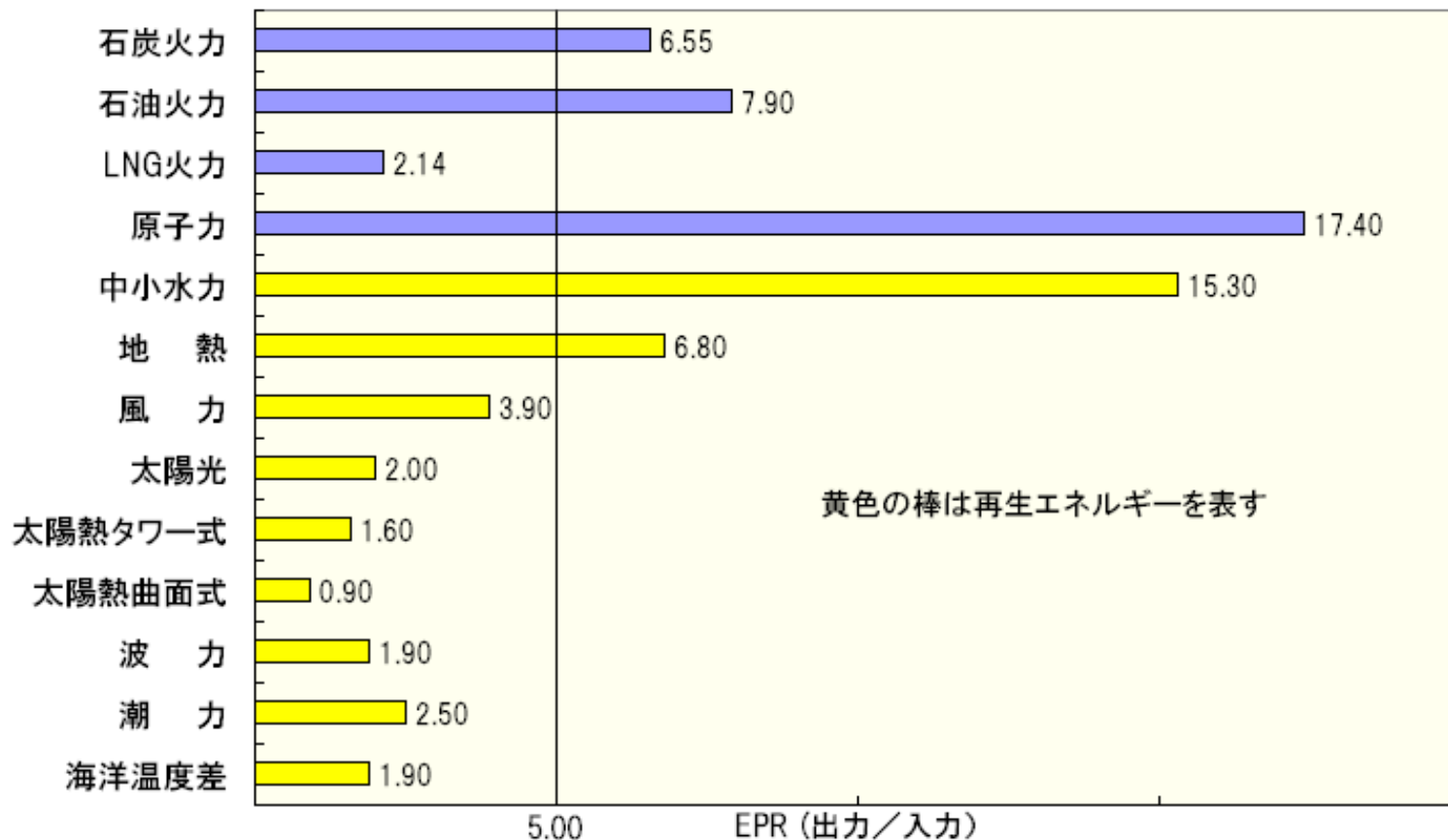
- 発電所敷地面積あたりの発電電力量(筑波大、内山)

| 対象 | 敷地面積あたりの 電力密度 [kWh/m ² ・年] | 備考 |
|----------|---|--------------------------------|
| 家庭の電力需要 | 35 | 一戸建(敷地50坪、契約40A) |
| 事務所の電力需要 | 400 | 8階建て(延床面積3,000m ²) |
| バイオマス発電 | 2 | ポプラプランテーション(6年サイクル)、発電効率34% |
| 風力発電 | 21 | 米国テハチャピWF、C.F.20% |
| 太陽光発電 | 24 | 家庭屋根(50坪、3kW、設備利用率15%) |
| 水力発電 | 100 | 日本の水力発電所約100箇所の平均値 |
| 石炭火力 | 9,560 | 碧南石炭火力(210万kW) |
| 原子力発電 | 12,400 | 柏崎刈羽(821.2万kW) |

分散
電源

基幹
電源

各種電源のEPR, Energy Profit Ratio(エネルギー収支比)

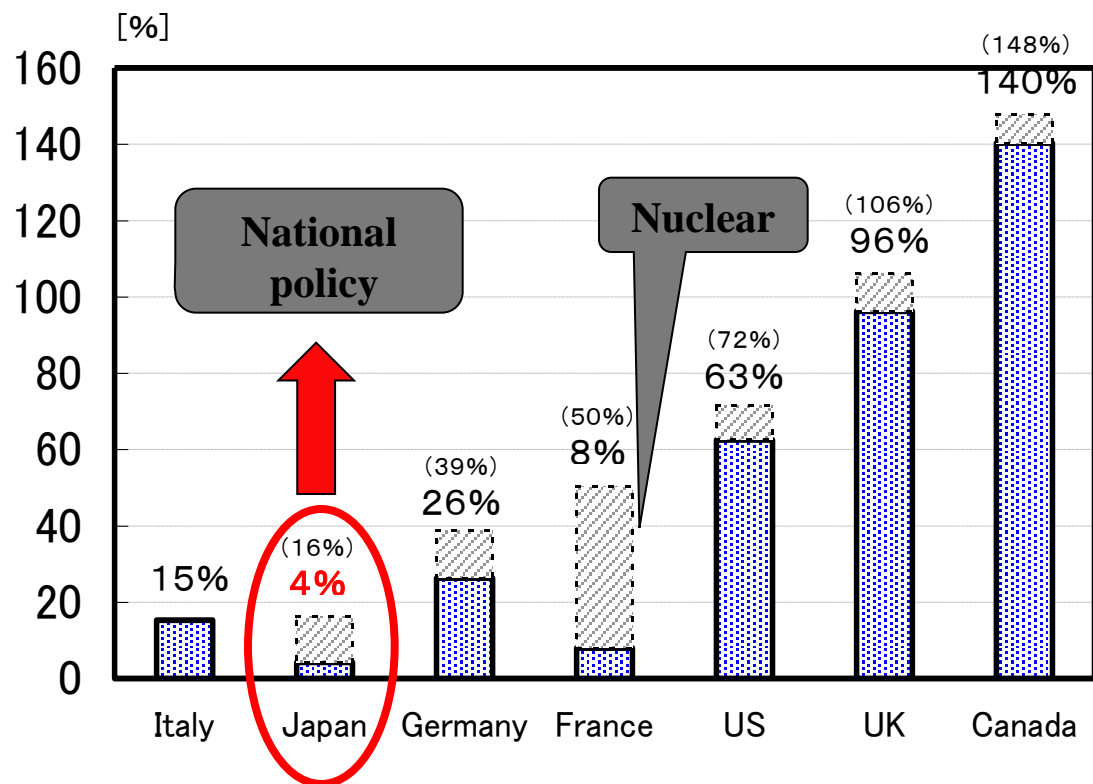


(注)原子力では、ガス拡散と遠心を半分ずつにしている

設備利用率は、石炭、石油、LNG、原子力は75%、水力45%、風力35%、太陽光15%、太陽熱15%

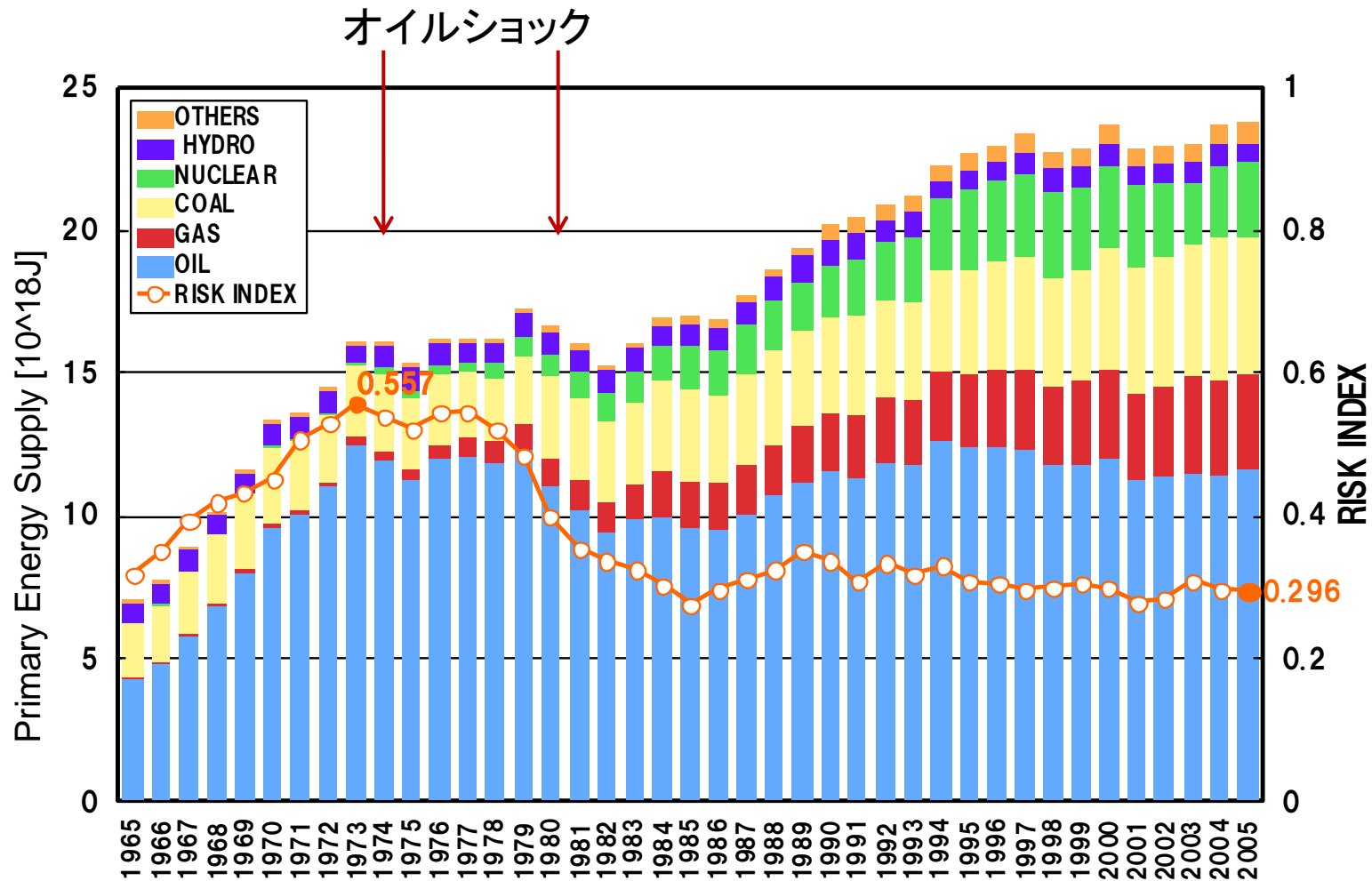
エネルギーセキュリティの評価

-エネルギー自給率



日本の一次エネルギー供給安定リスクの推移

(電中研報告書「原子力の燃料供給安定性の定量評価」)



Risk Index: 供給不安定度指数

3種類の一次エネルギーのベストミックス

- 安井は「市民のための環境学ガイド」のなかで、3種類のエネルギー源を以下のように形容している
 - 化石燃料: 見かけは普通の人間のように見えるが、実は地球を破壊する悪魔
 - 原子力: 一見は魅力的な人物だが、本性を見せると暴力的危険人物
 - 自然エネルギー: いかにも善人を装うが、実は気まぐれな浪費家
- どれも一長一短があるので、そのすべてをうまく組み合わせることが肝要である
- リスクとベネフィットのトレードオフで異なるトラを飼い慣らしていく努力が望まれる

事前警戒原則(世代間倫理)

- 非常に長期にわたる地球規模の問題の対策としては、たとえその効果が科学的に不確かだとしても、事前警戒原則にのっとり対応することが必要
- その定義は、リスク評価の際に生じるさまざまな科学的不確実性を承知の上で、因果関係が必ずしも明確に証明できない状態ではあるが、将来起こるかもしれない被害を避けるために規制を行うルール
 - 人の生命や生物の生存に致命的な被害を与える**不可逆性**
 - 地域などの空間スケールを超える**越境性**と長期にわたる**蓄積性**
 - 次世代の個人、集団、社会が選択や回避の自由度がない**非選択性**
- 対策を検討するには、リスクベネフィット解析に基づく環境保全の効果と経済性への影響の関係から適切に決定することが必要

世代間倫理: INTER-GENERATION ETHICS

□ 将来世代に選択肢を与える

- 研究開発能力(知的贈与)と成果を残す
- 社会資本(公共財、きれいな大気や永続的なエネルギー源)をきちんと残す

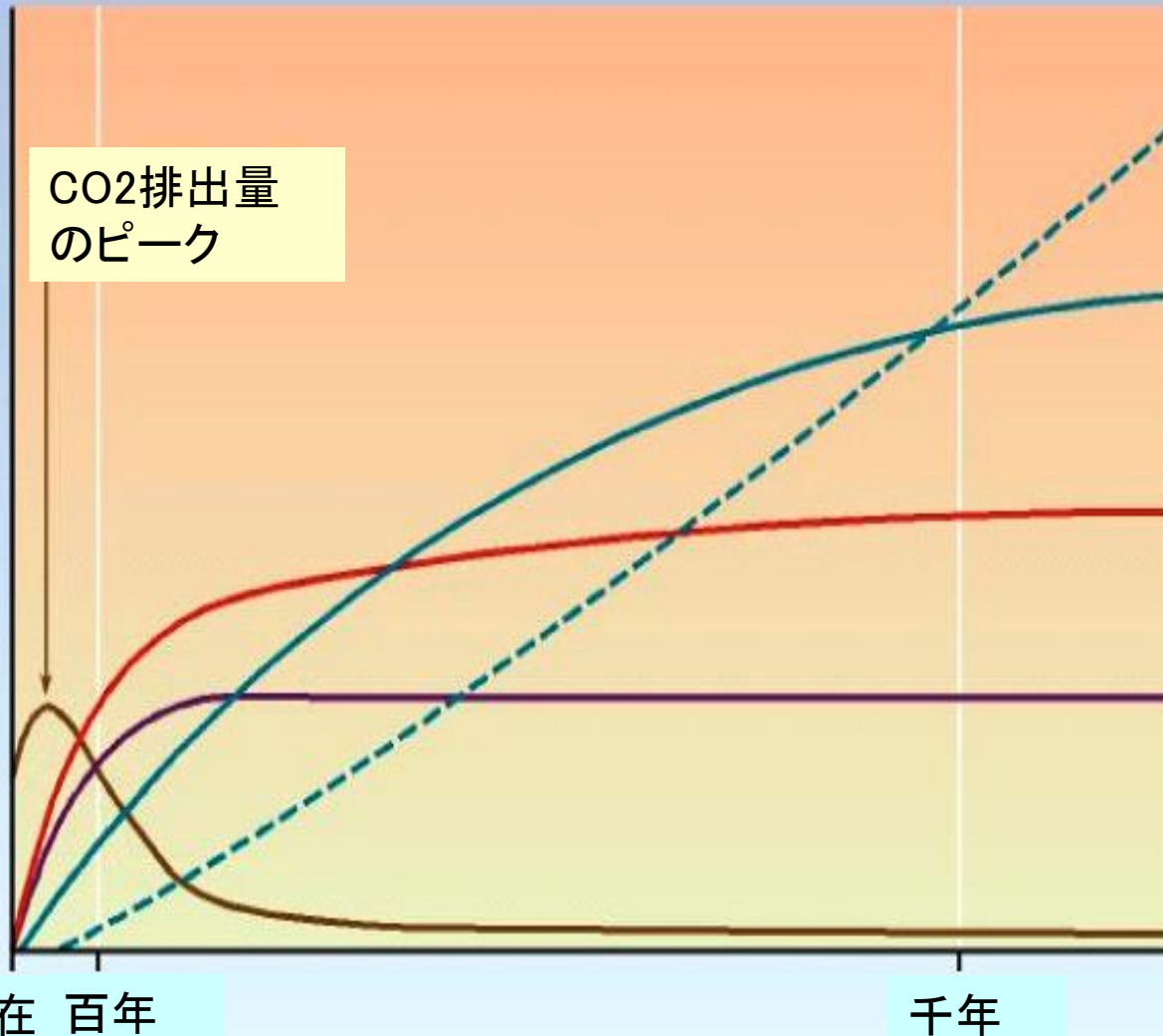
□ 地球温暖化の問題

- 現世代がミニマムの成長で我慢し将来世代のために対策費用を捻出する努力(持続的発展の概念)をしてきた実績
- 研究開発により新たな革新技術の芽を提供する
- 原子力や再生可能のような長期のエネルギー源を確保しておく

□ 気候変動問題の特徴

環境影響の様々な時間遅れ

反応の大きさ



平衡に達する時間

←海面上昇(氷融解)
数千年

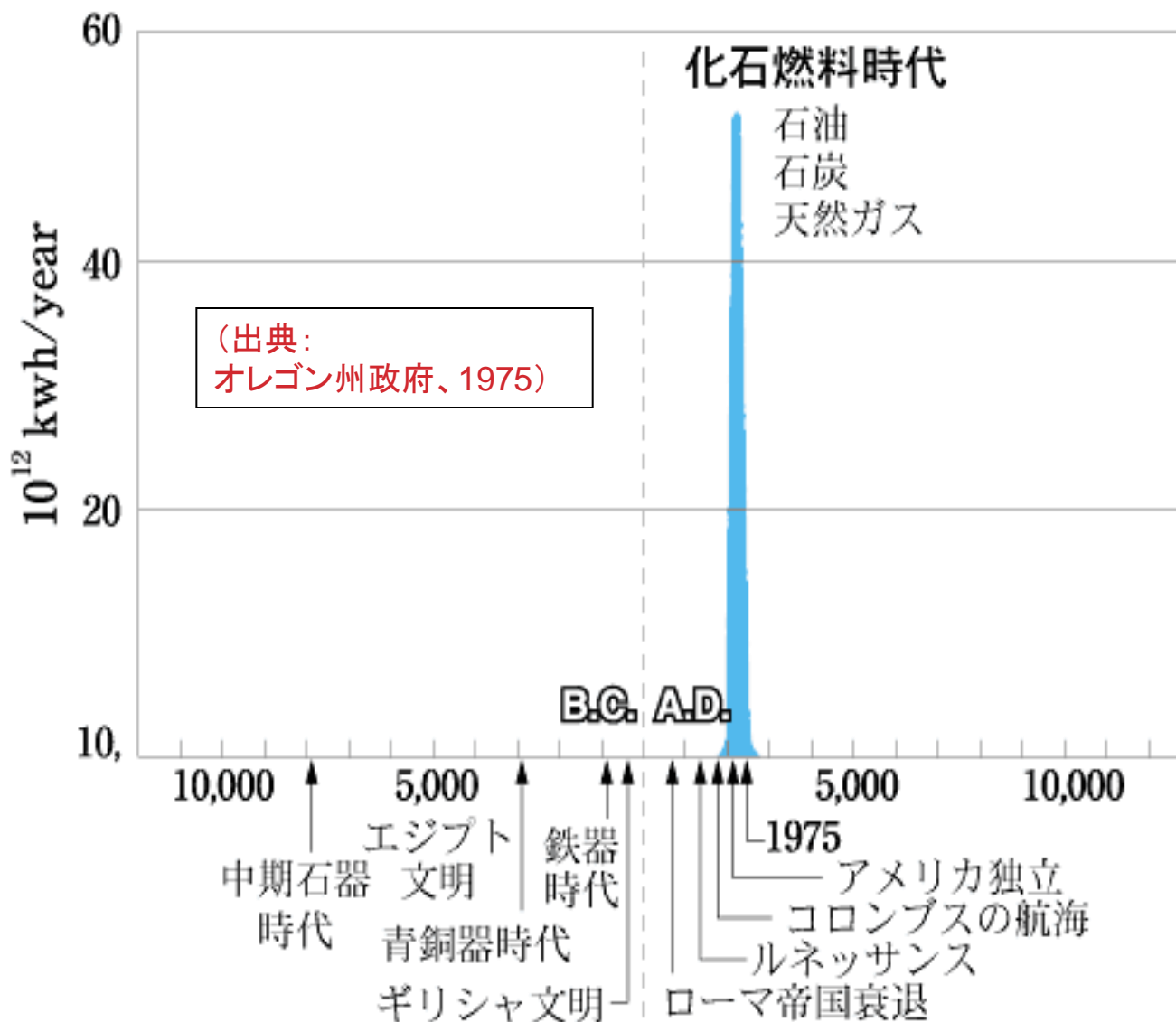
←海面上昇(熱膨張)
数百年~千年

←気温の安定化
数百年

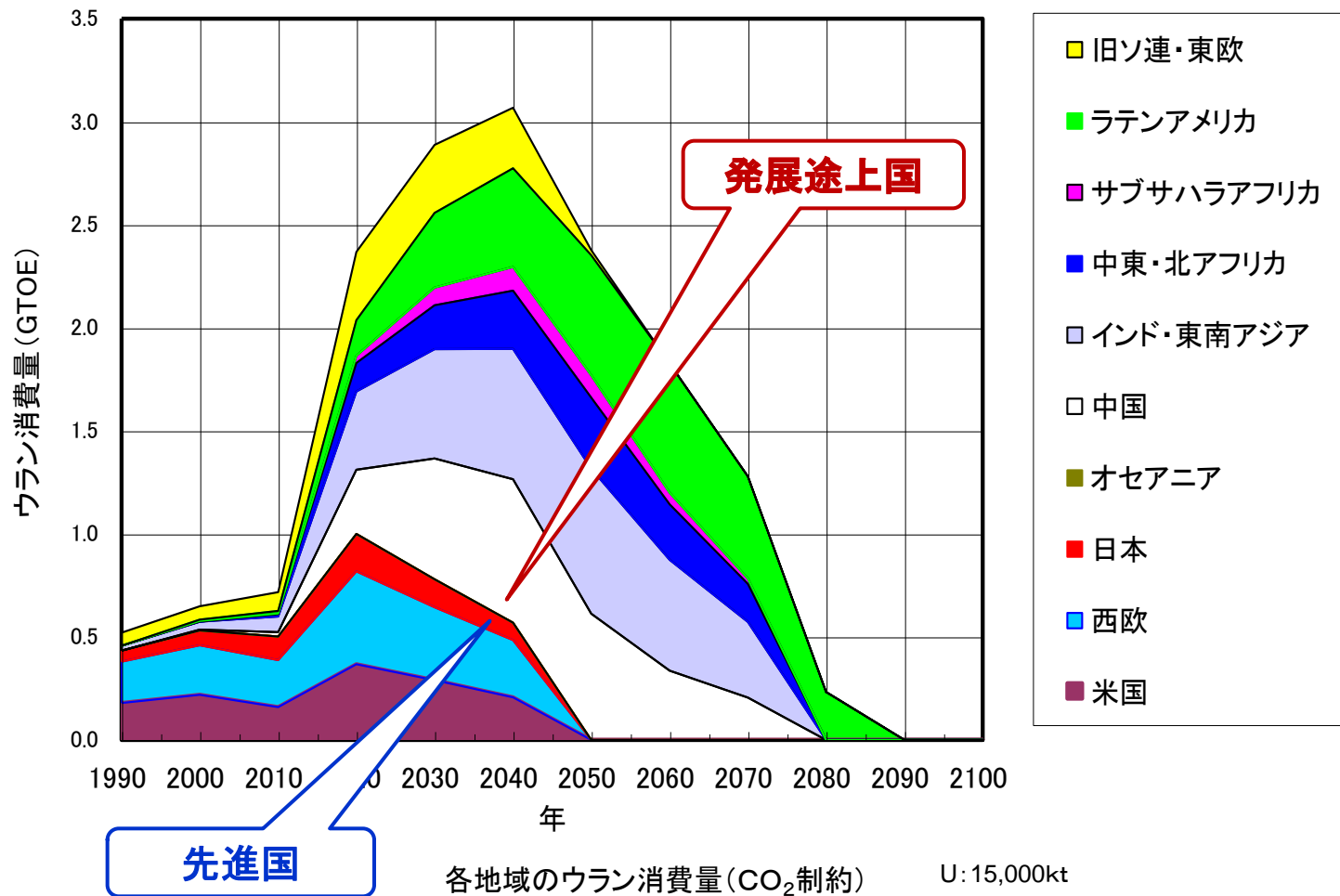
←CO2の安定化
百年~3百年

←CO2排出量

□ エネルギー資源問題の特徴 一瞬の化石燃料時代



ウラン資源の利用(CO2制約)



(氏田, 2008)

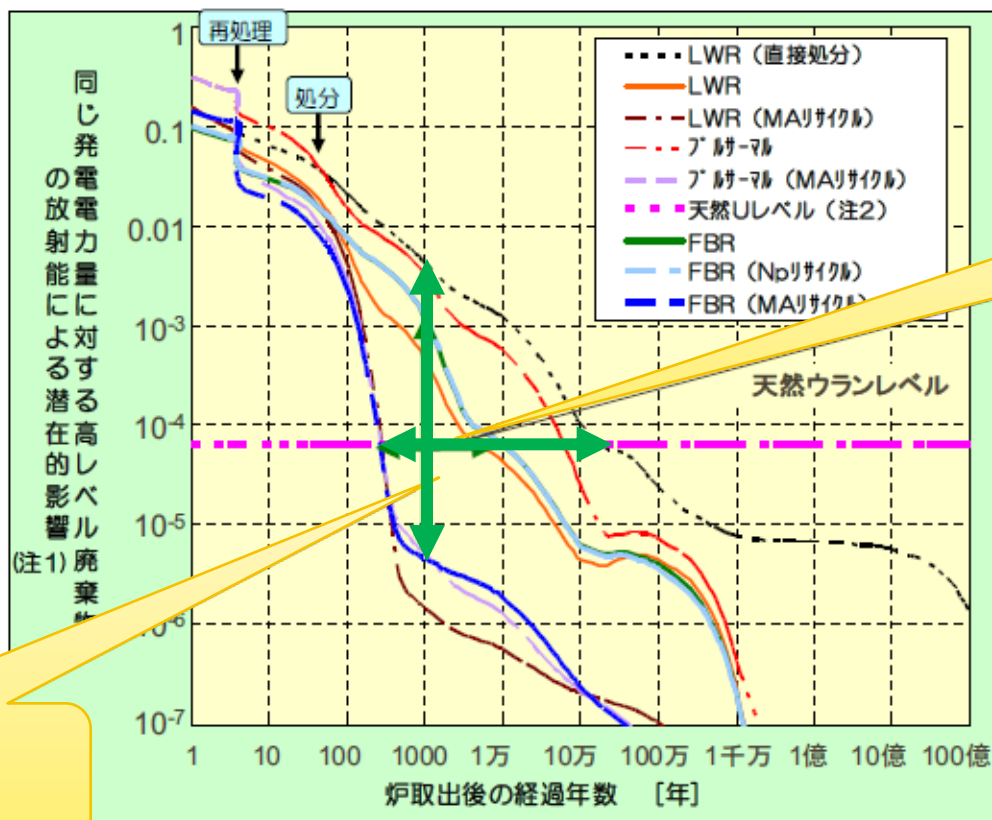
ウラン鉱石の埋蔵量と燃料サイクル

| | 資源量 | 利用可能年数 (2012年の発電量、発電効率において) | |
|---------|-----------|--------------------------------|---------------------------------|
| | | 軽水炉 ワンスルー (U235利用) | 高速増殖炉 核燃料サイクル (Pu利用、100倍) |
| 既知在来資源 | 764万t-U | 142年 | 14,200年 |
| 総既知在来資源 | 1,533万T-U | 288年 | 28,800年 |

**世代間倫理-長期的価値の保存
:一万年の長期エネルギー源の確保**

核燃料サイクルにおける消滅処理の意義

世代間倫理-長期的負の遺産の解消 : 廃棄物の寿命短縮



LWR直接処分の
数十万年から
数百年へ

LWR直接処分
から3桁低減

MA: マイナーアクチナイド

原子力委員会バックエンド対策専門部会報告書「長寿命核種と分離変換技術に関する研究開発の現状と今後の進め方」
(平成12年3月31日)

ロ リスクとベネフィット比較/長期的価値評価

| 評価指標 | | 化石エネルギー | 原子力 | 再生可能エネルギー |
|----------------|------------------------|---------------------------|------------------------------|-------------------|
| リスクと ベネフィット | 廃棄物発生量 | ×× 脱硫排煙、灰 | ◎ 放射能 | ◎ 酸 |
| | 健康リスク | ×× SOx、NOx、粒子 | ◎ ガン | - |
| | 事故リスク | × (××@LPG) | ◎ | - |
| | CO2排出量 | ×× 燃料 (○CCS付) 設備・運用 | ◎ 設備・運用 | ◎ 設備・運用 |
| | エネルギー密度 | ◎ 需要の2ケタ上 | ◎ 需要の2ケタ上 | ×× 需要以下 |
| | EPR (エネルギープ ロフィット比) | ○ | ○ | × |
| | エネルギー自給率 | × 輸入 | ○ 準国産 | △ 国産だが寄与少 |
| 長期的価値 | 資源 | × 資源枯渇 | ◎ Uには資源枯渇があるが、Pu利用で1万年に延長 | △ 永久に存在するが量的制約 |
| | CO2、廃棄物 | ×× 地球温暖化 環境問題 | △ 消滅処理により百年オーダーで処分可能 | ◎ |

基幹電源

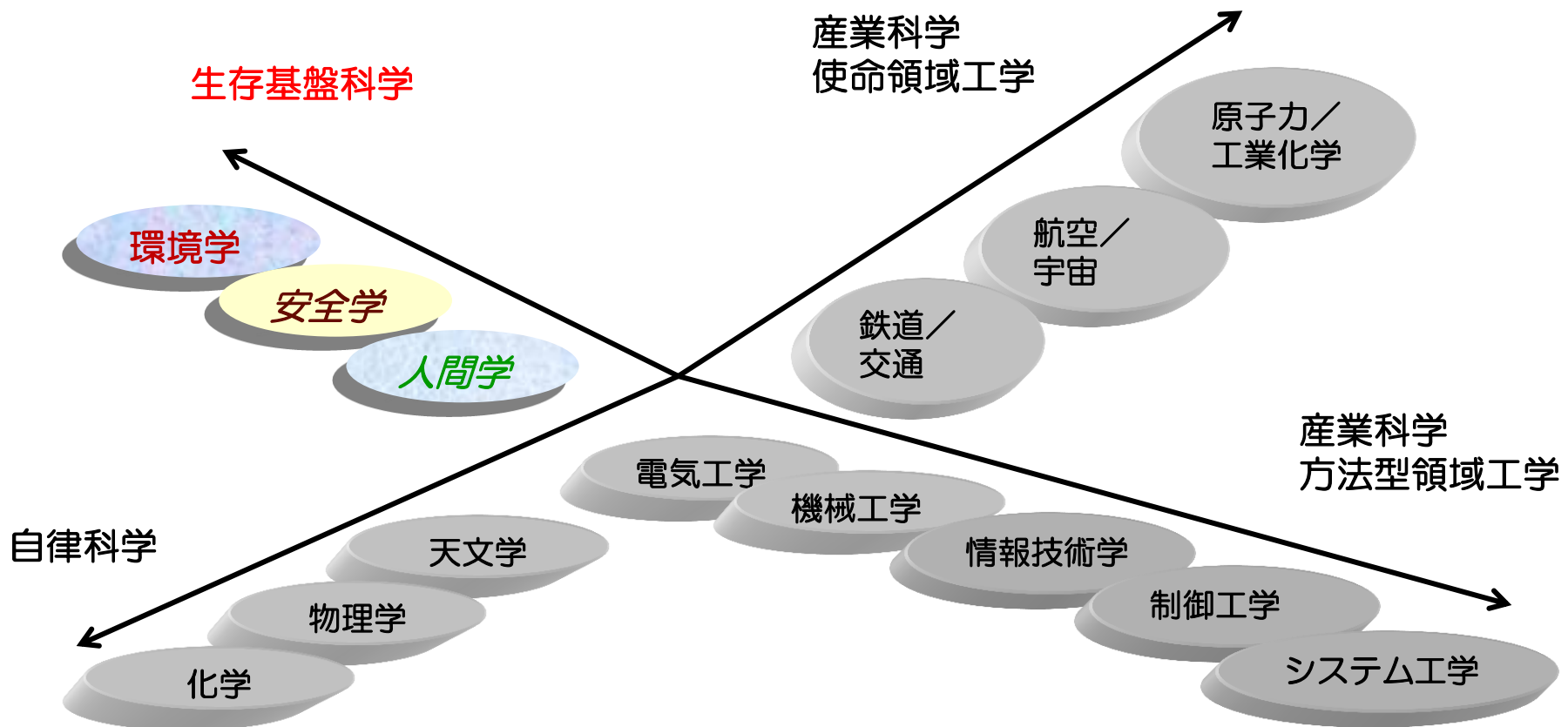
分散電源

考察

- 早期に方針、すなわちエネルギーにおける原子力の位置づけを明確化する
- 原子力業界として、まず事故の教訓からレジリエントシステム化も含めて安全概念を再構築すること
- 原子力産業の在り方の明確化も必要である。
 - 推進・規制、国家賠償責任、地域協定、外部監視の目の在り方
 - 安全設計のメーカ、安全運用の電力、安全社会システムの国の責任の明確化
- 安全の課題と同時に将来の技術革新も語るべき
- 原子力システムは本来的にレジリエントなシステムであり、今は安全思想の再構築によりレジリエント化が図られつつある
- それに加え、安全性向上、利便性向上など新たな原子炉概念である第4世代炉（高速増殖炉、高温ガス炉）、中小型炉、処理処分、消滅処理などの革新的な研究開発が進められている
 - 開発工程を明確に打ち出すべき
 - 日本における自主技術開発と国際協力の意味も再検討すべき

補足

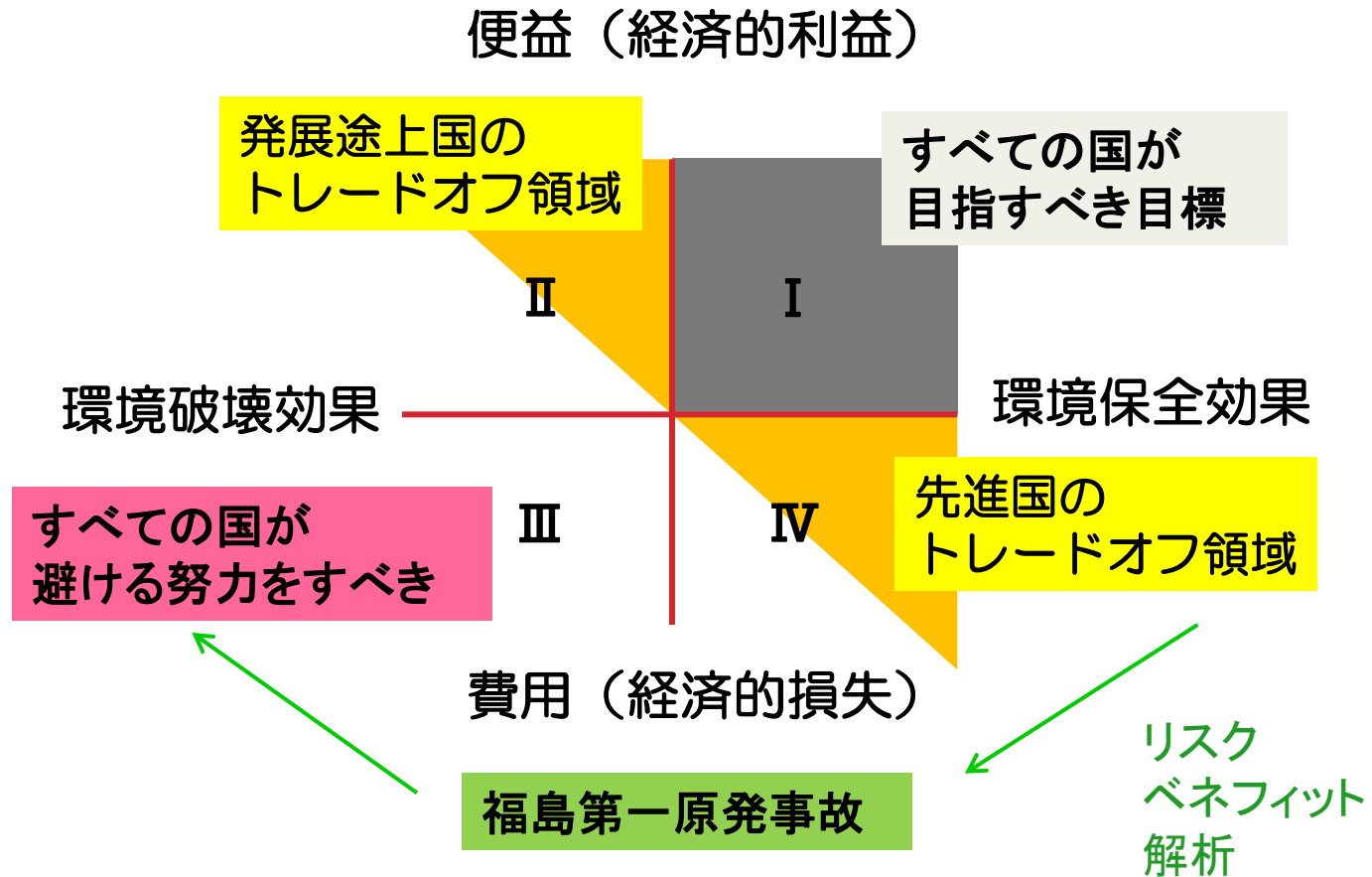
□ 技術と社会 環境学と安全学と人間学の位置付け



岩波講座 地球環境学 1

リスクベネフィット解析に基づく 環境保全と経済性の関係

(中西,1994)



衡平性指標の考え方1

- **責任** (温暖化寄与度、大気への権利) - 発展途上国が先進国を責める構図
 - 気温上昇への歴史的貢献 (排出量)
 - **一人当たり排出量** - 平等論
 - 国の絶対排出量

- **能力** (支払い能力) - 発展途上国と先進国の差異ある責任
 - 国内総生産: GDP、一人当たりGDP
 - 人間開発指標: HDIと一人当たりGDPの組み合わせ

- **実効性** (削減ポテンシャル)
 - 生産原単位あたり排出量
 - **GDP当たり排出量** - 合理的だが、先進国間の衡平性
 - **限界削減費用** - 発展途上国の衡平性に利用可能
- 最も合理的だが、先進国間の衡平性

衡平性指標の考え方2

- トップダウンアプローチ(国別削減目標、京都プロトコル、ポスト京都プロトコル)
 - プレッジアンドレビュー方式(国別削減約束)
 - 排出権取引(2°C実現に向けて))
- ボトムアップアプローチ(セクター別削減目標、技術対策)

- 世代間衡平性
 - 気温上昇への歴史的貢献(排出量)で、発展途上国が先進国を責める構図があるが、将来世代への衡平性を問えば、今後に大幅な排出が予想される国々(中印など)には大きな責任がかかることを認識すべき
 - 地球温暖化の問題では、現世代がミニマムの成長で我慢し将来世代のために対策費用を捻出する努力(持続的発展)をしてきた実績、研究開発により新たな革新技術の芽を提供すること、が大切
 - 原子力(FBRなど)や再生可能のような長期のエネルギー源を確保すべき
 - 先進国が技術支援で途上国の排出削減に協力

地球温暖化のキーワード

- 持続可能な発展 Sustainable Development
- 衡平性 Equity
 - 空間的
 - 地球レベルの温暖化問題、国家のエネルギーセキュリティ、地域の環境問題
 - 世界として、地域として、国家として、個々の組織として、そして個々の人間として、何ができるのかを問われている
 - 共通だが差異ある責任 Common but Differentiated Responsibility
 - 時間的
 - 環境影響には様々な相違の大きな時間遅れがある
 - 数千年を対象とする科学的分析、百年を対象とする技術開発評価、数十年を対象とする経済分析、具体的な政策は政治に左右され1年程度で揺れ動く
 - 事前警戒原則 Precautionary Principle
 - 世代間倫理 Inter-Generational Ethics

原発停止の経済へ影響

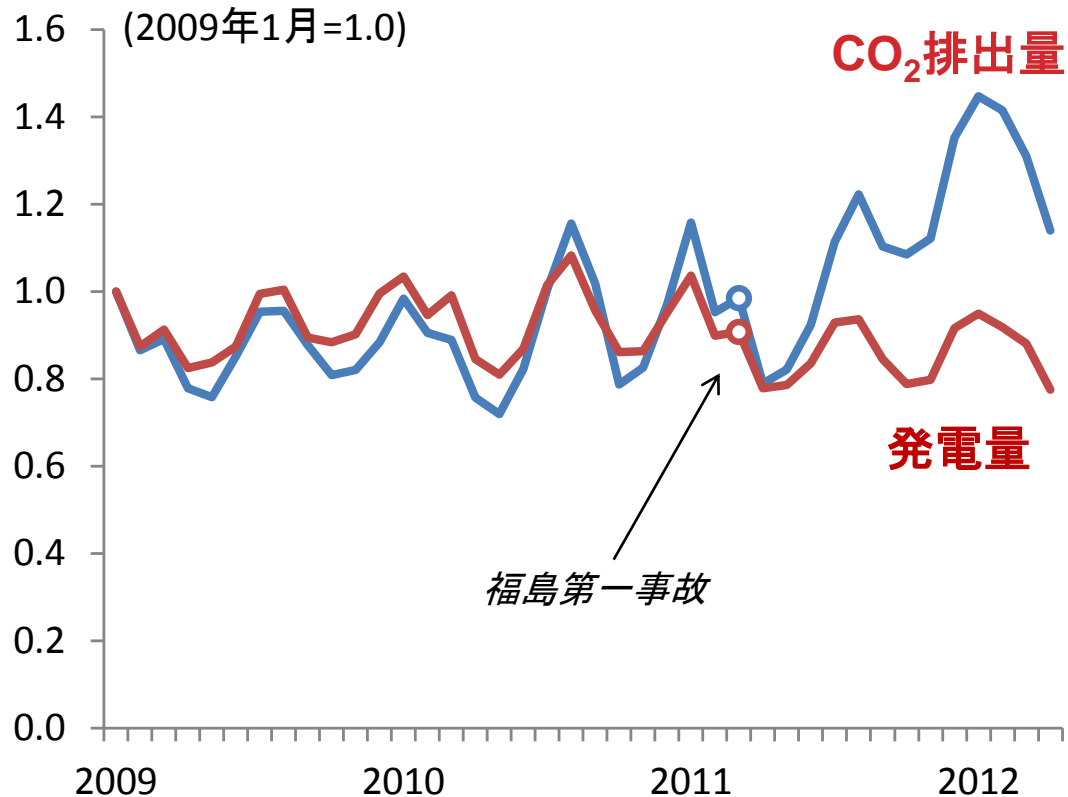
(出所) (一財)日本エネルギー経済研究所 「短期エネルギー需給見通し」 2011年12月22日

電力制約なし(原発あり)ケースと比較(2012年度)

- ・GDP: 1.8%ポイント減(9.1兆円減、年度ベース)
- ・鉱工業生産指数: 3.4%ポイント減
- ・失業者数: 10万人増
- ・化石燃料輸入増: 2.0兆円増
- ・発電用燃料増: 2.3兆円増(2.5円/kWh相当)

原発停止で増加するCO₂排出量

- ✓ 2011年度、節電により夏冬の発電量は減少
- ✓ 火力発電の増加に伴い、発電部門のCO₂排出量は大きく増加

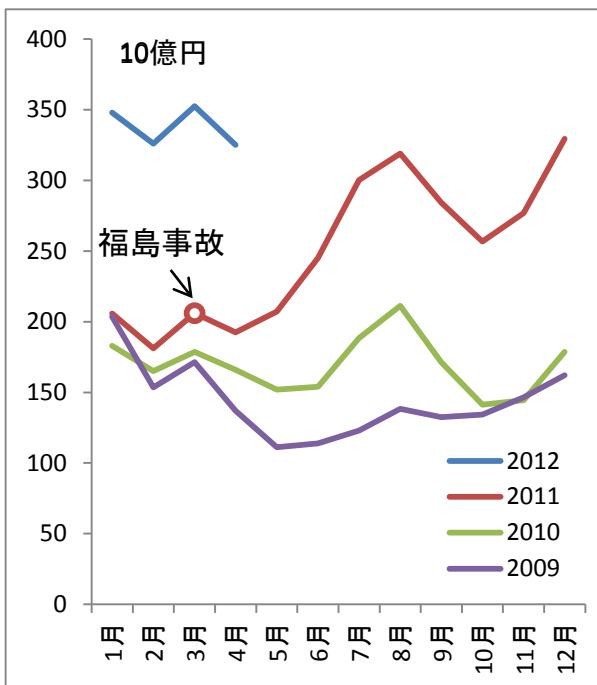


(yobi) 原発停止で急増する火力発電の燃料費

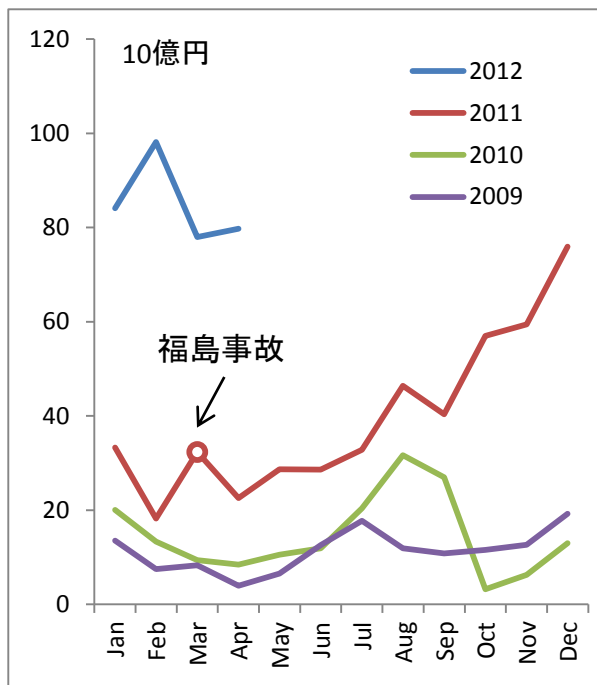
- 原発稼働停止で急増する火力発電の燃料費
- 燃料費増加で国富流出、国民負担の増加
 2011年度: 2.3兆円増 (1.8万円/人)、電力1kWhあたり2.4円増
 2012年度(見込み): 3.1兆円増 (2.5万円/人)

発電用燃料費 (10電力会社計)

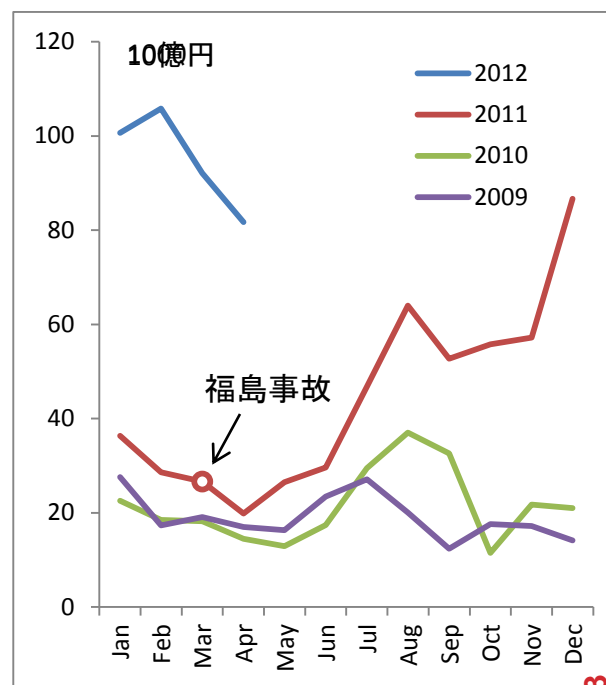
天然ガス(LNG)



原油



C重油



CHERNOBYL'S LEGACY: HEALTH, ENVIRONMENTAL AND SOCIO-ECONOMIC IMPACTS, 2003-2005

CHERNOBYL FORUM: IAEA, WHO, UNDP, FAO, UNEP, UN-OCHA, UNSCEAR, THE WORLD BANK, AND THE GOVERNMENTS OF BELARUS, THE RUSSIAN FEDERATION AND UKRAINE

- 100人の科学者
- 60万人の調査

- 直接死亡:47人+甲状腺がん9人
- 甲状腺がん死亡率上昇確率:2-3% (3千人/11万人)

- 約12万人の避難、約35万人の強制移動
- 約700万人への援助
- 援助に依存する心的傾向、誇張された情報に基づく将来への漠然とした健康不安
- 生活を自ら切り開く意欲を失わせた