

日本工学会 技術倫理協議会 第11回公開シンポジウム
技術倫理の最前線 ～社会に深く係わる技術の倫理問題を考える～
平成27年11月2日(月) 建築会館ホール

地球温暖化とエネルギーセキュリティの 課題と対策 世代間倫理の観点も含めて

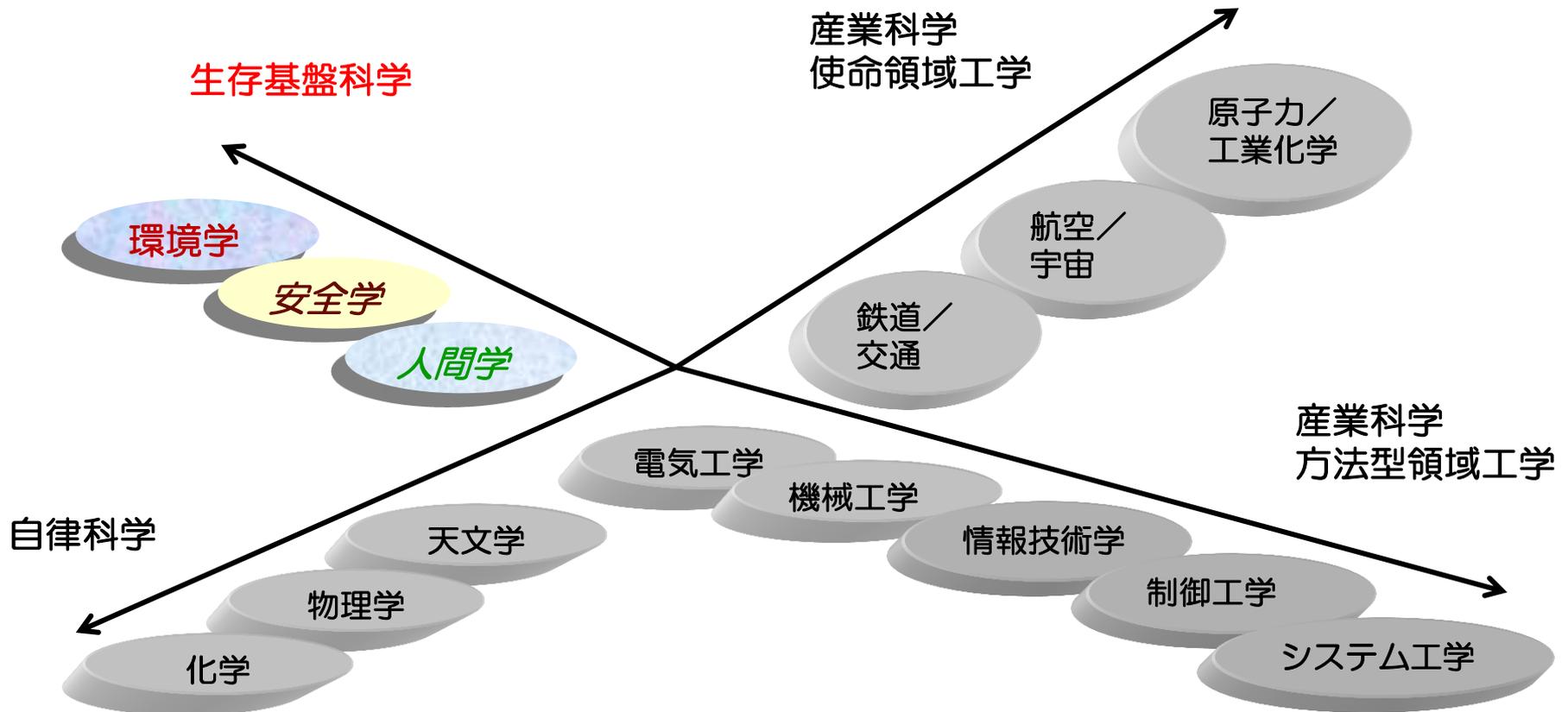
氏田 博士

キヤノングローバル戦略研究所

講演内容

- 技術と社会
- リスクとベネフィットの比較
- エネルギーセキュリティ
- 地球の環境・エネルギー問題
- 気候変動問題の特徴
- エネルギー資源問題の特徴
- リスクとベネフィット比較/長期的価値評価

□ 技術と社会 環境学と安全学と人間学の位置付け



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

IPCC: Inter-governmental Panel on Climate Changeによる科学的知見の評価

	第2次評価 (SAR) 1995	第3次評価 (TAR) 2001	第4次評価 (AR4) 2007	第5次評価 (AR5) 2013
総合所見	人為的活動による地球気候への影響が表れていることが示唆される	SARの時に比べて、地球気候への人為的影響に、より確かな証拠がある	温暖化は人間活動の結果の可能性が非常に高い(90%以上)	温暖化は人間活動の結果の可能性が極めて高い(95%以上)
気温上昇 過去100年 今後100年	0.3~0.6 °C 1.0~3.5 °C	0.4~0.8 °C 1.4~5.8 °C	0.74°C 1.1~6.4 °C	0.85 °C 0.3~4.8 °C
海面上昇 過去100年 今後100年	10~25 cm 13~94 cm	10~20 cm 9~88 cm	- 18~59cm	- 26~82 cm

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**」の社会的受容には、**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**

□ 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
= $\text{CO2排出量} / \text{エネルギー消費量 (エネルギーの種類)} \#$
× $\text{エネルギー消費量} / \text{GDP (生産のエネルギー効率性)}$
× $\text{GDP} / \text{人口 (豊かさ)}$
× 人口
- # $\text{CO2排出量} / \text{CO2発生量 (炭素回収隔離、CCS)}$
× $\text{CO2発生量} / \text{エネルギー消費量 (化石燃料の種類)}$

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

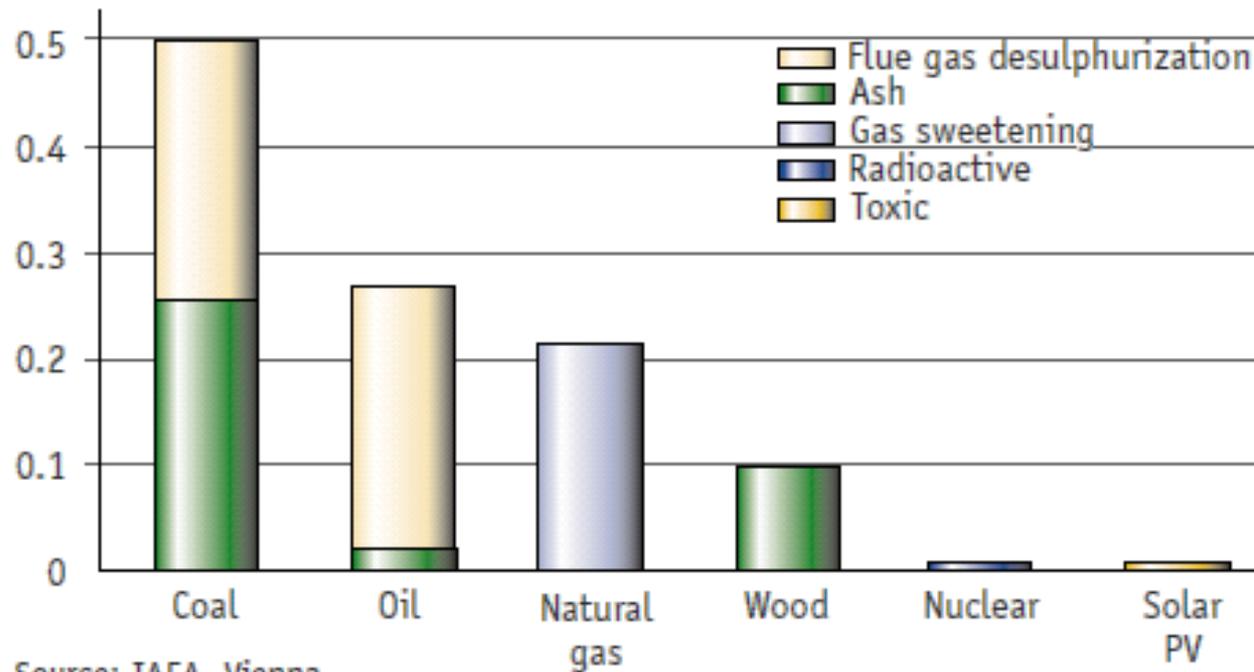
核分裂

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

廃棄物発生量の比較

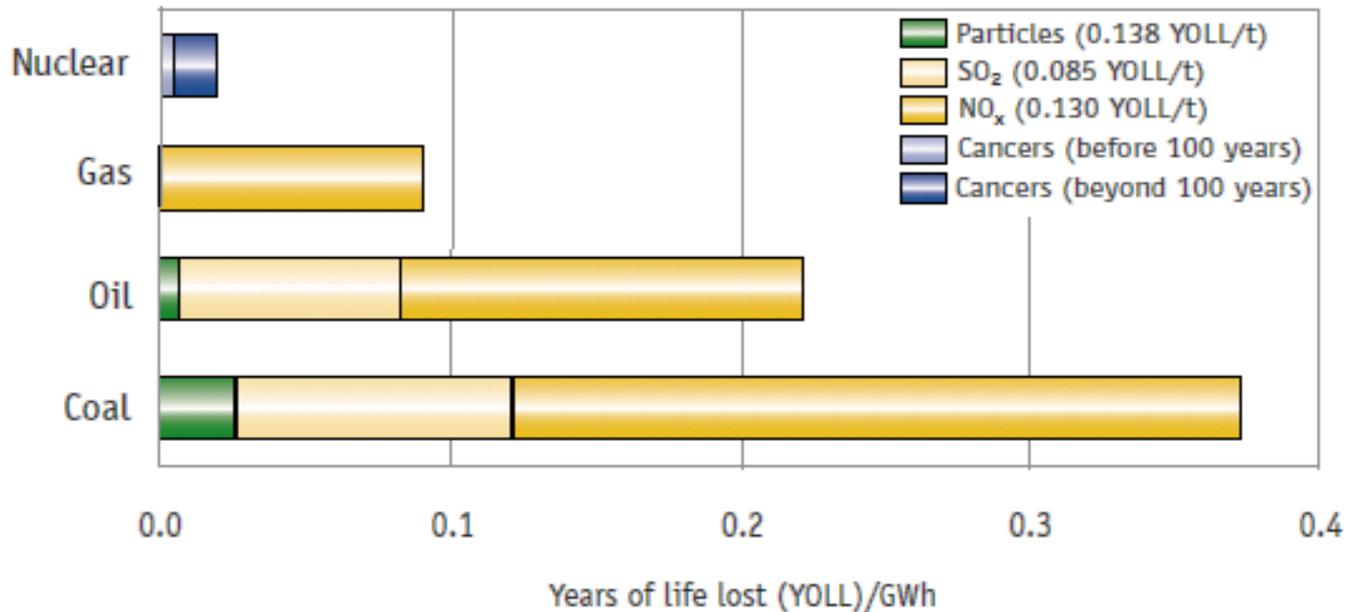
Million tonnes
per GWe yearly



Source: IAEA, Vienna

Nuclear Energy Today, OECD/NEA, 2002

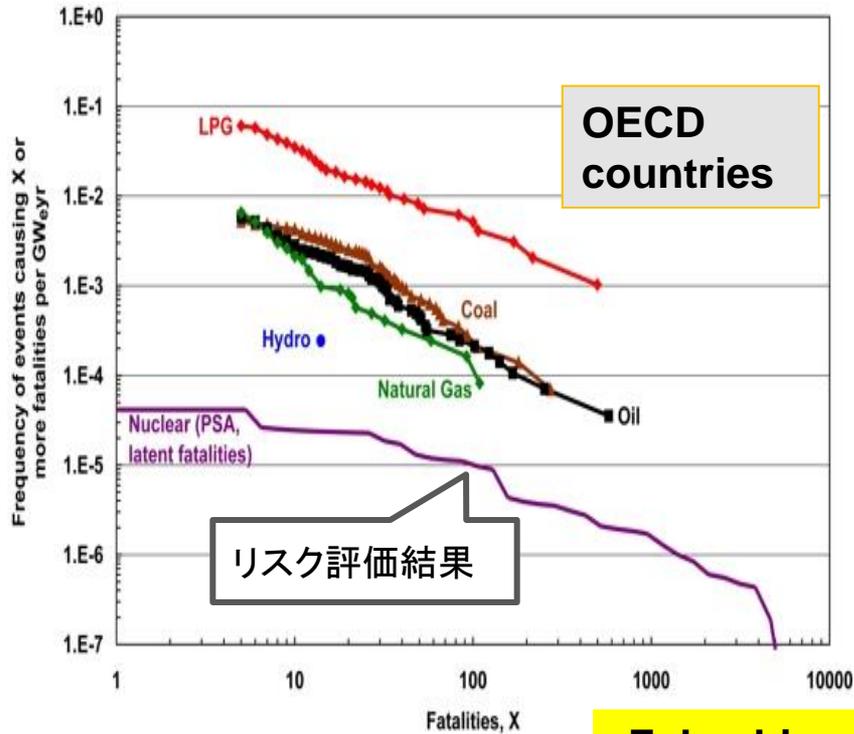
健康リスクの比較



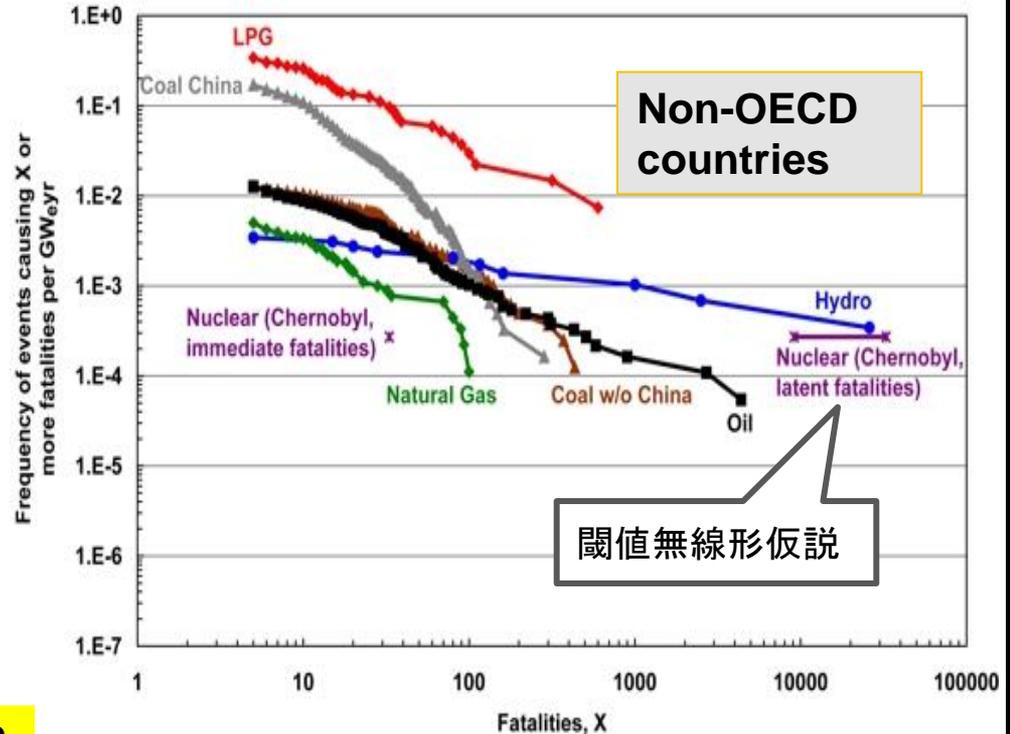
Source: "Comparative Assessment of Emissions from Energy Systems", IAEA Bulletin, 41/1/1999.

Nuclear Energy Today, OECD/NEA, 2002

エネルギー産業の事故のリスク比較



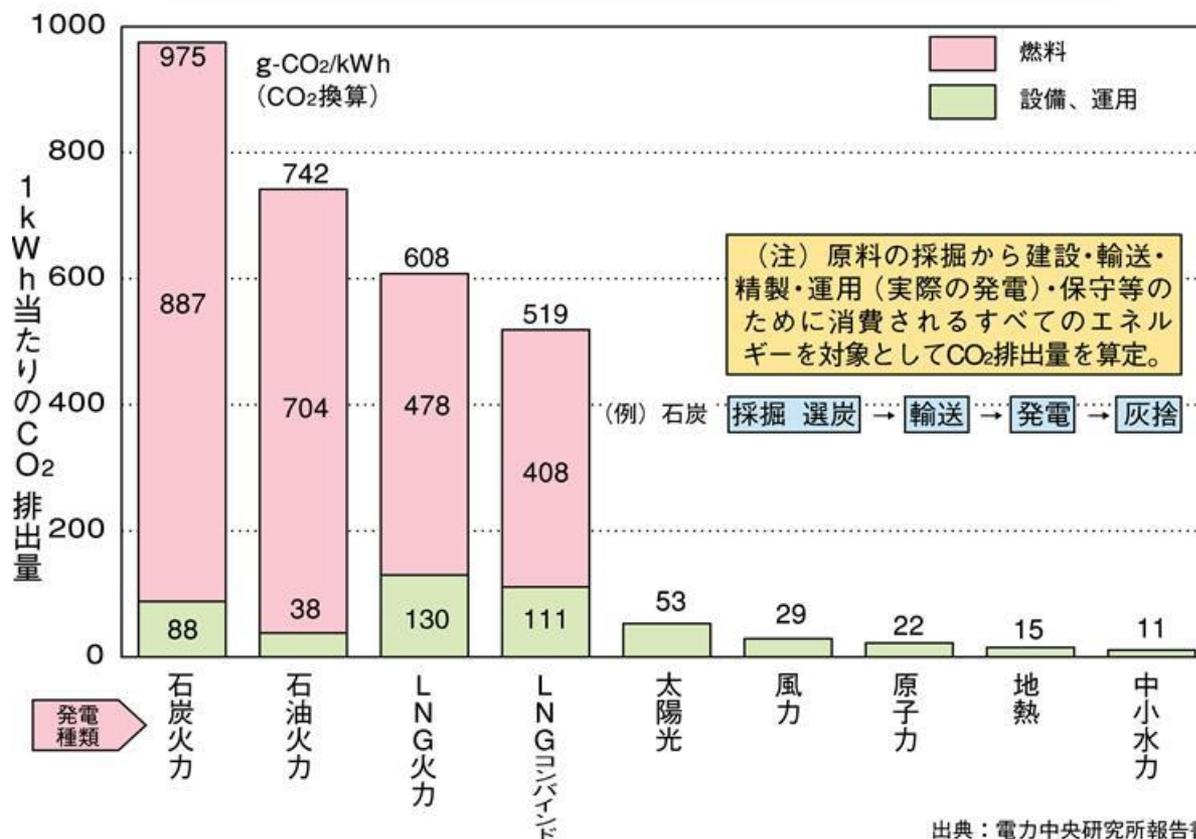
•Fukushima?
•TMI?



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

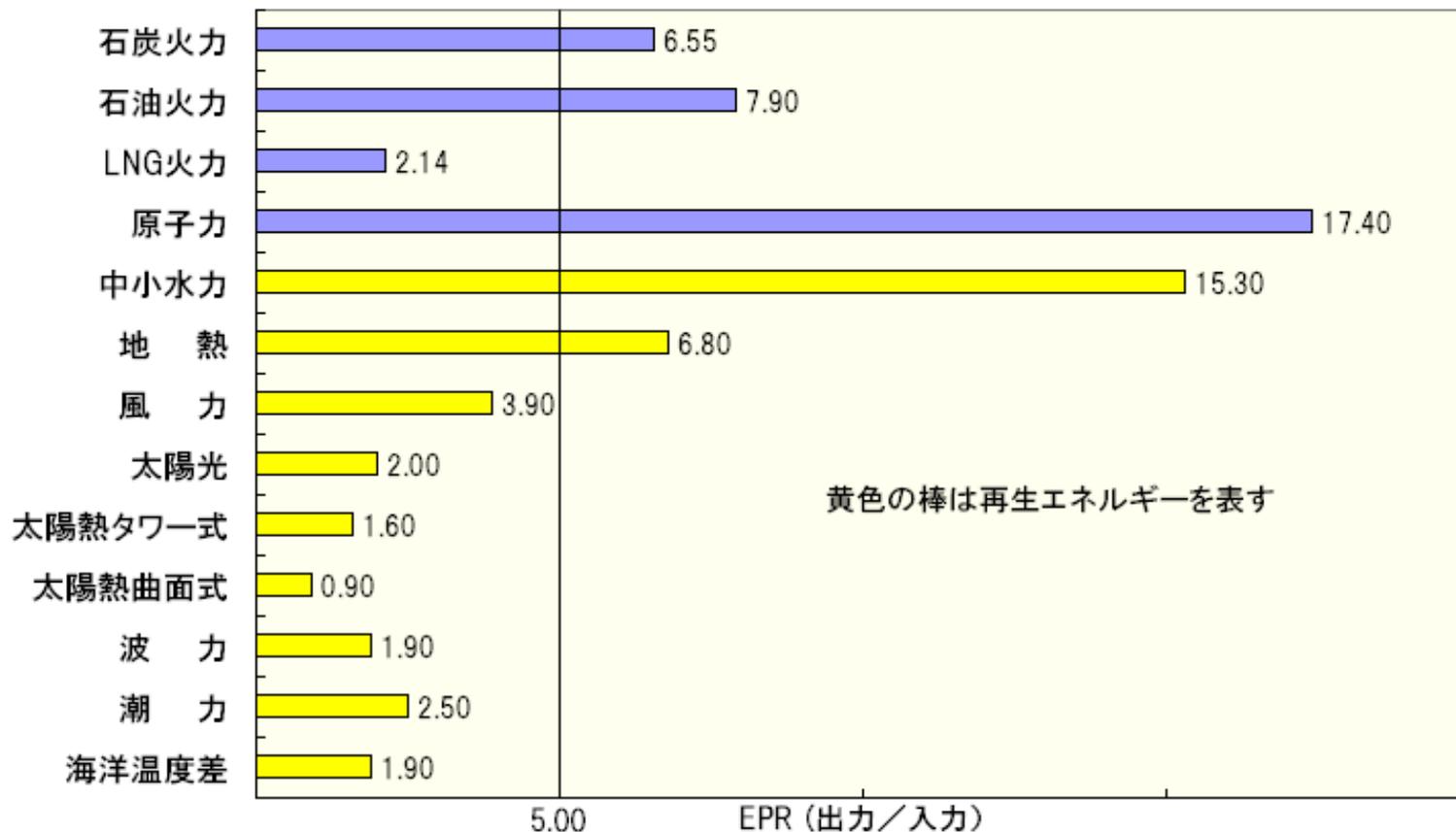
- 発電所敷地面積あたりの発電電力量(筑波大、内山)

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

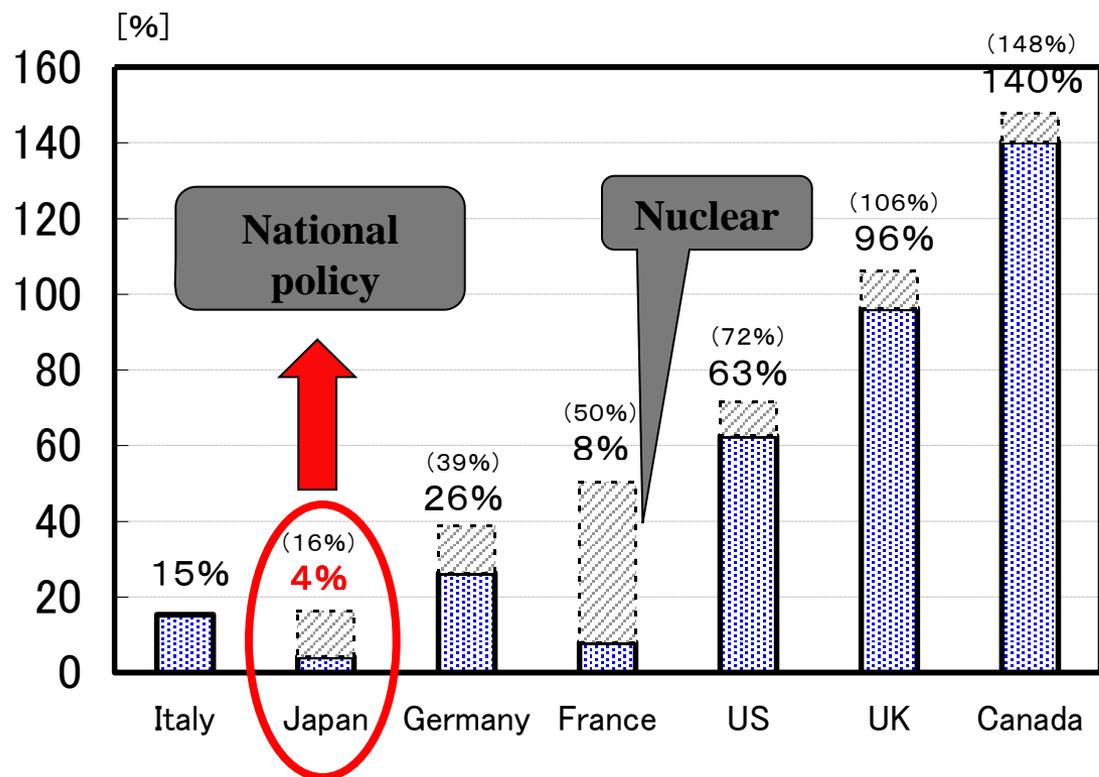
広義のエネルギーセキュリティ(氏田, 2008)

時間軸 と空間軸から分類できる短期の危機vs.長期の課題

時間範囲	空間範囲	内容
狭義のエネルギーセキュリティ 短期 ~10年 エネルギー危機	■国 ■地域 ■世界規模	■エネルギー供給-ベストミックス ■燃料供給-Uの問題 ■電力供給-ネットワークの課題 ■発展途上国の利用拡大 (BRICs, etc.)-ベストミックス
長期 ~100年 エネルギー問題	■地球規模	■化石燃料資源の枯渇 ■地球温暖化

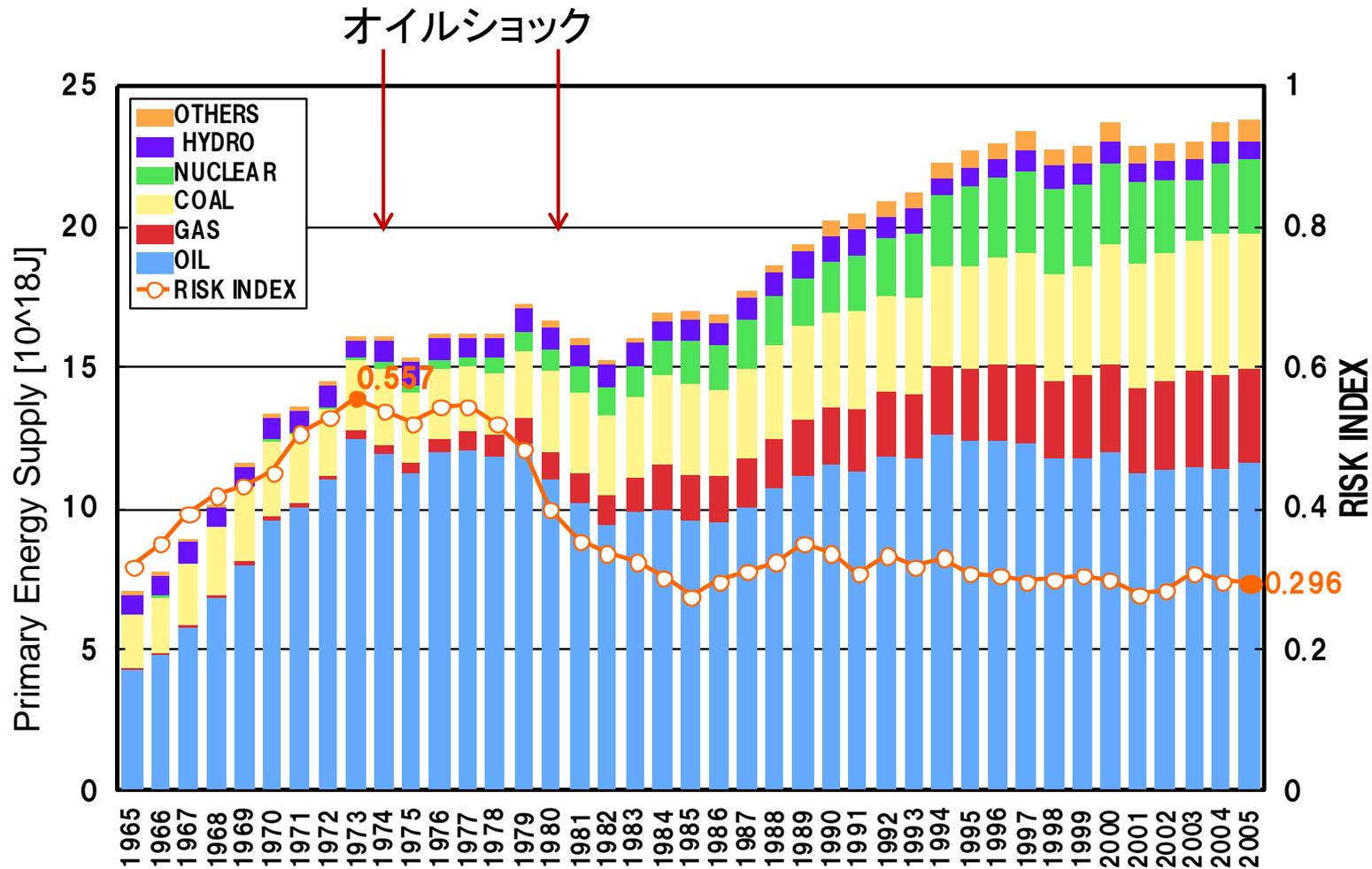
エネルギーセキュリティの評価

-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

地球の環境・エネルギー問題

成長の限界—ローマ・クラブ「人類の危機」レポート

ドネラ H.メドウズ

-システムダイナミクス

1972年の段階で「地球の資源は有限であり、農地も有限だ。その一方で人口は幾何級数的に増加し、爆発的に増えていく。そうなったら飢餓がはびこり地球は地獄となる。野放図な経済成長と人口増加に歯止めをかけろ」と警鐘を鳴らした

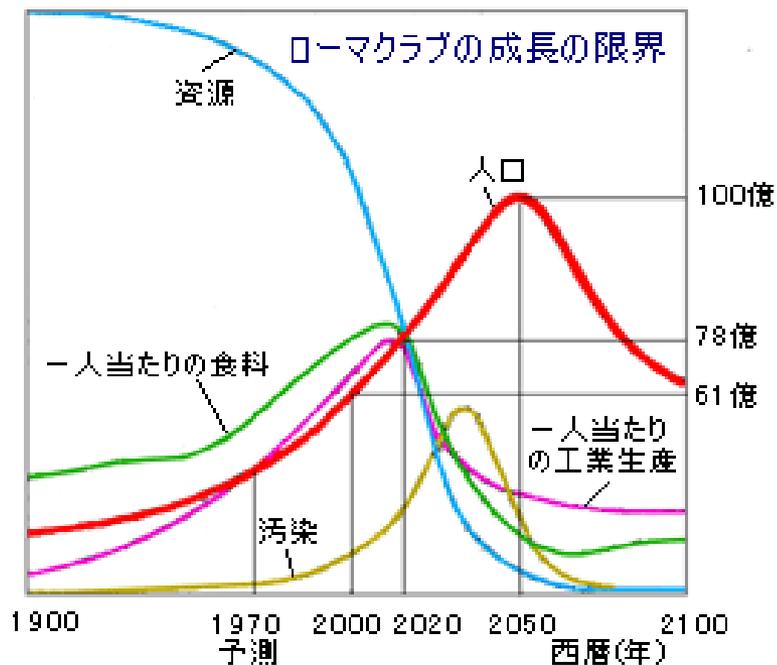
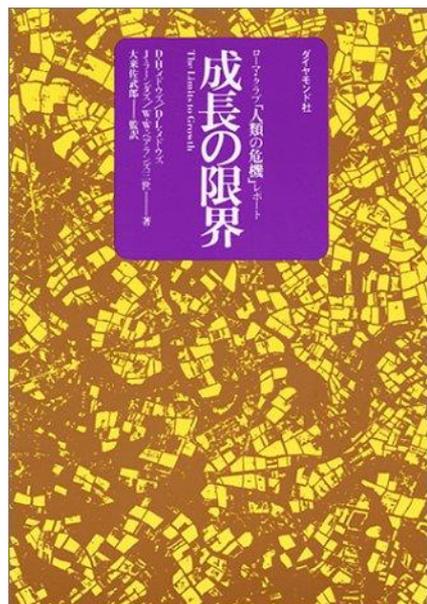
1972年

1992年

2005年

「限界を超えて」

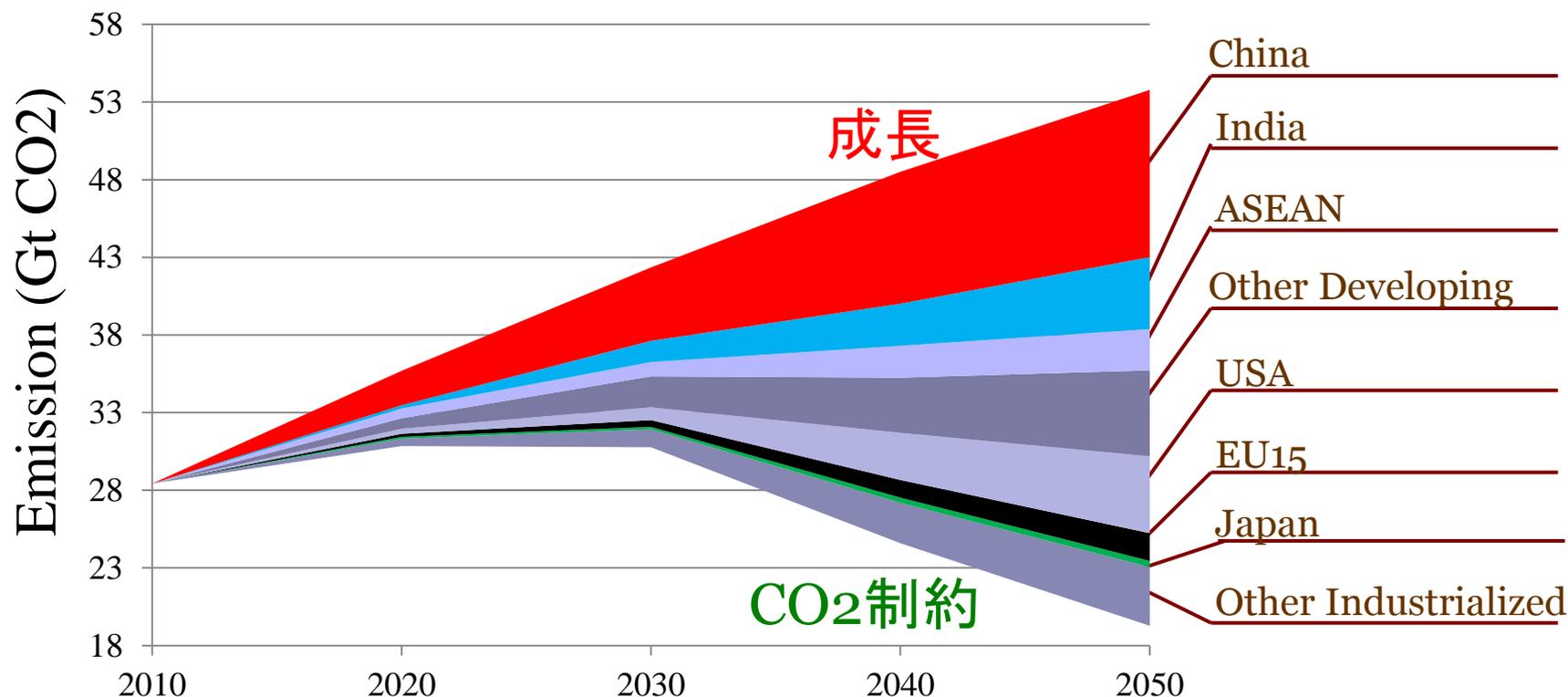
「成長の限界
-人類の選択」



1962年カーソン
『沈黙の春』
1963年フラー
『宇宙船地球号』

領域ごとのCO₂ 排出量削減

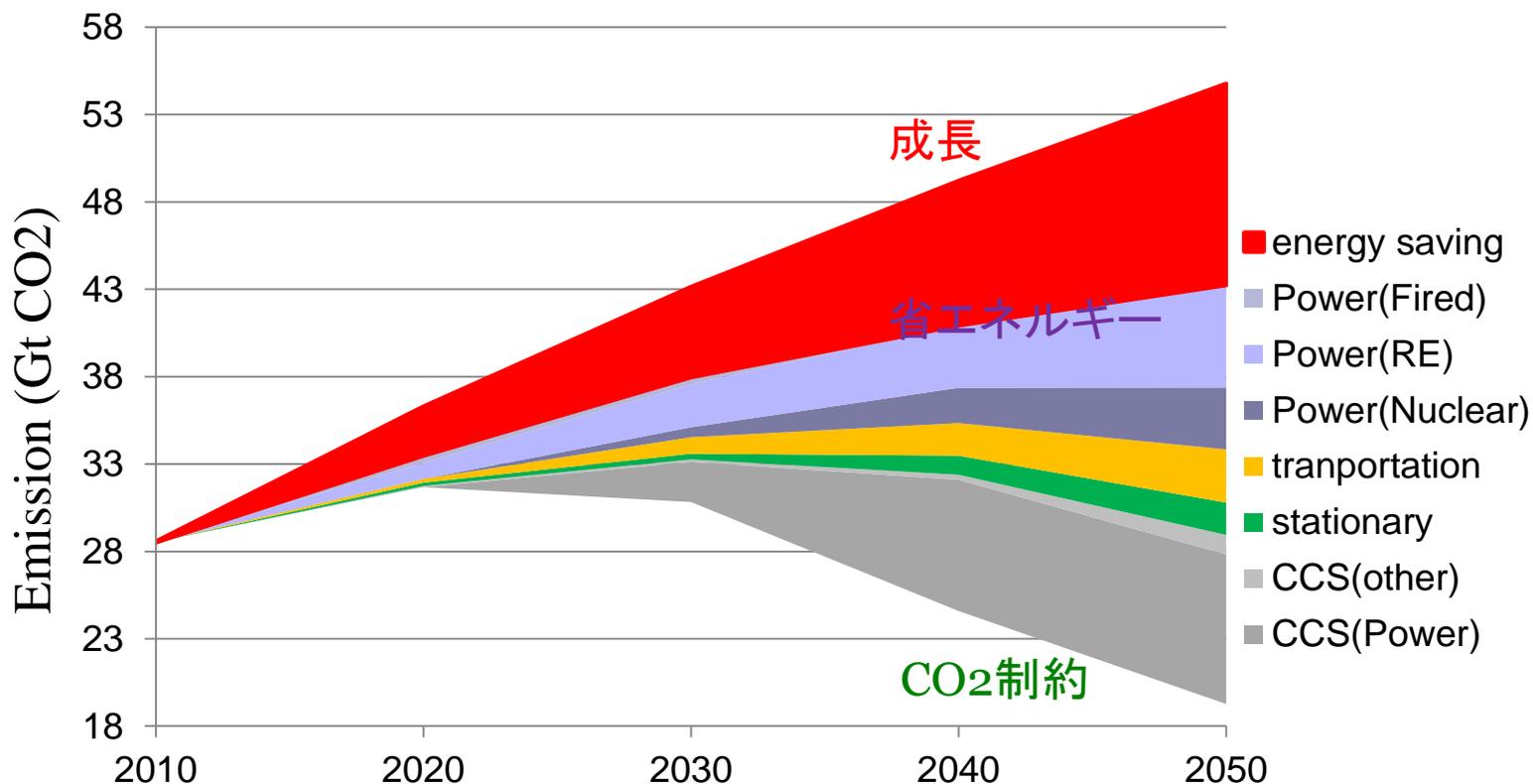
-エネルギーシステムコスト最小化



世界の削減量の70%は主要な発展途上国の削減による

セクタごとのCO₂ 排出量削減

-エネルギーシステムコスト最小化



- 省エネルギーが重要
- 主要な削減セクタは発電部門（運輸、定置）
- CCS（炭素回収隔離、carbon capture and storage）は主要な削減技術

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

CO2排出量のピーク

←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

現在 百年

千年

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

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)

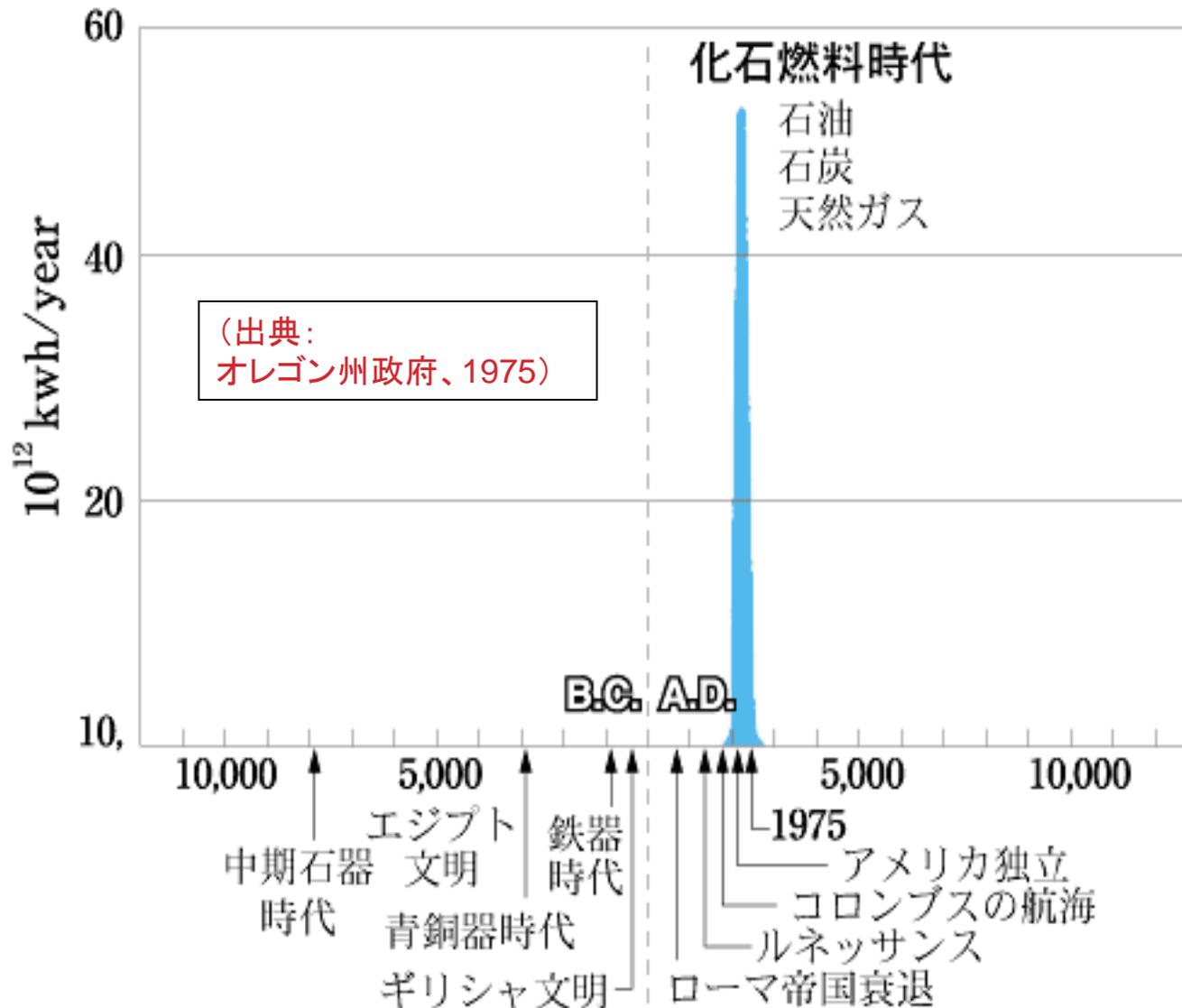
- 世代間衡平性
 - 気温上昇への歴史的貢献(排出量)で、発展途上国が先進国を責める構図があるが、将来世代への衡平性を問えば、今後に大幅な排出が予想される国々(中印など)には大きな責任がかかることを認識すべき
 - 地球温暖化の問題では、現世代がミニマムの成長で我慢し将来世代のために対策費用を捻出する努力(持続的発展)をしてきた実績、研究開発により新たな革新技術の芽を提供すること、が大切
 - 原子力(FBRなど)や再生可能のような長期のエネルギー源を確保すべき
 - 先進国が技術支援で途上国の排出削減に協力

事前警戒原則(世代間倫理)

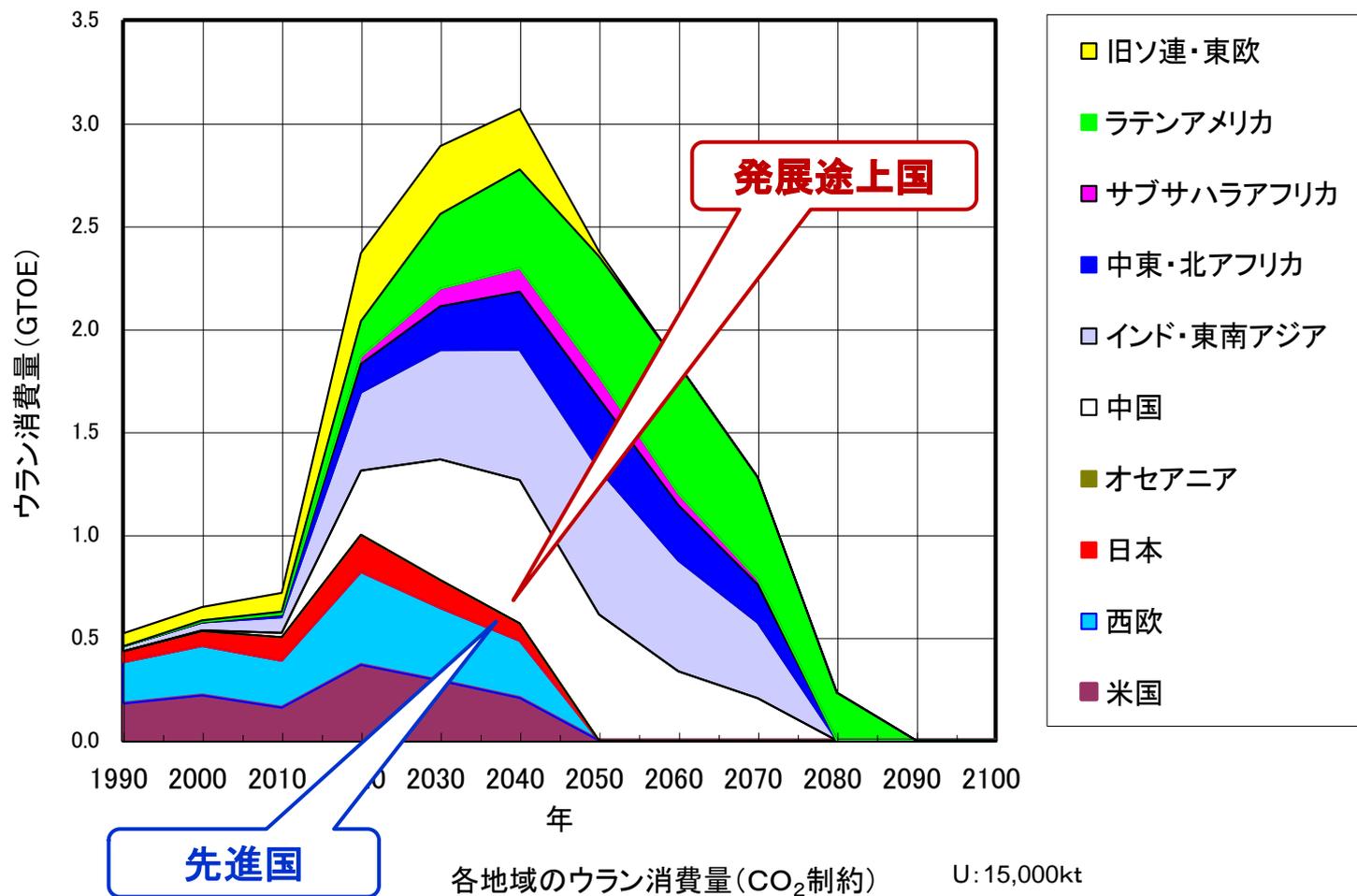
- 非常に長期にわたる地球規模の問題の対策としては、たとえその効果が科学的に不確かだとしても、事前警戒原則にのっとり対応することが必要
- その定義は、リスク評価の際に生じるさまざまな科学的不確実性を承知の上で、因果関係が必ずしも明確に証明できない状態ではあるが、将来起こるかもしれない被害を避けるために規制を行うルール
 - 人の生命や生物の生存に致命的な被害を与える**不可逆性**
 - 地域などの空間スケールを超える**越境性**と長期にわたる**蓄積性**
 - 次世代の個人、集団、社会が選択や回避の自由度がない**非選択性**
- 対策を検討するには、リスクベネフィット解析に基づく環境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

□ 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)



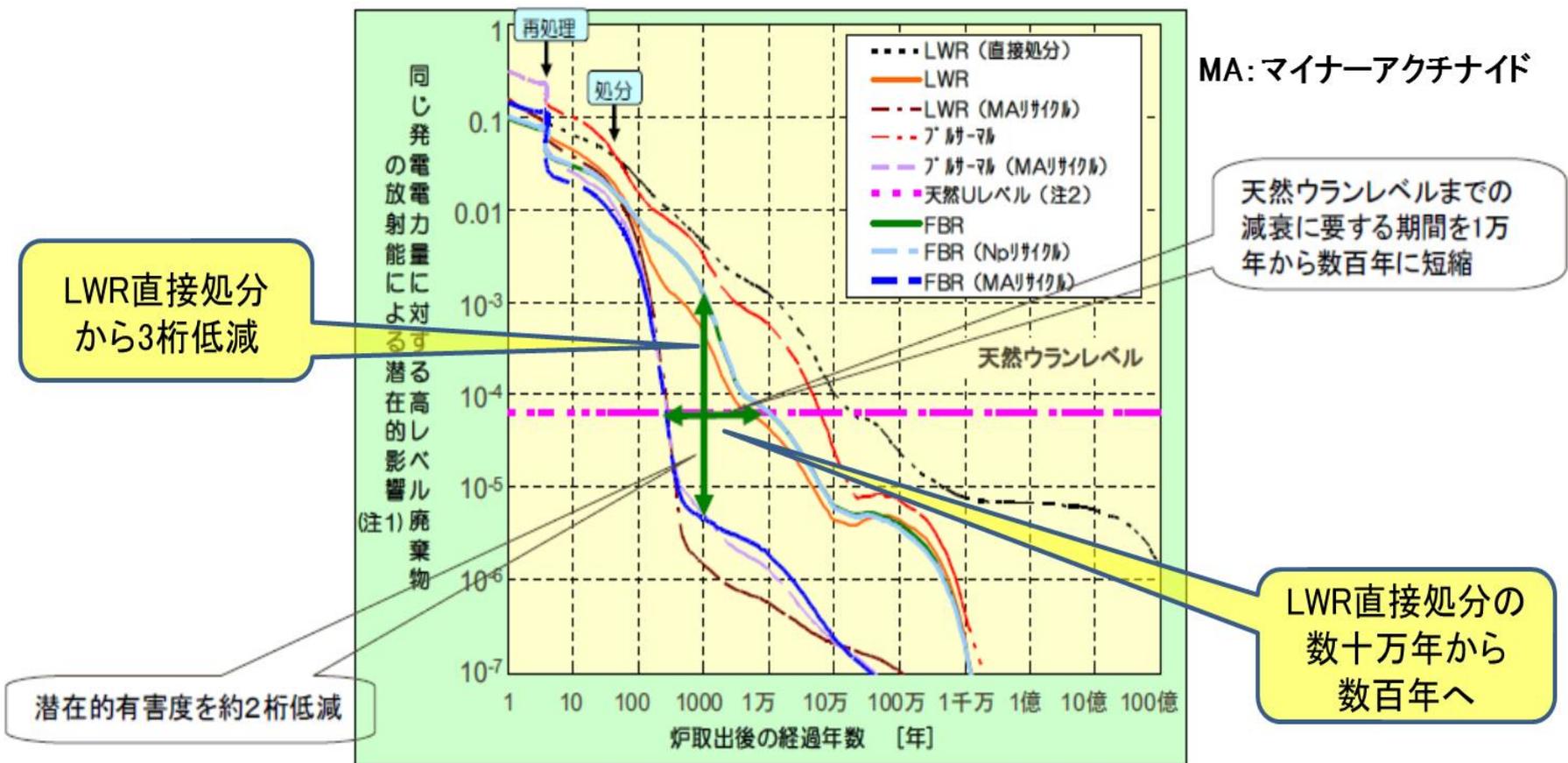
(氏田, 2008)

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

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

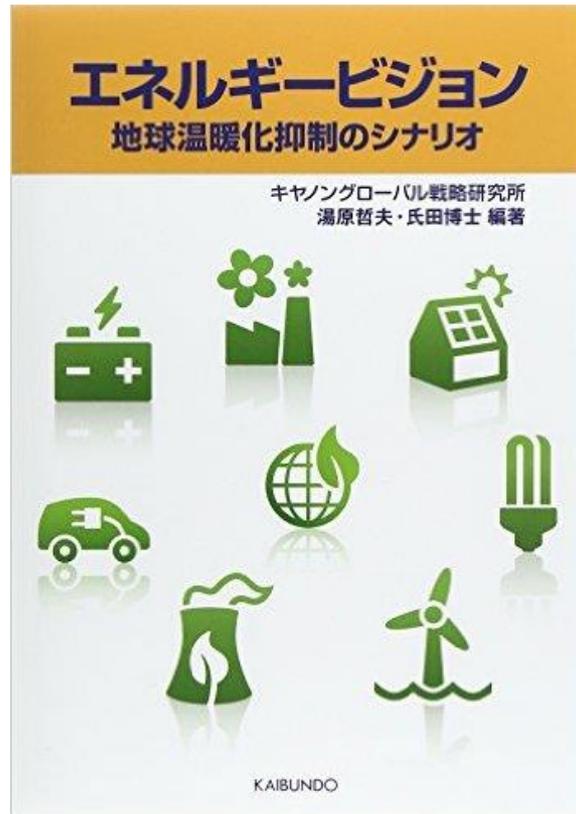
分散電源

参考資料



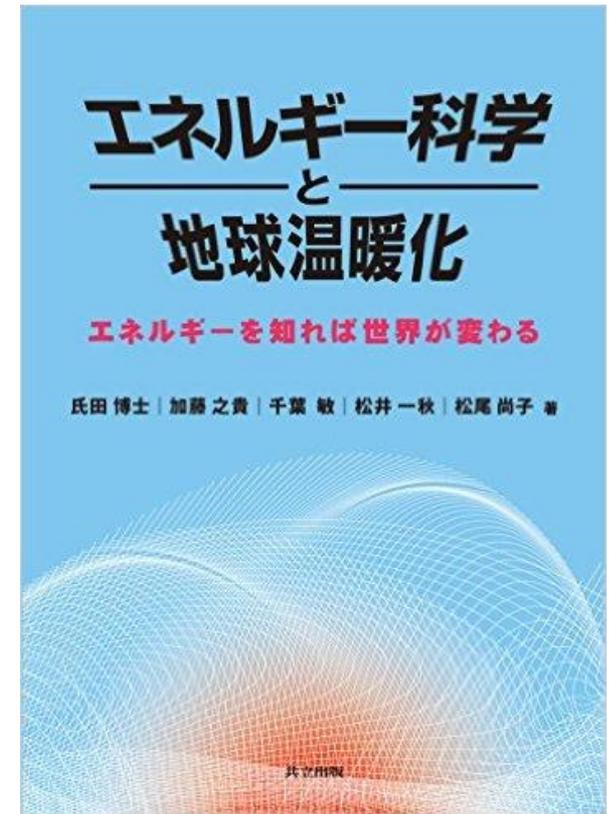
リスクとベネフィット

安全学の体系化



長期予測

環境学体系化の試み
→ 環境政策科学



長期的課題と価値

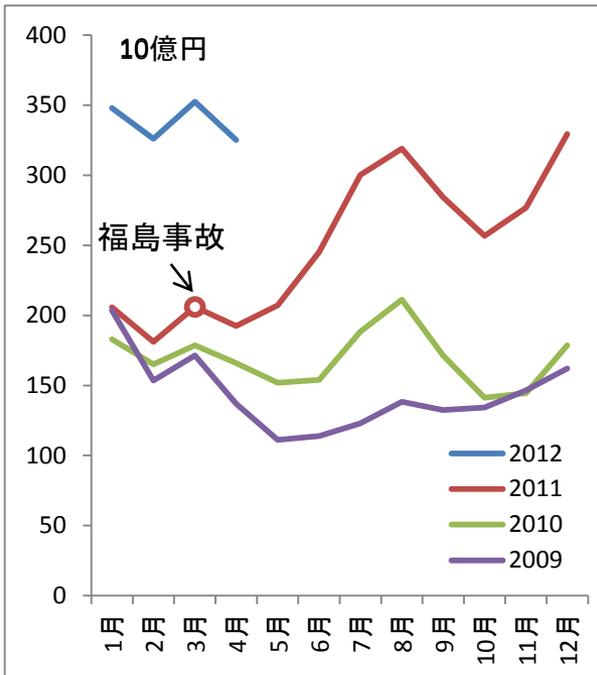
□ 日本の現状

原発停止で急増する火力発電の燃料費

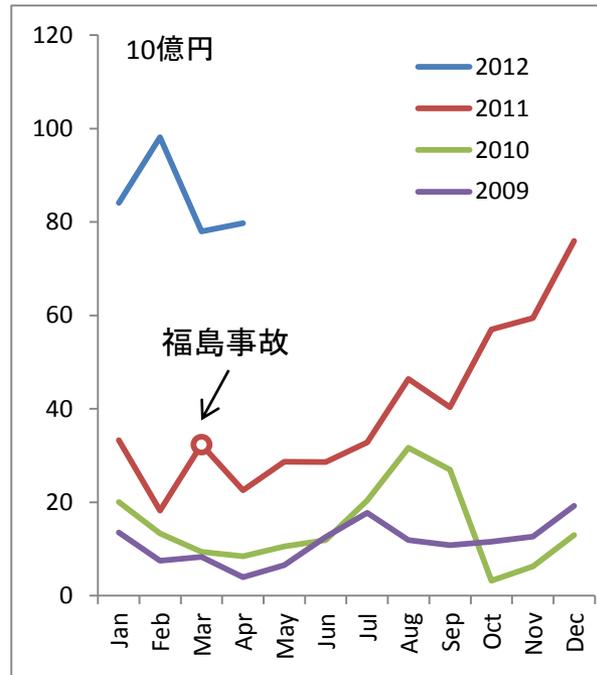
- 原発稼働停止で急増する火力発電の燃料費
 - 燃料費増加で国富流出、国民負担の増加
- 2011年度: 2.3兆円増 (1.8万円/人)、電力1kWhあたり2.4円増
 2012年度(見込み): 3.1兆円増 (2.5万円/人)

発電用燃料費 (10電力会社計)

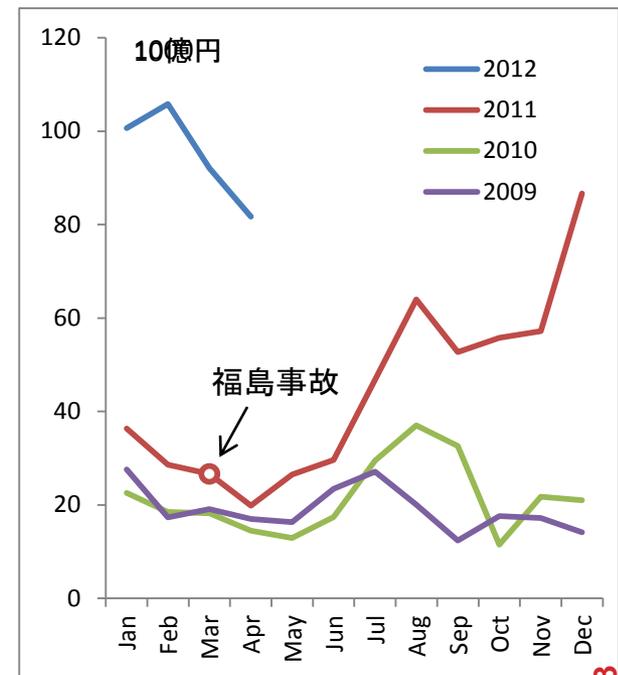
天然ガス(LNG)



原油

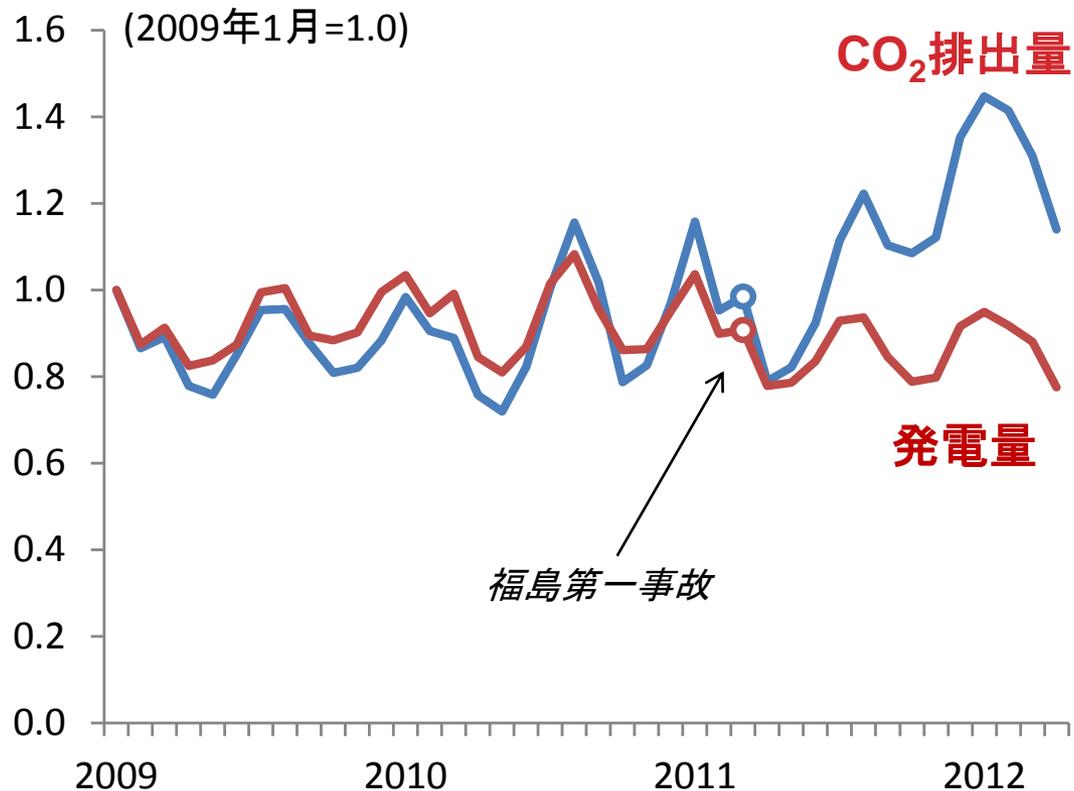


C重油



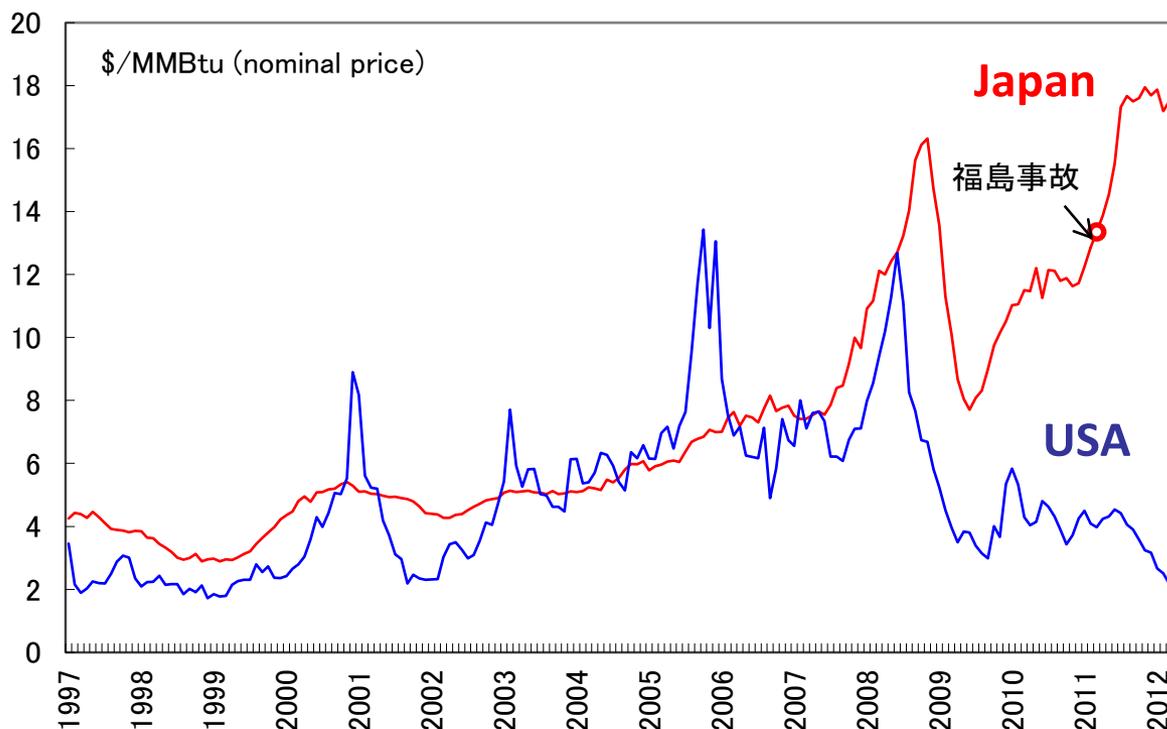
原発停止で増加するCO₂排出量

- ✓ 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



高騰する天然ガス価格

- 日本のLNG価格決定は石油価格リンクが主流。
- 国産資源や、パイプラインガス輸入による代替等の売主に対する牽制材料が少なく、石油価格・スポット需要の影響を直接的に受けやすい。原発はガス安定供給の貴重な牽制材料。
- 油価上昇、原発低迷による価格交渉力低下、震災後の需給逼迫懸念によるスポット価格高騰により、日本のLNG価格急騰。LNG需要が今後も高水準の場合、高値推移の可能性大。
- イランによるホルムズ海峡封鎖の場合、世界のLNG輸出の3分の1を占めるカタール・UAEからの供給が途絶、更なる価格高騰、供給不安のリスク大



(出所)EIA/DOE統計, 財務省編「日本貿易月報表」

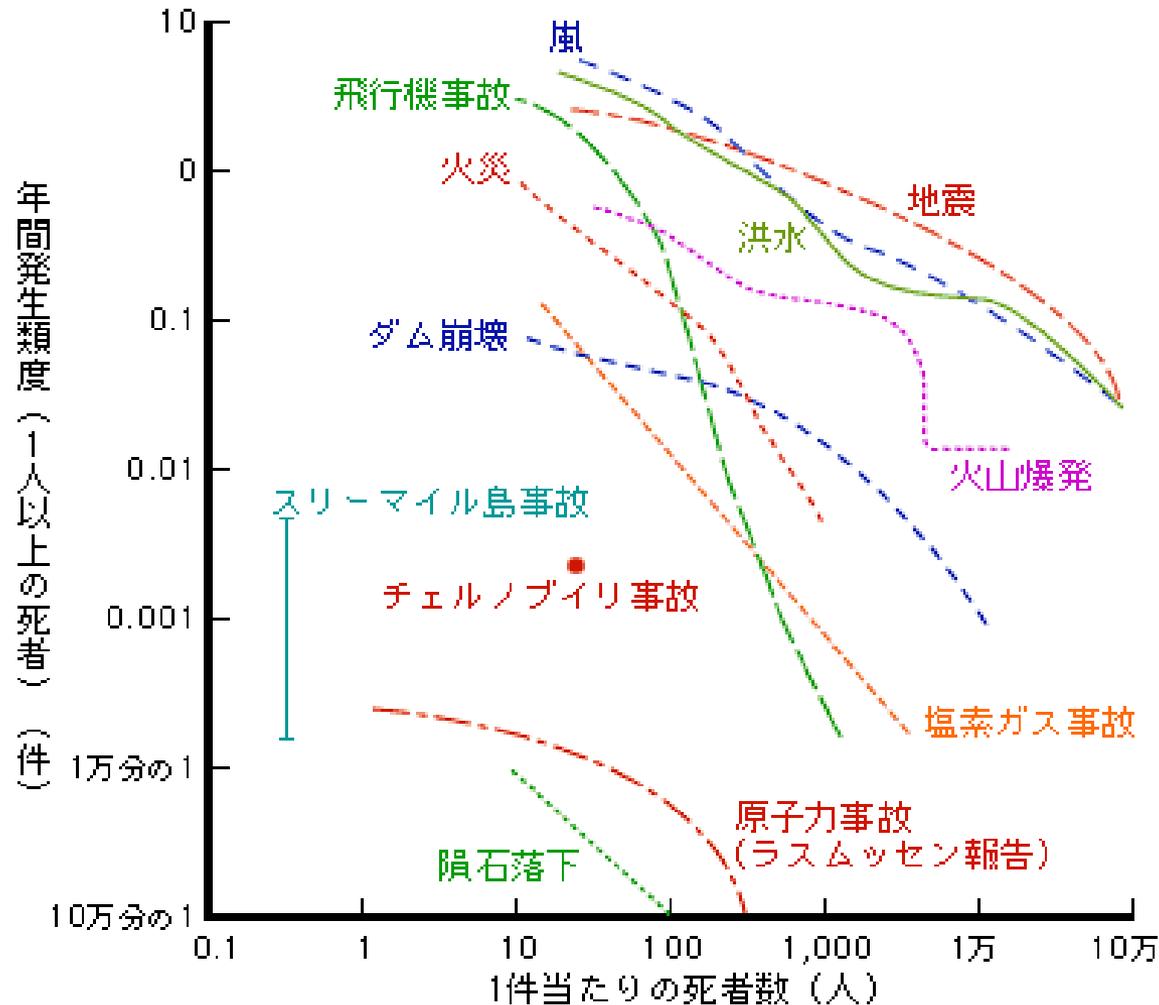
原発停止の経済へ影響

(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)

世界の大規模災害における被害規模と発生頻度



J.H.FREMLIN, 「Power Production ~WHAT ARE THE RISKS?」Oxford University Press(1987)

気候変動に関する国際交渉の経緯

地球サミット(92年6月 リオデジャネイロ)

・気候変動枠組条約(92年5月採択)を150ヶ国以上が署名

COP3(97年12月 京都)

・**京都議定書を採択**し、先進国の排出削減目標値を合意
・我が国は**6%削減(90年比)**を約束(批准は2002年6月)

京都議定書上の主要国削減目標(90年比)

米国:▲8%	カナダ:▲6%
EU:▲7%	ロシア:±0%
日本:▲6%	豪州:＋8%

京都議定書の発効(05年2月)

ただし、

・米国は批准せず
・削減義務は先進国のみ

次期枠組みに向けた交渉の開始(COP13～)

COP15(09年11月 コペンハーゲン)

「コペンハーゲン合意」を留意

COP16(10年11月 カンクン)

「カンクン合意」

・各国が自主的に目標を登録するボトムアップ型の仕組みに合意
・我が国は**前提条件付25%削減(90年比)**を登録(10年1月)

・先進国は削減目標
・中国を含む途上国は削減行動 を登録

GSEP(エネルギー効率向上に関する国際PS(10年9月))

・産業部門の省エネ・環境対応を促進する国際イニシアティブ

COP17(11年11月 ダーバン)

・2020年以降の将来枠組みに向けた検討プロセスに合意
・京都議定書第二約束期間の設置が決定(**日本は不参加**)

COP18(12年11月 ドーハ)

・2020年以降の将来枠組みに関する2015年の交渉妥結に向けた大まかなスケジュールを策定

COP19(13年11月 ワルシャワ)

・各国が自主的に約束草案を提出する方式について合意
・COP21に十分に先立ち(準備が整った国は2015年第1四半期までに)、すべての国に約束草案を提示することを招請

COP20(14年12月 リマ)

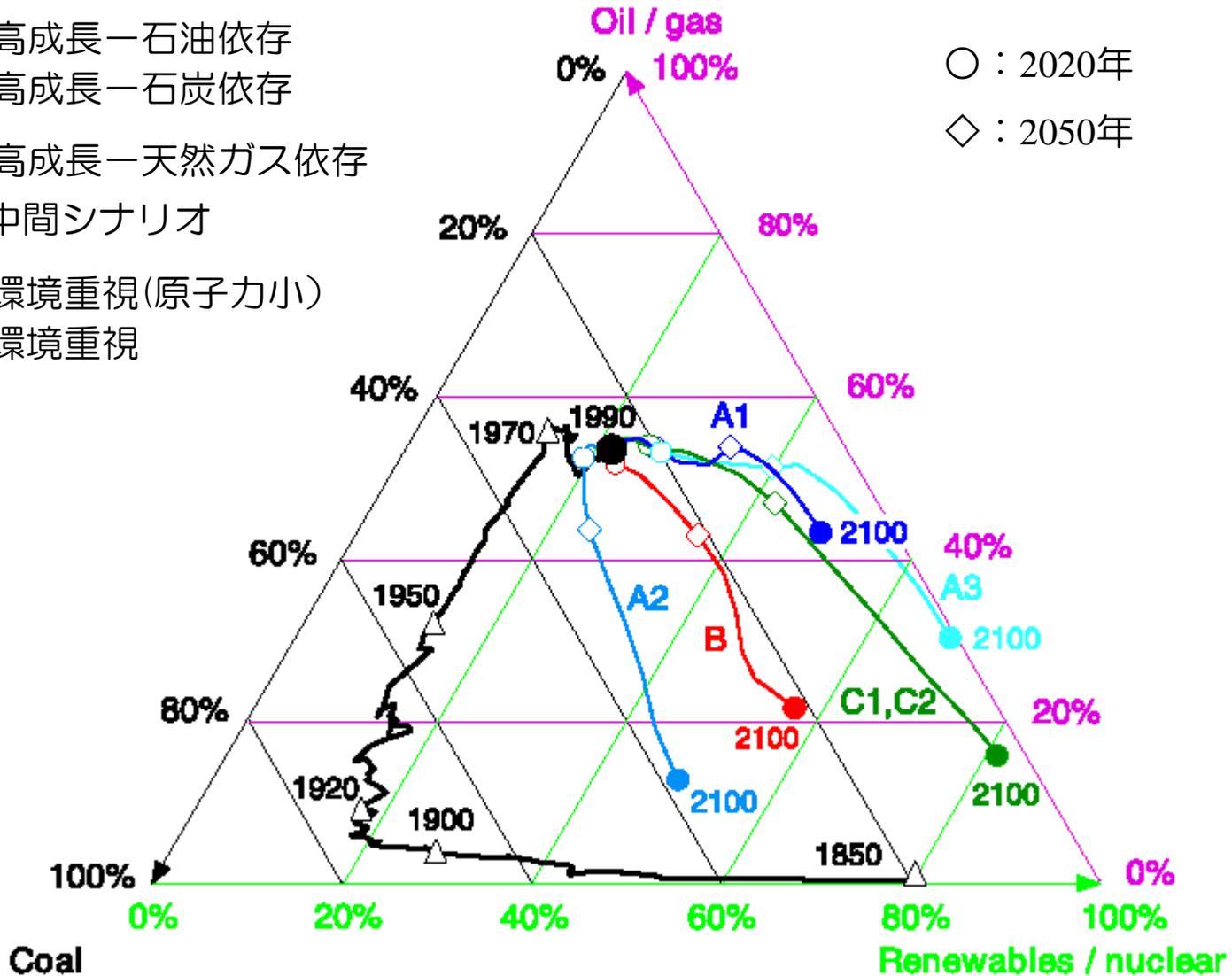
・我が国から「攻めの地球温暖化外交戦略」を表明

COP21(15年12月 パリ)

エネルギー資源の課題 一次エネルギー供給構造の変遷 (IIASA/WEC, 1998)

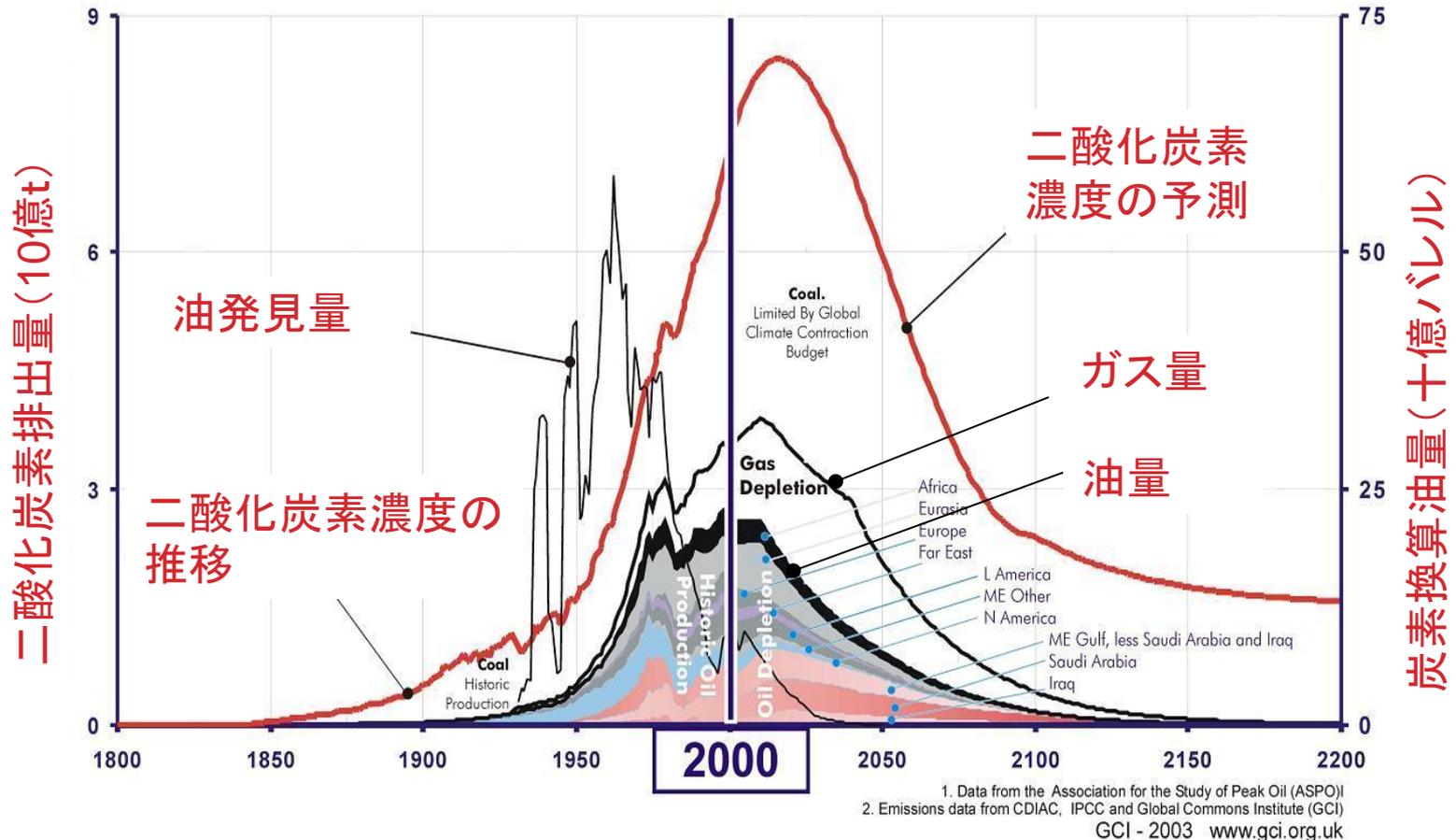
- A1 : 高成長—石油依存
- A2 : 高成長—石炭依存
- A3 : 高成長—天然ガス依存
- B : 中間シナリオ
- C1 : 環境重視(原子力小)
- C2 : 環境重視

○ : 2020年
◇ : 2050年



石油、天然ガスの発見量、生産量及び二酸化炭素排出量

(Global Commons Institute: 2003)

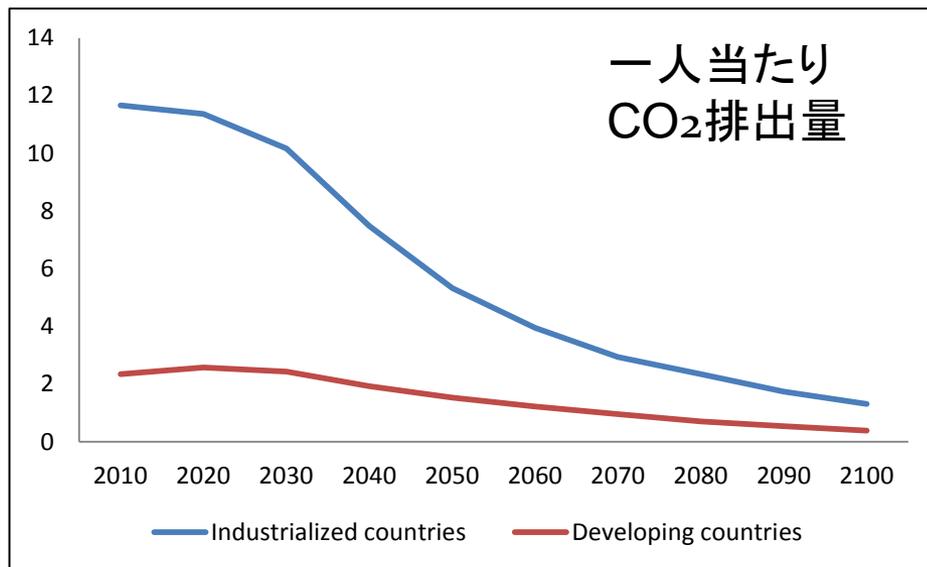


1. Data from the Association for the Study of Peak Oil (ASPO)
 2. Emissions data from CDIAC, IPCC and Global Commons Institute (GCI)
 GCI - 2003 www.gci.org.uk

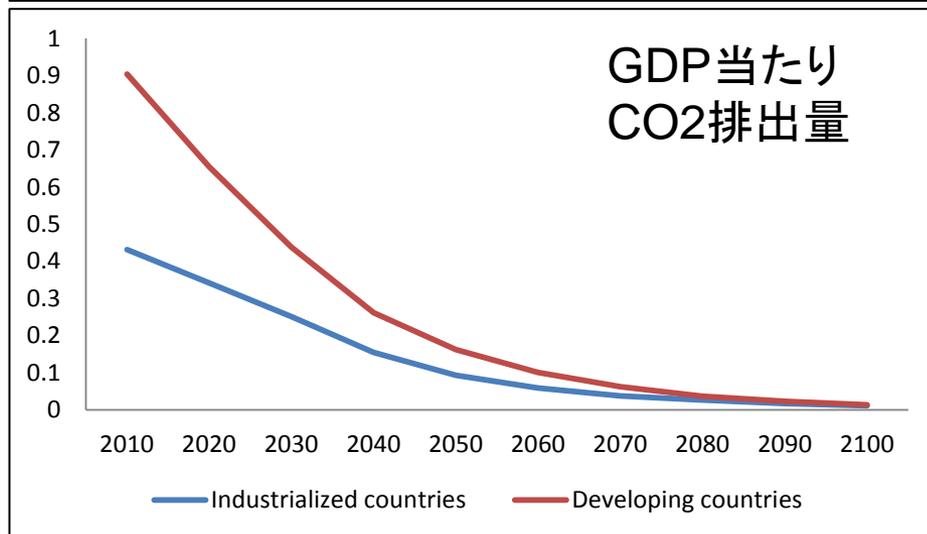
短期のエネルギー危機（氏田, 2008）

	原因	結果	対策
偶発的な危機	<ul style="list-style-type: none"> ■ 闘争 ■ 事故 ■ テロリズム 	<ul style="list-style-type: none"> ■ エネルギー供給チェーン(シーレーン)遮断 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 石油備蓄 ■ 国際的・地域的協力 ■ 事故対策 ■ テロ対策
構造的な危機	<ul style="list-style-type: none"> ■ 中東地域の不安定 ■ アジアのエネルギー需要増大 ■ 技術開発の遅延 ■ 環境問題 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 価格変動 ■ 供給不測 ■ 資源獲得闘争 ■ 弱い消費者 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 資源開発 ■ 技術開発 ■ エネルギー政策 ■ 外交政策 ■ 防衛政策

一人当たりCO₂排出量とGDP当たりCO₂排出量の先進国と途上国比較



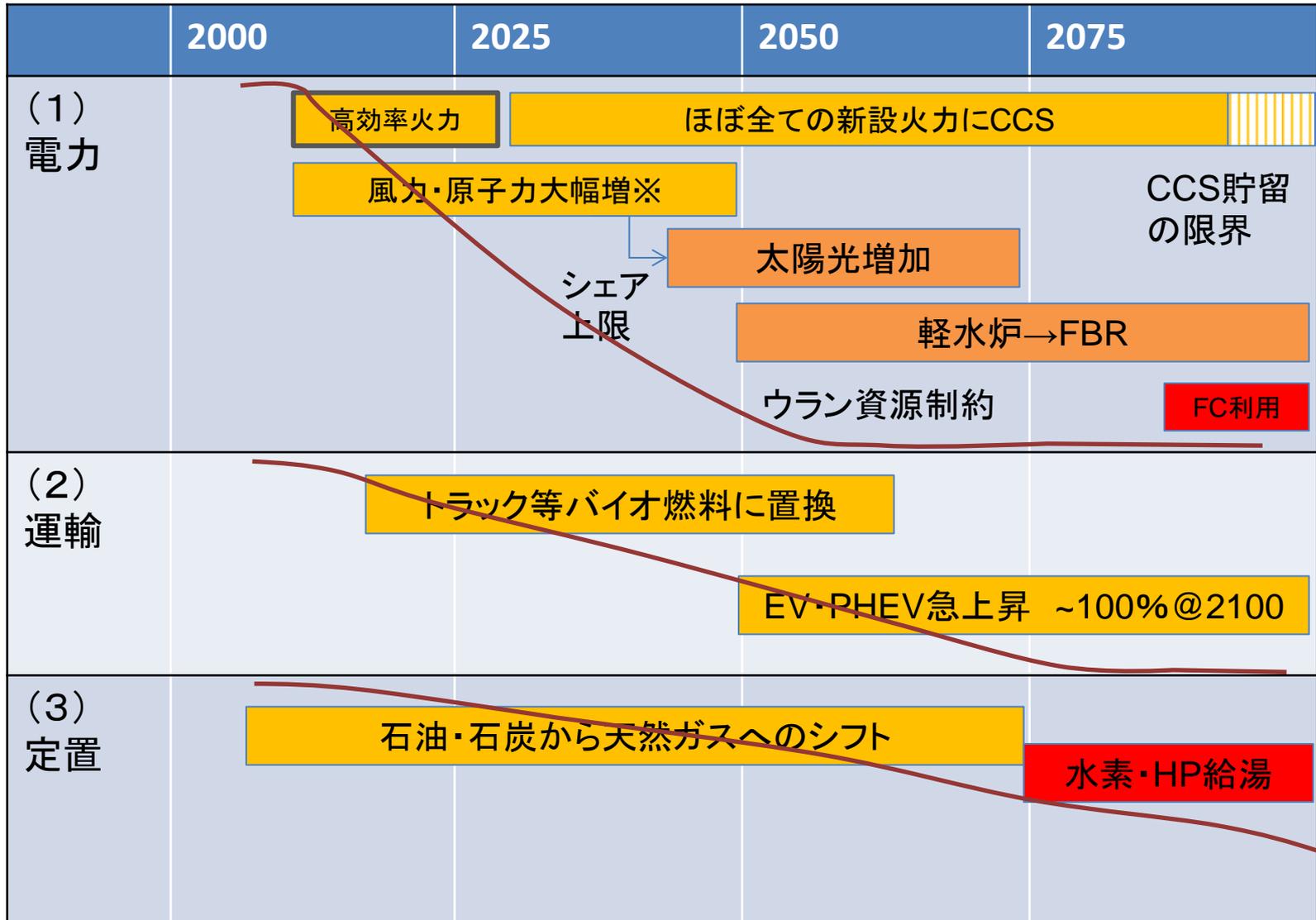
- 先進国の努力
 - 低炭素化技術開発
 - ロードマップ作成
 - セキュリティとのリンク



- 途上国の努力
 - 低炭素化技術早期移行
 - エネルギー効率向上
 - 先進国の最新技術導入
 - 技術のロックイン回避
 - 環境対策とのリンク

CO₂排出量：国際エネルギー機関(IEA)
GDP、人口等：世界銀行

CO₂制約におけるエネルギー技術構成概要

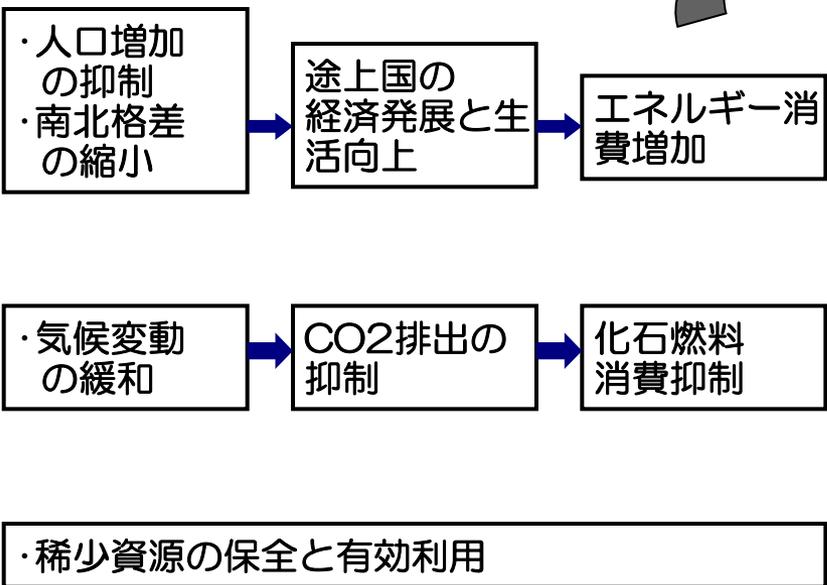


図中の曲線はCO₂削減率 (Z650の排出/BAUの排出) のイメージ

グローバルな資源・環境問題とエネルギー展望

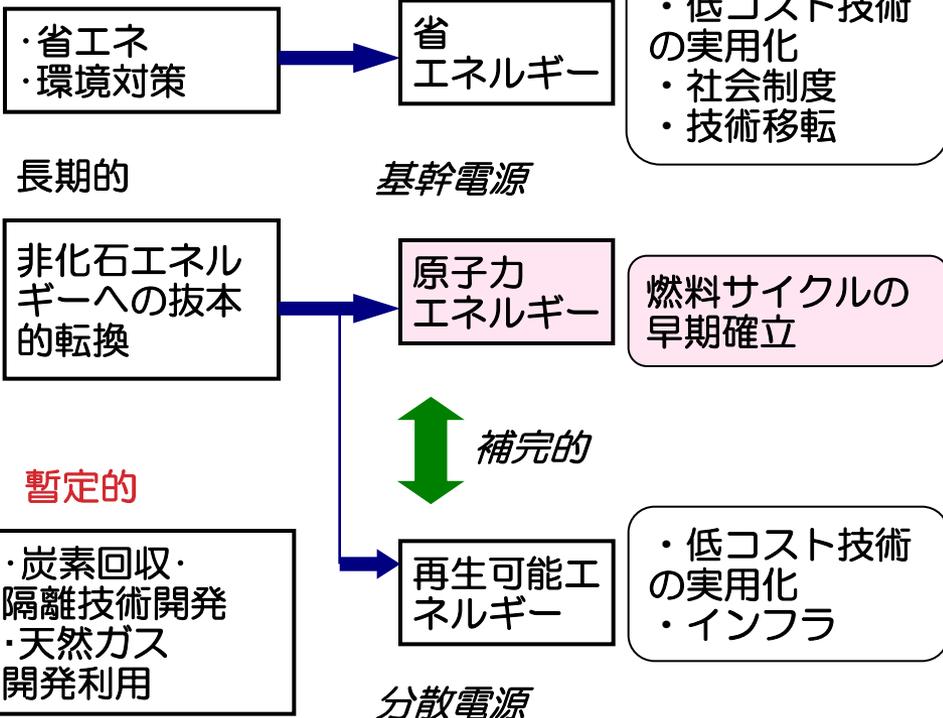
世界の課題

トリレンマ



持続的発展

循環型社会システムの実現



わが国の課題

科学技術立国

少子化、経済力低下

技術開発分野での国際貢献