



CIGS 地球温暖化シンポジウム

地球温暖化抑制に向けて  
世界で共有できる  
エネルギービジョンと  
日本の役割

2013.7.10 (水)

13:00 - 18:00

会場: 経団連ホール



## ご挨拶

キヤノングローバル戦略研究所では「地球温暖化抑制に向けて世界で共有できる中長期ビジョン」についてのシンポジウムを欧米と中国から専門家を招聘して2009年10月に第一回を、2011年9月に第二回を開催し、その第三回を今秋に開催することにしております。それに先立ち、国内シンポジウムを公開にて開催することといたしました。

これまでの提言の主旨は、①世界で共有する二酸化炭素の排出曲線を新しいシナリオに基づいて設定し、②その制約下でコスト・ミニマムを基本とする世界全体最適化による各地域・各国の排出とエネルギー構成を定め、③投資とメリットのバランスに配慮しつつ、そのエネルギー構成を実現させるための国際協力の仕組みについて提案することです。これらの提案について、主要国の専門家間のコンセンサスを築くことに努めて来ました。

今回は焦眉の急である日本の長期エネルギー政策のあり方について、まず検討いたします。地球温暖化抑制とエネルギーセキュリティ確保及び高効率でクリーンなエネルギー技術の活用による経済成長の維持というエネルギー政策3原則に基づいた、あるべき将来のエネルギー構成についての提言を行います。

次に、これまで提案してきた世界の長期二酸化炭素排出シナリオについて、最近の研究成果などについての報告と濃度安定化シナリオに代わるオーバーシュート・シナリオについての世界の動向について検討いたします。

さらに長期エネルギー需給にとって基本的に重要なイノベーション技術の見通しと普及のメカニズムについて、特に進展する化石燃料の利用技術、原発事故を踏まえた原子力エネルギーの利用技術と開発、さらに大規模な導入が計られつつある再生可能エネルギーについて、2030年から2050年を射程に入れて提言を行い、専門家間の意見交換を行います。

今秋には我が国のエネルギー基本計画の見直しが行われ、また11月には気候変動に関わる国際交渉COP19も行われます。本国内シンポジウムは今秋の国際シンポジウムに先立ち、本問題に関わる国内の専門家の方々と意見交換し、最近の動向を踏まえた上で、世界で共有できる中長期的なビジョン形成に役立てたいと考え開催するものです。

2013年7月10日

キヤノングローバル戦略研究所  
研究主幹(資源・エネルギー/環境)

**湯原 哲夫**

# プログラム

※このプログラムは予告なく変更する可能性があります。

13:00-13:10 (10分)

開会のご挨拶 キヤノングローバル戦略研究所 (CIGS) 理事長 **福井 俊彦**

13:10-13:40 (30分)

イントロダクション「地球温暖化抑制のための世界で共有できるエネルギービジョン」  
CIGS 理事・研究主幹 **湯原 哲夫**

13:40-15:20 (100分)

ラウンドテーブル セッション1 「世界で共有できるエネルギービジョンの検討」

- 「CO2排出シナリオの科学性の検討について」  
一財) 電力中央研究所 環境科学研究所  
上席研究員 **筒井 純一**
- 「中長期エネルギービジョンについて」  
一財) エネルギー総合工学研究所  
プロジェクト試験研究部 主管研究員 **都筑 和泰**
- 「エネルギービジョンの実現可能性」  
東京大学大学院工学系研究科  
レジリエンス工学研究センター 准教授 **小宮山 涼一**
- 「CO2排出シナリオの経済性評価について」  
東北大学大学院 環境科学研究科  
環境・エネルギー経済部門 准教授 **馬奈木 俊介**
- 「CO2長期削減目標の再検討」  
公財) 地球環境産業技術研究機構(RITE)  
主席研究員・システム研究グループリーダー  
**秋元 圭吾**

15:20-15:35 (15分) 休憩

15:35-16:45 (70分)

ラウンドテーブル セッション2 「日本の役割と貢献」

- 「高効率でクリーンな火力発電技術の役割と展望について」  
東京大学生産技術研究所 エネルギー  
工学連携研究センター副センター長 **金子 祥三**
- 「原子力の役割と展望について」  
東京工業大学 大学院理工学研究科  
原子核工学専攻 特任教授 **氏田 博士**
- 「地球温暖化抑制における日米中協力について」  
CIGS 主任研究員 **段 烽軍**

16:45-17:55 (70分) 総合討論

- イントロダクトリーステートメント:「エネルギー政策について」  
モデレーター: 一財) 日本エネルギー経済研究所 理事長 **豊田 正和**

17:55-18:00 (5分)

総括と閉会のご挨拶

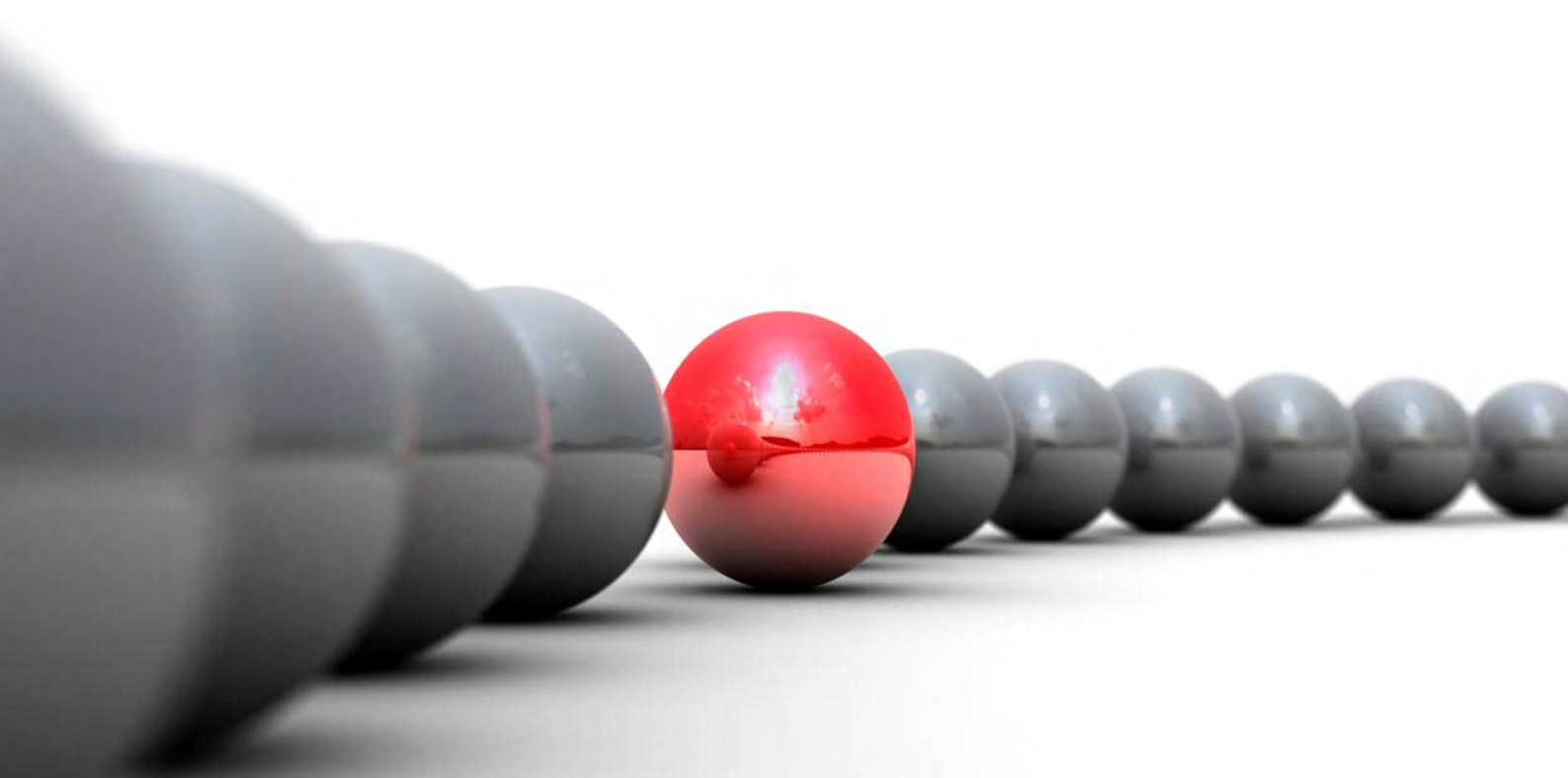
3

CIGS 理事・研究主幹 **湯原 哲夫**

# 地球温暖化抑制の ための世界で共有できる エネルギービジョン

キヤノングローバル戦略研究所  
理事・研究主幹

湯原 哲夫





# 地球温暖化に向けて世界で 共有できるエネルギービジョンと 日本の役割

2013年7月10日

キヤノングローバル戦略研究所  
理事・研究主幹 湯原哲夫

1

温暖化を巡る最近状況 2013.7.4 T. Y

## 1. 後退する温暖化への国際的取組

・大きく後退する一方、二酸化炭素などの温室効果ガスの排出は増加を続け、特に石炭消費量は急増し、2012年の排出量も過去最高を更新し続けている。  
2012年の各国の二酸化炭素排出量試算をIEAが公表。米国や欧州で減少、中国では増加に歯止めがかかりつつある。日本は11年に比べて7千万トン5.8%の増加  
・国連は「地球環境は既に限界点(Tipping-point)」との報告書を出した。

## 2. 京都議定書と排出量取引の危機

・京都議定書の第一約束期間終了し、2013年から第二約束期間に入った。米国、日本、カナダ、ロシアは参加せず、また中国インドは削減義務を負わない。  
・排出量取引市場は低迷し、取引価格は下落(この2年で1/10程度に)し、制度存続の危機にある。欧州議会は存続への改革案を可決した(2013年7月)。

## 3. 2020年以降の温室効果ガス削減の国際的枠組み

・削減目標を自主的に設定する案で先進国が一致(次期枠組みは2015年末のCOP21で採択予定)。

## 4. 日本政府、目標の撤回

・2020年の温暖化ガス排出量を1990年比で25%削減する目標の撤回を決め、新たな目標をCOP19で表明する。また、新たなエネルギー基本計画を年内めどに取りまとめる予定である。

## 5. 米国オバマ大統領の温暖化行動計画発表

・温暖化対策で講演(2013.4.26)し、すべての火力発電所からの二酸化炭素の排出を規制すること等の行動計画を発表した。  
・2020年までに2005年比17%削減することを確認し、低炭素でクリーンなエネルギー技術は成長エンジンであり、とくにクリーンで高効率な化石燃料利用の促進、再生可能エネルギーの倍増、小型原子炉の開発など原子力の維持・推進を強調した。  
・新興国へ働きかけ、世界を主導する。

## 6. 中国の排出量取引所

・中国のエネルギー消費量は過去最高を更新し続け、大気汚染が深刻化している。  
一方、再生可能エネルギーへの投資は世界最大であり、また気候変動対策は最上位の政策課題としている。

・排出量取引制度が導入されて、この6月深圳市の排出取引所で試行取引が始まった。

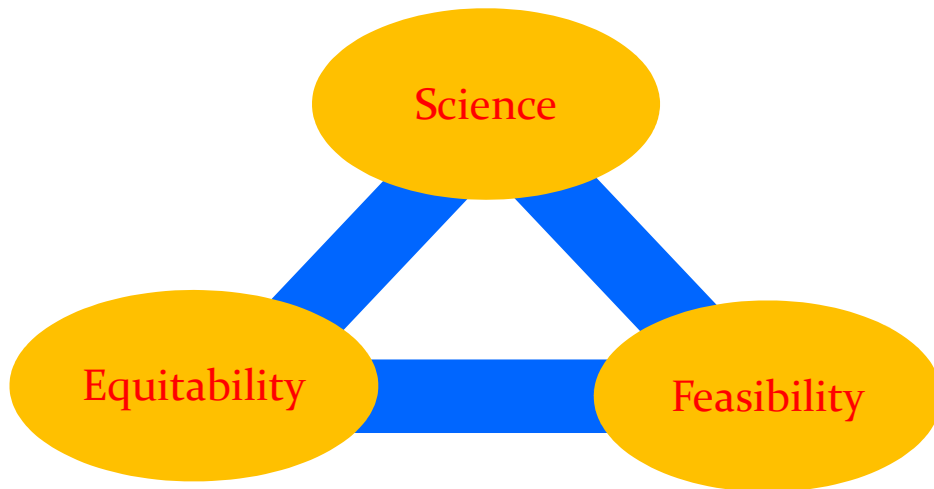
2014年までに7都市・地域で試験的に実施し、「中国の新市場は2015年までに8~10億トンのCO2排出量を削減するとみられ、ヨーロッパに次ぐ世界第2位規模のキャップ・アンド・トレード市場になる見込み」(ブルームバーク)という。

・2020年から全国的な排出取引を行い、GDP当たりのCO2排出量を2005年比40~45%に押さえる目標。

2

# Towards the harmony

- Principles for the new climate regime-



**Tetsuo YUHARA, Prof.**  
**The Canon Institute for Global Studies**

3

キャノングローバル戦略研究所  
#2「地球温暖化対策で世界が共有するエネルギービジョン」  
国内シンポジウム(2011.6.30) ,国際シンポジウム(2011.9.16)

目的:

地球温暖化対策を話し合う国連気候変動枠組み条約の締約国会議(COP17)に向けて、京都議定書に代わる新たな枠組みづくり\*に向けた提言を行う。

\*「あたらしい排出曲線+世界全体で最適化+先進技術とその普及の仕組み」

内容:

- (1)温室効果ガス(主としてエネルギー起源二酸化炭素)の総排出量の設定(「GHG濃度安定化450ppm&2°C」から「オーバーシュート&ゼロエミッションシナリオへ」)
- (2)これを満たす世界全体で最適化(コストミニマム)するエネルギー構成とその結果得られる各国の排出量(2050年先進国50%減、途上国10%増)
- (3)このエネルギー構成に対する追加削減費用と省エネメリットのバランスを維持(追加投資が燃料削減メリットとバランスする)
- (4)低炭素エネルギー技術普及のメカニズム(途上国支援のための技術移転とその在り方、京都議定書における追加性とカーボン市場における投機性の排除)。

---

政府の約束「京都議定書延長からの離脱」、福田首相「2050年世界50%削減(先進国は80%削減)」、鳩山首相「日本国内 2020年1990年比25%削減」、COP15&16「2020年毎年1000億ドルの途上国温暖化対策への先進国支援」

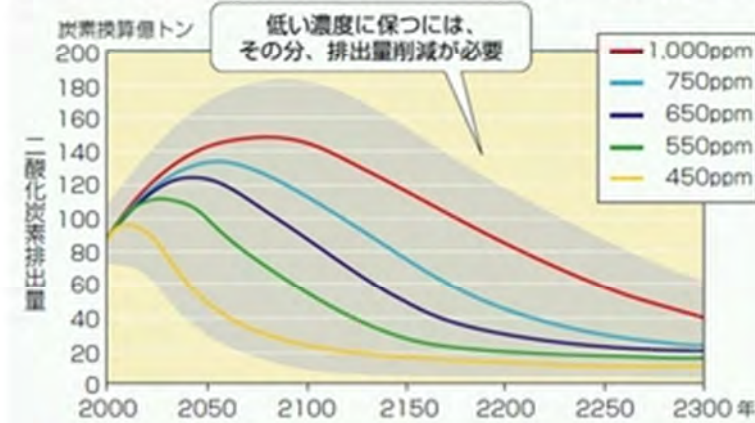


## 安定化状態における世界の二酸化炭素排出量

安定化濃度 (ppm)	平衡に達した時の気温上昇幅 (括弧内:平均値) <sup>*1</sup>	2300年における世界のCO <sub>2</sub> 排出量 <sup>*2</sup>		安定化する時期とCO <sub>2</sub> 累積排出量 <sup>*1</sup>	
		年間排出量 (炭素換算トン)	2000年総排出量 (炭素換算80億トン) 比	おおむね安定化する年	21世紀の累積排出量 (炭素換算トン)
450	1.5 ~ 4 °C (2.5°C)	14億	18%	2090年	5,500億
550	2 ~ 5 °C (3.5°C)	20億	25%	2150年	8,600億
650	2.5 ~ 6 °C (4°C)	26億	33%	2200年	10,500億
750	3 ~ 7 °C (4.5°C)	34億	43%	2250年	11,600億
1,000	3.5 ~ 8.5 °C (6°C)	40億	50%	2375年	12,600億

※1: IPCC第3次評価報告書より抜粋。

※2: 国立環境研究所 (MAGICC: 簡易炭素循環モデル) による計算結果。なお、1,000ppmの場合の排出量についてはIPCC第3次評価報告書の図より推計した。

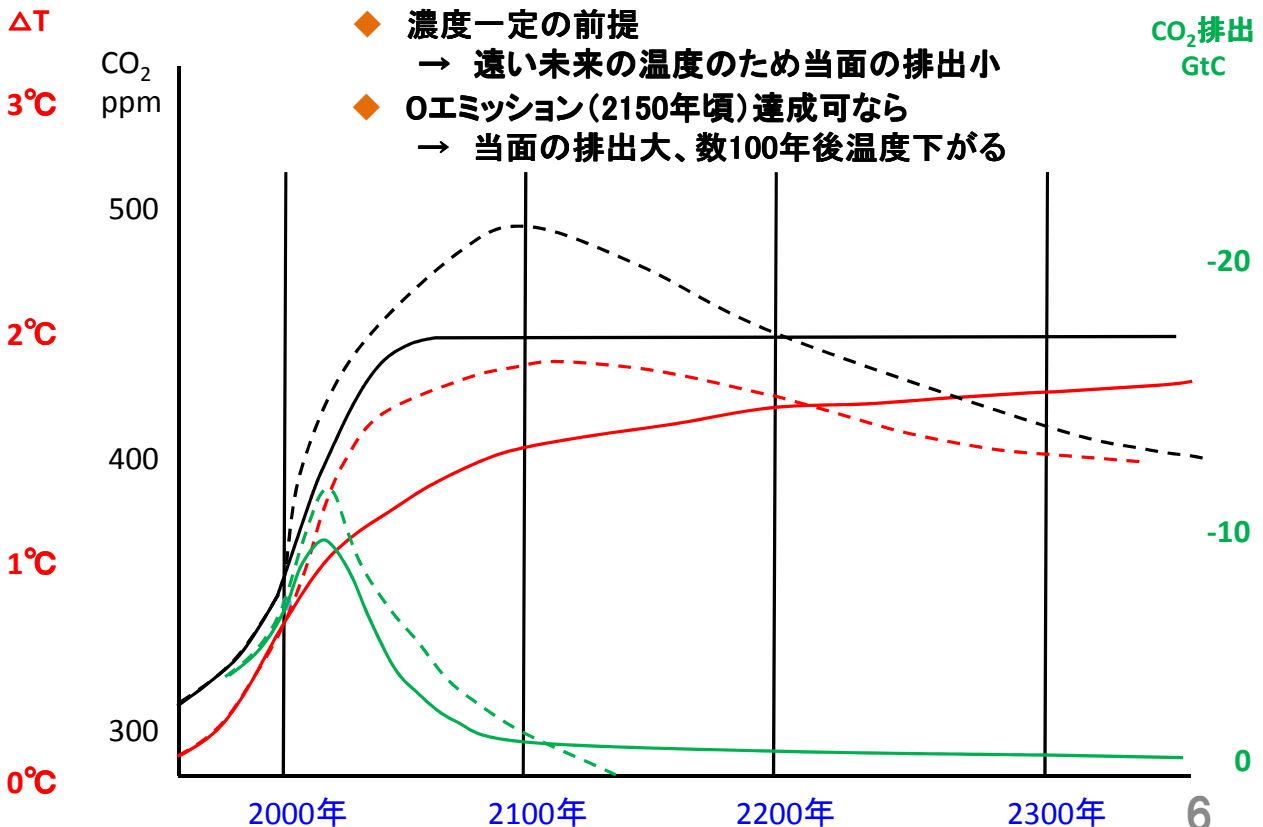


■ 様々な安定化水準に対応する世界の二酸化炭素排出量の変化 (文献24より)

環境省「STOP THE 温暖化 2005」 (IPCC AR3) 5

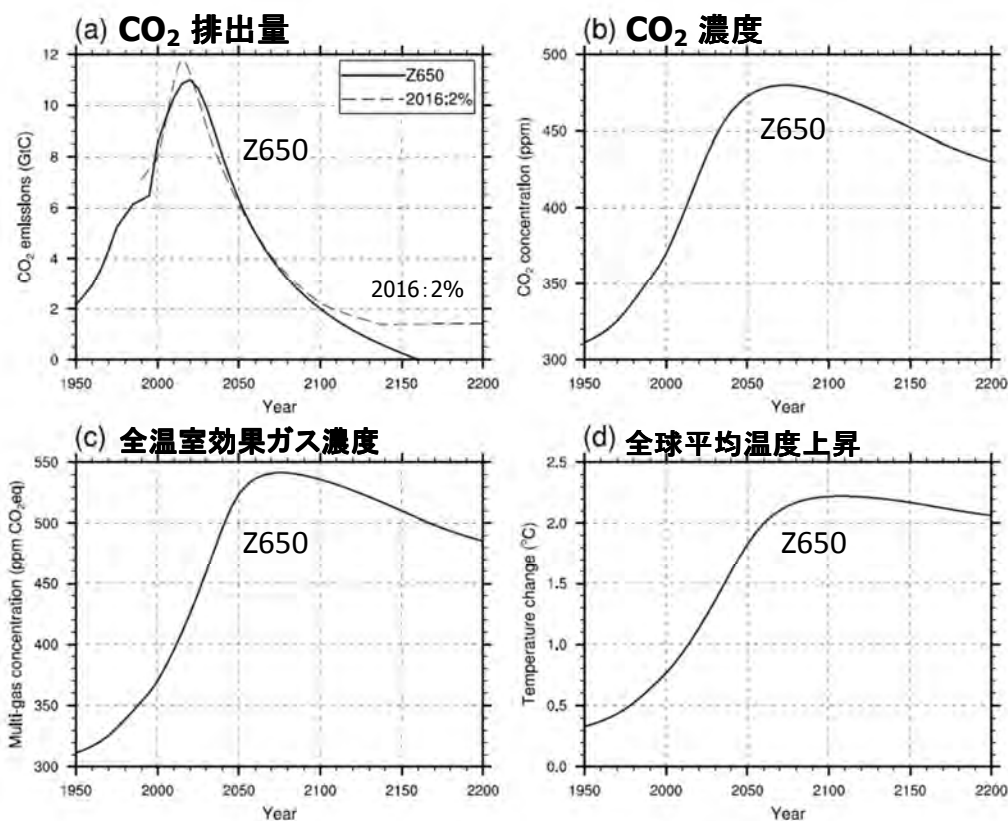
## 濃度安定化 vs ゼロ・エミッション安定化

( ——— 実線 ) ( - - - - 破線 )



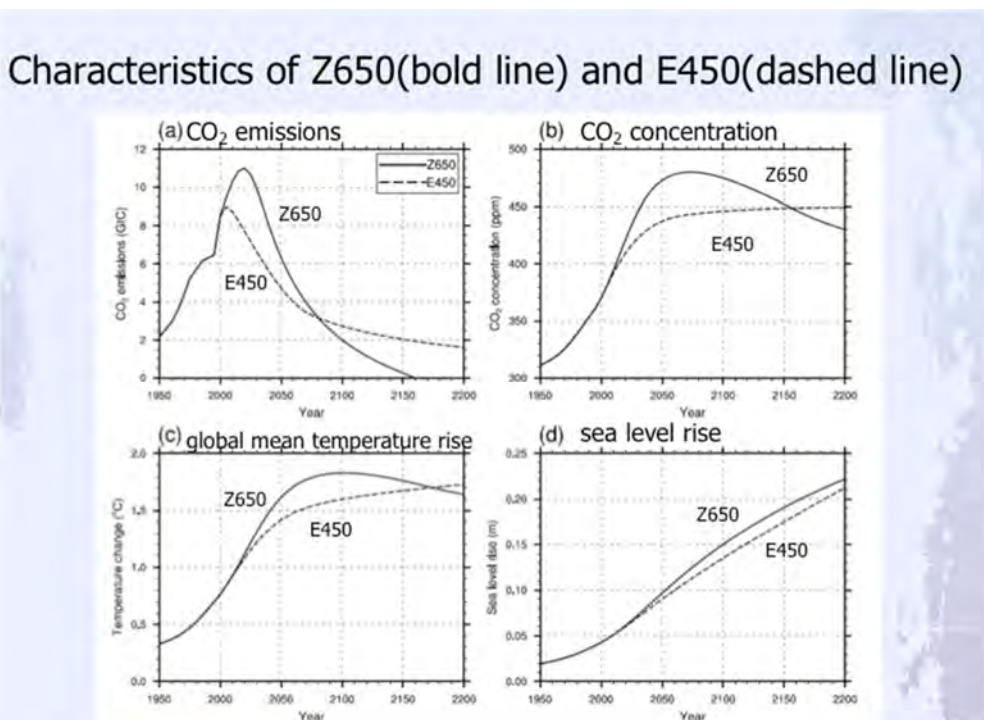
- ◆ 濃度一定の前提  
→ 遠い未来の温度のため当面の排出小
- ◆ 0エミッション(2150年頃)達成可なら  
→ 当面の排出大、数100年後温度下がる

# 温度上昇ピークが2°Cを少し越えるZ650シナリオ（他のGHGを含む場合）



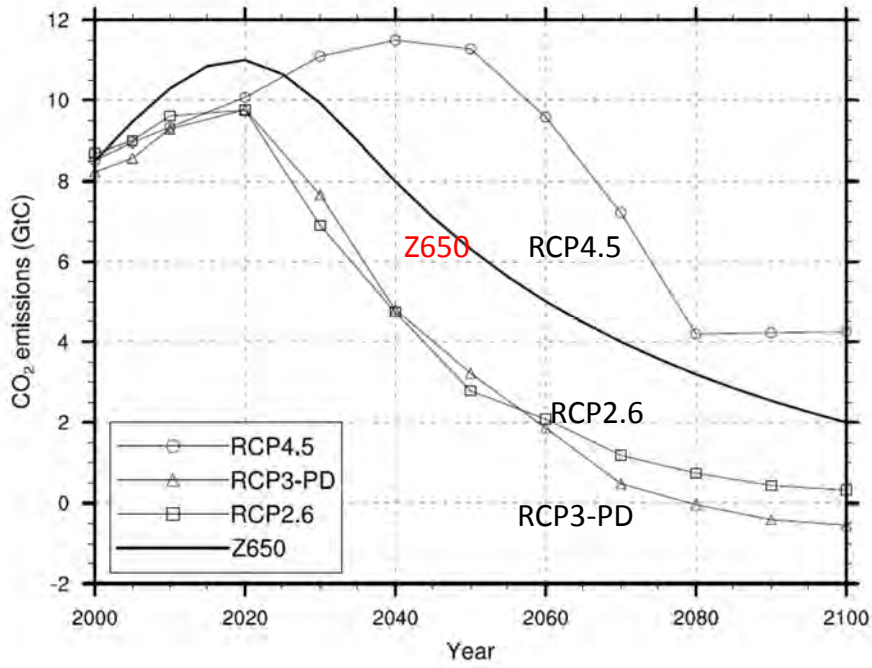
7

T.Matsuno, K. et al. "Stabilization of the CO<sub>2</sub> concentration via zero-emission in the next century- Possibility of new emission pathway to stable climate" 26 Nov.2009 #1 CIGS Symposium  
 来世紀ゼロエミッションによるCO<sub>2</sub>濃度安定化-気候安定化への新しい排出シナリオの可能性-  
 松野太郎他 #1 Canon Institute for Global Studies Symposium 27 October 2009



Z650: 二酸化炭素濃度 450ppmを超える(最大480ppm)が温度上昇は2°C以内  
 超長期的にはこのピーク濃度(480ppm)後ゆっくりと減衰し~370ppmに落ち着く。 8

## AR5用RCP排出パス群と松野・丸山・筒井等の提案するZ650の排出パス



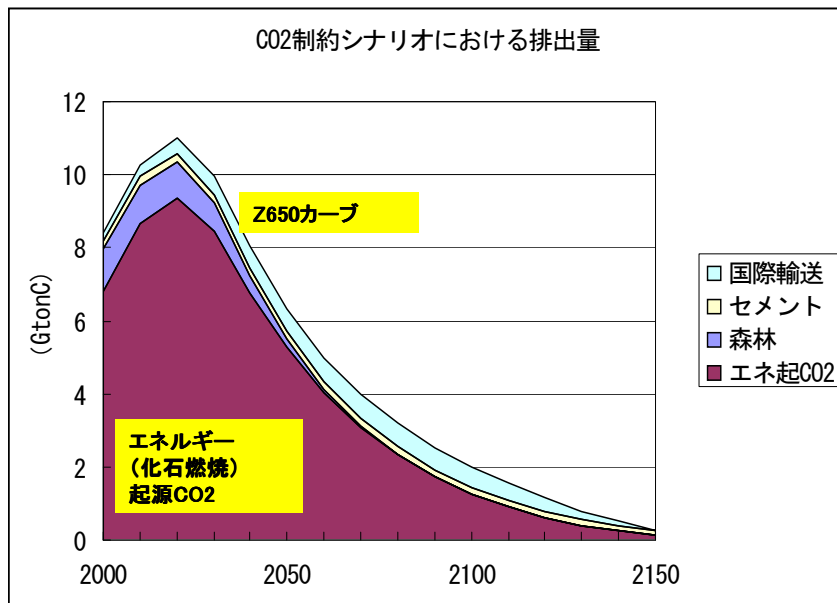
(Source) RCP Database (version1.0)  
IIASA Homepage (<http://www.iiasa.ac.at/web-apps/tnt/RcpDb>)

提案するZ650シナリオによる21世紀中CO<sub>2</sub>排出パスを他のRCPシナリオと比べる。  
Z650は21世紀中の総排出量が650GtC、RCP2.6は420GtCぐらい。

キヤノングローバル戦略研究所 (CIGS) 国内ワークショップ「地球温暖化緩和における世界で共有できるエネルギー・ビジョン」 2011年6月

9

## エネルギー起源のCO2排出カーブ

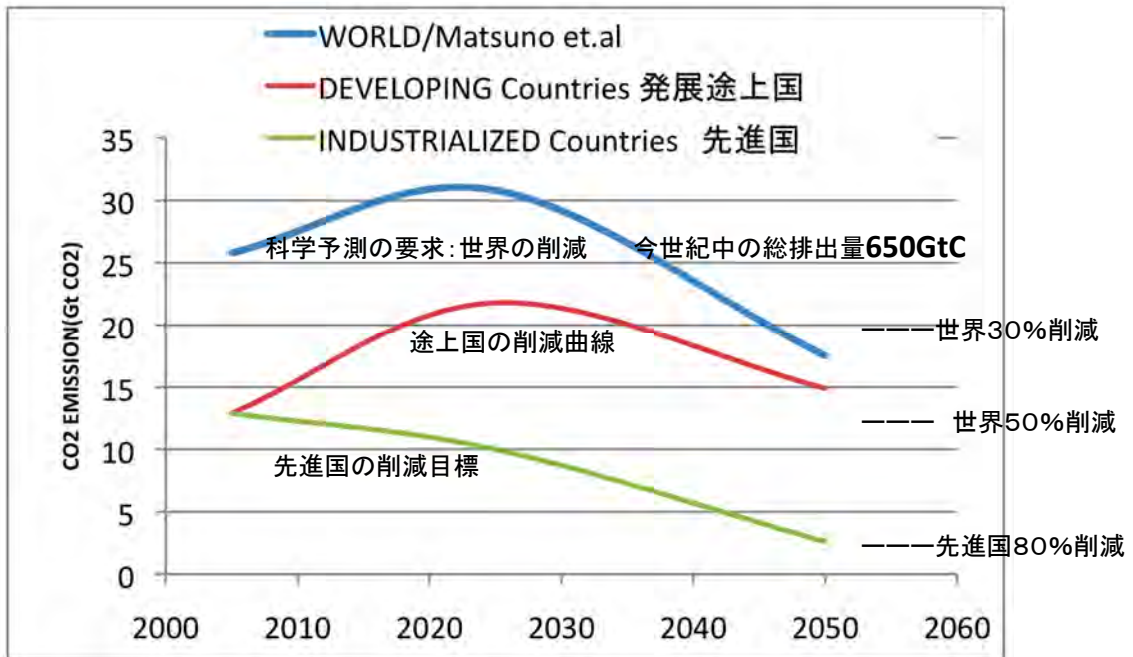


前回(20101125)ワークショップで報告

キヤノングローバル戦略研究所 (CIGS) 国内ワークショップ「地球温暖化緩和における世界で共有できるエネルギー・ビジョン」 2011年6月

科学に基づく「世界が共有する削減シナリオ案」  
 温暖化予測の科学(2°C)と先進国の削減目標(2050年50%削減)が途上国の削減  
 量を決める

[気候変動予測の要求(2°C以下)]-[先進国の削減目標]=[途上国の削減]



11

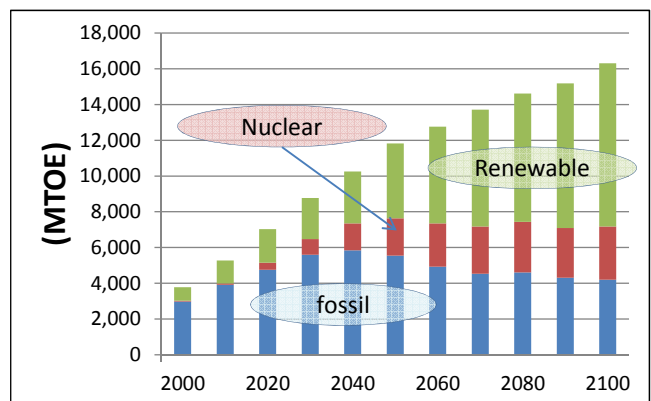
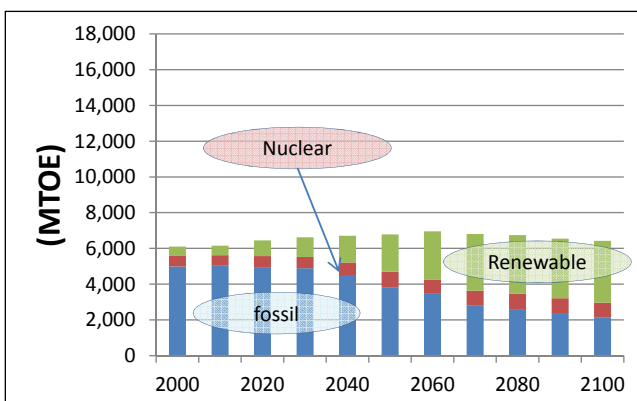
## Region Total Primary Energy for Z650 <sup>12</sup>

### Industrialized countries

- Total Primary Energy is almost constant up to 2100.
- Share of fossil fuel gradually decreases
- Alternatively, share of renewable energy mainly increases

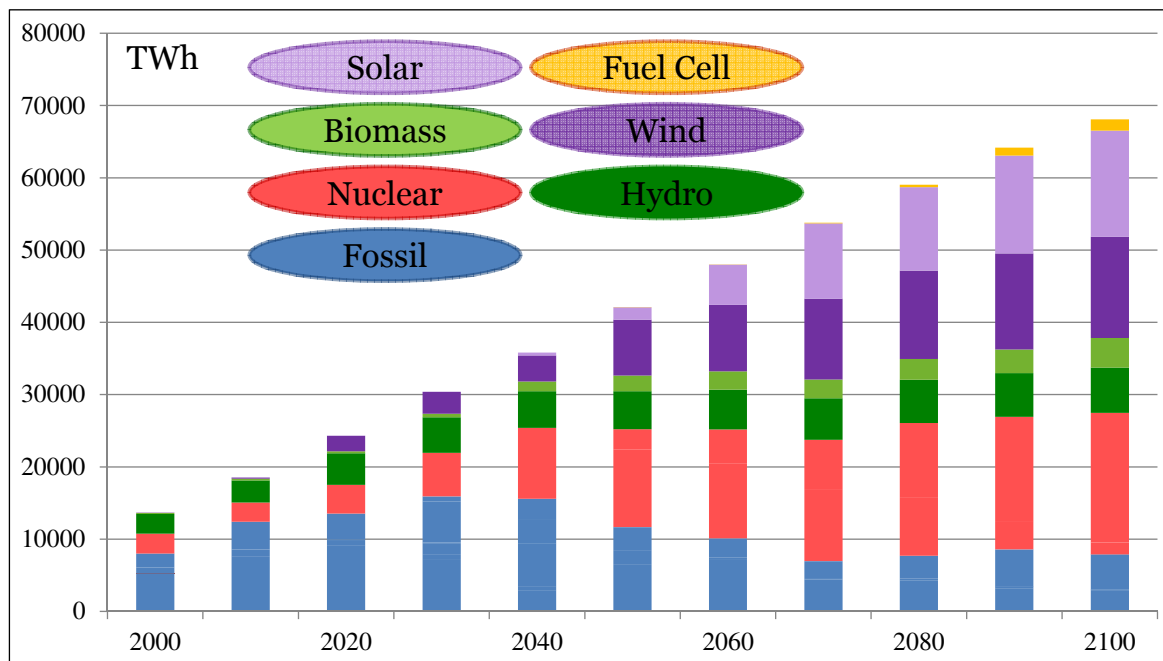
### Developing countries

- Total Primary Energy continuously increases up to 2100
- Peak of fossil fuel consumption at 2040
- Both Nuclear and renewable energy increase remarkably



11

# Electricity: Global Power Generation of Z650



Nuclear Power Capacity (GWe)	2000	<b>2030</b>	<b>2050</b>	2100
		370	<b>810</b>	<b>1,800</b>

13

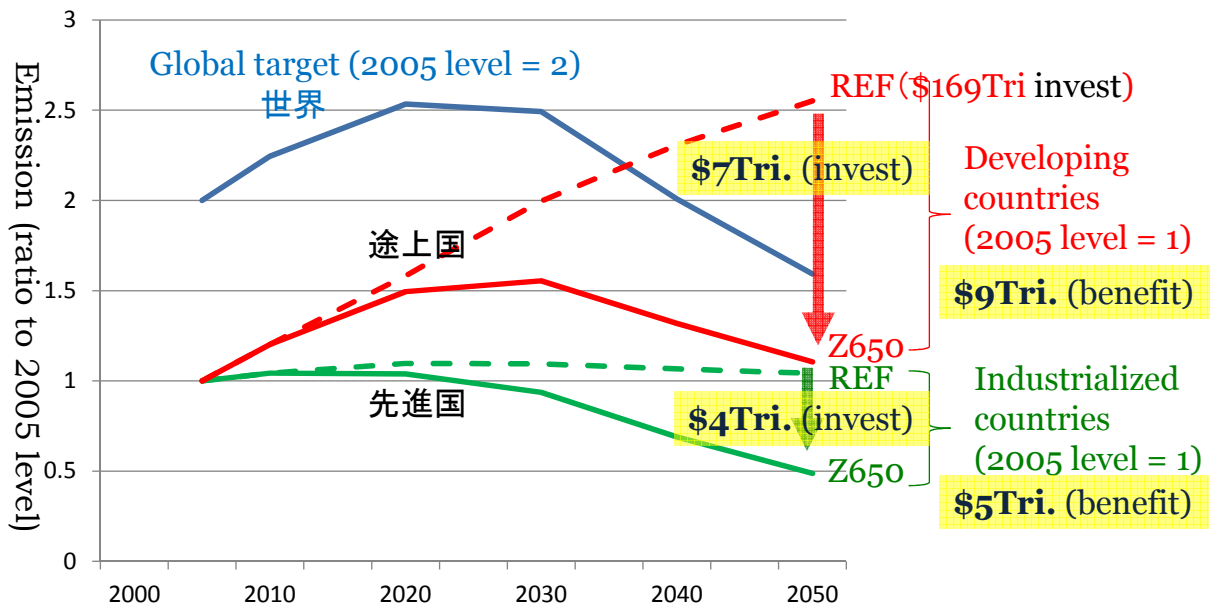
## Regional Equitability

Major industrialized and developing countries

Region	CO2 Emissions					
	2030			2050		
	Ratio to 1990 levels	Ratio to 2005 levels	Ratio to REF of 2030	Ratio to 1990 levels	Ratio to 2005 levels	Ratio to REF of 2050
World	1.60	1.20	0.82	1.00	0.75	0.46
Industrialized countries	1.05	0.95	0.89	0.53	0.48	0.48
USA	1.16	0.96	0.90	0.57	0.47	0.47
EU15	0.89	0.86	0.91	0.46	0.45	0.53
Japan	0.93	0.79	0.90	0.55	0.47	0.66
Developing countries	2.82	1.54	0.77	2.05	1.12	0.45
China	2.77	1.48	0.74	1.53	0.82	0.37
India	3.42	1.91	0.72	2.83	1.57	0.37
ASEAN	3.74	1.64	0.80	3.41	1.50	0.57

# Additional Investments vs. Fuel Saving Benefits

世界全体で最適化し、投資と燃料削減費がバランスするエネルギー構成が存在する  
Global and regional emissions of Energy Related CO<sub>2</sub>

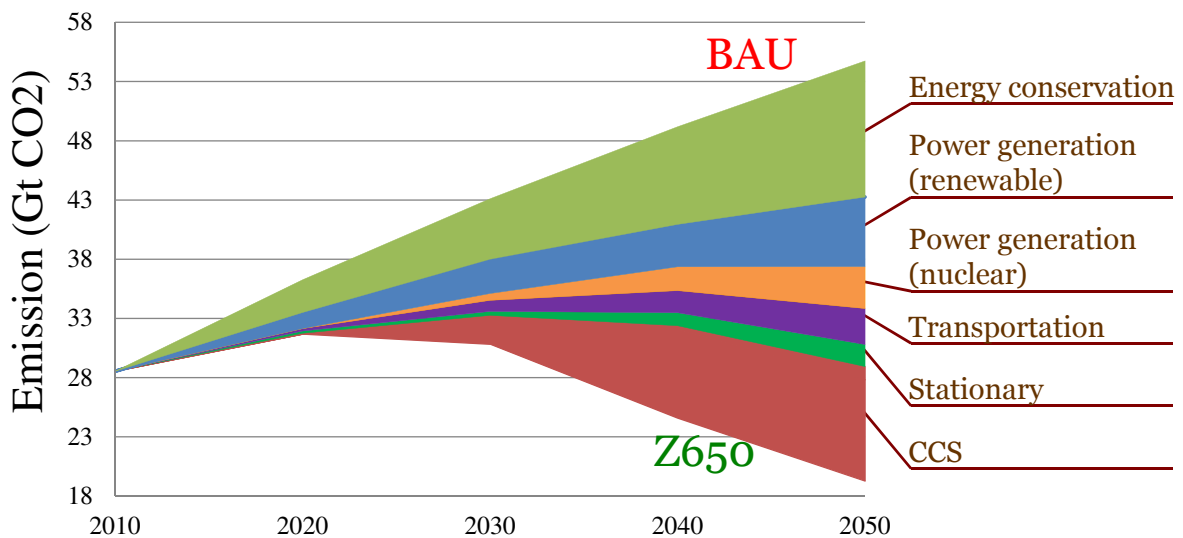


註: \$ 1 Tri/40年間 = 25B \$ /年 = 2兆円 /年

先進国2050年80%削減ケースでは 追加投資 \$ 38Tri, 燃料削減メリット = - \$ 10Tri; net \$ 28Tri

15

## CO<sub>2</sub> emission reductions by sector

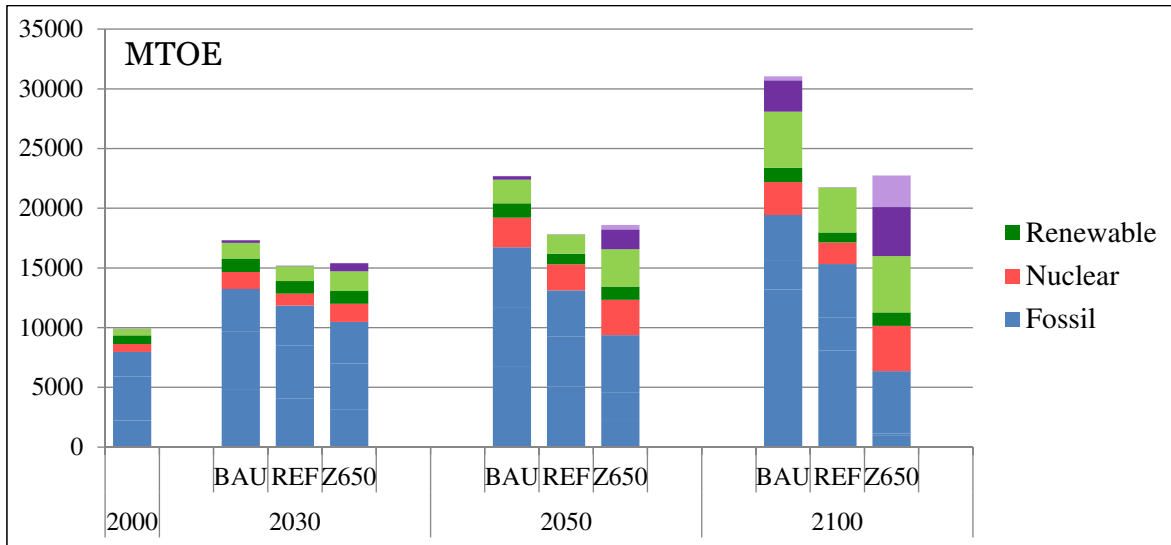


Energy saving and renewable energy play an important role during the whole period, while nuclear, transportation and CCS play an increasing role during the later stage.

16

# Total Primary Energy

Total Primary Energy continuously increases up to 2100  
 Less energy consumptions in REF and Z650  
 More clean energy combination in Z650



Changes of Primary Energy Mixture in Z650 (Fossil: Nuclear: Renewable)  
 7: 1: 2 (2030) → **5: 2: 3 (2050)** → 3: 2: 5 (2100)

## 原子力フェーズアウトは途上国への負担増

世界全体最適化 (Z650) のコストと原子力フェーズアウトのコストとの比較  
 /削減費用と省エネメリット (2010~2050)

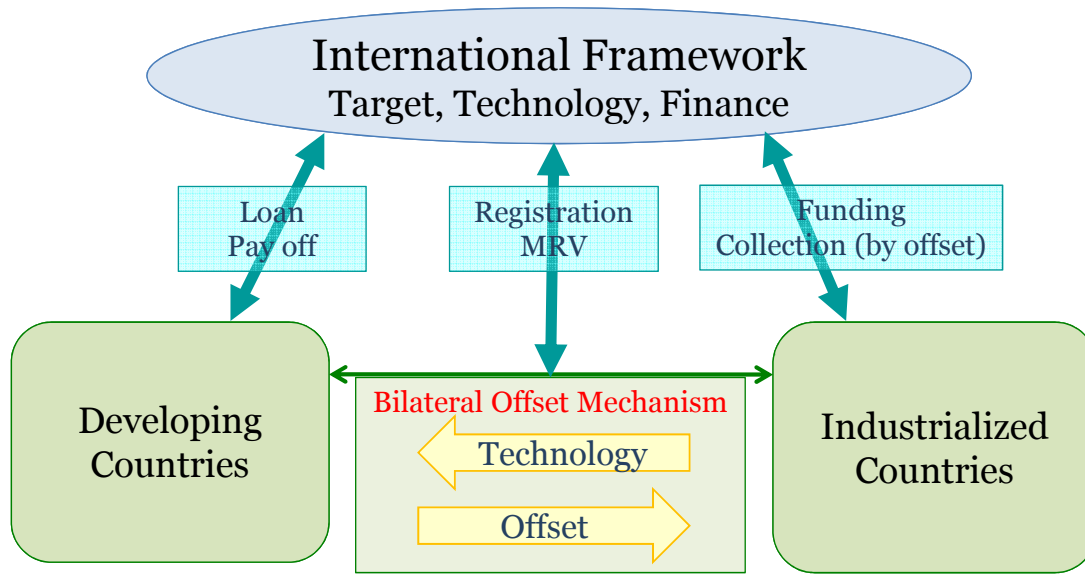
Z650	削減比		累積削減量 (Gt CO <sub>2</sub> )	追加費用 (Tri\$)	省エネメリ ット (Tri\$)	正味コス ト
	2030	2050				
世界	1.2	0.75	372	13→20	-13→-7	0→13
先進国	0.9	0.5	128(164)	5→7	-4→-4	1→3
途上国	1.6	1.1	245(219)	8→13	-9→-3	-1→10

Tri\$/40年間=25B\$/年=2兆円/年

キャノングローバル戦略研究所(CIGS)国内ワークショップ  
 湯原「地球温暖化緩和における世界で共有できるエネルギー・ビジョン」 2011年6月

# Enhanced international Mechanism

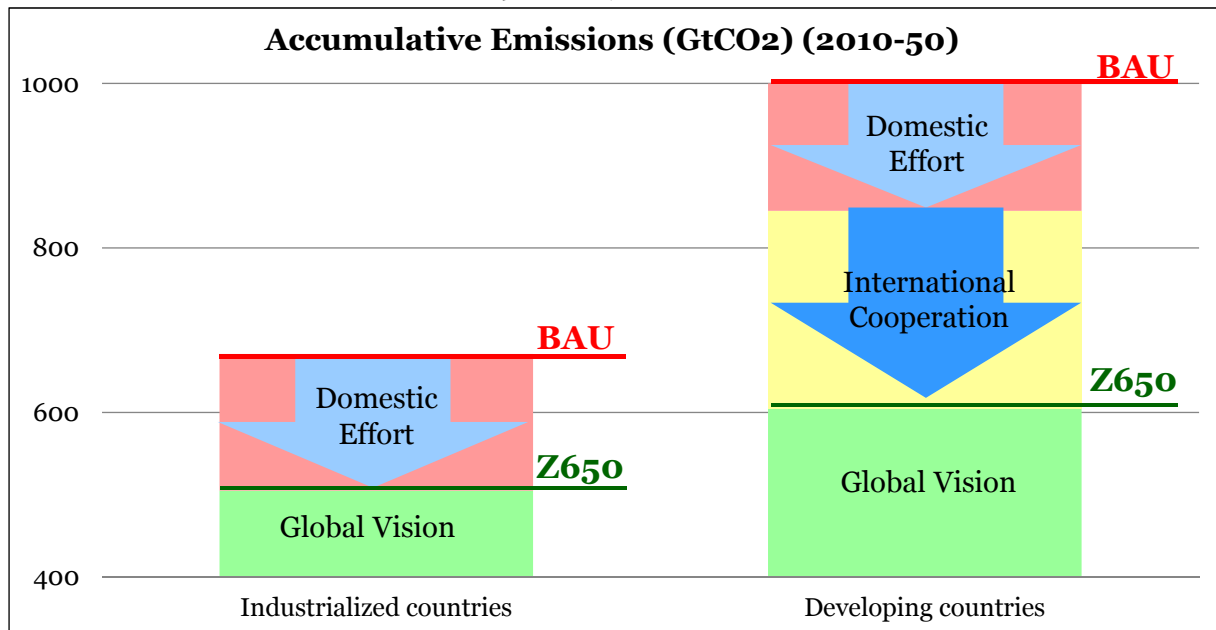
国際協力による低炭素技術の普及、認証認定



To promote the low carbon technology deployment  
 To provide incentive to low carbon technology development

二国間でのオフセットと技術移転。有償の融資とロイヤリティの確保(トップランナー低炭素技術の認定とライセンスフィーの尊重)、透明性ある削減実績の認証

## CIGSの世界共有ビジョン提案 実現する途



**BAU:** traditional development **REF:** energy conservation **Z650:** Low carbon vision  
 International cooperation is necessary to fill in the gap in developing countries from domestic initiative to low carbon vision



## #2「地球温暖化対策で世界が共有するエネルギービジョン」 国内シンポジウム(2011.6.30) ,国際シンポジウム(2011.9.16)

### 目的:

地球温暖化対策を話し合う国連気候変動枠組み条約の締約国会議(COP17)に向けて、京都議定書に代わる新たな枠組みづくり\*に向けた提言を行う。

\*あたらしい「排出曲線+世界全体で最適化+国際協力の仕組み」

### 内容:

- (1)温室効果ガス(主としてエネルギー起源二酸化炭素)の総排出量の設定(「GHG濃度安定化450ppm&2°C」から「オーバーシュート&ゼロエミッションシナリオへ」)
- (2)これを満たす世界全体で最適化(コストミニマム)するエネルギー構成と各国の排出分担(2050年先進国50%減、途上国10%増)
- (3)このエネルギー構成に対する追加削減費用と省エネメリットのバランス(追加投資が燃料削減メリットとバランスする)
- (4)低炭素エネルギー技術普及のメカニズム(途上国支援のための技術移転とその在り方、京都議定書における追加性とカーボン市場における投機性の排除)。

-----  
政府の約束「京都議定書延長からの離脱」、福田首相「2050年世界50%削減(先進国は80%削減)」、鳩山首相「日本国内 2020年1990年比25%削減」、COP15&16「2020年毎年1000億ドルの途上国温暖化対策への先進国支援」

21

## 2030年日本のエネルギー構成の提案

1. 二酸化炭素排出 2005年比20%削減

2. 原子力発電の維持

- ・2010年設備4900万kW・稼働率67%・発電電力量288TWh
- ・中長期的に維持する→4200万kWの設備を稼働率65%・発電電力量240TWh(全発電電力量の24%)で維持。
- ・同一設備量で稼働率の改善(80~90%)により発電電力量は30%~35%を維持できる。

3. オーバーシュートシナリオ下における世界全体最適化(GRAPEの結果)を基軸に据え、その中における日本の構成を日本の状況を踏まえて、これに修正を加え、エネルギー構成を作る。

4. セクターごとの効率とその改善を設定し、需要量とそのエネルギー構成を見直し、電源構成と総一次供給量を定める。

- ・ 便益は各セクターの活動量の予測(中期目標検討委員会・国立環境研究所資料など)に基づき、各セクターとも2030年はほぼ2010年時を維持すると想定
- ・ 効率の設定は東京大学トリプルフィフティの設定値を引用
- ・ 電力化率 2030年(改)ケースで 供給51%(最終需要30%)
- ・ 総合エネルギー効率(便益/総一次エネルギー供給) 2030年40%とし、2050年50%を目指す。

5. 結果

(1)総一次エネルギー供給

20%程度減らし、化石燃料:原子力:再生可能エネルギーの構成比:73:13:14% 電源構成 56:24:20

その結果、CO2排出は1990年比で18%減、2005年比で27%減が可能。

エネルギー効率の改善により、最終需要量を抑制し、転換効率を上げ、その結果総供給量が抑制される。

(2)二酸化炭素の排出は2005年比で20%を上回る削減が可能

22

## 2030年日本エネルギー構成(総一次エネルギー供給)

		石炭	石油	ガス	再生	原子力	合計	効率*1	
総供給	2010実績	120	210	96	26	60	513	33%	
		83%			5%	12%			
	2030(Grape)	68	203	38	56	102	467		
		66%			12%	22%			
	2030(改) 本提案	89	134	72	55	60	421	40%*4	
		73%			13%	14%			

\*1 便益/総供給

\*3 電力化率 2030年(改)ケースで 供給51%(最終需要30%)

\*4: 総合エネルギー効率 2050年50%を前提

23

## 2030年日本エネルギー構成(発電電力量)

オーバーシュートゼロエミッションシナリオ制約下におけるエネルギー構成-  
原子力発電を維持する(=設備容量を4200万kWに維持)ケース

## 2030年の電源構成(発電電力量 TWh)

	総電力量 TWh	化石燃料			原子力	再生可能エネルギー					
		石炭	石油	ガス		水力	太陽	風力	海洋	地熱	バイオ
2010 実績	1157	261	100	276	350	91					
2030 Grape	1085	234	3	224	408	80	0	124	-	-	11
		42%			38%	20%					
2030 本提案	1000	286	0	273	240	91	29	33	15	10	22
		56%			24%*1	20%					

\*1: 原子力発電所の設備容量を4200万kWとすれば、稼働率65%の時の発電量240TWh(全電源の24%)に相当する。  
稼働率81%で300TWh(同30%)、同じく稼働率94%で350TWh(35%)となる。

24

2030年再生可能エネルギー20%(全電源1000TWh中)の内訳例

再生可能エネルギー発電の 全電源に占める割合 (%)		水力	太陽	陸上 風力	洋上 風力	海洋	地熱	バイ オ	合計	備考
稼働率(%)		<b>22</b>	<b>12</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>40~75</b>	<b>80</b>	<b>80</b>		総発電電力量 <b>1000TWh</b>
<b>2010</b> 実績 <b>10%</b>	設備 (GW)	48	3.6	2.4	-	-	0.53			
	電力量 (%)	9.1	0.16	0.4	-	-	0.3	0.3	10	
<b>2030</b> <b>35%</b>	設備 (GW)	48	69	52	8	1.5	3.9	6.0		エネ環会議 2012. 6. 19 環境省 2012. 8. 31
	電力量 (%)	9.1	7.2	9.0	2.1	0.5	2.7	4.2	35	
<b>30%</b>	設備 (GW)	48	53	<b>25</b>	<b>10</b>	<b>5.7</b>	3.9	6.0		荒川・湯原 <b>2012.10</b> 海洋政策本部参与会議 <b>PT</b>
	電力量 (%)	9.1	5.7	<b>4.4</b>	<b>2.6</b>	<b>2.5</b>	2.7	4.2	<b>30%</b>	
<b>20%</b>	設備 (GW)	<b>48</b>	<b>27</b>	<b>10</b>	<b>6</b>	<b>3.4</b>	<b>1.7</b>	<b>---</b>		本検討
	電力量 (%)	<b>9.1</b>	<b>2.9</b>	<b>1.7</b>	<b>1.6</b>	<b>1.5</b>	<b>1.0</b>	<b>2.2</b>	<b>20%</b>	

2013.5.8湯原記

原発事故評価と新しい展開

1. 規制一電力事業者一メーカーの在り方と責任所在を明確化した新しいシステムの構築

2. 事故原因の説明とその克服 及過剰な安全規制への懸念

(1)事故原因の技術的説明

- ①津波による 海水ポンプの機能喪失 (最終的熱吸収源の喪失)
- ②電源盤と非常用電源の浸水による配電・受電機能停止
- ③長時間全電源喪失下における高圧注水系統と減圧系統の機能不全

(2)その克服

①②③に対する深層防護(系統の多重性と外部事象に対する設備・配置基準)

想定すべき苛酷事故は長時間全電源喪失事故をとし、炉心溶融を回避する長時間の冷却機能の保持  
構造的には格納容器破損防護。

(対テロ、航空機衝突に対する対策を再起動条件としない。本格的多面的検討を中長期に行うこと)。

3. 新しい原子力の世界の構築

(1)(第三世代+福島対応炉)炉は上記①②③と長時間電源喪失事故に対する苛酷事故対策(SA)

(2)(第四世代) 2030年商業化炉

- ・炉心溶融の無い(除熱システムの多様化と多重化、又は低出力密度の炉心、自然循環での冷却可能システム)
- ・高レベル廃棄物も無い(消滅か元々出さない)原子力エネルギー利用の姿
- ・地球温暖化のための産業用プロセスヒートの供給「多目的高温ガス炉HTGR」

- ・資源問題と廃棄物問題、核不拡散からトリウム燃料をも導入可能とする多様性の維持  
発展途上国への安全で経済性ある原子力エネルギー技術の構築(濃縮しない燃料、  
炉心溶融の無い炉、高レベル廃棄物を出さない使用済み燃料)

# 福島第一事故後の世界の次世代原子力開発を巡る動向

## 1. 世界の潮流

炉心溶融のない、水素爆発もない、高レベル廃棄物を出さない「原子炉と燃料」システムへの指向が強まるだろう。  
(第四世代炉、2030年から商業化・普及化プログラム。高温ガス炉・溶融塩炉・高速増殖炉など)

## 2. 高温ガス炉:

・出力密度薄く、自然循環で炉心冷却可能、ヘリウム冷却のために高温(ほぼ1000°C)熱供給が可能(化学・鉄鋼のプロセスヒート供給)。  
・地球温暖化対策には産業用の熱供給の化石燃料削減が不可欠との観点から評価。

(1)中国政府は福島事故後、すべての原発建設工事を停止した。2013年高温ガス炉建設から再開した。(20万kWの熱電供給を20基の計画の第一基目、将来途上国への輸出も視野に)

(2)米国の高温ガス炉計画の再活性化、DOEの予算により、合同チームを結成、開発を進めている。原子炉は仏AREVA、米国WH、GAも参加。また化学工業界も熱需要家として参加。またシェールガスからGTL製造プラントへの熱供給を検討、公表した。

・ (3)日本はHTTR(高温ガス炉実験炉として1990年代に1000億円かけて旧原研・大洗建設し、臨界し、自然循環による炉心冷却を確認し、順調に実験を継続している。水素生産システムとして細々と研究を継続している。この分野で稼働中の炉を持つトップランナー。

・ (4)ドイツはトリウム燃料の高温ガス炉を1960~70年代に開発(炉心溶融ない、トリウム燃料(高レベル廃棄物・マイナーアクチナイドMAを出さない)を採用。その後原子力開発中止するも中国に技術移転。

・ (5)米国は同じ頃 ガス炉開発し、実証炉を建設運転したが、トラブルあり、軽水炉路線が定着した。今世紀に入り、原子力開発プログラムの中で、2021年までに高温ガス炉を建設する法律作り、計画推進してきている。英国は炭酸ガス炉で世界を先行したが、原子力潜水艦用の軽水炉PWRに世界市場を奪われた。

## 結論

・ 高温ガス炉の推進戦略を再構築し、安全で、安定した原子炉技術として商業化を図ること。  
・ 産業用熱供給を長期的目標とする(CCS代替)。  
・ 燃料転換を含め、高レベル廃棄物を出さないシステムを考える。

27

## 3. 中小型炉(SMR)

・ 米国のSMR プロジェクトは進展を続け、軽水炉小型炉を建設中、引き続き第二弾の高速炉が期待されている。またビルゲーツの小型炉(燃料交換しない燃やしきり炉、液体金属高速炉)も中国と共同研究を実施中、勧告もこれに参加する模様。

・ (2)米国は軽水炉の固体燃料と溶融塩冷却のシステムを使用済み燃料の高レベル廃棄物(超ウラン元素MA)を消滅させる炉としての役割を重視している。一方フランスは燃料も冷却剤も溶融塩とする原子炉の研究を進め、第四世代の原子炉の国際協力をリードしている(GIF-MSR)。

## 4. 消滅炉ADSの開発

・ フランスの増殖炉計画と消滅炉計画が進む。

・ 日本の原子力機構の 高レベル放射性廃棄物に含まれるマイナーアクチナイド(MA)の核変換を目的とした加速器駆動核変換システム(ADS)の研究レベルは高い。熱出力800MWのADSが1基で、電気出力1GWの軽水炉10基で生じるMAを核変換できる(放射能無毒化30万年を300年に短縮、消滅性能は高速増殖炉も同様のレベルにある)。

・ (2)日本はこの分野ではほとんど実績ない(故古川博士や有馬元東大総長が推進を提言してきた)。広範な基礎研究の基盤と積み上げが必要である。原子力委員会が先頃状況を関係者から聴取した。

## 結論

・ 進化した中小型原子炉への開発はこれまでの成果の上にトップランナーになりうる。

・ 高レベル廃棄物の低レベル化(核変換による消滅)もまたトップレベルにある。  
・ ウランに加え、トリウムも核燃料として利用できる柔軟性と基礎技術基盤の再生が必要

## 5. トリウム燃料と溶融塩炉の開発(米中連携。インド開発加速)

・ ウランと並ぶ資源量ある(特に中国・インド)、またレアアースの副産物として、中国で多量に産出・産廃として大きな問題に。高レベル廃棄物を出さないトリウム燃焼炉として、また軽水炉の高レベル廃棄物の消滅炉として位置づけられている。これまでも第四世代原子炉

・ トリウム溶融塩炉も高レベル廃棄物を消滅させるシステムとして検討し、また再処理工場の最後端での低レベル化処理プロセスとして検討すべき。

・ (1)中国が大規模な研究開発プロジェクトを上海応用物理研究所で立ち上げ(2011年1月、500名程度の研究員から構成されるプロジェクト)、福島事故後米国の溶融塩炉技術(オークリッジ国立研究所、1960年代)とも連携し、高レベル廃棄物を出さない原子炉システムとしての開発を目指している。US-DOEがこれをバックアップし、協力覚え書きを交わしている。

28

## 原子炉の種類と自主開発炉

原子炉の種類		燃料	減速材	冷却材	技術導入	日本の自主開発	海外
ガス炉	ガス冷却炉	GCR	天然ウラン	黒鉛	炭酸ガス	GCR 東海 1 (英国)	英国国産
	高温ガス炉	HTGR	濃縮ウラン	黒鉛	ヘリウム		HTTR
		AVR	トリウム	黒鉛	ヘリウム		ドイツ→南ア、 中国
軽水炉	沸騰水型炉	BWR	濃縮ウラン	軽水	軽水	BWR (GE)	米 GE, WH
	加圧水型炉	PWR				PWR (WH)	むつ 船用炉 (超臨界圧炉) SMR
重水炉	軽水冷却	GCR	天然ウラン	重水	軽水	<del>カナダ CANDU</del>	中国・インド
	重水冷却	ATR	天然ウラン	重水	重水		ふげん
高速増殖炉		FBR	濃縮ウラン プルトニウム	なし	ナトリウム		常陽-もんじゅ→ 実証炉 ロシアで実証炉、 中国
溶融塩炉		MSR FHR	トリウム	黒鉛	溶融塩	ORNL	(富士) 米中, インド

29

## 動向に関する私見

2013.5湯原

0. 福島第一原発事故以降、世界の新型炉の開発が活性化した。高温ガス炉、溶融塩炉が見直され、新たな国際連携が欧米、中国、韓国、インド、ロシア間で持たれている (SMR, HTGR, MSR など)。その動きに日本は全く取り残され、情報も報告・報道されない状況にある。FBR や HTGR ではかつてのトップランナーが周回遅れになるだろう。

### 1. 次世代軽水炉による第三世代++炉の開発

長時間全電源喪失事故を回避し、炉心損傷を回避する次世代炉の開発が日本の義務。  
炉心溶融とその対策を安全設計の前提とする様な行き過ぎた安全規制を回避すべき。

### 2. 第四世代炉の開発

FBR FACT サイクルの開発は維持すべきも、米・ロの鉛ビスマス液体金属高速増殖炉 SMR のような発展・進化形も考え、それができる柔軟な体制を再整備すべき。

一方で HTGR は産業用熱供給として温暖化対策上将来的には不可欠になるだろう。炉心溶融を原理的に起こさないガス炉の開発を続け、産業界主体 (鉄鋼・化学) の実証炉計画を推進すべき。

### 3. 高レベル廃棄物の消滅炉

地層処分場探しが極めて困難な中、再処理工場の最後流に消滅炉を設置し、MA を燃焼すべき。また、ガス炉燃料とリンクさせたトリウム溶融塩炉の米中の動きにもっと注目すべき。

高速炉又は溶融塩炉による使用済燃料の高レベル廃棄物の減容化と低レベル化の研究は、欧米中で、今後ますます重要性をもつだろう。

### 4. CO2削減と高温ガス炉による産業用プロセスヒートの供給

地球温暖化対策上の最大問題は産業部門のプロセスヒート。シェールガスの自動車燃料化のための HTGR-GTL の動きにもっと注目すべき。

-----  
 新型炉戦略は長期エネルギー供給の安定化とセキュリティ上、かつ温暖化対策上不可欠な課題として、また人材育成の場として、促進すべきである。検討する場を活性化させて、提言機能を強化する必要がある。

30

## 山東省石島湾原発

# 中国:2年ぶりに原発建設再開、自主開発の第4世代原子炉「高温ガス炉」を使用予定—山東省榮成市 2013年1月25日

<http://www.recordchina.co.jp/group.php?groupid=68789>

- 2013年1月24日、中国山東省榮成市にある約2年間にわたり建設が中断されていた華能石島湾原子力発電所がこのほど着工した。中国東部沿海地域に位置する同原発では、**中国が自主開発した世界初の第4世代原子炉**が使われる予定だ。新華社通信が伝えた。
- 清華大学原子エネルギー・新技術研究院の張作義(ジャン・ズオイ)院長(高温ガス炉チーフエンジニア)は、「石島湾原発の主体工程が着工した。これは、福島原発事故を受けて中断されていた中国の原発建設が再開したことを意味する」と語った。
- 同原発は華能集団、清華大学、中核建設集団の共同出資で建設される。中国が知的財産権を有する初の高温ガス炉モデルプロジェクトであり、第4世代原子炉の安全性を備える**モジュール型高温ガス炉**を商用化した世界初の原発でもある。総工費約40億元(約560億円)を投じて20万キロワットの高温ガス炉を建設し、**2017年までに稼働**を始める予定。
- 華能山東石島湾核電有限公司の張廷克(ジャン・ティンカー)董事長(取締役会長)は、「第3世代原子炉である加圧水型原子炉技術とは異なり、高温ガス炉の蒸発器は560度にまで達するため、発電効率が大幅に高まる。さらに重要なのは、**高温ガス炉はどのような事故が発生しても炉心溶融や大量の放射線漏えいが発生せず、安全性が高い点だ**。原子炉の余熱で炉心が融解する恐れが無く、原発の外から緊急措置を講じる必要がない。第4世代原子炉の安全目標を達成した」と話した。
- 高温ガス炉原発のモデルプロジェクトは2011年3月1日に、国家科学技術重大特別プロジェクトの1つとして国務院の認可を得た。しかし同月に日本の福島原発で事故が発生したことを受け、中国は全ての建設中の原発プロジェクトを一時中止した。その後、2012年10月24日に国務院が「エネルギー発展の第12次五カ年計画」、「原子力発電安全計画(2011~2020年)」、「原子力発電中長期発展計画(2011~2020年)」を審議可決し、原発の建設再開が正式に決定された。
- 石炭火力発電を中心とするエネルギー構造は、中国の生態環境に極めて大きな試練をもたらしている。中国東部では今年1月中旬以降、広範囲の大気汚染が持続的に発生した。中国のエネルギー構造調整とクリーンエネルギーの発展は差し迫った問題だ。
- 張董事長(取締役会長)は「**石島湾原発モデルプロジェクトが成功すれば、中国は商用化された高温ガス炉を有する世界初の国となり、中国は原発技術の輸入大国から、原発技術・設備の輸出大国へと変化を遂げる。世界の原発産業における中国の地位も大幅に高まるだろう**」と語った。(提供/人民網日本語版・翻訳/SN・編集/内山)

湯原註: 炉心溶融のない、高レベル廃棄物も出さない高温ガス炉は中国の輸出原子炉として強力な戦略製品となると予測される。

31

# CO<sub>2</sub>排出シナリオの 科学性の検討について

一財) 電力中央研究所  
環境科学研究所  
上席研究員

筒井 純一









# CO<sub>2</sub>排出シナリオの科学性の検討 について

電力中央研究所 環境科学研究所

上席研究員 筒井純一

2013年7月10日

RI 電力中央研究所

© CRIEPI

1



RI 電力中央研究所

## 概要

- ◆ Z650の背景と要点
- ◆ 最新の気候科学に基づく温度上昇の検討

© CRIEPI

24

2

## IPCC第4次評価報告書(2007年)以降の議論

### ➤G8サミット

- 世界平均の温度上昇を2°C<sup>注1)</sup>以下に
- 世界のCO<sub>2</sub>排出量を2050年に半減

### ➤UNFCCC/COP

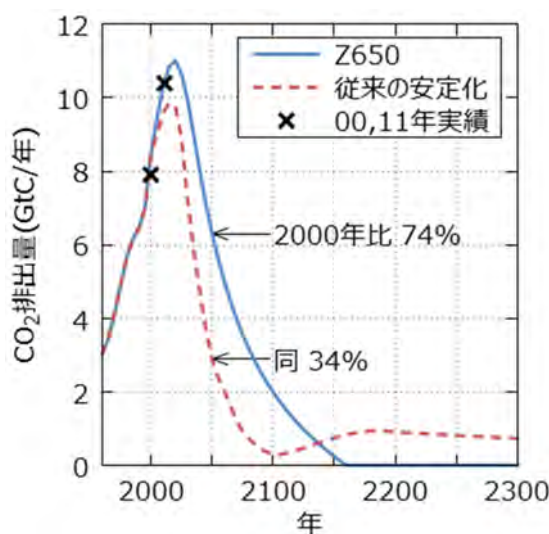
- 2009年COP15で2°C目標に実質合意
  - 海面上昇の脅威から島嶼国は1.5°C目標を主張
  - 限界以上の温度上昇が長期間(数百~千年)続くと、グリーランド氷床融解で海面が7 m上昇
- 2°Cレベル(450 ppm-eq<sup>注2)</sup>)安定化の排出削減は困難
  - オーバーシュートを含む幅広い選択肢を検討する必要性

注1) 温度上昇の基準は産業革命前(18世紀)

注2) CO<sub>2</sub>以外の要因を含むCO<sub>2</sub>換算の濃度(ppmは体積比百万分の1)

IPCC: 気候変動に関する政府間パネル、UNFCCC: 国連気候変動枠組条約、COP: 締約国会議

## Z650とは



- ・2020年にピークアウト、21世紀中の累積650 GtC<sup>注3)</sup>程度、22世紀半ば以降ゼロとする排出パスの一例
- ・2050年の排出量は2000年比74% ⇒従来の2°C目標に対し大幅増
- ・気候安定化の新しい概念 (ゼロエミッション安定化)に基づく
- ・直近の排出実績と整合

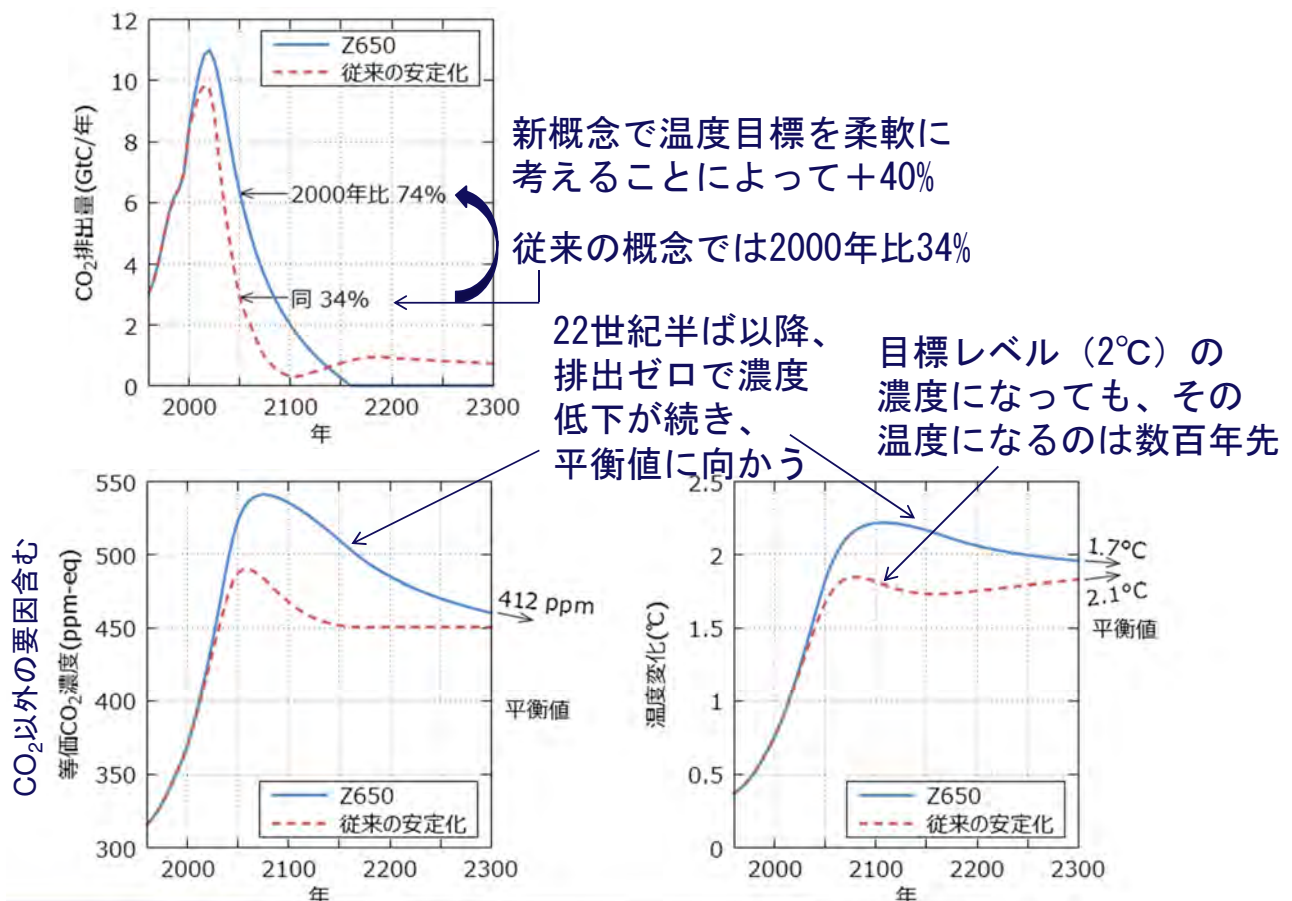
注3) 1 GtCは炭素(C)換算で10億トン、CO<sub>2</sub>はその3.7倍、最近の年間排出量(化石燃料使用+土地利用変化)は世界計で約10 GtC

# ゼロエミッション安定化の概念

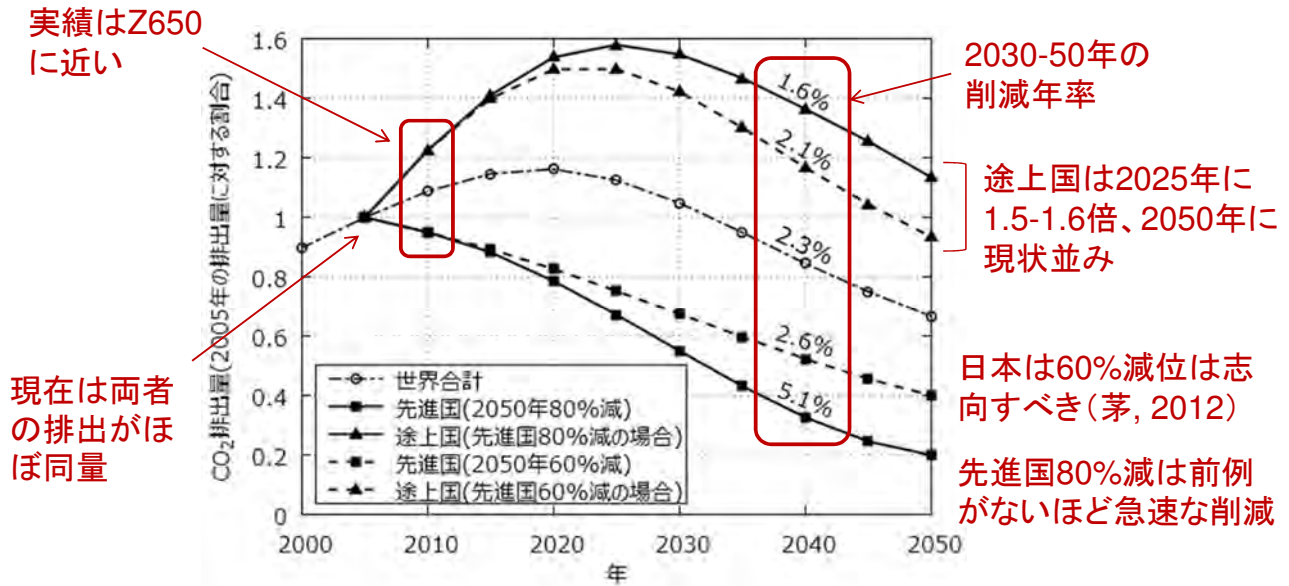
## ◆ 排出ゼロの下で平衡に向かう過程

- 海洋のCO<sub>2</sub>吸収が長期間続き、大気CO<sub>2</sub>濃度、温度とも低下に向かう
  - 一時的に目標温度を超過しても、グリーンランド氷床融解のような深刻な影響は避けられる
- 従来の濃度安定化の下では、気候系の慣性によって、温度上昇が長期間続く
  - 数百年後の温度上昇が安定化目標となり、過大な排出削減を強いることになる

Matsuno, Maruyama, and Tsutsui, 2012: Stabilization of atmospheric carbon dioxide via zero emissions --- An alternative way to a stable global environment. Part 1: Examination of the traditional stabilization concept. Part 2: A practical zero-emissions scenario. Proceedings of the Japan Academy, Ser. B, Vol.88, pp.368-395.



## Z650のCO<sub>2</sub>排出量の推移とその先進国と途上国の分担例



先進国はUNFCCCのAnnex IIに分類される国・地域。途上国はそれ以外で、中国などの新興国含む。Z650(新概念+柔軟性)で、双方が妥協できる余地拡大、日本の負担軽減。

Matsuno et al (2012, Part 2) Fig. 7に基づいて作成  
<http://criepi.denken.or.jp/jp/kenkikaku/report/detail/V12007.html>

## Z650の温度変化の論点

- ◆ 今世紀の比較的急激な温度上昇への適応
  - 想定以上の気候感度<sup>注4)</sup>に対するリスク管理
- ◆ ゼロ排出達成後の温度低下の可能性
  - 自然のCO<sub>2</sub>吸収による濃度低下と、平衡状態に向かう温度応答の兼ね合いによる
  - 非CO<sub>2</sub>強制力の推移にも依存

注4) 放射強制力(地表を加熱する効果)に対する温度上昇の度合い

これまでの検討では簡易気候モデルを使用  
 2012年度ワークショップ(7/19)で複雑な気候モデルの一例と比較  
 ⇒ 簡易モデルは自然のCO<sub>2</sub>吸収が過大評価の可能性  
 ⇒ 複雑なモデルでも長期的に温度は低下する傾向

# 気候感度に関する知見

## ◆ ECS 数百年以上の変化の指標

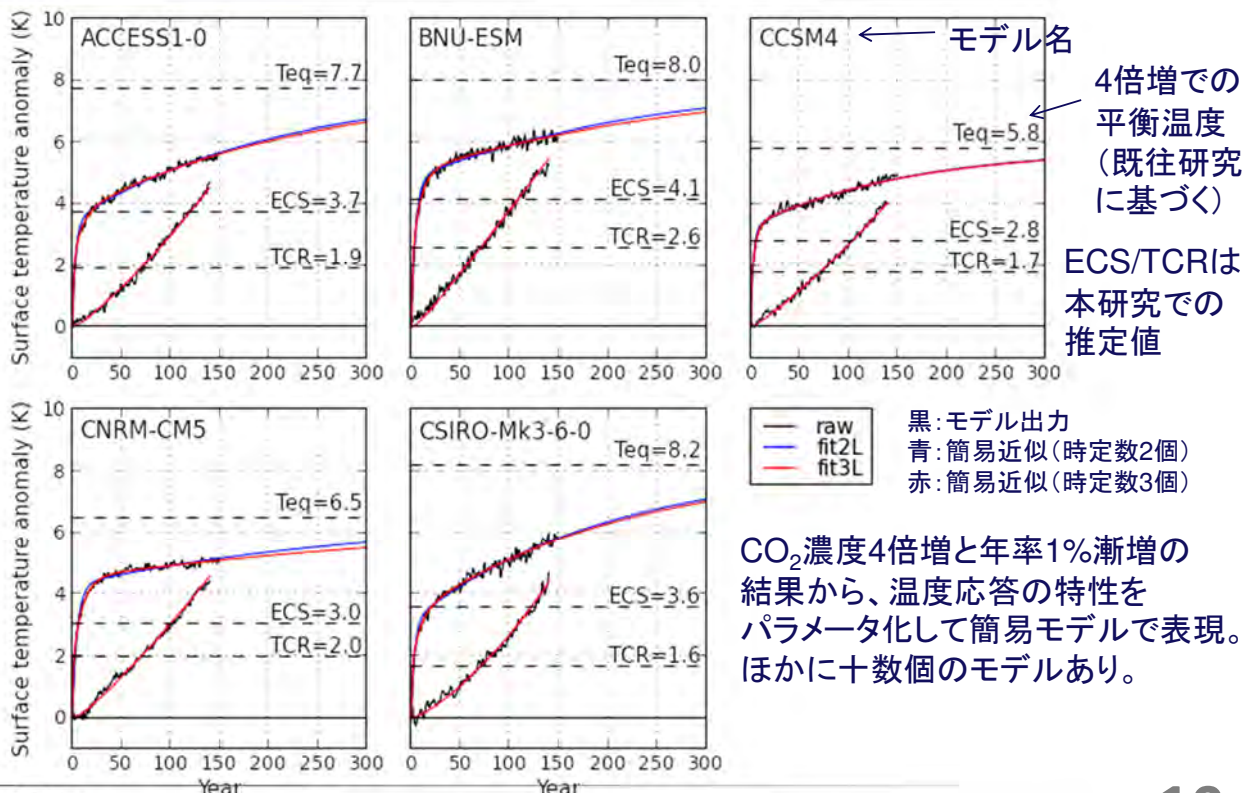
- CO<sub>2</sub>濃度倍増による平衡時の温度上昇
- 3°C程度 (2~4.5°Cの可能性)
  - 不確実性の原因はわかってきたが幅は縮まらない

## ◆ TCR 今世紀の変化の指標

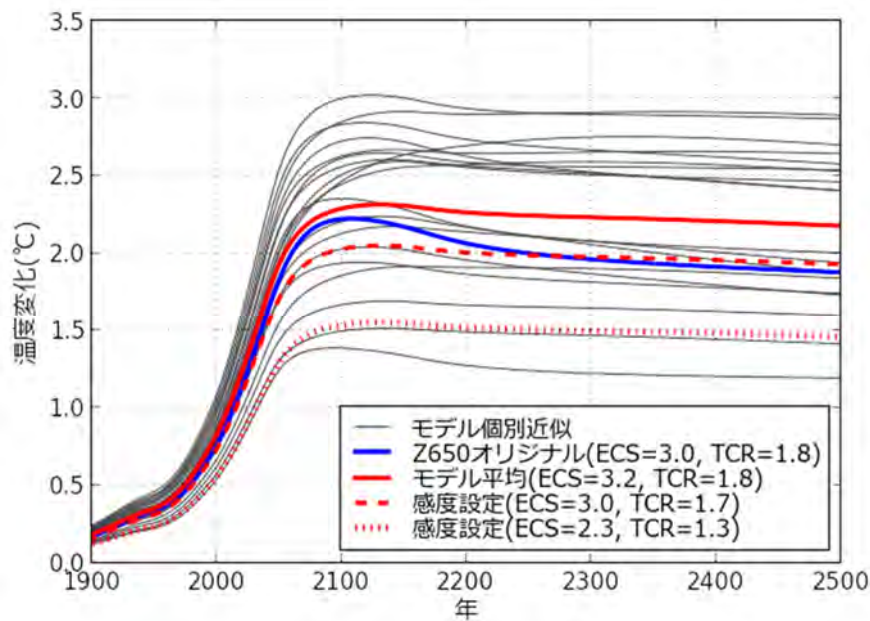
- 年率1%増の2倍時点 (70年目) の温度上昇
- 1~3°C程度の可能性
  - 海洋の熱吸収の度合いに依存
  - 最新の研究では1.3°C (90%信頼区間0.9~2.0°C)
    - Otto et al (2013, Nature Geoscience)

ECS: equilibrium climate sensitivity, TCR: transient climate response

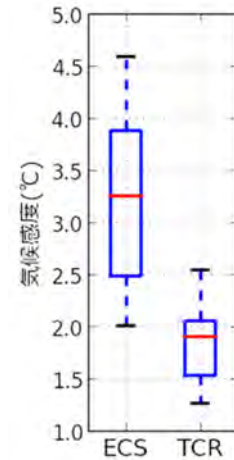
# 次期IPCC報告に向けた複数の気候実験



## Z650濃度パスに対するマルチモデル温度応答



モデル群の気候感度  
(TCRは観測に基づく  
推定より高め)



気候感度によって温度上昇は大きく異なるが、同じ気候感度でも、応答特性の違いで、ピーク値やピーク後の変化傾向が異なる。  
ECSが3.0°Cの場合、平均的には、2°C程度で推移。

## まとめ

### ◆Z650は現実的な排出パス

- 排出ゼロの下で長期的な気候復元を目指す
- 先進国は現実的なペースで削減、途上国は経済発展に必要な排出余地を得る
- 近年の排出実績とも整合

### ◆Z650の温度変化

- 炭素循環と温度応答に関する不確実性を含む
- 最新の観測と気候モデル群の知見は、2°C超回避を示唆

# 中長期エネルギー ビジョンについて

一財)エネルギー総合工学研究所  
プロジェクト試験研究部

都筑 和泰  
新藤 紀一  
黒沢 厚志





# 中長期エネルギービジョンについて

(一財)エネルギー総合工学研究所  
都筑 和泰、新藤 紀一、黒沢 厚志

0

## 本発表の内容

- はじめに
- シナリオ想定
- Z650を実現するための技術構成
- 短中期の主要課題
- 中長期の主要課題
- まとめ

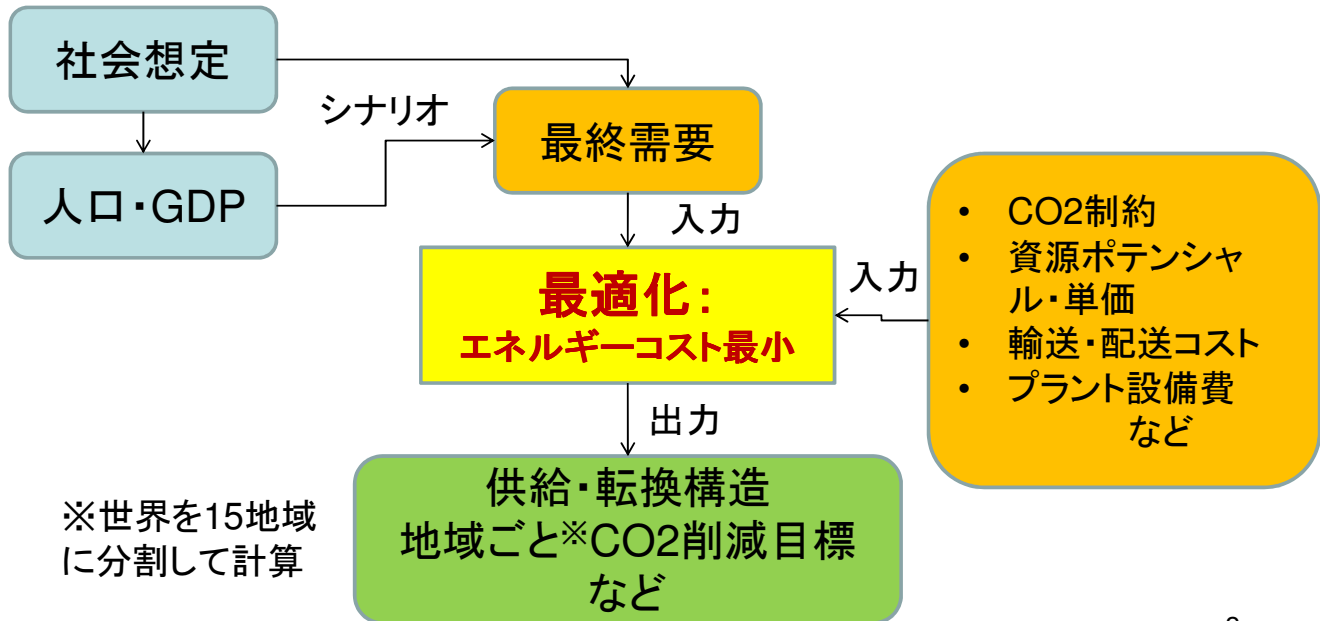
1

# はじめに

- ・ Z650の実現性評価
- ・ 実現見通しのある技術の組み合わせで成立し得るか



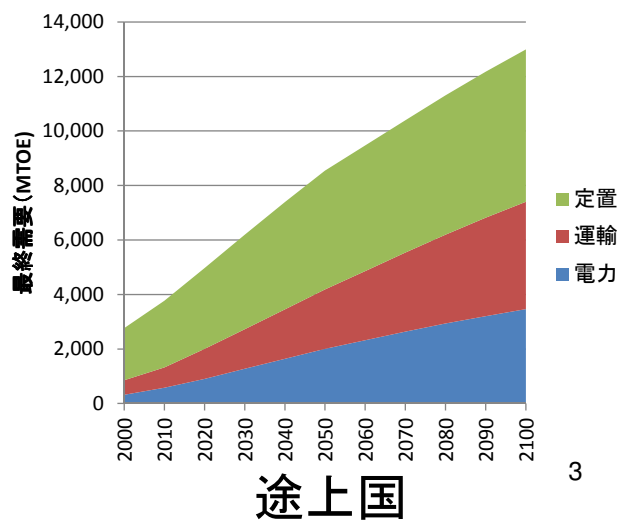
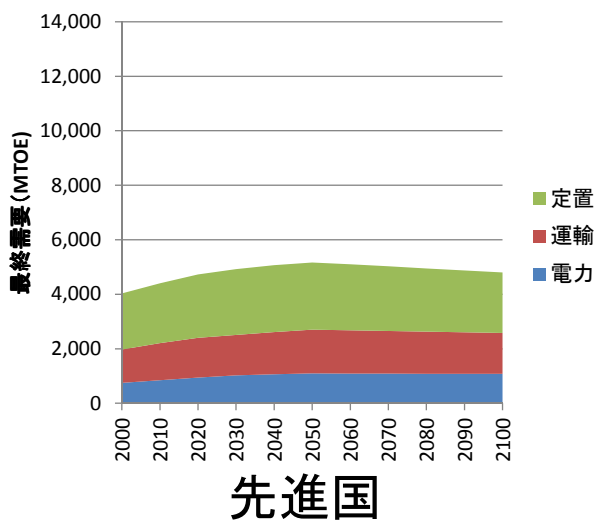
エネルギーモデルにより需給構造を試算



## 1. シナリオ想定

- ◆ 最終需要は途上国を中心に着実に増加
  - 人口増加
  - 生活水準の向上
- ◆ エネルギー効率の着実な増加は想定するが、社会構造の変革は想定しない。

	電力	非電力
産業	電力	定置
民生	電力	定置
運輸	運輸	



## 2. 一次エネルギー構成①成り行きシナリオ

CO2対策を実施しないと化石燃料中心の社会が続く

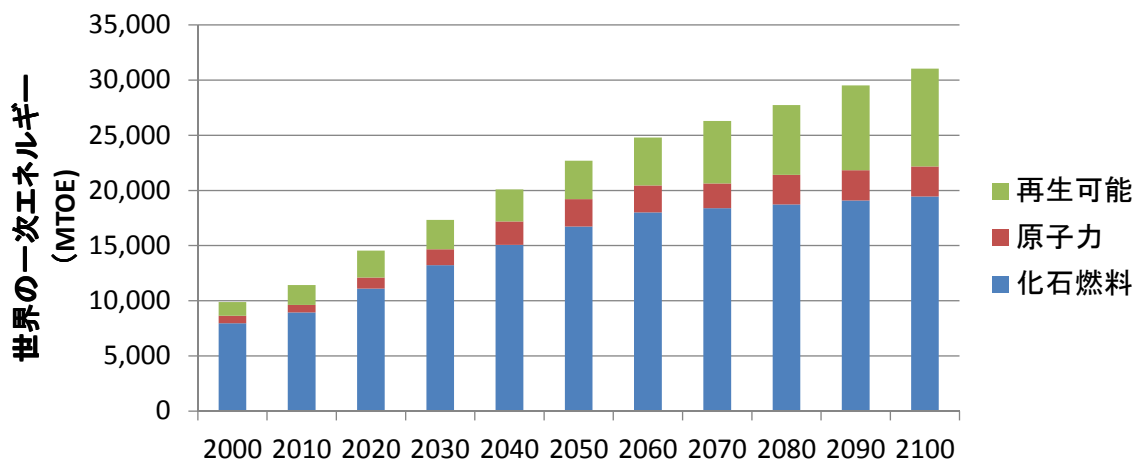
### ◆ CO2排出

2050年の排出量54Gt(1990年の約2.5倍)

累積排出量:2050年まで630Gt-C、2100年までの累積で1480Gt-C

### ◆ 資源制約

今世紀は石炭を中心に十分に供給可能。ただし、2150年で総資源量の5~7割を消費しており、長期持続的ではない。



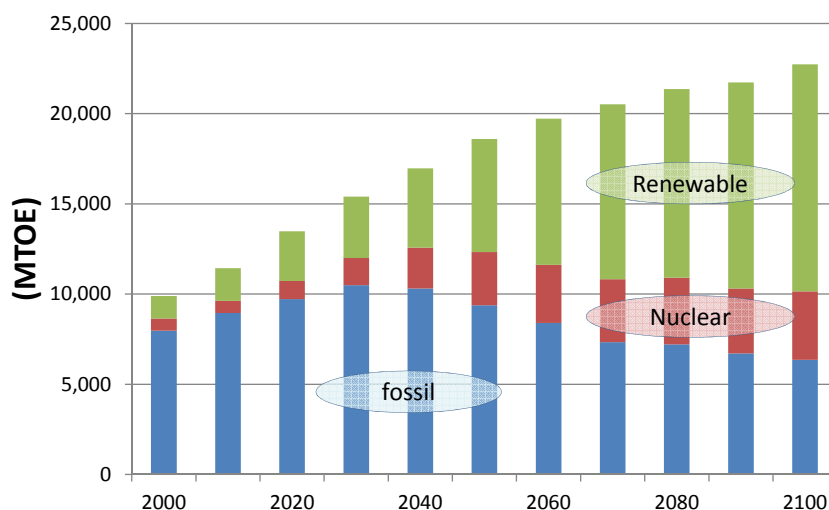
4

## 2. 一次エネルギー構成② Z650

- 途上国を中心にエネルギー消費が急増していく中、二酸化炭素排出を削減していくためには、原子力、再生可能の着実な増加が必要

Fossil : Nucl : Renew = 5 : 2 : 3 (2050)

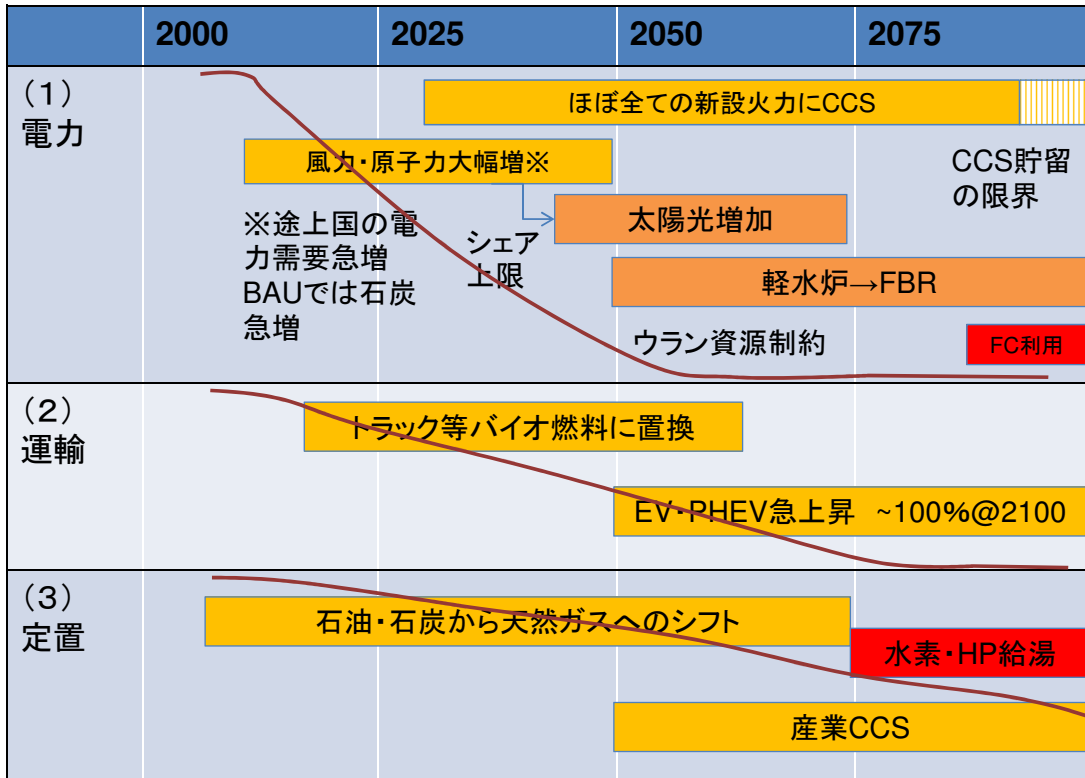
3 : 2 : 5 (2100)



世界の一次エネルギーの推移

5

### 3. Z650の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

6

### 4. 短中期(~2030年)の主要課題

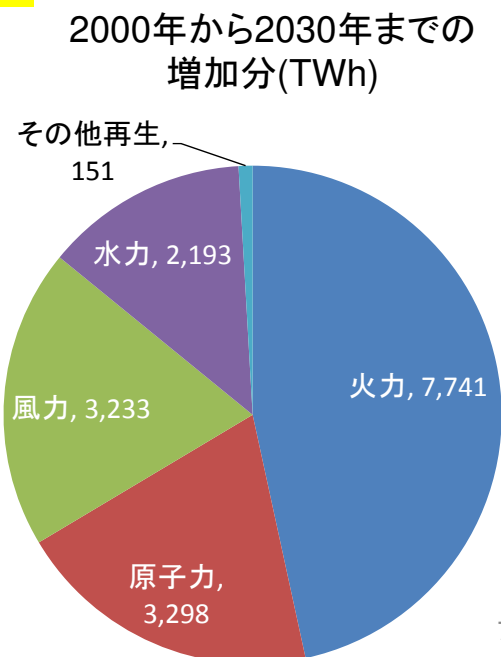
- ▶ 当面実現可能であって、比較的安価かつ大きな削減ポテンシャル発電部門の対策を中心に実施

- ➡ 原子力、風力、水力の導入
- ➡ 高効率の火力発電
- ➡ 高効率の需要機器

2030年までの平均増加量

- 原子力 : 36GW/年(稼働率85%)
- 風力 : 90GW/年(稼働率25%)

これらは原子力の導入期の50GW/年(1980年代前半)、最近の風力の導入速度40GW/年と比べ、桁違いに大きい値ではない。



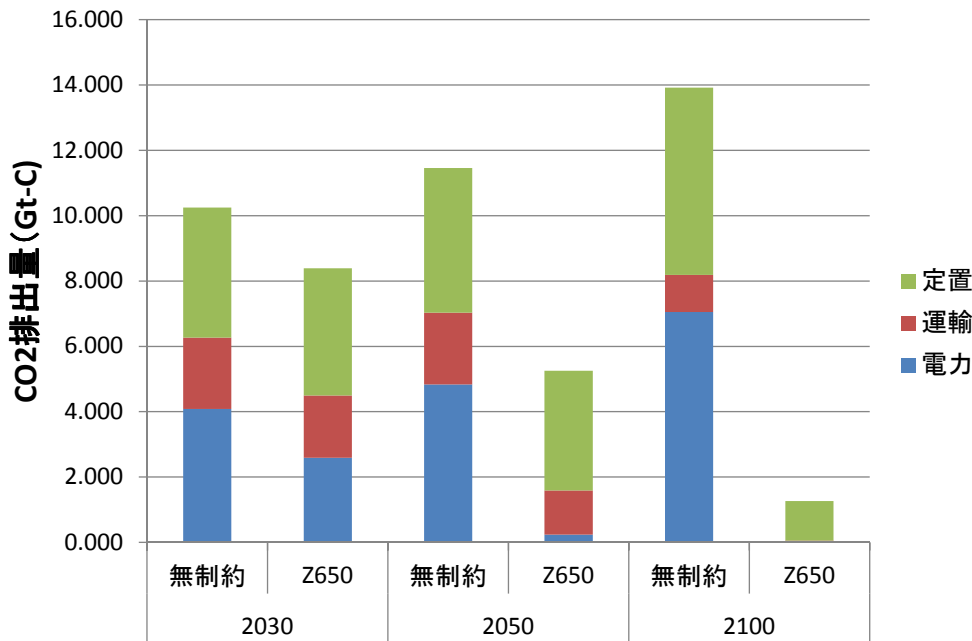
7

## 5. 中長期の主要課題

2050年：電力ゼロエミッション

2100年：運輸もゼロエミッション

定置(=産業・民生熱源)大幅減



CO2排出量の排出部門内訳

8

## 4. 1 電力ゼロエミッションの達成とその維持

### ●ゼロエミッション達成：

原子力、再生の急速導入の継続＋ほぼ全ての新生火力にCCS

### ●ゼロエミッション維持：

下記中長期的な技術開発課題の克服が必要

#### ➤ 原子力

✓ ウラン資源は今世紀中に枯渇

- GRAPEでは2050年以降の廃炉リプレイスは全てFBR
- その他の可能性：海水ウラン、トリウムサイクル、核融合

#### ➤ 再生可能

✓ 出力変動対策が鍵

- 蓄電池、水素利用
- スマートネットワーク、送電網

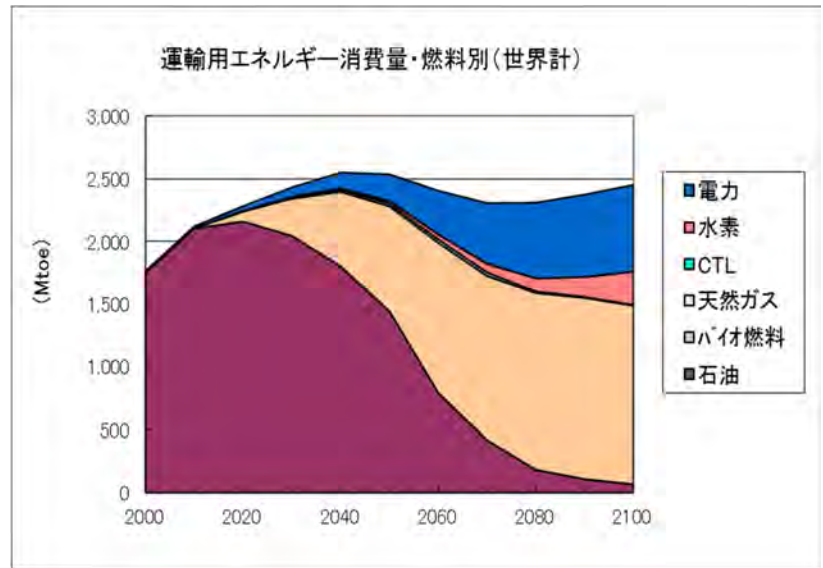
#### ➤ CCS

➤ 保守的な想定では、貯留ポテンシャル(409Gt-C)は今世紀末には枯渇

9

## 5.2 運輸ゼロエミッション

- 乗用車はほぼすべて電水素化。
- バス、トラック、船舶、航空などは**バイオ燃料**、**水素**
- 2100年世界のバイオマスは約4700MTOEと想定。この約40%が輸送燃料に、残りは定置燃料約45%、電力約15%

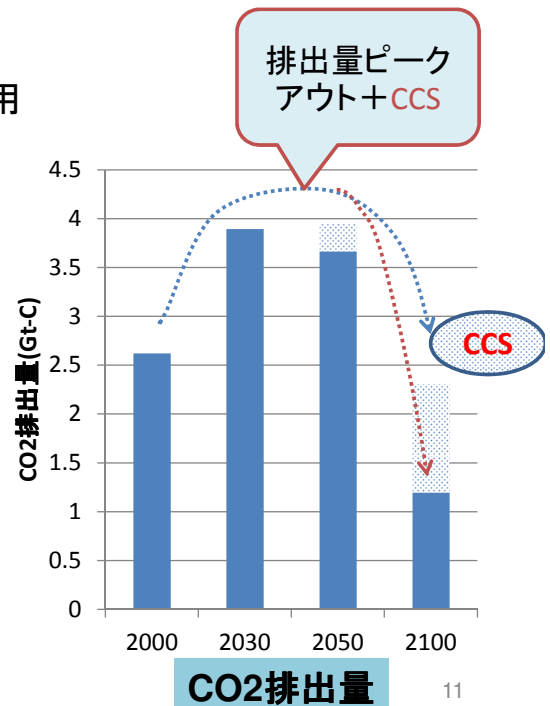
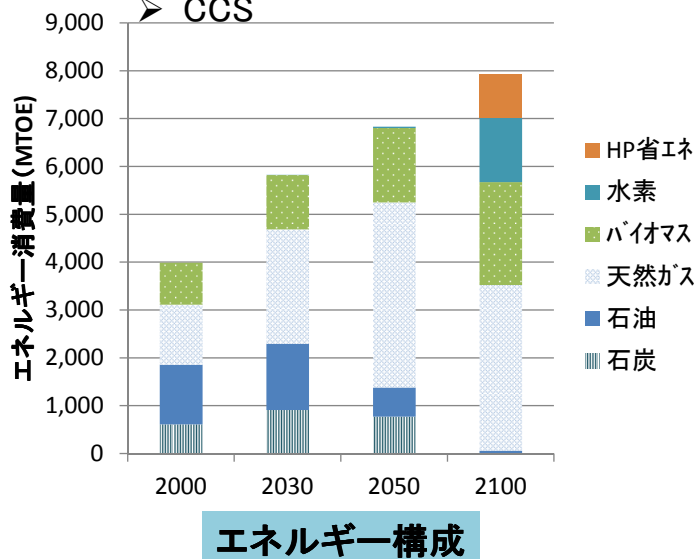


- ・バイオ燃料は残渣とエネルギー作物のみを想定。
- ・土地利用を含め、ポテンシャルとしてはまだ余裕がある。

## 5.3 産業・民生熱源のCO2排出大幅削減

産業分野の高温かつ大規模需要(鉄鋼、化学、セメントなど)は化石燃料の代替は容易ではない

- 石炭・石油から天然ガスへのシフト
- バイオマスの利用拡大
- 水素やヒートポンプ(HP)給湯の活用
- CCS



## まとめ

- ◆ 途上国を中心にエネルギー需要が伸びていく中でZ650を実現する場合、世界で協調して下記取り組みを進めることが必要。
- ◆ 短期的には、下記施策を強力に推進
  - ◆ 原子力、再生可能の急速な導入
  - ◆ 発電効率の向上
  - ◆ 需要機器の効率向上
  - ◆ CCSの実用化
- ◆ 中長期的ゼロエミッション実現のために必要な、下記技術開発の促進
  - ◆ 原子力:ウラン資源対策(FBR、海水ウラン、核融合など)
  - ◆ 再生可能:出力変動対策(蓄電池、スマートネットワークなど)
  - ◆ 運輸:トラック、航空、船舶など(バイオ燃料、水素など)
  - ◆ 産業:素材産業の大規模熱源(バイオマス、水素、原子力など)

※ 下線は本モデルによる想定技術

12

ご静聴ありがとうございました

13

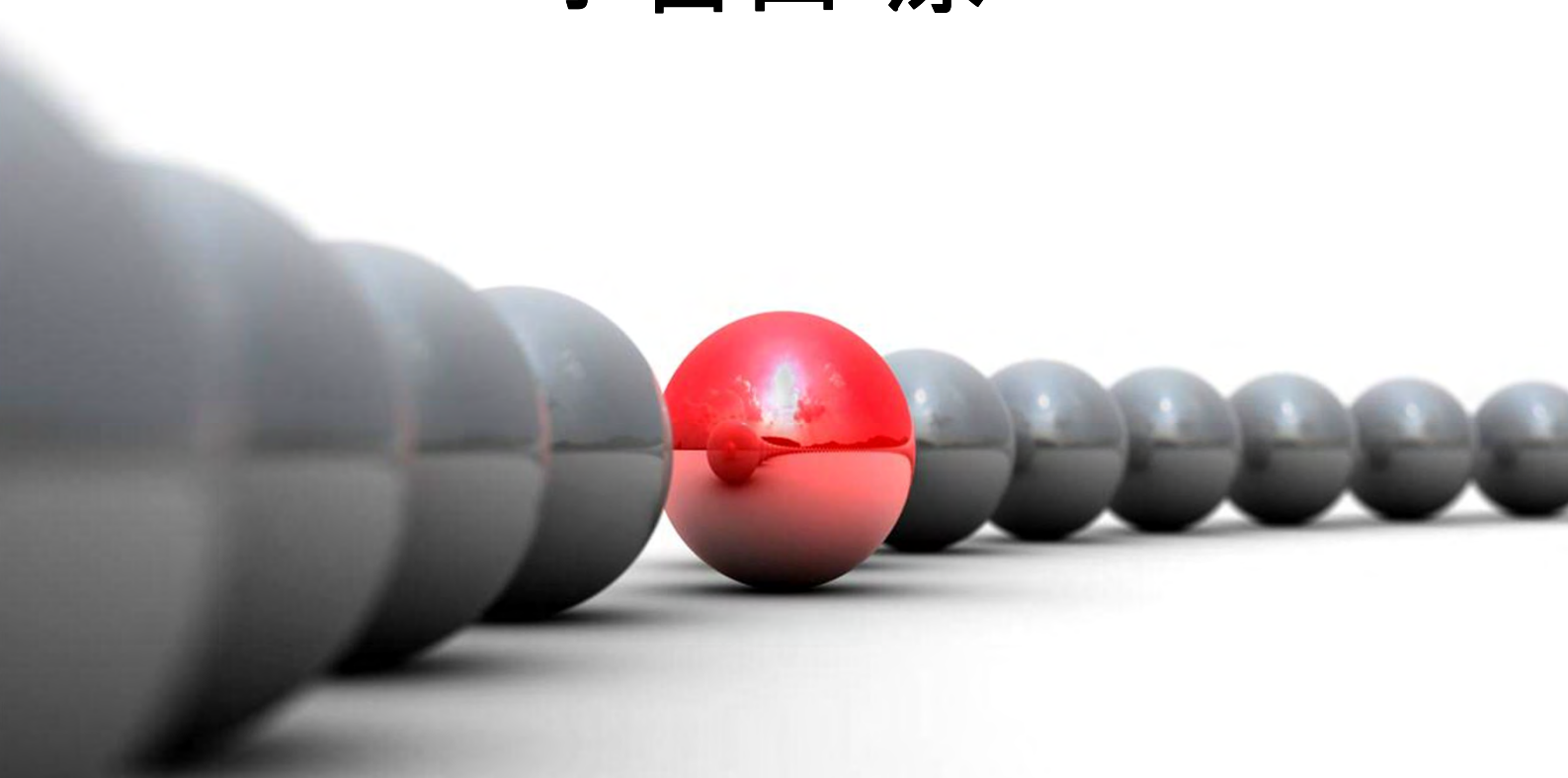




# エネルギービジョンの 実現可能性

東京大学大学院工学系研究科  
レジリエンス工学研究センター  
准教授

小宮山 涼一





地球温暖化シンポジウム  
「地球温暖化に向けて世界で共有できるエネルギービジョンと日本の役割」  
キヤノングローバル戦略研究所、2013年7月10日(水)

## エネルギービジョンの実現可能性

東京大学 准教授 小宮山 涼一  
(工学系研究科 レジリエンス工学研究センター)

1

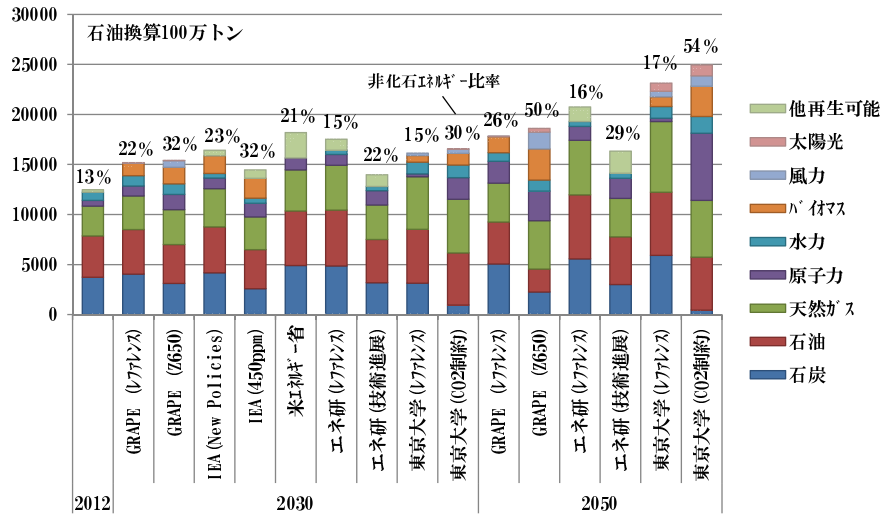
## 内容

- ◆ 一次エネルギー供給構成
- ◆ 石油
- ◆ 天然ガス(シェールガス、天然ガス価格)
- ◆ 石炭
- ◆ 原子力
- ◆ 電源構成・再生可能エネルギー
- ◆ エネルギーシステム・レジリエンス

2

# 一次エネルギー供給構成

- CO<sub>2</sub>制約や技術進展を考慮しても、供給の大半を化石燃料に長期的に依存。
- 経済合理性、現実性を考慮すれば、化石燃料の有効利用が重要。
- 非化石エネルギー導入拡大と共に、化石燃料の安定供給確保とクリーンで高効率な利用がエネルギー安全保障、経済性、環境保全の観点から不可欠。



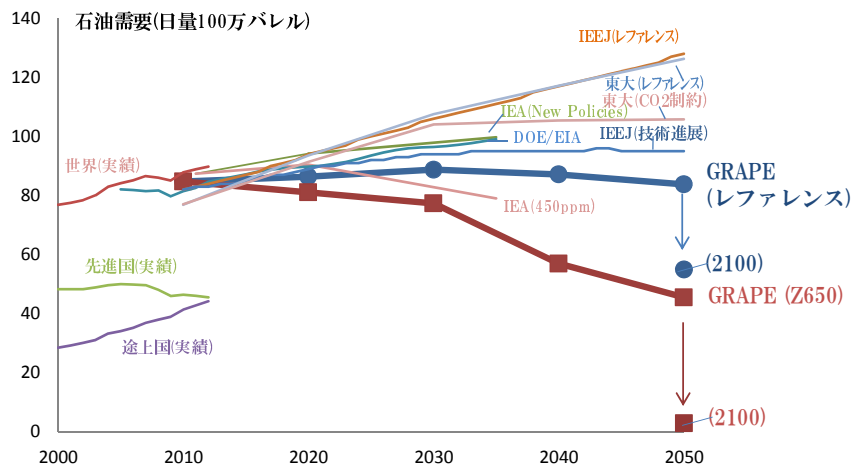
出所 (IEA) IEA:World Energy Outlook 2012, (米エネルギー省)DOE/EIA:International Energy Outlook 2011, (エネ研)日本エネルギー経済研究所:アジア世界エネルギーワトック2012, (東大)東大藤井研:地域細分化型DNEモデルによる計算結果

3

# 石油需給の展望

原油需給・価格の帰趨が、国際エネルギー需給の変化を展望する上で特に重要

- 石油需要展望のポイント： 新興国の経済発展, 燃費基準(CAFE基準等), 高燃費車(ハイブリッド車, ディーゼル車等), 次世代車(EV, PHEV, CNG, FCV等), バイオ燃料, 途上国での燃料補助金, モータリフト(公共交通等), 需要のピーク・オイル
- 石油供給展望のポイント： Easy Oilの枯渇化, 非在来型石油(Tar Sand, Tight Oil), 大水深開発, 産油国(中東, アフリカ, 中南米, ロシア)の投資環境や地政学リスク, 探鉱・開発コストの動向, 産油国の寡占化(中東産原油比率の拡大), OPEC原油への需要(Call on OPEC)と生産調整の行方, Sea laneの安全保障



出所 (IEA) IEA:World Energy Outlook 2012, (DOE/EIA) 米エネルギー省:International Energy Outlook 2011, (IEEJ)日本エネルギー経済研究所:アジア世界エネルギーワトック2012, (東大)東大藤井研:地域細分化型DNEモデルによる計算結果

4

# 天然ガス需給の展望

## 天然ガス需給展望のポイント

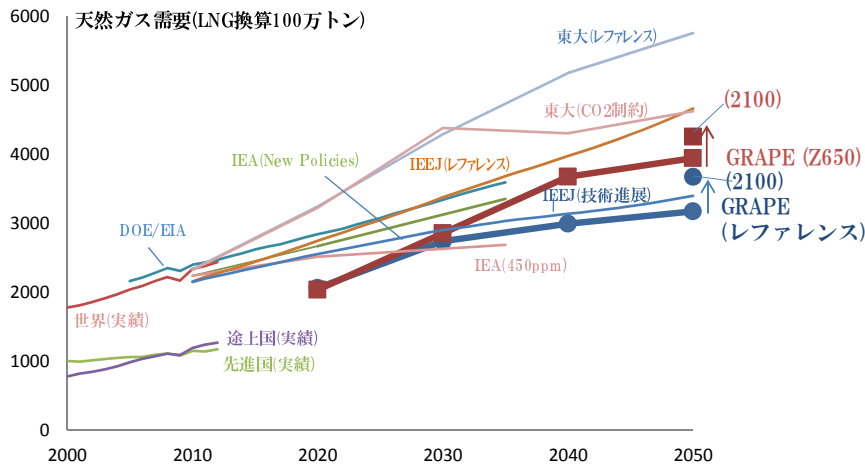
- ・ 米国「シェールガス革命」の影響と世界全体への波及の程度
- ・ 競合エネルギー源(原子力、再生可能エネ、石炭等)の開発に及ぼす影響
- ・ 天然ガス価格の国際的な地域差(米・欧・亜)、LNG価格形成の動向

## 天然ガス需要：世界の天然ガス需要は長期的に増加基調

- ・ 環境対策として優位性のある燃料として消費が増加、安定供給確保が重要な課題

## 天然ガス供給：十分な供給ポテンシャルの存在

- ・ 在来型資源に加え、非在来型資源(シェールガス、CBM等)の資源ポテンシャルは大きい
- ・ 安定的な価格形成の下で設備・インフラ投資が進めば、十分な供給力確保は可能



出所 (IEA) IEA:World Energy Outlook 2012, (DOE/EIA) 米国エネルギー省:International Energy Outlook 2011, (IEEJ) 日本エネルギー経済研究所: 世界のエネルギーアウトルック2012, (東大) 東大藤井研:地域細分化型DNEPモデルによる計算結果

5

# 米国「シェール革命」

## 米国天然ガス生産

- ・ 米国内天然ガス生産は2005年以降33%増、自給率94%を達成
- ・ 天然ガス価格が低位安定(原油価格の約4分の1)、LNG輸出プロジェクトが計画中(9計画、計1億トン以上)
- ・ 米国エネルギー省がFreeport LNG輸出計画(大阪ガス、中部電力)を認可、2017年輸入開始
- ・ 日系企業に関わる2計画(計1500万トン)が申請・認可待ち、LNG総輸入量の約2割

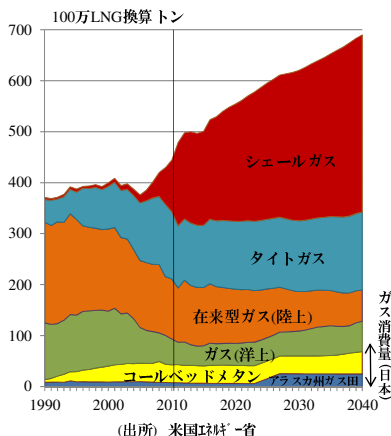
## 米国石油生産

- ・ 日量1,000万バレルを上回り(2014年見込)、サウジ(同1,150万バレル)、ロシア(同1,060万バレル)に匹敵する産油国に
- ・ 米国内石油生産は過去5年で約4割増加、消費は約1割減少。石油輸入依存度は62%から43%へ大きく低下

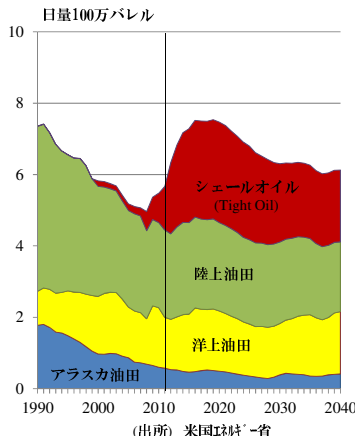
## 社会経済への影響

- ・ 製造業の米国内回帰傾向(安価な石油化学原料(エチレン工場新增設)、電気料金の低下等)
- ・ 貿易赤字(年間約5,400億ドル、石油輸入額約3,000億ドル)の削減(石油輸入削減、ガス輸出増加)、ドル高を後押し
- ・ シェールガスの経済効果、関連8産業合計3,400億ドル超の生産、110万人超の雇用増加(全米化学工業会)

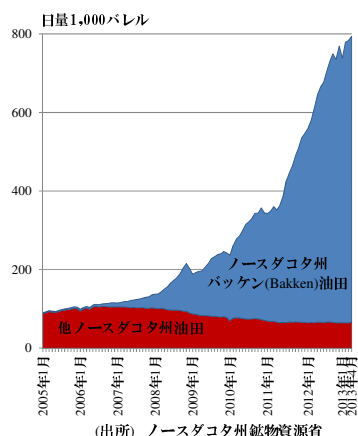
## 米国天然ガス生産の展望



## 米国石油生産の展望



## ノースダコタ州石油生産(バックン)



6

## シェールオイル、シェールガス資源量評価(DOE)



(出所) DOE/EIA, Technically Recoverable Shale Oil and Shale Gas Resources: An Assessment of 137 Shale Formations in 41 Countries Outside the United States, June 2013

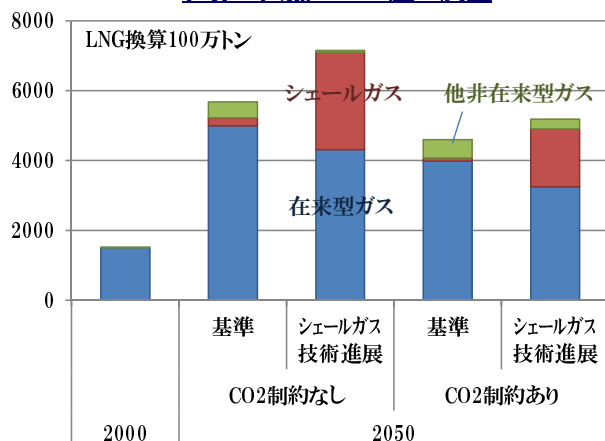
- 世界41ヶ国(米国除く)の頁岩(シェール)層の資源量評価により、シェールオイルは世界の石油埋蔵量(約3.4兆バレル)の10%(3,450億バレル)、シェールガスは世界の天然ガス埋蔵量(22,882兆ft<sup>3</sup>, 4,760億LNG換算トン)の32%(7,299兆ft<sup>3</sup>, 1,520億LNG換算トン)に相当する資源量が存在。
- シェールオイル埋蔵量上位5か国(ロシア、米国、中国、アルゼンチン、リビア)で世界の63%を占める。
- シェールガス埋蔵量上位6か国(中国、アルゼンチン、アルジェリア、米国、カナダ、メキシコ)で世界の60%を占める。国別のシェールガス埋蔵量は中国がトップ(15%)。
- 米国ではシェールオイル(石油生産の約3割)、シェールガス(ガス生産の約4割)の生産が急増。ただし米国以外では、地質条件が異なること等から、経済的な開発可能性に関しては不確実性も大きい。

7

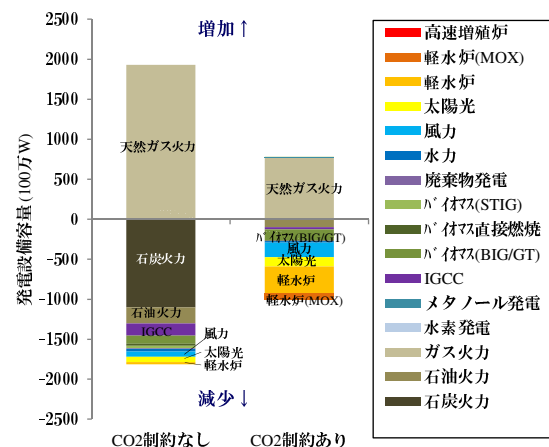
## シェールガスの国際エネルギー需給への影響評価

- シェールガス増産が進めば国際ガス市場に十分な供給力を与え、長期的に需給緩和基調が続く可能性。
- 競争力のある価格でシェールガス生産が進めば、石炭火力、原子力や太陽光、風力発電等の再生可能エネルギーの導入テンポに影響を及ぼす可能性。
- シェールガスは、他の競争力のある資源の温存を通じエネルギーの安定供給確保をもたらす可能性や、CO<sub>2</sub>削減に資する次世代技術の研究開発、商業化に時間的猶予を与える架け橋となる可能性もある。

### 世界の天然ガス生産の展望



### シェールガス増産に伴う世界の電源構成の変化(2050年)



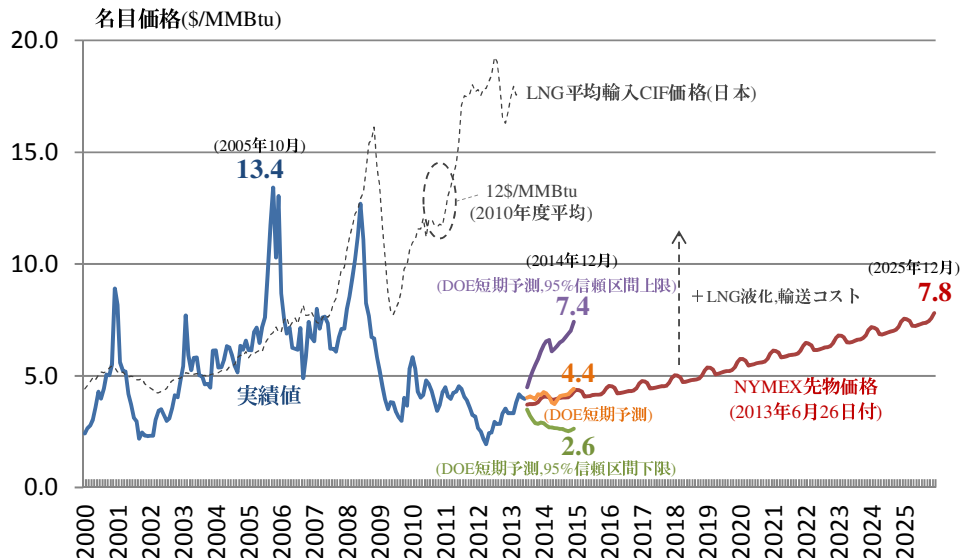
(出所)小宮山,細谷,藤井,古川,西村,吉崎,第30回エネルギー・資源学会研究発表会講演論文集,pp.85-88,2011

8

## 天然ガス価格の展望(米国)

- 米国天然ガス価格は長期的に緩やかな上昇基調で推移する見通し。
- シェールガス由来の日本の米国産LNG輸入価格の見通しに関しては、米国天然ガス価格の不確実性、日本向け輸送コスト(約6ドル/MMBtu)等も踏まえ、今後も慎重に注視する必要がある。

### 米国天然ガス価格 (Henry hub, pipeline) の現状と見通し



(出所) 米国ガス価格実績値: EIA/DOE, DOE短期予測: EIA/DOE STEO, NYMEX先物価格: NYMEX Market Data, LNG価格(日本): (一財)日本エネルギー経済研究所計量分析ユニット EDMCデータバンク、より報告者作成

9

## シェールガスの環境問題(GHG排出、地震、水)

### 採掘工程でのメタンガス等の大気放散

- 近年の研究はシェールガスのライフサイクルGHG排出量は石炭、石油を下回ると評価
- ユーネスク大学の論文(シェールガスのGHGが石炭を上回る可能性)はベント率100%(水圧破碎工程のGHGが全て大気に放散)と設定するなど、掘削実態から見ると不適切。
- MIT報告: 実際のGHG排出量は、100%大気放散した場合に比較して約2割程度(Barnett, Marcellus等)
- 水圧破碎後のフローバック水中の溶融メタン⇒米国環境保護庁(EPA)がメタンガス、VOCを回収するガス回収設備導入を事業者に義務付け

### 地震誘発リスク

- 研究評議会(National Research Council)は過去の地震を発生要因別(石油・ガス採掘、石油二次回収、廃水地下注入、地熱、水圧破碎)にリスク評価を実施⇒水圧破碎の地震リスクは低い
- 廃水地下注入は一定のリスクありとされている⇒地下注入規制強化の可能性(浄化処理+放流)

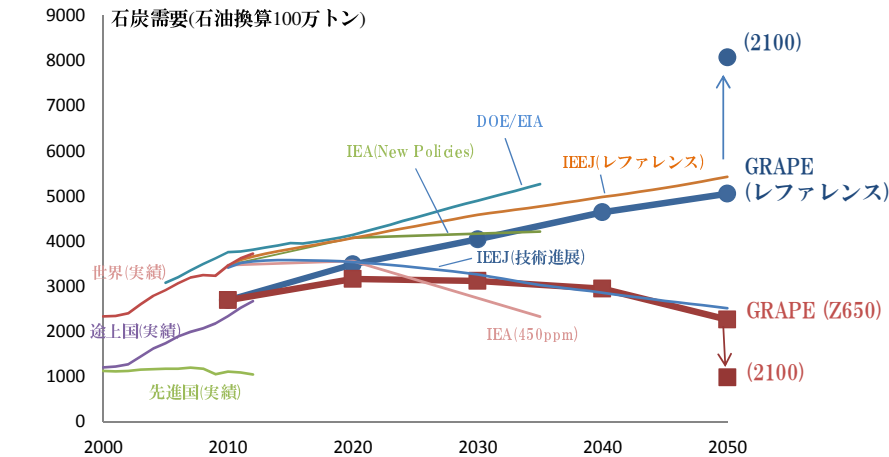
### 地下水汚染 (水圧破碎工程の流体、メタンガスの地下・地表水への混入)

- シェール層深度と地下水脈深度の評価⇒汚染水混入リスクは低い(MIT報告等)  
例 Barnett: シェール層2000-2600m, 地下水脈370m, Marcellus: シェール層1200-2600m, 地下水脈260m
- 各州で規制措置を実施⇒地下水の事前調査、添加物の情報開示、廃水処理等
- 廃水の地下注入は既に連邦政府の規制対象(UIC: Underground Injection Control)  
⇒地下貯留容量不足、微小地震リスク等より、廃水浄化処理後、河川放流の可能性
- 多量の水消費(水圧破碎)⇒シェール開発地域の水消費の1%以下(MIT報告等)
- 米国環境保護庁(EPA)は地下水汚染評価に関して2014年に最終報告を予定

10

## 石炭需給の展望

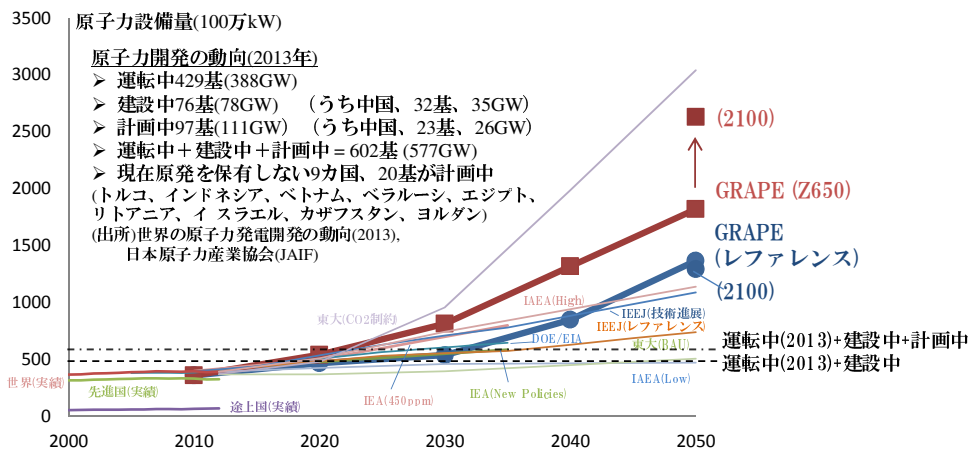
**石炭の特徴：** 豊富な資源量、優位にある価格競争力、最も重要な発電用燃料(石炭発電比率は世界の約4割で最大)、主要国の重要な国産資源、消費量が電源構成の変化の影響を受けやすい  
**石炭需給の課題：** 高効率技術(石炭IGCC)の開発、新興国を中心とした需要の急増、供給インフラ整備、安定供給確保の問題(中国等での石炭輸入拡大)、大気汚染等の環境負荷増大、気候変動対策に関する不確実性、CCS等に関する技術開発動向の不確実性の存在



出所 (IEA) IEA:World Energy Outlook 2012, (DOE/EIA) 米エネルギー省: International Energy Outlook 2011, (IEEJ) 日本エネルギー経済研究所: 7/7世界エネルギーネットワーク2012, (東大) 東大藤井研:地域細分化型DNEET7/7による計算結果

## 原子力発電の展望

**原子力展望のポイント：** 経済性、競合燃料の動向(シェールガス、再生可能エネルギー)、技術開発(高温ガス炉など)、電力市場自由化の影響、気候変動対策、放射性廃棄物処理の問題(使用済燃料処理、大深度処分、核変換処理等)、社会受容性の確保、核不拡散・保障措置の動向、原子力規制の動向、Financeの確保、原子力人材育成、国・政府の役割(賠償制度等)

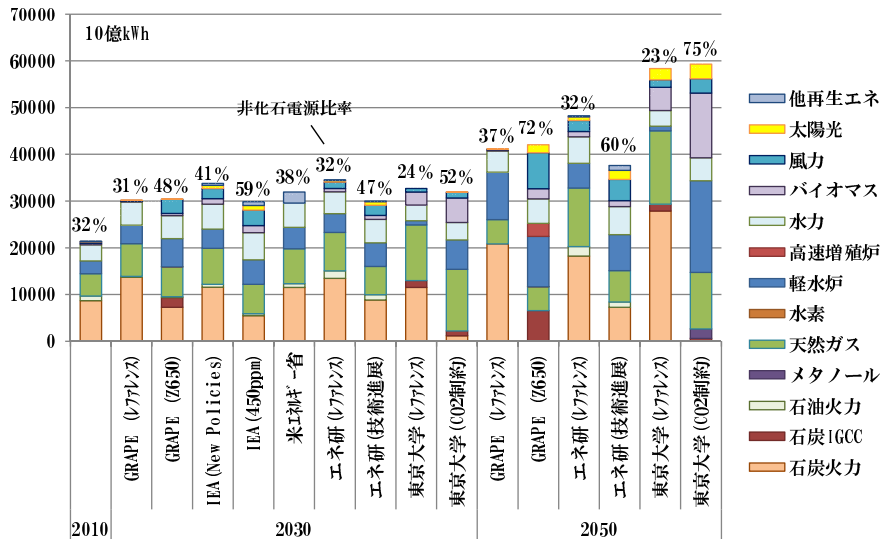


出所 (IEA) IEA:World Energy Outlook 2012, (DOE/EIA) 米エネルギー省: International Energy Outlook 2011, (IEEJ) 日本エネルギー経済研究所: 7/7世界エネルギーネットワーク2012, (東大) 東大藤井研:地域細分化型DNEET7/7による計算結果, (IAEA) IAEA: Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2050



## 電源構成の展望

- CO2大幅削減実現には、電力化の拡大と電源の低炭素化が重要なオプションのひとつ。
- 再生可能エネルギー電源(風力、太陽光等)や原子力発電等の非化石電源の比率を電力システムの中でどこまで拡大できるかが鍵。
- とくに、出力変動の大きい風力や太陽光の大量導入実現には需給両面での複合的対策が重要。



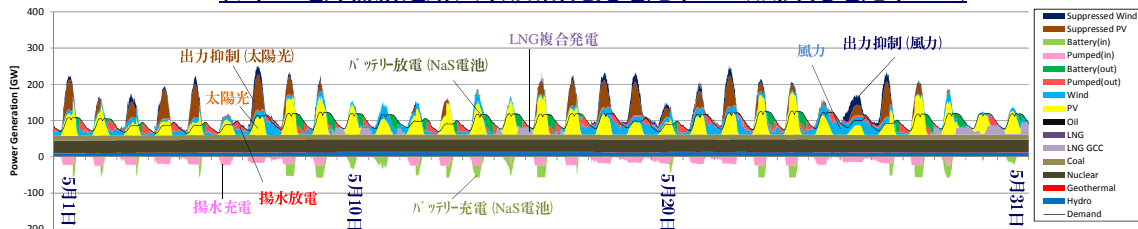
出所 (IEA) IEA:World Energy Outlook 2012, (米工研) DOE/EIA: International Energy Outlook 2011, (エネ研) 日本工研 - 経済研究所: 7/7/ 世界工研 - 7/7/2012, (東京大学) 東大藤井研: 地域細分化型DNEモデルによる計算結果

13

## 太陽光・風力大量導入下での需給調整対策

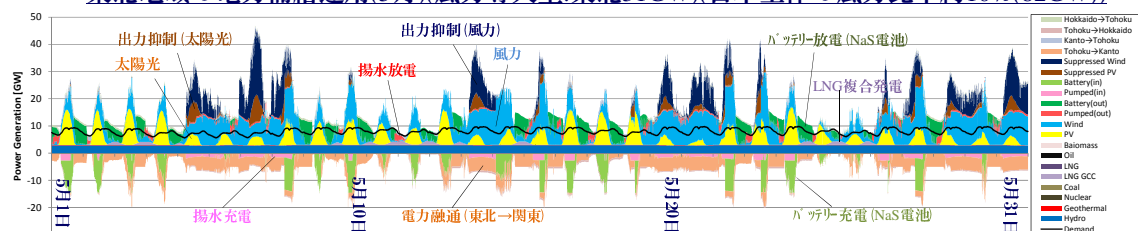
- 火力発電(天然ガス火力等)による出力調整、バックアップ
- 電力貯蔵システム(バッテリー(Li-ion, NAS電池等), 水素貯蔵, 揚水可変速運転など)の活用
- デマンド・サイド・マネージメント(可制御負荷(電気自動車, 電気ヒートポンプ給湯器等) 導入によるdemand extensionや BEMS, HEMS等)
- 出力抑制(PCS, 双方向通信技術の活用)
- 電力流通設備(送配電網等)の増強, 広域にわたる需給調整(広域運用)

日本の電力需給運用(5月)(太陽光発電比率20%、風力発電比率10%)



(出所)小宮山, 藤井, 電気学会論文誌B, Vol.132, No.7, pp.639-647, 2012

東北地域の電力需給運用(5月)(風力導入量:東北31GW)(日本全体の風力比率約10%(82GW))



(出所)小宮山, 柴田, 藤井, 電気学会論文誌B, Vol.133, No.3, pp.263-270, 2013

14

# エネルギーシステム・レジリエンス

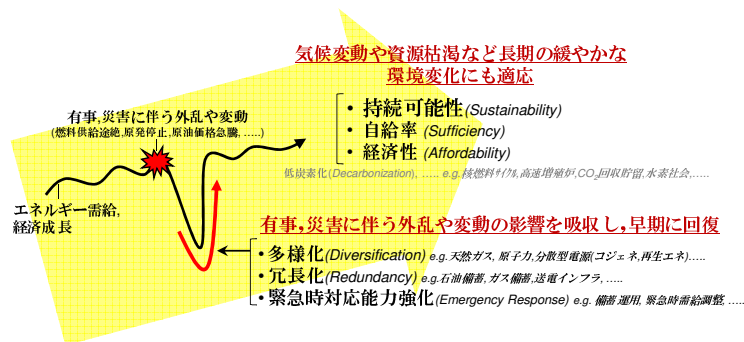
**背景** リーマンショックや東日本大震災を踏まえ、リスクに対する備えが必要

## エネルギーシステム・レジリエンス

- 有事、災害に伴う外乱や変動 (燃料供給途絶, 原発停止, 原油価格高騰など) がエネルギーシステムに与える影響を吸収し、早期に回復できるシステムの能力
- 同時に、災害や危機への緊急時対応能力ばかりではなく、気候変動や資源の枯渇など長期にわたる緩やかな環境変化にも適応できるシステムの能力

**研究目的** 様々なリスク、変化する社会経済環境の中で、エネルギーシステムが機能を維持、発展するためにはどのような対策が必要であるのか？ リスクマネジメントに対する新たなアプローチが重要。

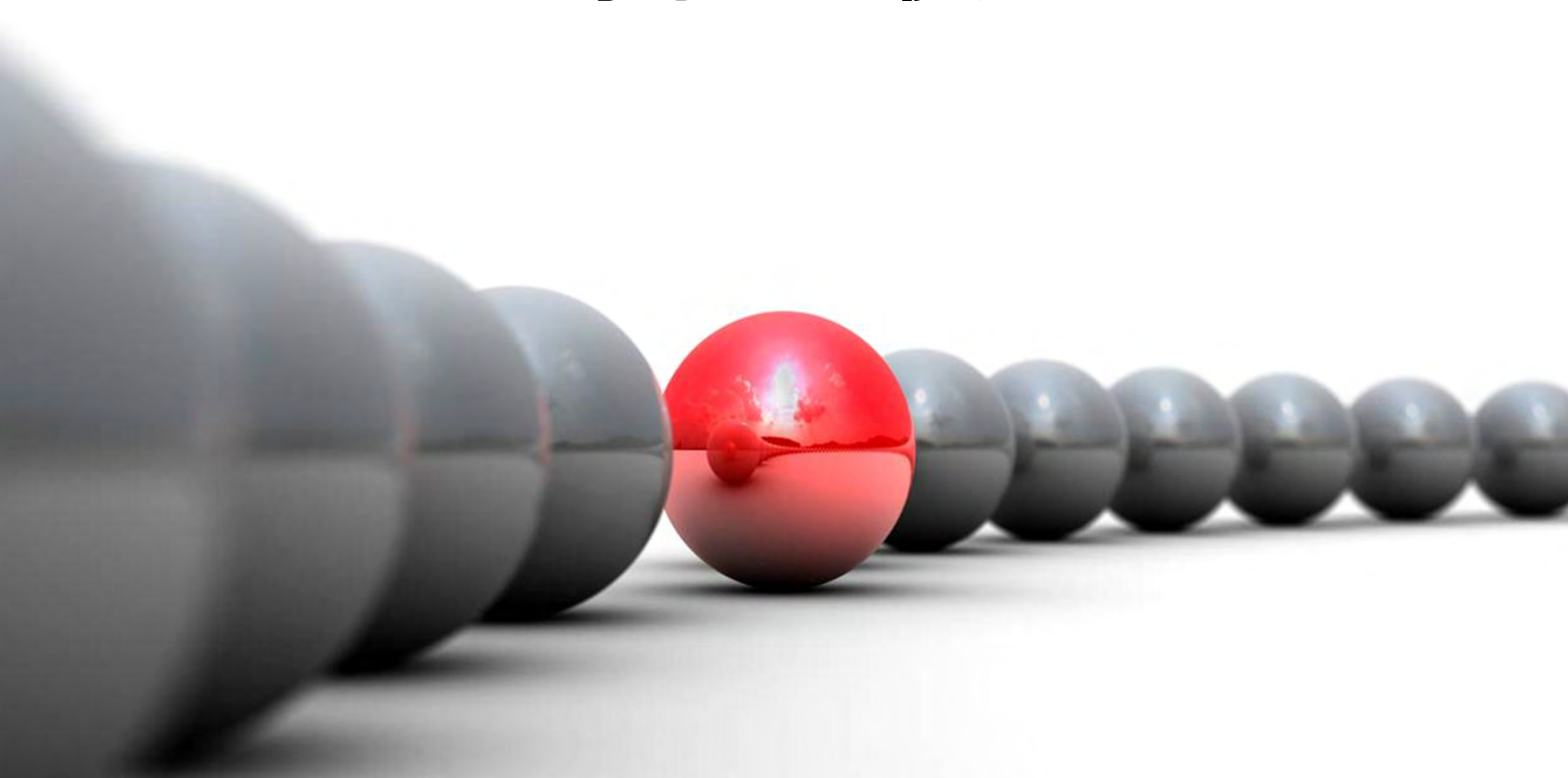
⇒ エネルギービジョンを考える上で、エネルギーミックスの「レジリエンス」評価も重要な視点



# CO2排出シナリオの 経済性評価について

東北大学大学院 環境科学研究科  
環境・エネルギー経済部門  
准教授

馬奈木 俊介







TOHOKU  
UNIVERSITY

馬奈木俊介, 東北大学大学院准教授

# CO<sub>2</sub>排出シナリオの経済性評価

[www.managi-lab/](http://www.managi-lab/)

神戸大学畠瀬和志氏  
との共同研究

1

## ポイント

1. CO<sub>2</sub>削減費用と温暖化被害からGDPへの影響
2. エネルギーセクターのみでなく、経済全体の合理性
3. 国ごと被害の考慮し、以下を比較
  - ① 厳しい制約(450ppm)
  - ② Z650
  - ③ 緩い制約(500ppm)

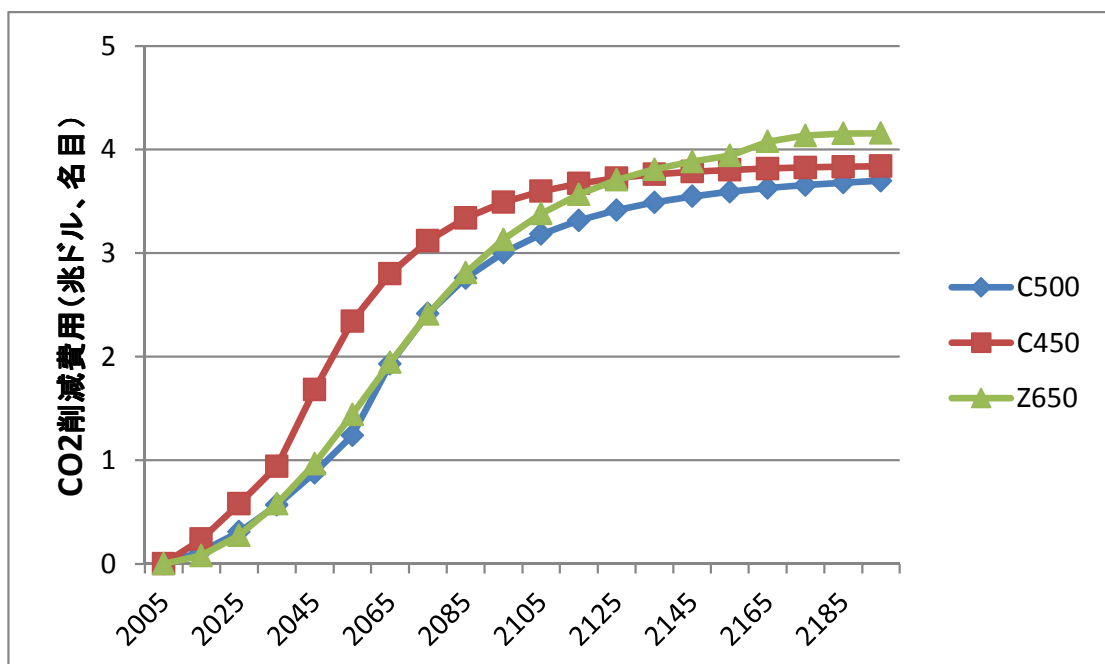
2

# モデルの考え方

1. 全期間の効用を最大化する最適化モデル
2. 大気・海洋からのCO<sub>2</sub>蓄積
3. 温暖化被害から経済へのフィードバック

3

## CO<sub>2</sub>削減費用(グローバル)



4

## 優位性があるZ650

	費用	被害額	合計
C500	小	大	中
C450	大	中	大
<b>Z650</b>	<b>小</b>	<b>中</b>	<b>小</b>

5

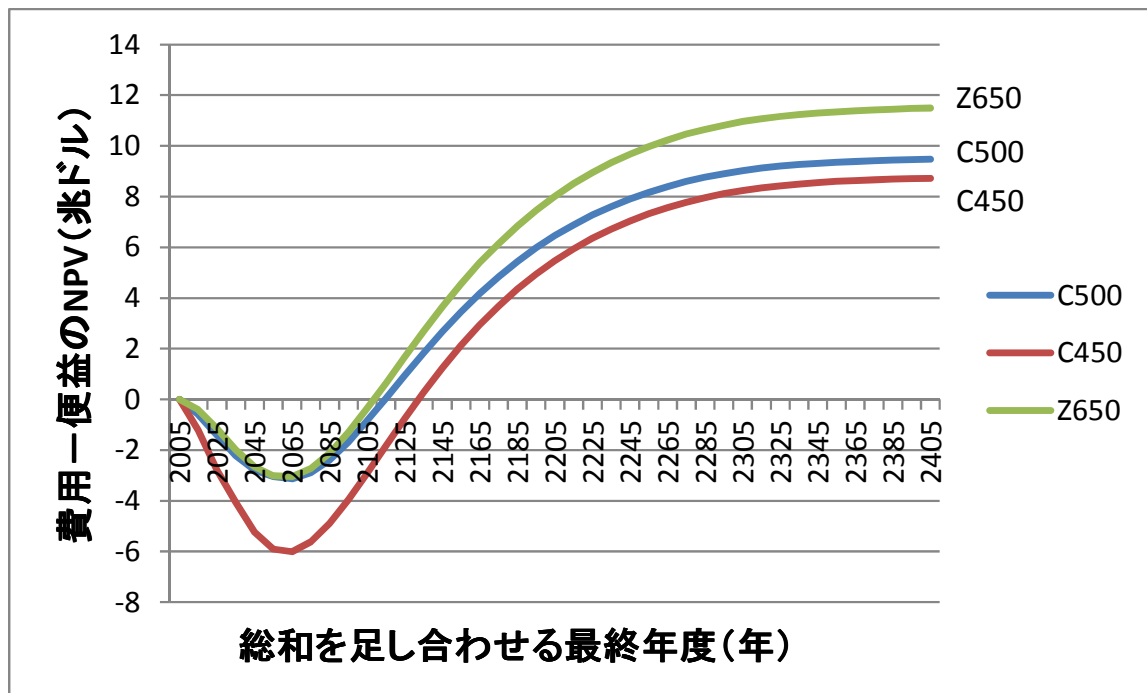
総和評価(費用+被害額, 約2100年まで)

(単位:兆ドル)

	費用	被害額	合計
C500	8.08	15.05	23.13
C450	13.22	14.46	27.68
<b>Z650</b>	<b>8.14</b>	<b>14.42</b>	<b>22.56</b>

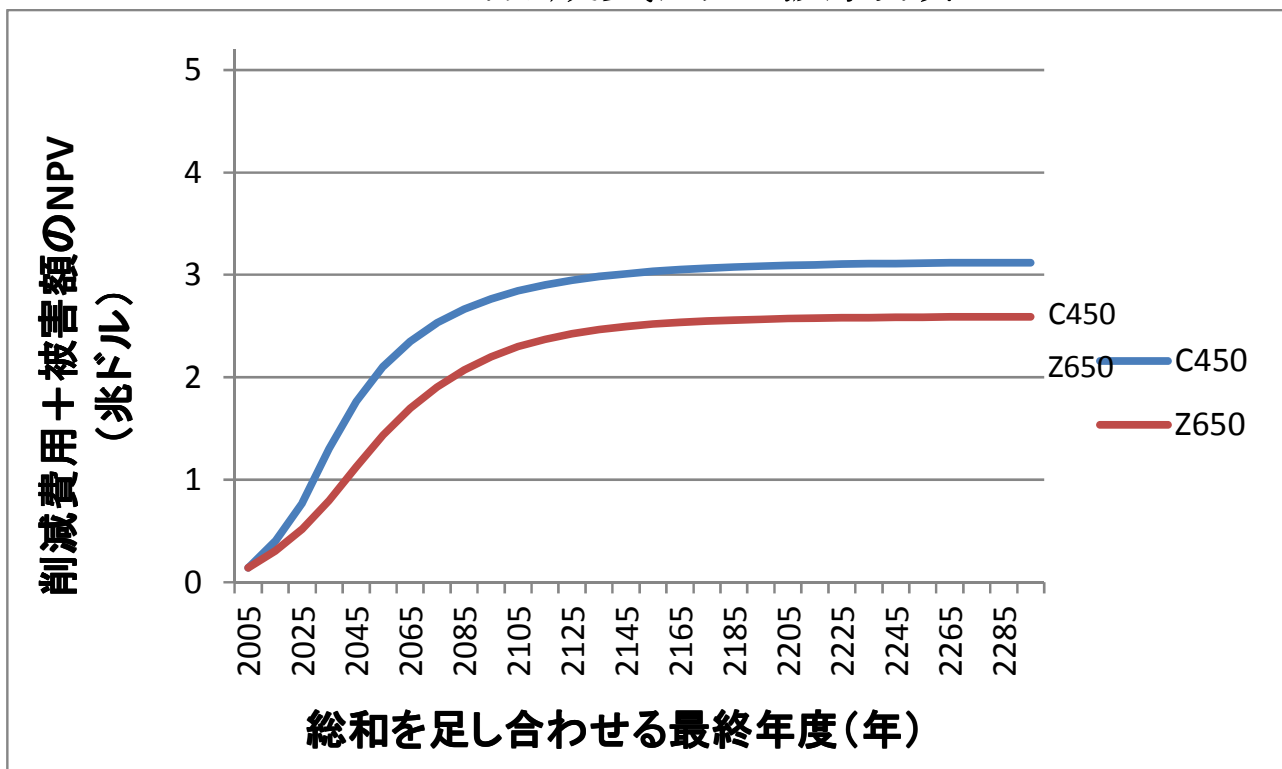
6

## 純便益(便益-費用)



7

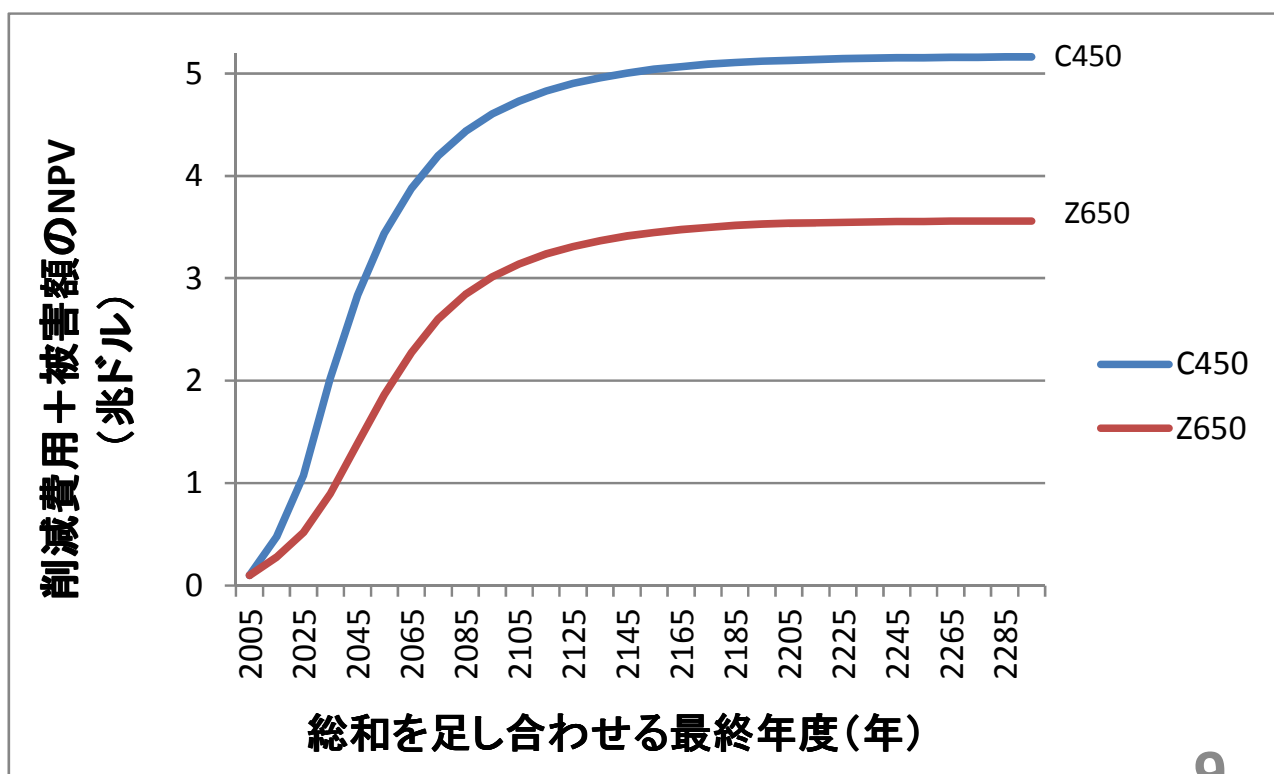
## US: 削減費用+被害額



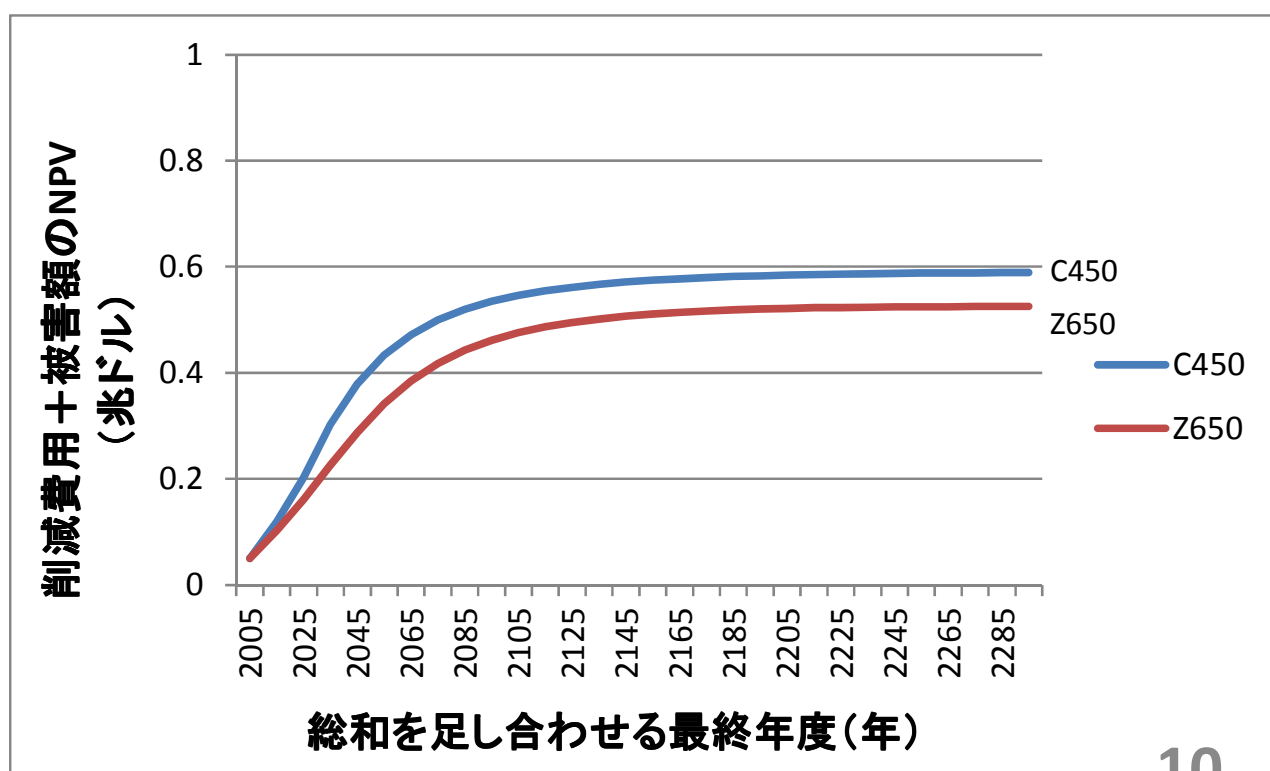
8



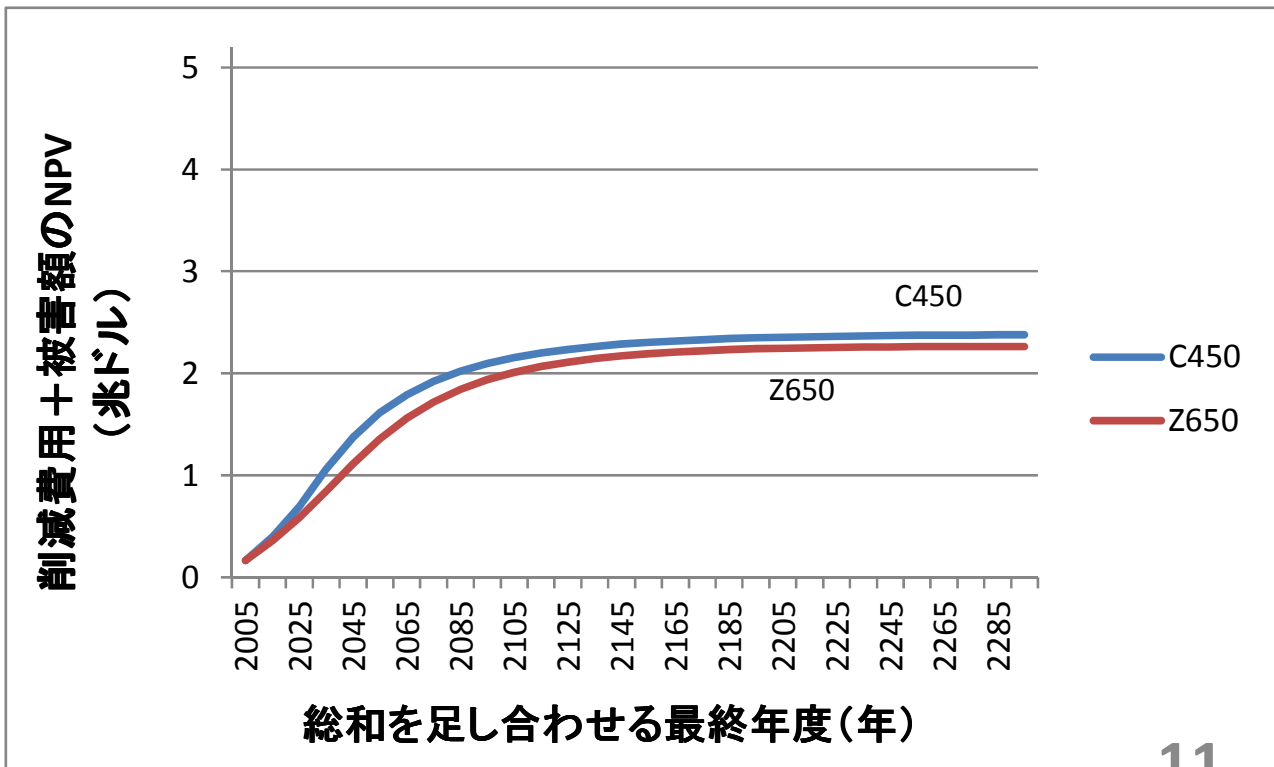
## 中国：削減費用＋被害額



## 日本：削減費用＋被害額

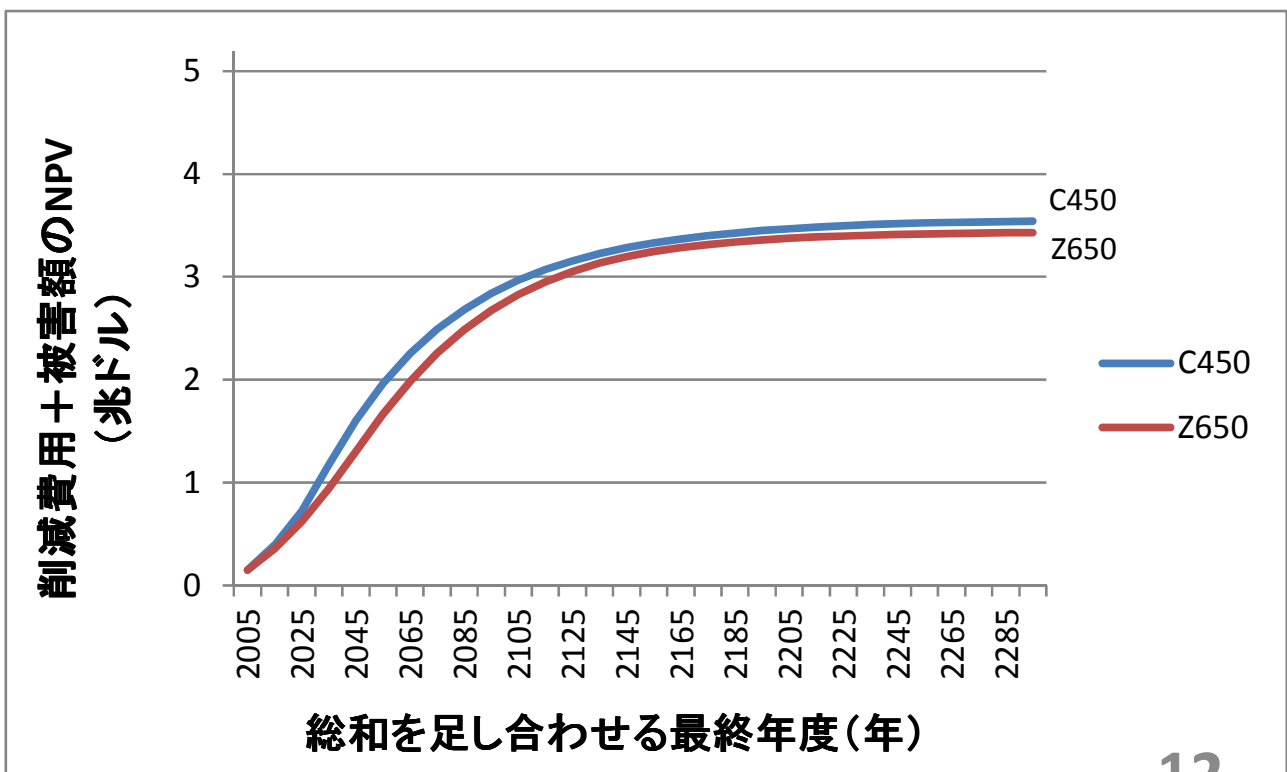


## EU: 削減費用+被害額



11

## インド: 削減費用+被害額



12

## 結論

---

1. 経済面からZ650が優位なケースがある
2. 中国・米国での大きな削減効果がある
3. いくつかの課題は残る



# CO2長期削減目標の 再検討

公財) 地球環境産業技術研究機構  
主席研究員

システム研究グループリーダー  
東京大学大学院総合文化研究科  
客員教授

秋元 圭吾





## CO2長期削減目標の再検討

(公財)地球環境産業技術研究機構 (RITE)

システム研究グループ グループリーダー

秋元 圭吾

東京大学大学院総合文化研究科客員教授



### 現在の気候変動緩和の長期目標



2

- ◆ IPCC第4次評価報告書(2007)で収集されたシナリオのうち、2°C目標を評価していたのはわずか6シナリオ(大部分(118シナリオ)は550 ppm CO2安定化(≒650 ppm CO2eq安定化)、3.2~4.0°C上昇のシナリオを評価)。
- ◆ この数少ないシナリオから、2°C目標≒450 ppm CO2eq安定化≒2050年に世界排出量は最低でも2000年比半減。このとき、先進国は最低でも80%削減が必要、という政治目標が作られた(平衡気候感度は3.0°Cを想定)。

世界排出量2050年半減目標

2°C目標

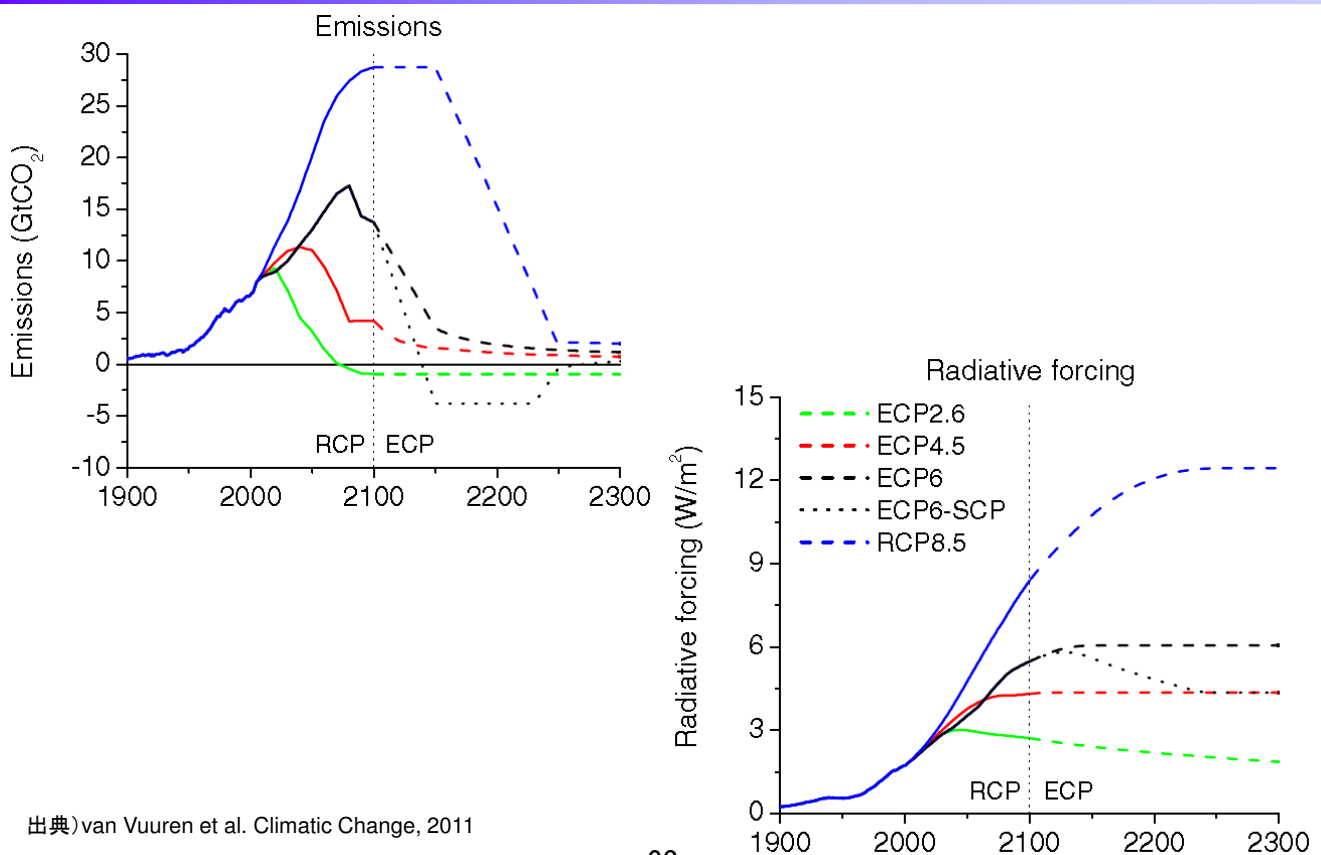
平衡気温

(濃度が安定化したとき、時間遅れを持って最終的に達すると推計される気温)

Category	Radiative forcing (W/m <sup>2</sup> )	CO <sub>2</sub> concentration <sup>c</sup> (ppm)	CO <sub>2</sub> -eq concentration <sup>c1</sup> (ppm)	Global mean temperature increase above pre-industrial at equilibrium, using "best estimate" climate sensitivity <sup>b1, c1</sup> (°C)	Peaking year for CO <sub>2</sub> emissions <sup>d</sup>	Change in global CO <sub>2</sub> emissions in 2050 (% of 2000 emissions) <sup>d1</sup>	No. of assessed scenarios
I	2.5-3.0	350-400	445-490	2.0-2.4	2000-2015	-85 to -50	6
II	3.0-3.5	400-440	490-535	2.4-2.8	2000-2020	-60 to -30	18
III	3.5-4.0	440-485	535-590	2.8-3.2	2010-2030	-30 to +5	21
IV	4.0-5.0	485-570	590-710	3.2-4.0	2020-2060	+10 to +60	118
V	5.0-6.0	570-660	710-855	4.0-4.9	2050-2080	+25 to +85	9
VI	6.0-7.5	660-790	855-1130	4.9-6.1	2060-2090	+90 to +140	5
Total							177

- ◆ IPCC第5次評価報告書策定に向けて、WG間横断での分析・評価を容易にするために、RCP (Representative Concentration Pathway) として、既往の排出パスの上下限までを広くカバーする4種類の排出パスが選定された。
- ◆ また、2℃目標が政治目標化したことから、第4次評価報告書以降、これに近い目標レベルのモデル分析が多数行われてきた。
- ◆ 結果、仮に2℃目標をとるにしても、それを満たす排出削減の経路はたくさんの可能性があり、特に直近の世界のGHG排出増を踏まえると、2050年頃までに排出量を半減することは難しい一方、2100年以降の排出をより削減することで2℃目標を満たすことができるとする分析が多く示されるようになってきているのが現状。

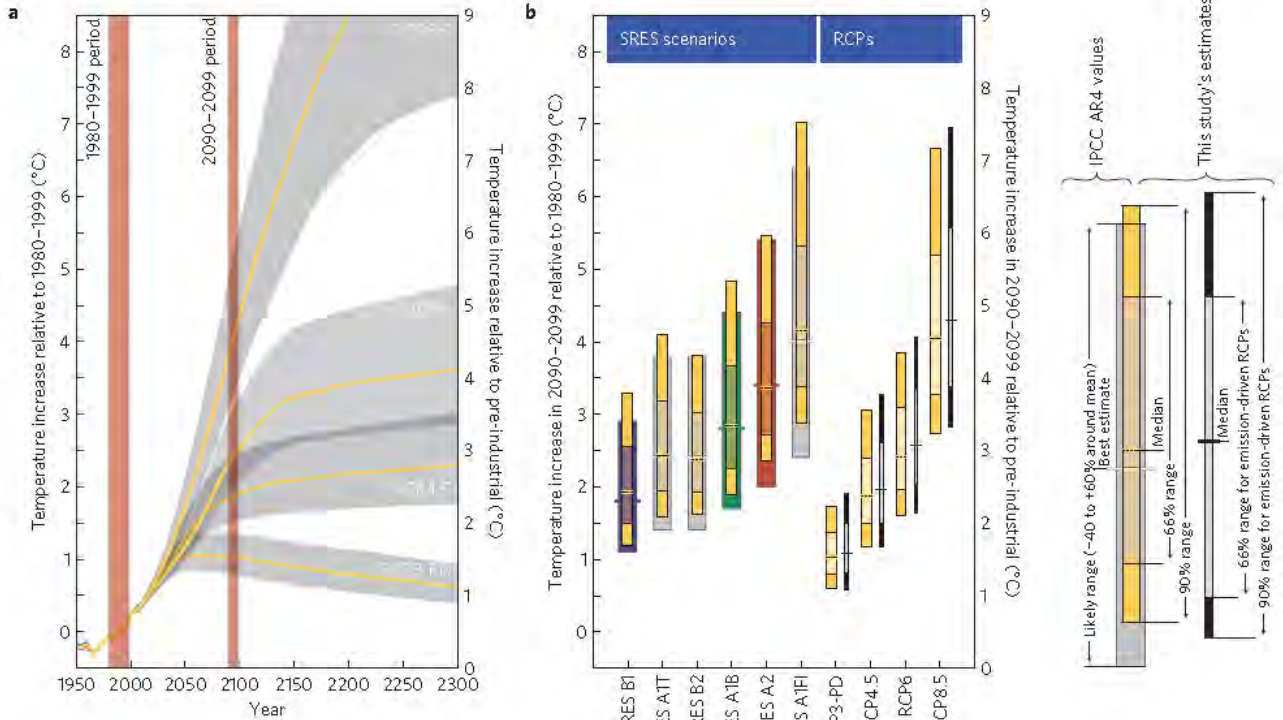
## RCPのCO2排出量と放射強制力経路



出典) van Vuuren et al. Climatic Change, 2011



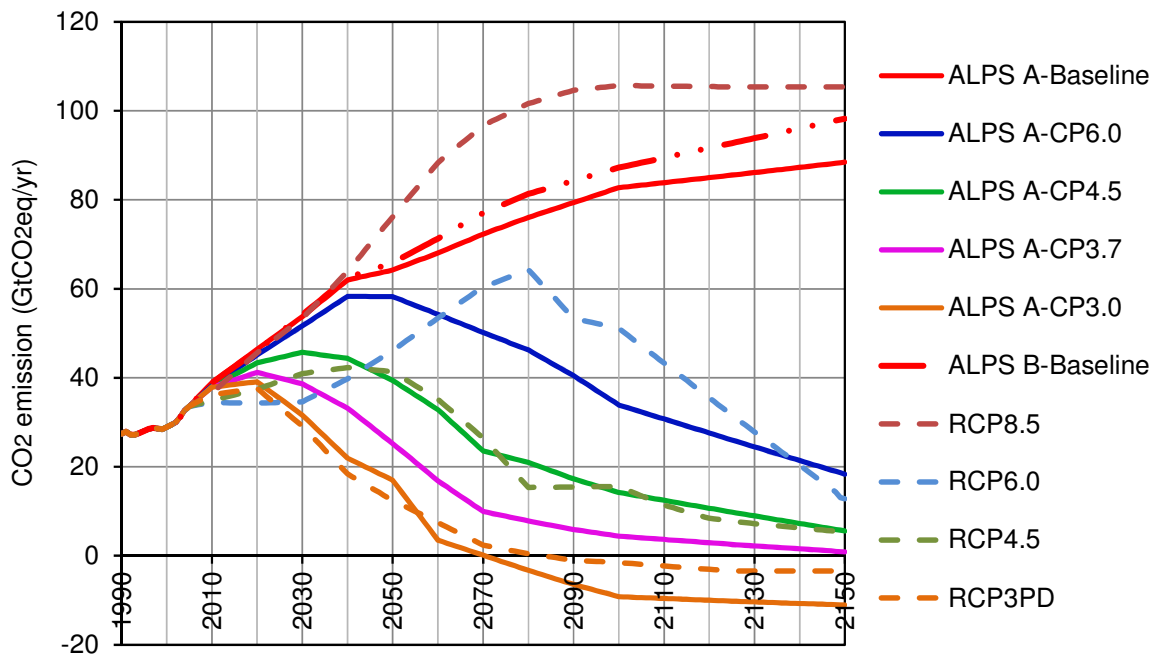
# RCPの気温推計



出典) Rogelj et al., Nature Climate Change, 2012

**RCP3-PD(RCP2.6): Medianでは、2100年に約1.5°C上昇、その後、低下【平衡気温上昇は基本的に定義できない】。2°C目標とはギャップあり。ただし、likely(66%確率)では最大約1.9°C上昇**

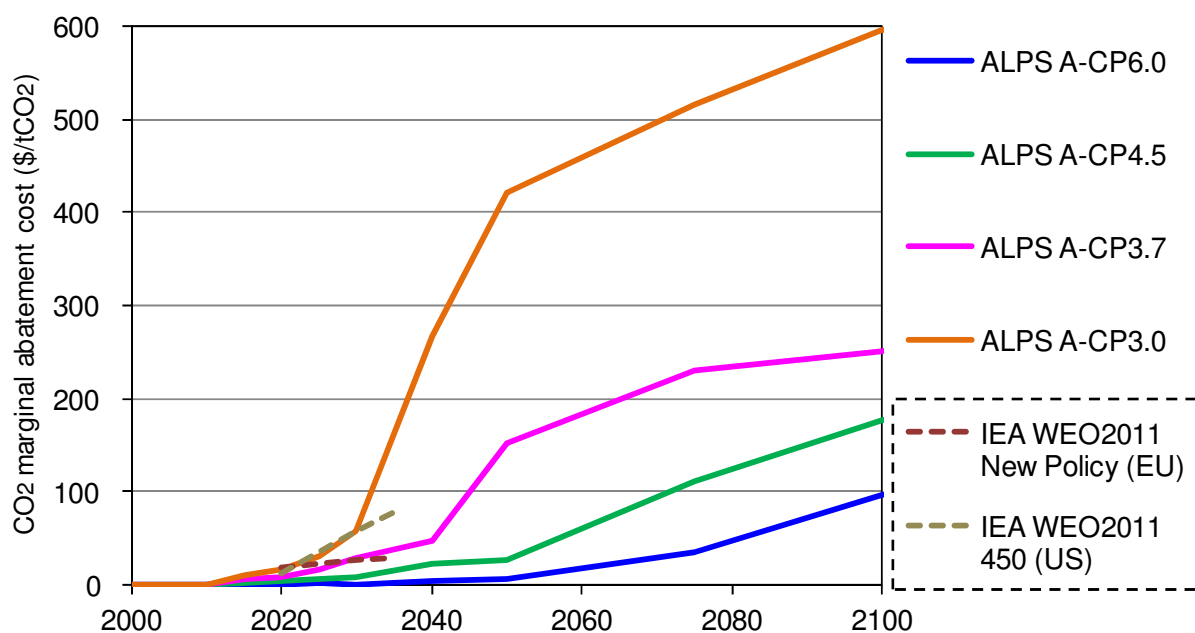
# CO2排出量シナリオ (RITE ALPS/RCP)



**ALPS CP3.7: 2050年 1990年比▲8%、2005年比▲25%**  
**ALPS CP3.0: 2050年 1990年比▲38%、2005年比▲49%**  
**RCP3PD(2.6): 2050年 1990年比▲55%、2005年比▲63%**

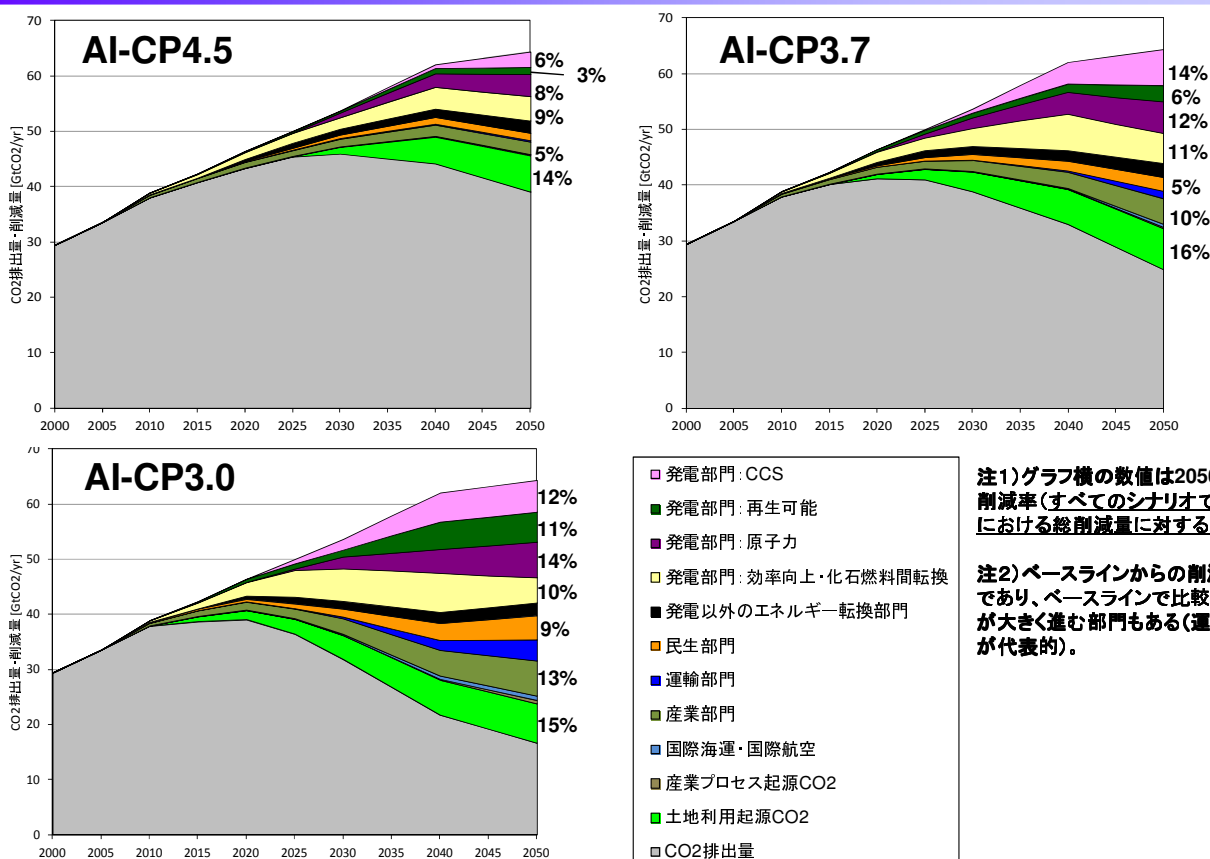
ただし、GHGでは削減率はより小さい

# CO2限界削減費用

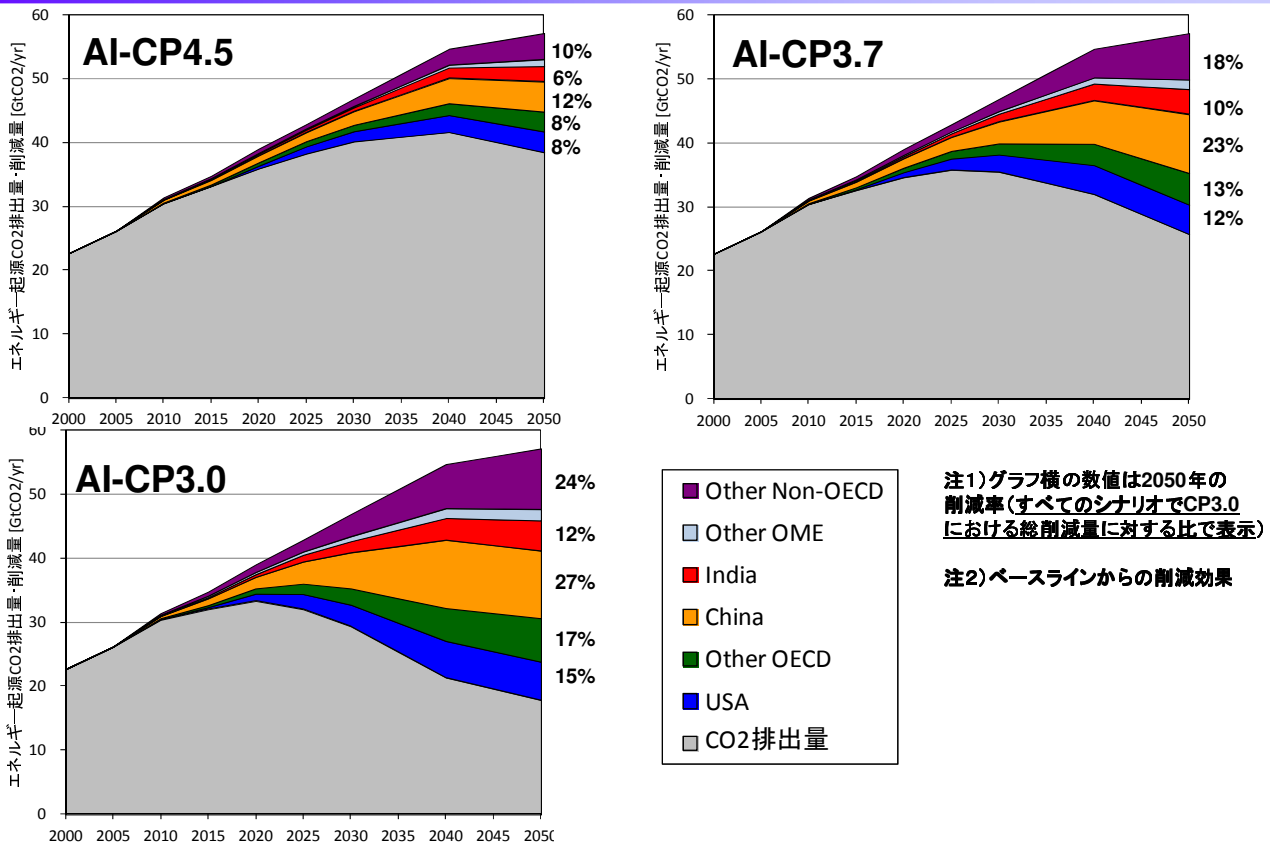


2050年まではDNE21+モデルによる分析。2050年以降はDNE21モデルによる分析。  
 CP3.0の2050年の限界削減費用は420\$/tCO2程度、CP3.7では150\$/tCO2程度。  
 2°C目標相当のCP3.0の限界削減費用は極めて高い。

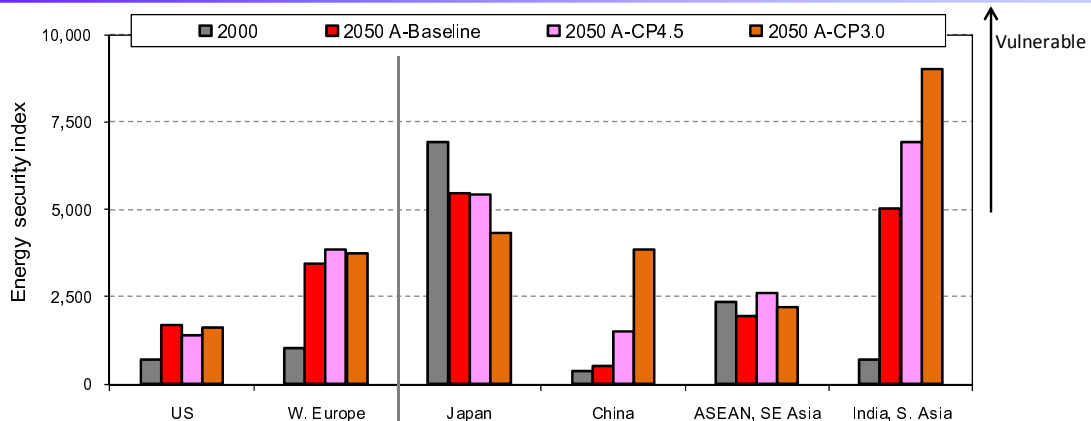
# ベースラインからの部門別・技術別CO2排出削減量



# ベースラインからの地域別CO2排出削減量 (エネルギー起源CO2のみ)



# エネルギーセキュリティの評価 —濃度安定化シナリオ別—



$$ESI = \frac{C_{oil}}{TPES} \sum_i (r_i \cdot S_{i,oil}^2) + \frac{C_{gas}}{TPES} \sum_i (r_i \cdot S_{i,gas}^2)$$

TPESの原油依存度

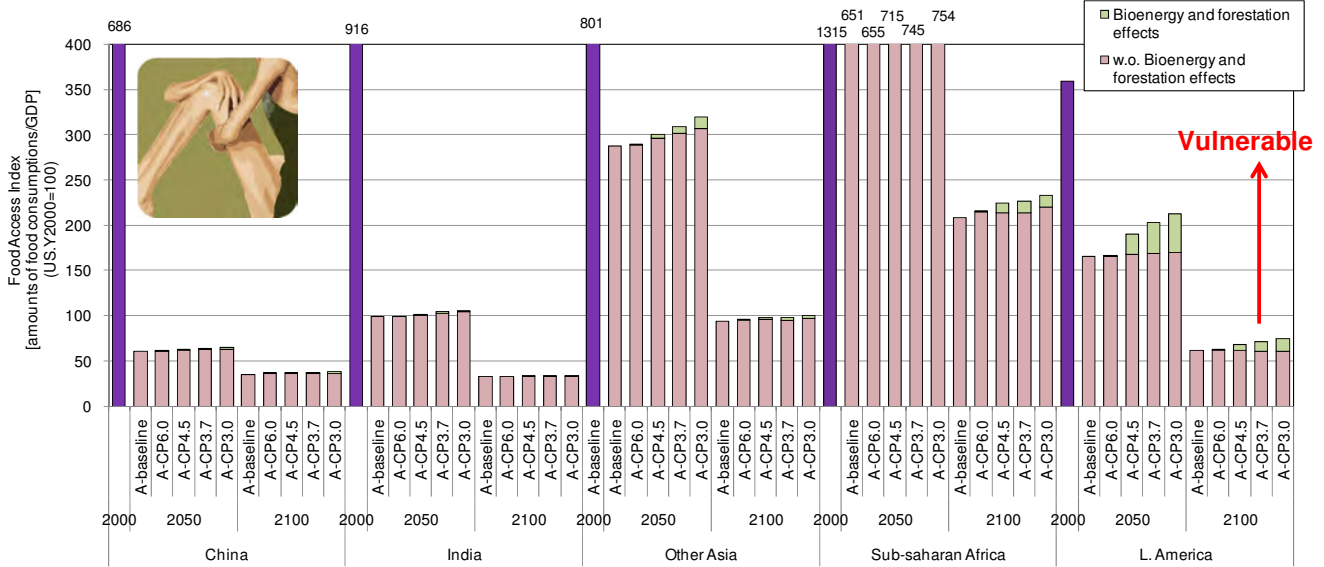
地域*i*の政治リスク指標

原油輸入に関する地域*i*への依存度

ESI = エネルギーセキュリティ指標(energy security index)、TPES = 一次エネルギー総供給量(total primary energy supply)  
注) IEA, 2007に準拠した指標

日本は、CP3.0のように厳しい削減目標下の方が、化石燃料消費の抑制によりセキュリティが増す結果となっているが、中国、インド等は、ガス利用の増大によりむしろ悪化傾向。厳しい削減ほど、エネルギーセキュリティが増すといった単純な関係にはない。

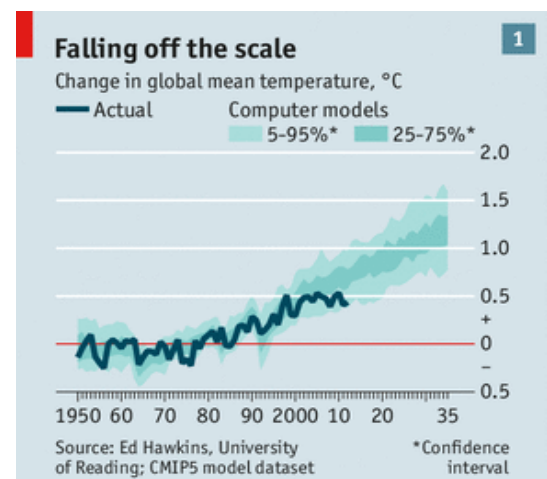
# 食料アクセス指標 (GDP当たりの食料消費額)



長期的には、食料価格上昇や食料消費量の増加よりも、経済成長(GDP)は十分に大きいため、どの地域においても食料アクセスの脆弱性は小さくなる。  
 長期的な指標推移と比較すると、温暖化影響が食料アクセスの脆弱性に与える影響は比較的小さい可能性。  
 排出削減が厳しいケースでは、大規模な植林、バイオエネルギー利用が必要になり、むしろ食料アクセス指標が若干ながら脆弱になる可能性あり。

# 気候変動予測に関する最新知見

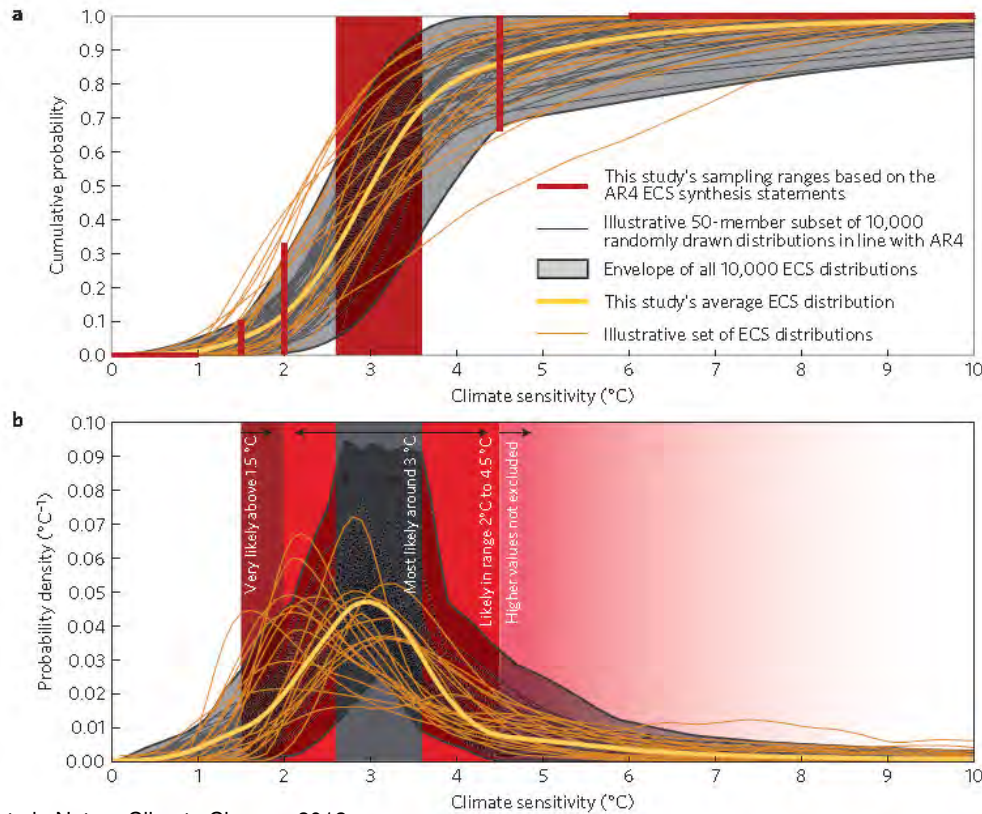
- ◆ 近年、気温上昇の速度は小さい。IPCC予測幅の下限をはずれそうになっているとの指摘あり。
- ◆ IPCC第3次評価報告書(2001)までは、平衡気候感度(温室効果ガス濃度が倍増したとき、時間遅れをもって最終的に上昇すると予想される気温)は1.5~4.5°Cが可能性としては高く、2.5°Cが最良推定だった。
- ◆ しかし、IPCC第4次評価報告書(2007)では、平衡気候感度を2.0~4.5°Cが可能性としては高く、3.0°Cが最もありそうな数値と変更
- ◆ 第5次評価報告書(2014)では再度修正が行われるか?
- ◆ 仮にこれが修正されると、2°C目標を前提としても、より大きな温室効果ガス排出が許容されると考えられるようになる。



- ◆ 世界のGHG排出は、経済危機にも関わらず、途上国を中心に大きく増大してきている。
- ◆ IPCC AR4の知見を基に、2℃目標→世界排出量2050年までに半減（先進国は8割削減）→中期2020年の排出ギャップ（埋めることが不可能なギャップ）→国際交渉の停滞 を招いてきた。
- ◆ 2℃目標を、たとえば2.5℃目標に緩和するなどし（3.7 W/m<sup>2</sup>に近いシナリオ）、実現性のある目標にしなければ、国際交渉も停滞するし、効率性の伴った温暖化対策もできない。0.5℃目標を緩和するだけでも、求められる排出削減レベルは、少なくとも2050年頃までは大きく異なる。
- ◆ 仮に2℃目標を維持するにしても、最近の知見で、それを満たす排出削減の経路としてたくさんの可能性が示されてきている。2050年までに世界排出量半減が不可欠ということはない。柔軟性をもって考えるべき。
- ◆ また、気候感度の最近の研究動向からしても、AR4の知見よりは排出許容が大きいと見る方が適切ではないか。
- ◆ 実現性の伴った長期排出削減目標を再構築することが、温暖化対策の前進につながるはずである。

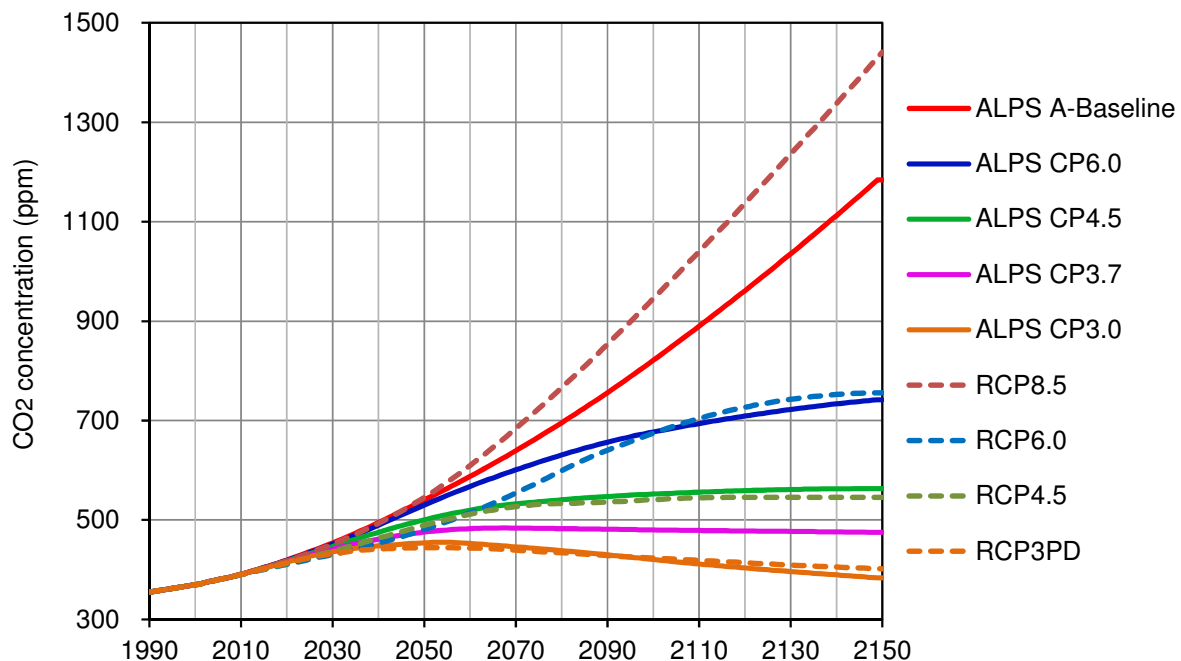
## 参考資料

# RCPの気温推計（平衡気候感度の想定）



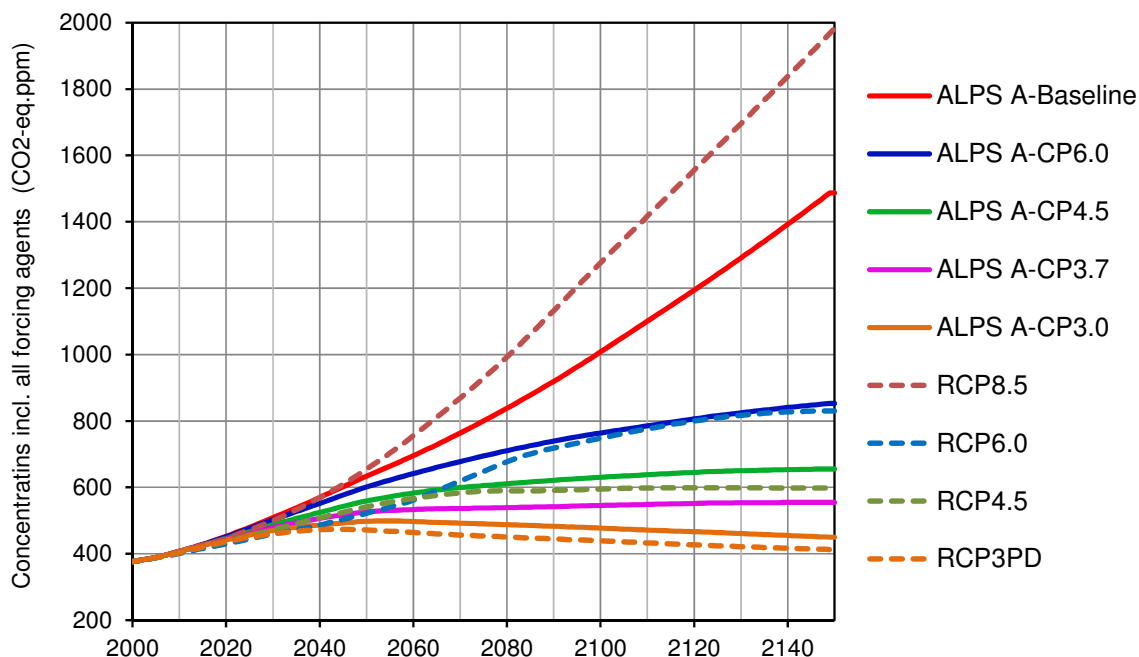
出典) Rogelj et al., Nature Climate Change, 2012

# 大気中CO<sub>2</sub>濃度推移シナリオ（ALPS/RCP）



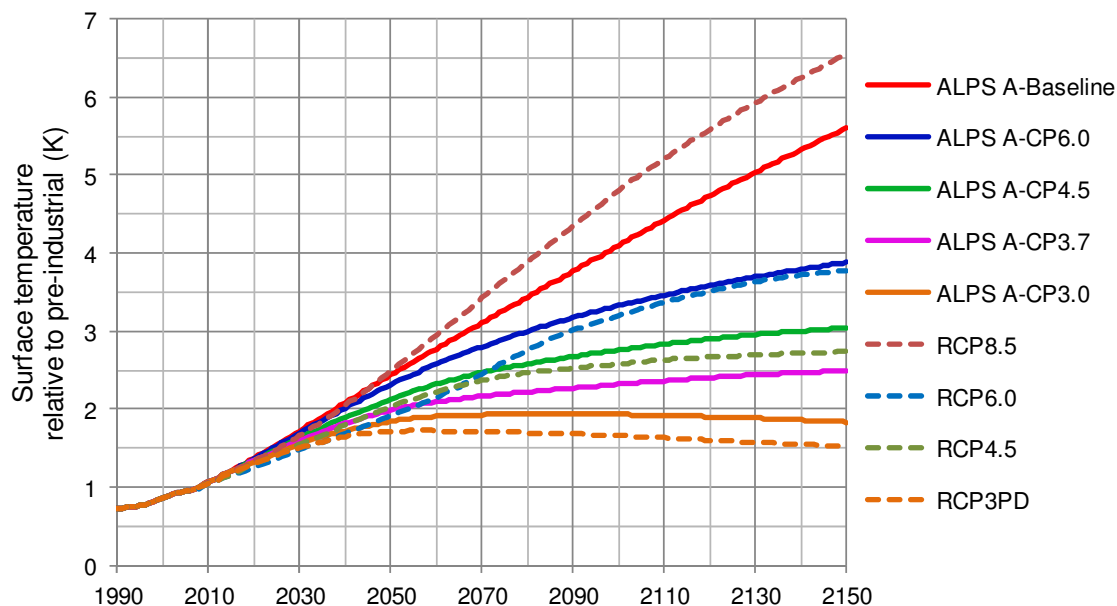
**ALPS CP3.7: 2060-70年にピーク 484 ppm、2100年 480 ppm**  
**ALPS CP3.0: 2050-60年にピーク 455 ppm、2100年 421 ppm**  
**RCP3PD(2.6): 2050-60年にピーク 445 ppm、2100年 423 ppm**

# 等価CO<sub>2</sub>濃度推移シナリオ (RITE ALPS/RCP)



ALPS CP3.7: 2100年 546 ppm CO<sub>2</sub>eq., 2150年 555 ppm CO<sub>2</sub>eq.  
 ALPS CP3.0: 2050-60年にピーク 499 ppm CO<sub>2</sub>eq., 2100年 477 ppm CO<sub>2</sub>eq.  
 RCP3PD(2.6): 2040-50年にピーク 473 ppm CO<sub>2</sub>eq., 2100年 439 ppm CO<sub>2</sub>eq.

# 全球平均気温上昇 (RITE ALPS/RCP)



注) 平衡気候感度は、IPCC AR4の"most likely value"の3.0°Cを用いて計算

ALPS CP3.7: 2100年 2.3°C、2150年 2.5°C  
 ALPS CP3.0: 2080-90年にピーク 1.9°C、2100年 1.9°C  
 RCP3PD(2.6): 2050-60年にピーク 1.7°C、2100年 1.7°C  
 ただし産業革命が始まった1765年比。一方、IPCCの現状気温上昇記述は1850-1899年比で0.76°Cとしており、両者の100年の間には0.1°C程度の気温上昇が存在する。1850-1899年比の場合、上記からそれぞれ-0.1°C程度

# 世界平均のGDP比温暖化影響被害推計

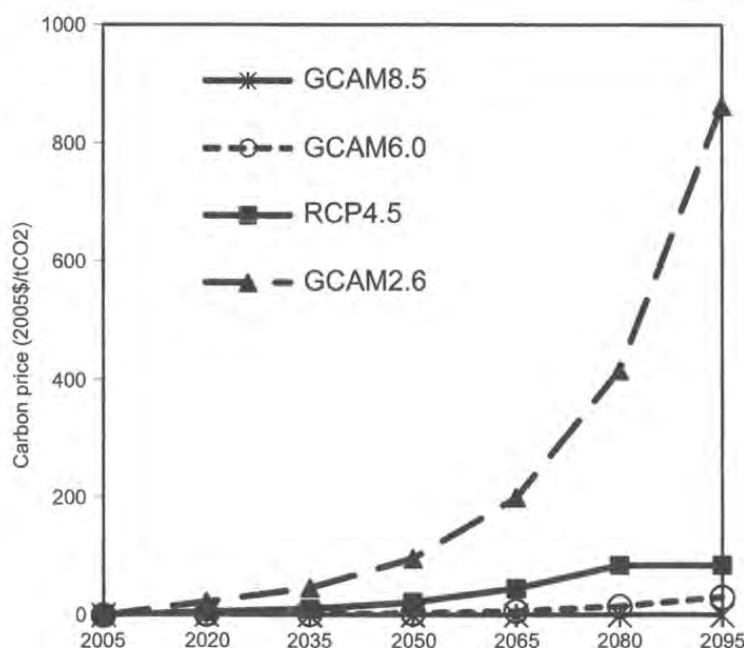
	2030	2050	2100	2150
A-Baseline	0.56%	1.11%	3.14%	5.56%
A-CP6.0	0.55%	1.01%	2.15%	2.84%
A-CP4.5	0.51%	0.87%	1.55%	1.83%
A-CP3.7	0.49%	0.77%	1.14%	1.29%
A-CP3.0	0.47%	0.67%	0.84%	0.77%

## Nordhaus, 2010における世界平均のGDP比温暖化影響被害関数

$$\frac{D(t)}{\text{GDP}_{\text{Base}}(t)} = a_1 T(t) + a_2 (T(t))^{a_3}$$

$\text{GDP}_{\text{Base}}$ : BaselineのGDP、 $T(t)$ : 全球平均気温、 $a_1$ 、 $a_2$ : 係数(12地域別)、 $a_3$ : 2.0

# 米国PNNLによるRCPシナリオのMAC推計



出典: Climatic Change, RCP特集号, 2011

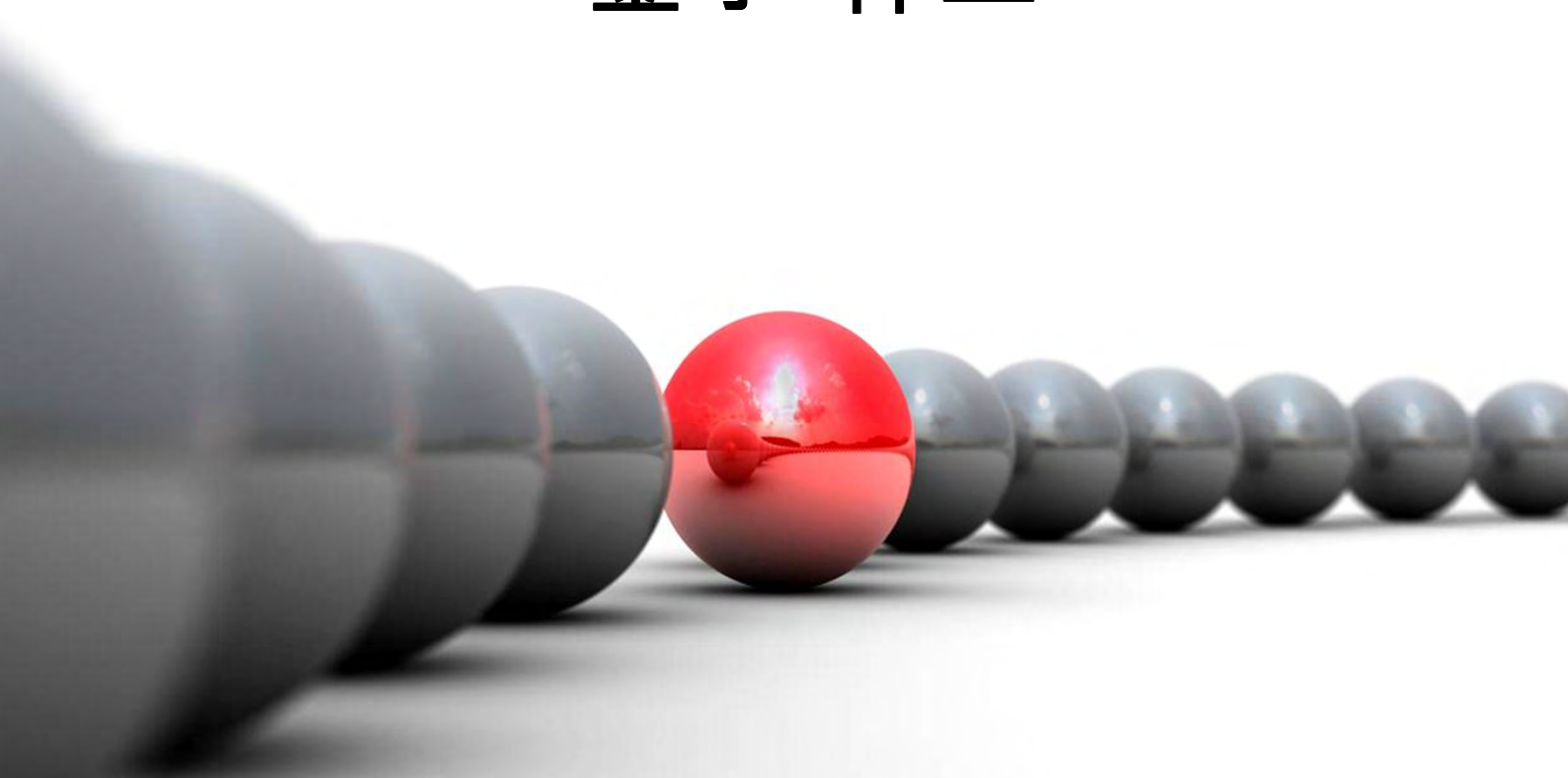
**PNNLの分析においても、2.6W/m<sup>2</sup>シナリオ(2℃安定化)の限界削減費用は、他シナリオと比べて、相当高い。**



# 高効率でクリーンな 火力発電技術の 役割と展望について

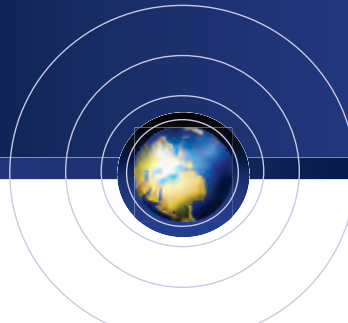
東京大学生産技術研究所  
エネルギー工学連携研究センター  
副センター長

金子 祥三





# 高効率でクリーンな火力発電技術の 役割と展望について

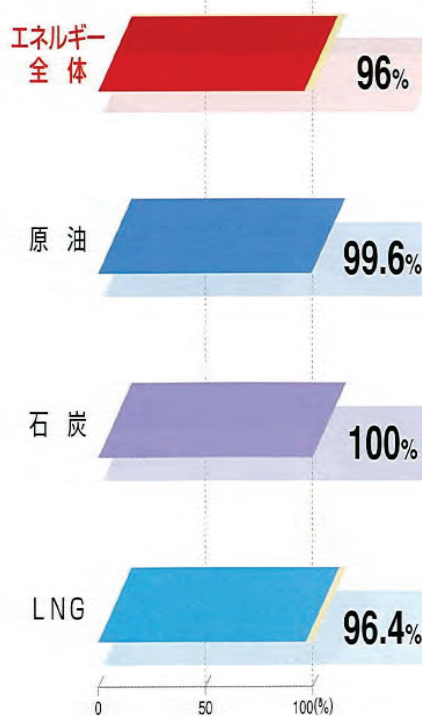


2013年7月10日

東京大学生産技術研究所  
特任教授 金子 祥三

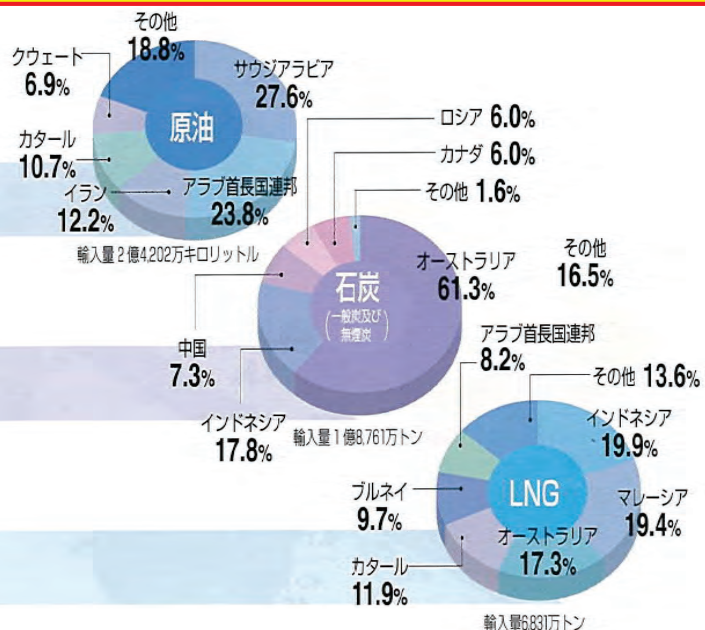
## 日本のエネルギーの海外依存度(2007年度)

エネルギー原料の輸入依存度 (2007年度)



エネルギー原料の主な輸入先 (2007年度)

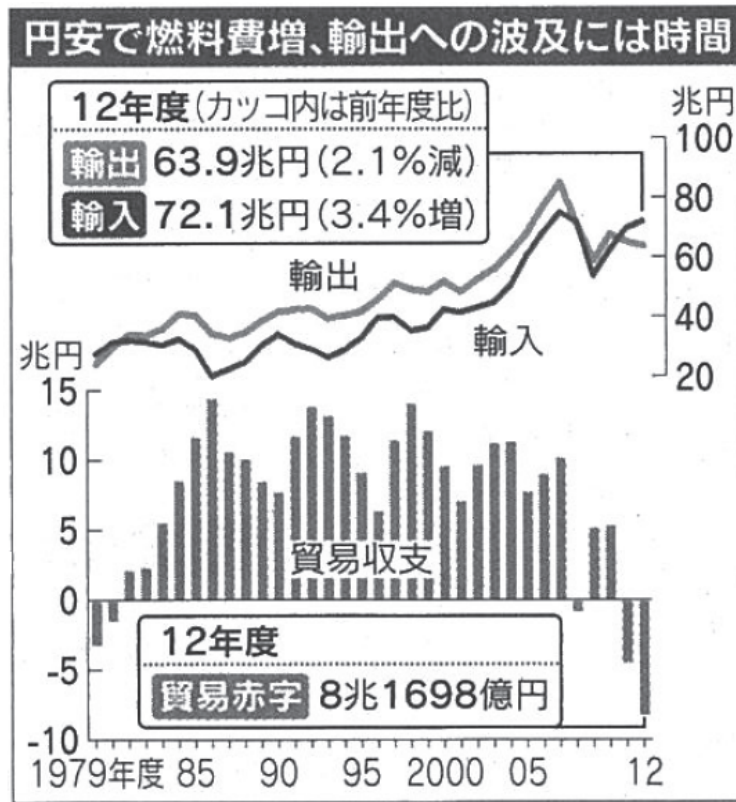
日本の自給率は僅か4%---先進国で最低!



出典: 「エネルギー白書」2009年版

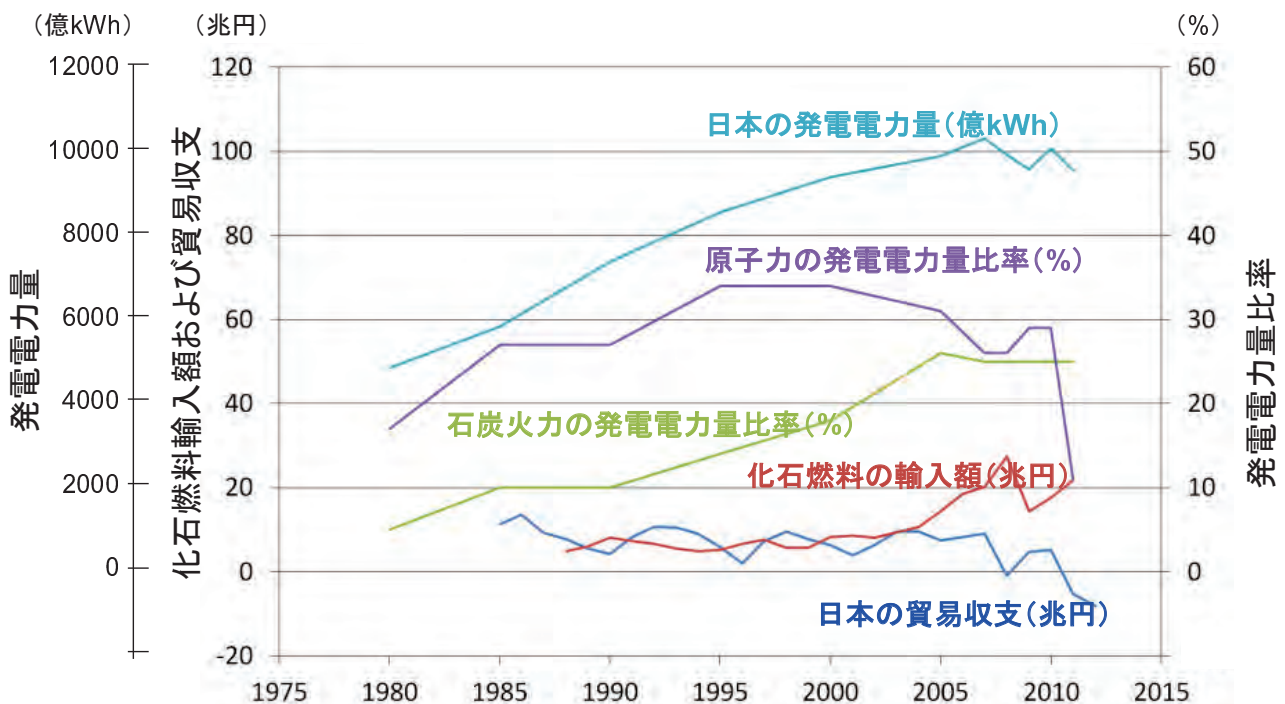
※SHIPPING NOW 2009-2010より引用

# 過去20年以上続いた貿易黒字が一挙に赤字に転落



日本経済新聞2013年4月18日

# エネルギーのベストミックスがいかに日本経済に貢献したか？



## 原子力の比率低下→火力発電の急増

- 輸入燃料費の急増
- 電力料金の上昇
- CO<sub>2</sub>発生量の増加

## 燃料消費の削減はどうしたらよいか？

- ①使用量を減らす→発電効率向上
- ②燃料を安く買う→交渉力ーOPTIONを持つ
- ③再生エネルギー増加

## 火力発電の高効率化

### ● 高効率発電技術の歴史と今後

◆ 発電技術は次の3世代に分類される。

- ①第1世代:従来型(ボイラータービン): USC
- ②第2世代:複合発電(IGCC)
- ③第3世代:トリプル複合発電(IGFC)

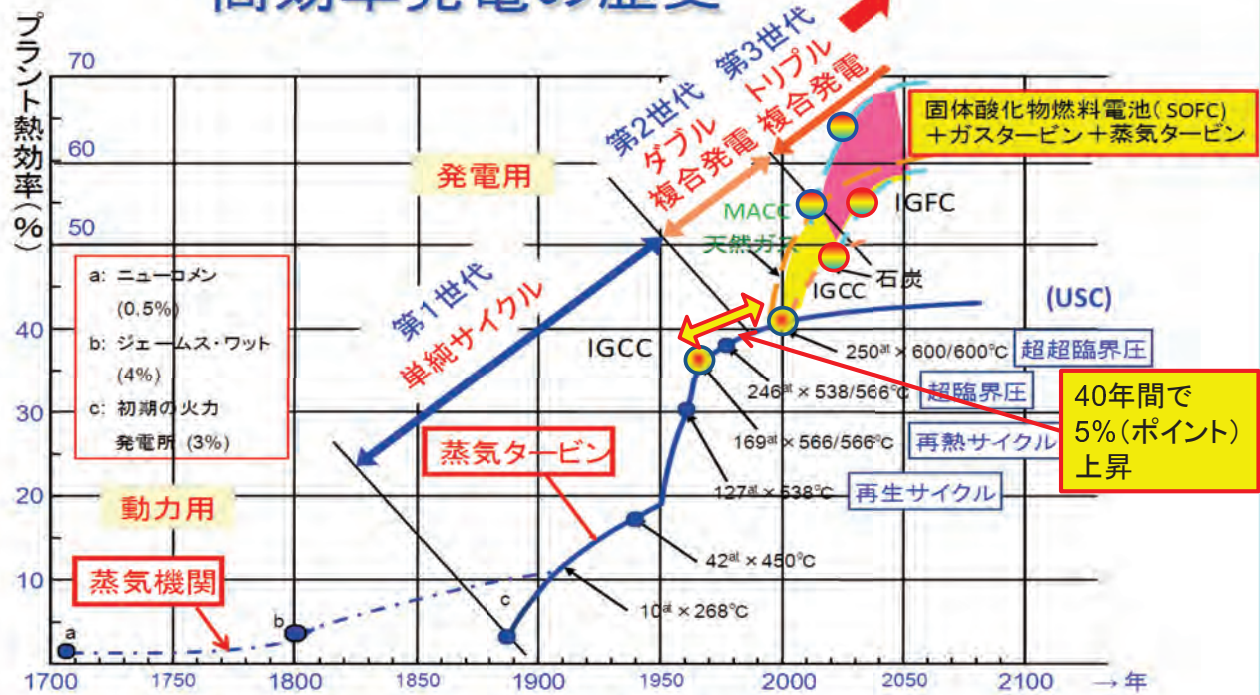
◆ 第1世代の蒸気タービンの時代は100年以上続いた。

◆ しかし今、限界にきており、次の世代に移っている。

- 現在は歴史的な変革の時代である
- 福島第一の事故と偶然の符合か？

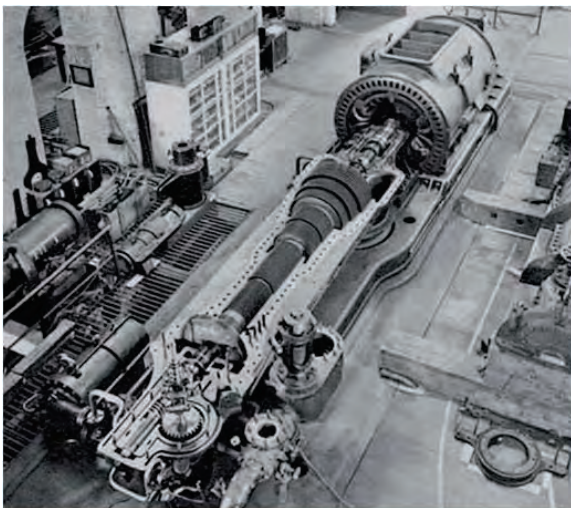
# 火力発電の高効率化の動向

## 高効率発電の歴史

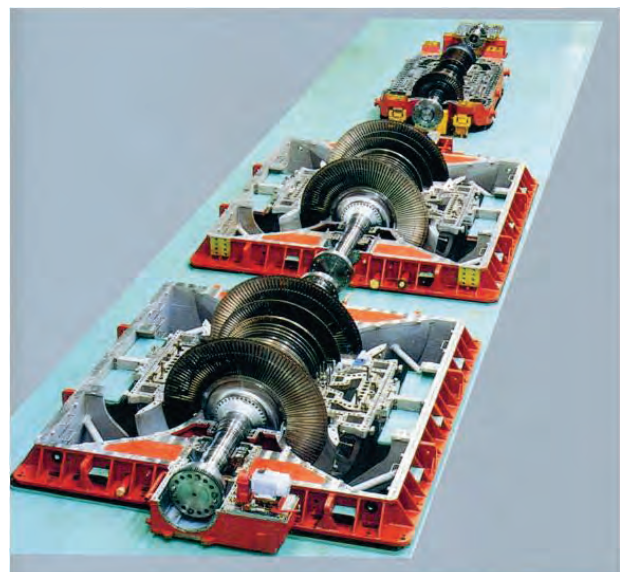


## 第1世代: 蒸気タービンの時代

- ボイラで蒸気を発生し、蒸気タービンを回す。終戦後、最新技術を米国から技術導入。
- 約100年以上にわたり火力発電を支えたが、蒸気温度が600°Cを超えるUSCとなり、ほぼ技術的限界。またすでに中国はUSCの量産体制に入っており、国際競争力喪失は時間の問題

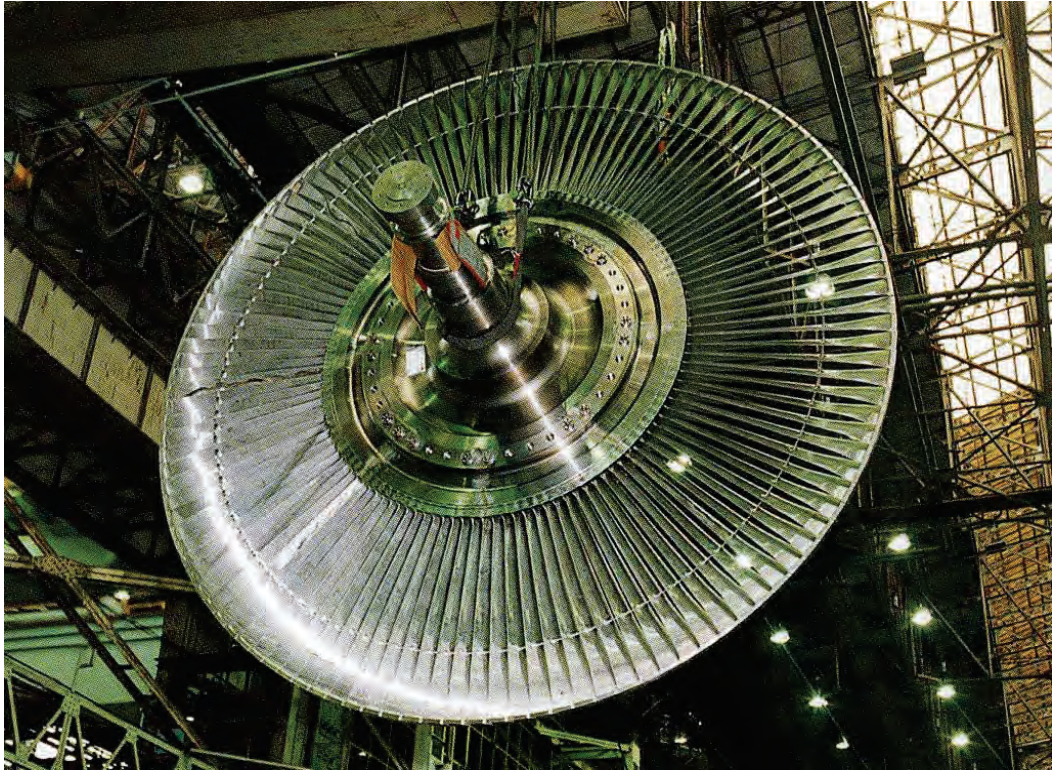


最初の発電用蒸気タービン: 500KW (1905年)



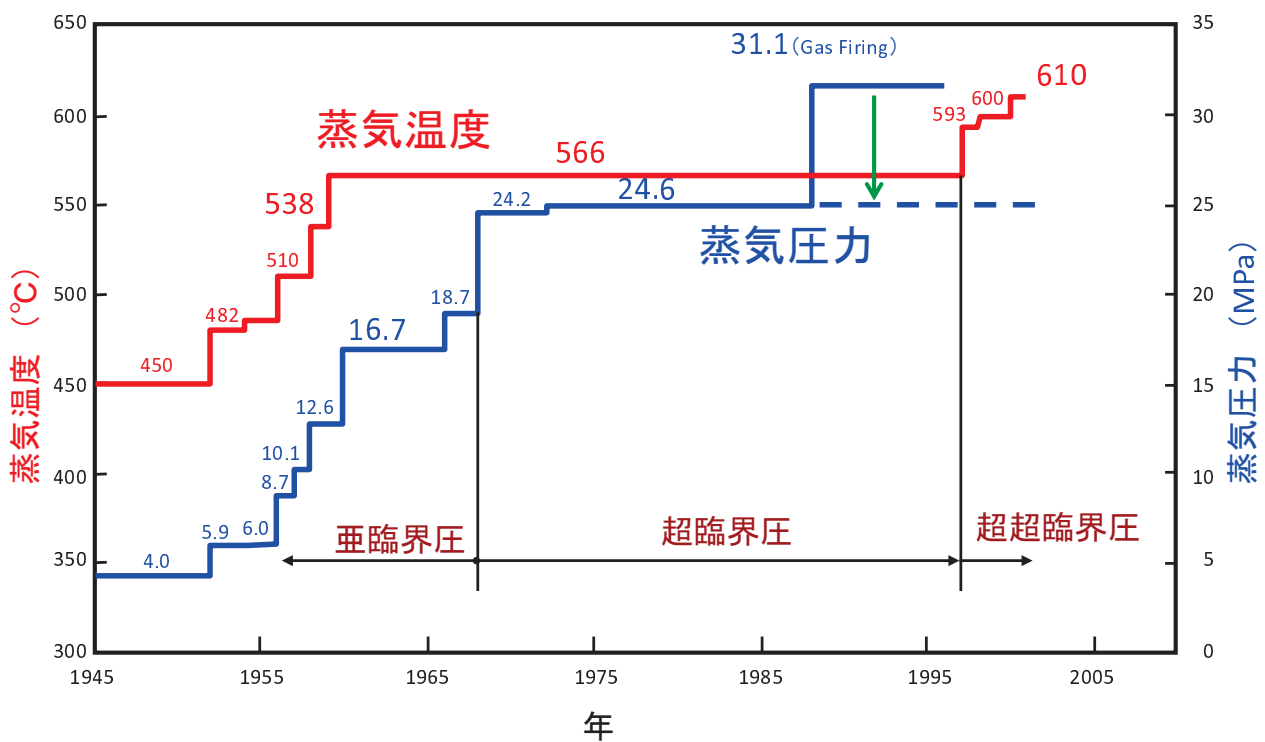
最近の発電用蒸気タービン: 700,000KW (1995年)

# 蒸気タービンの例

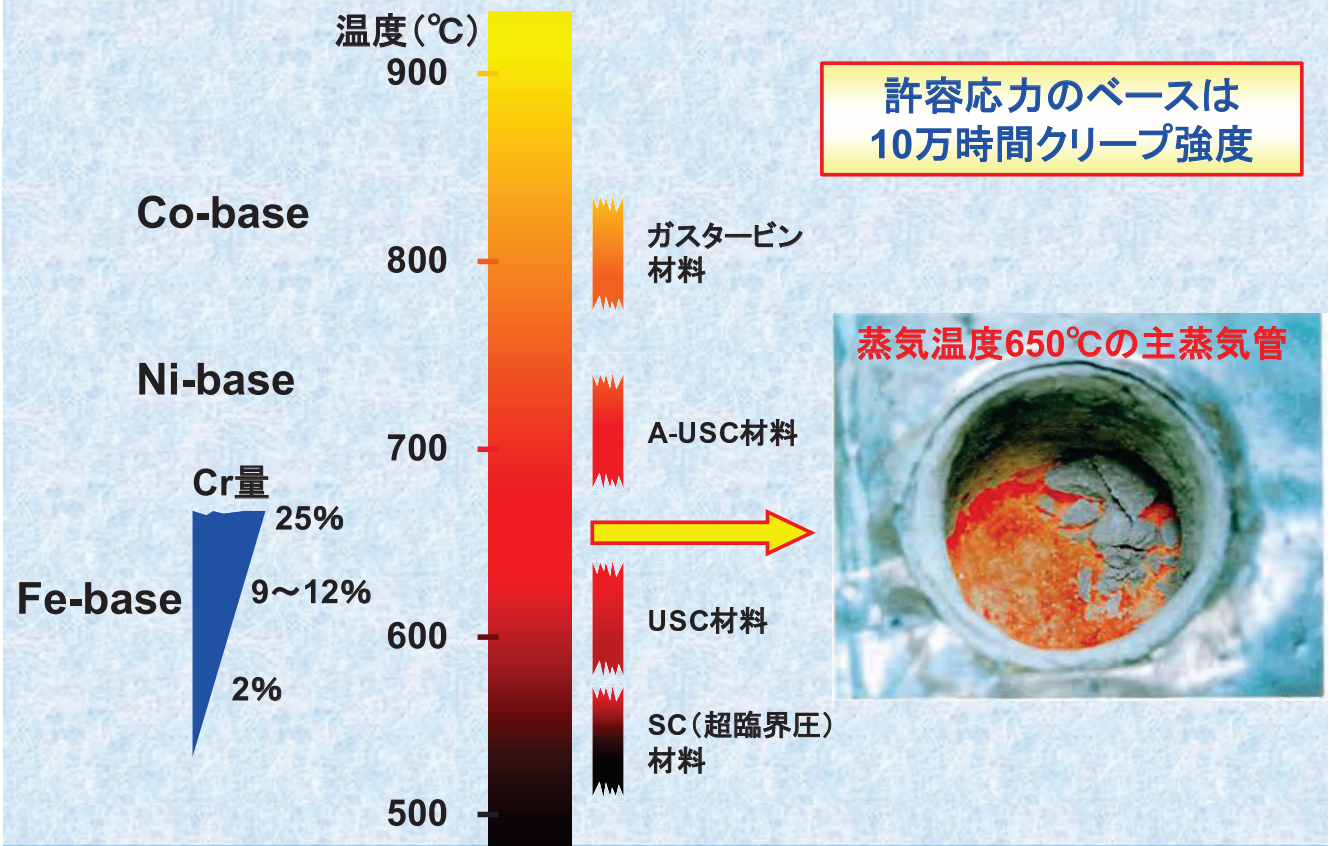


54インチ翼(原子カプラント用) 出典:三菱重工業カタログより

# 火力プラントの蒸気条件

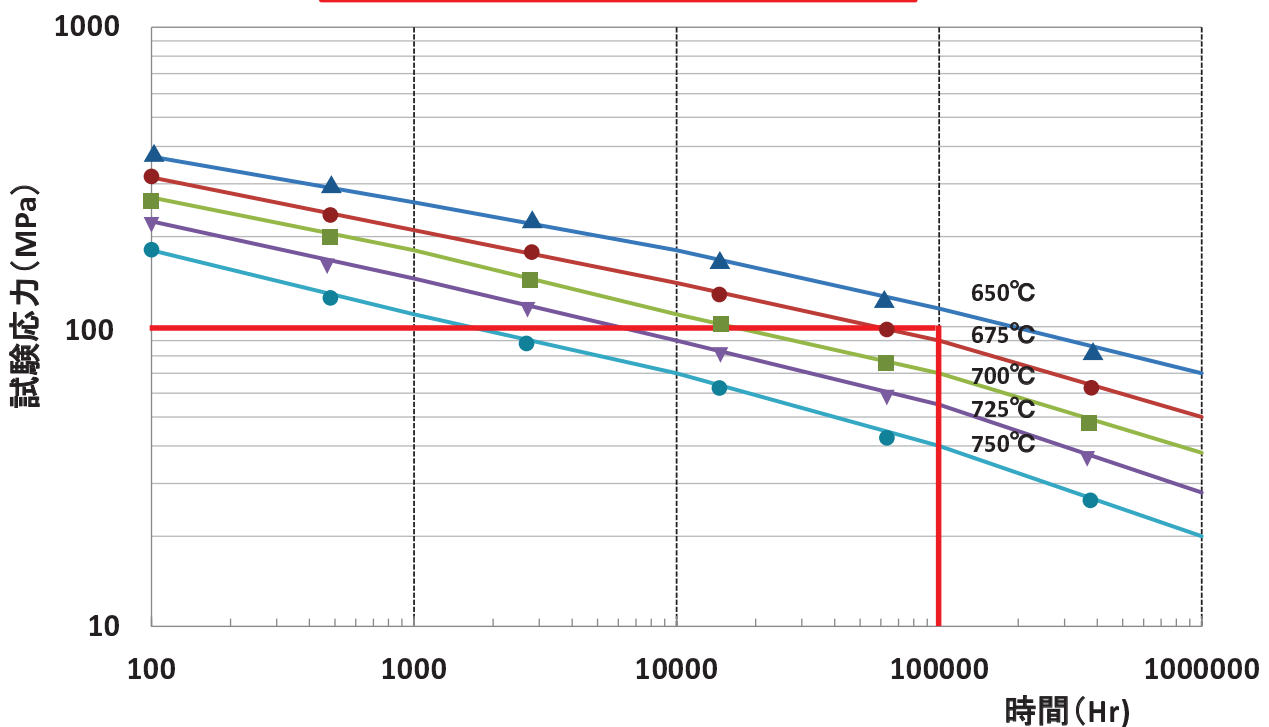


# 耐熱高温材料



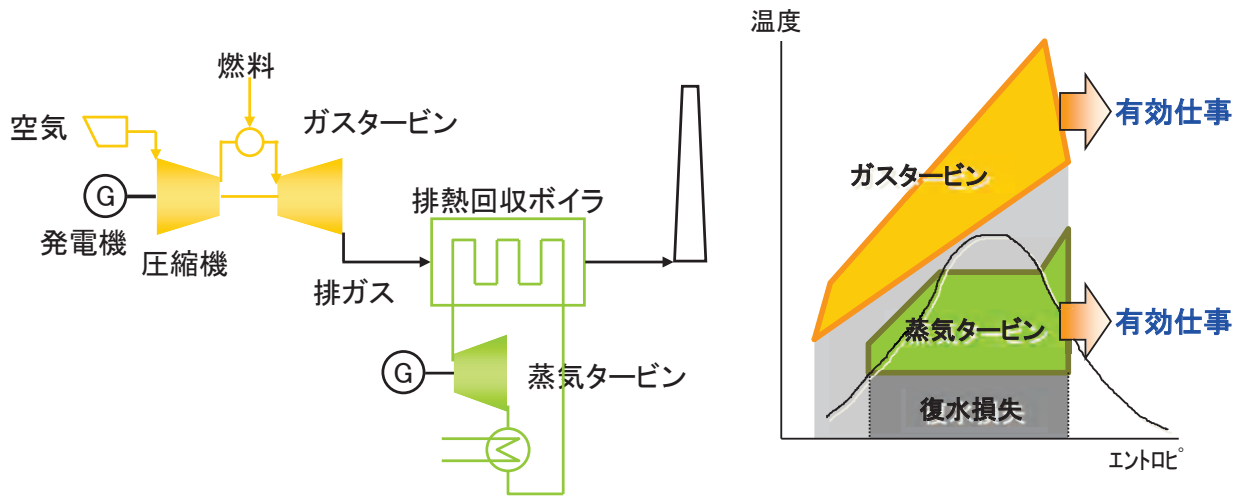
# 耐高温材料強度の決め方

## クリープ破断試験





# 複合発電サイクル



一粒で二度おいしい！

## 第2世代:ダブル複合発電:ガスタービン+蒸気タービン

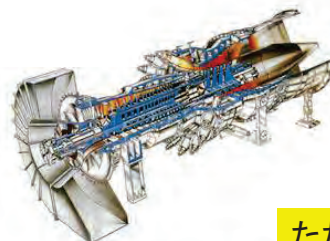
- 1984年ころ日本が世界に先駆けて100万KW級のダブル複合発電を実用化
- ただしGE(米国)、Siemens(ドイツ)の2大ガスタービンメーカーが世界を席卷



・蒸気タービン



・航空用ジェットエンジン



・発電用ガスタービン

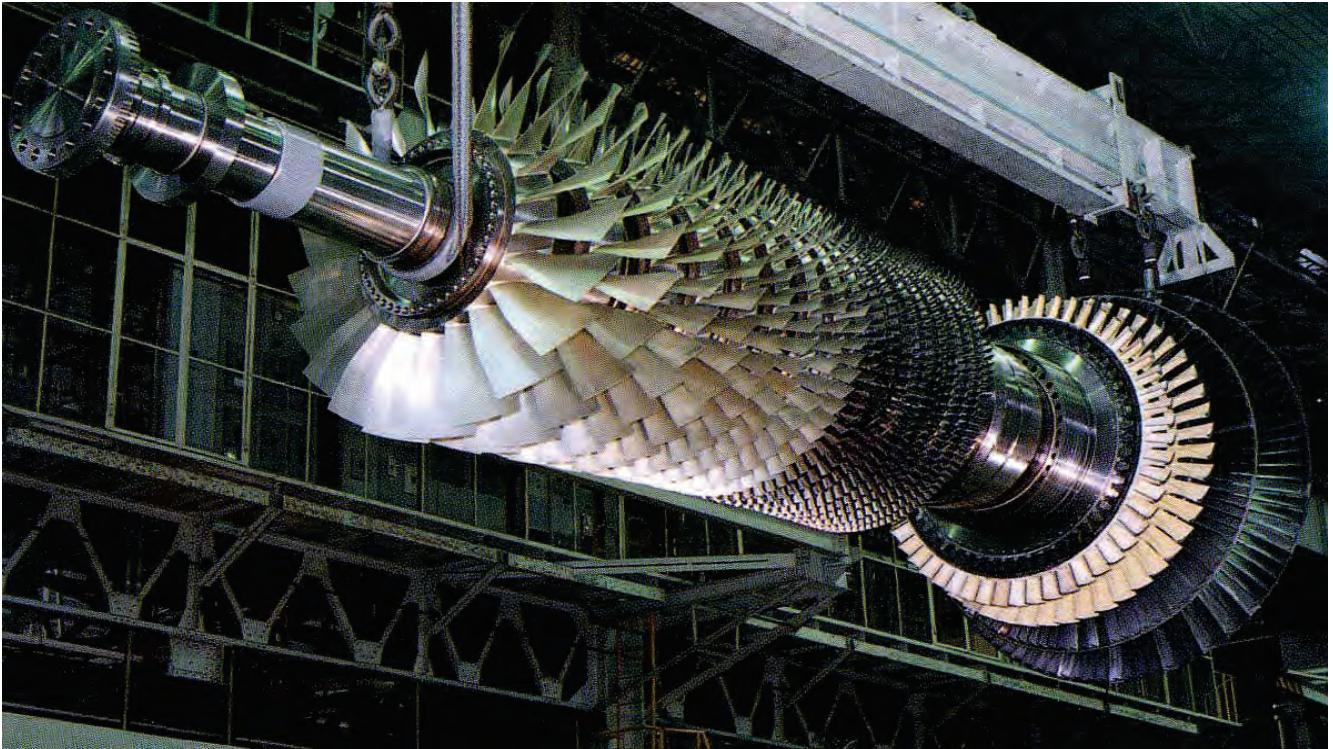
複合サイクル  
[ガスタービン+排ガスボイラ  
+蒸気タービン+発電機]



複合発電

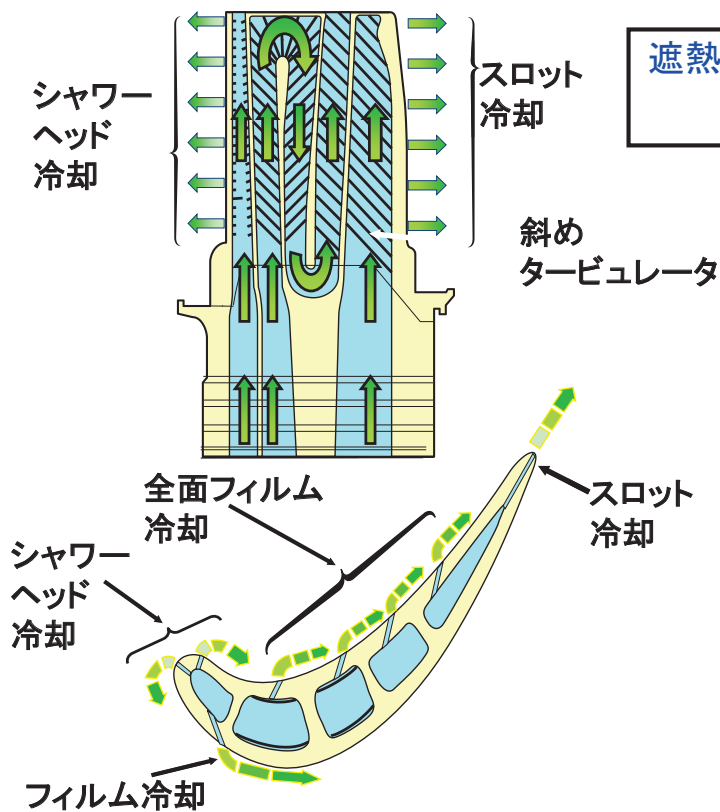
ただし日本も世界で初めて  
1600°Cのガスタービンを実用化  
し、世界をリードしつつある

# ガスタービンロータの例



提供：三菱重工業

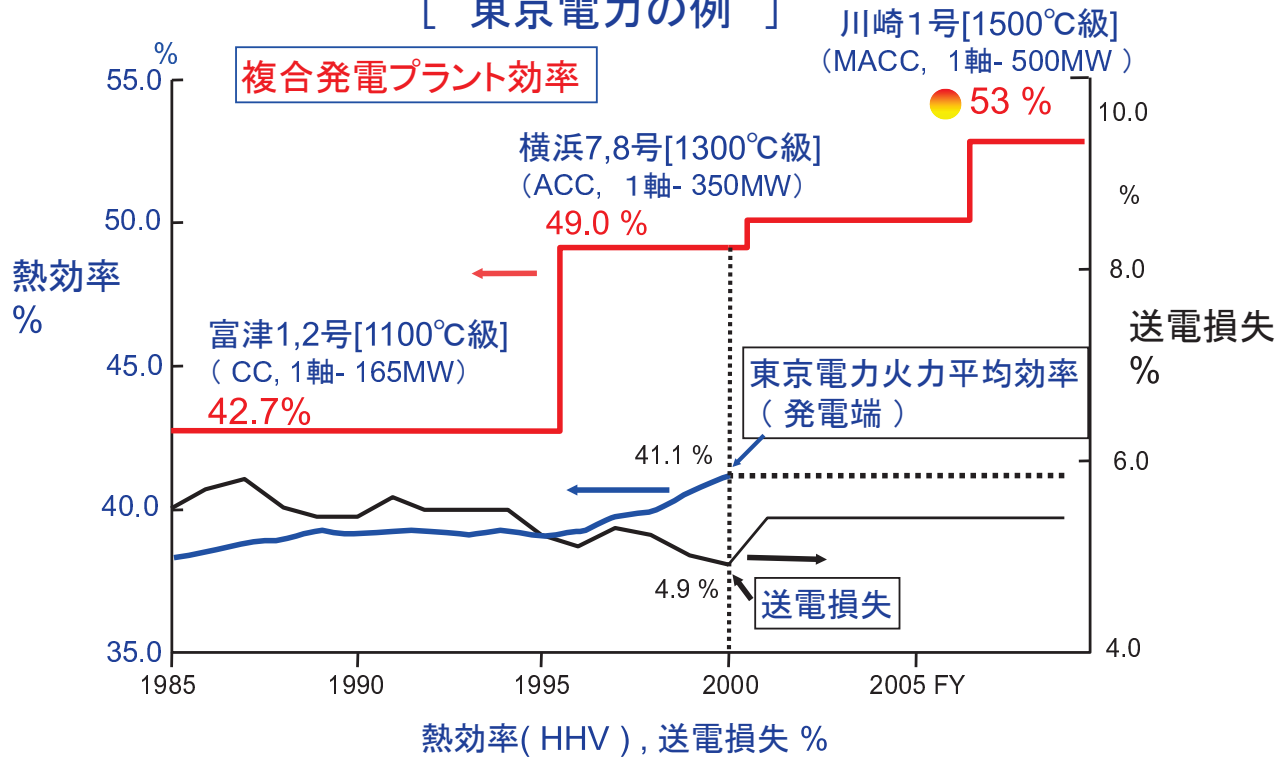
## ガスタービン 第1段動翼



提供：三菱重工業

# ダブル複合発電 (LNG)

[ 東京電力の例 ]

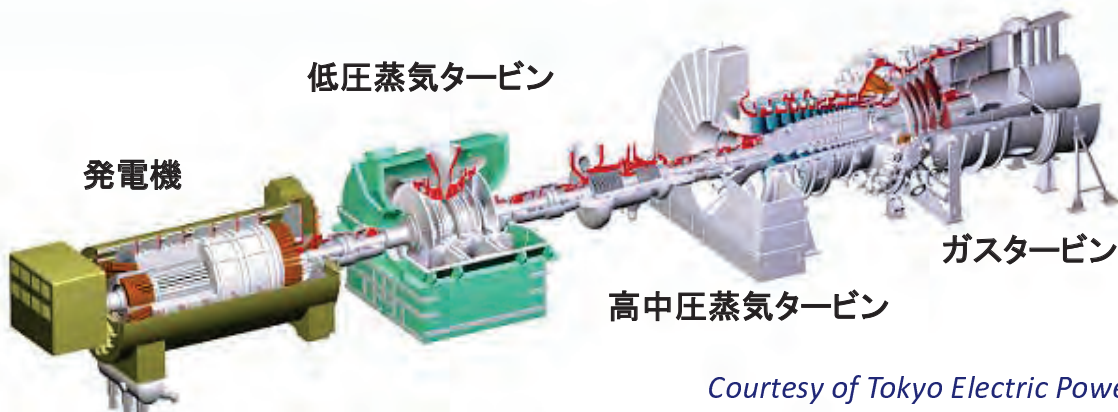


出典 : 東京電力環境行動計画報告 2001年, p.30

## 第2世代：天然ガス焼き1,500°C級GTコンバインドサイクル



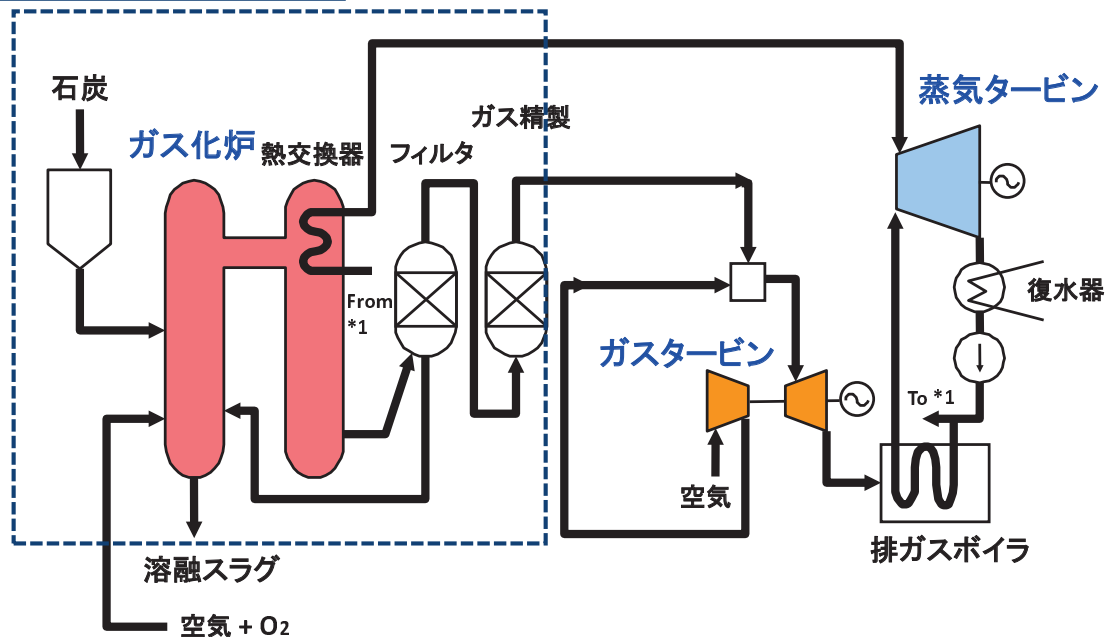
東京電力川崎1-1系列：出力50万KW：発電効率 53% (高位発熱量基準、送電端)



Courtesy of Tokyo Electric Power Co.

## 第2世代: 石炭ガス化複合発電 (IGCC)

### ガス化炉およびガス精製



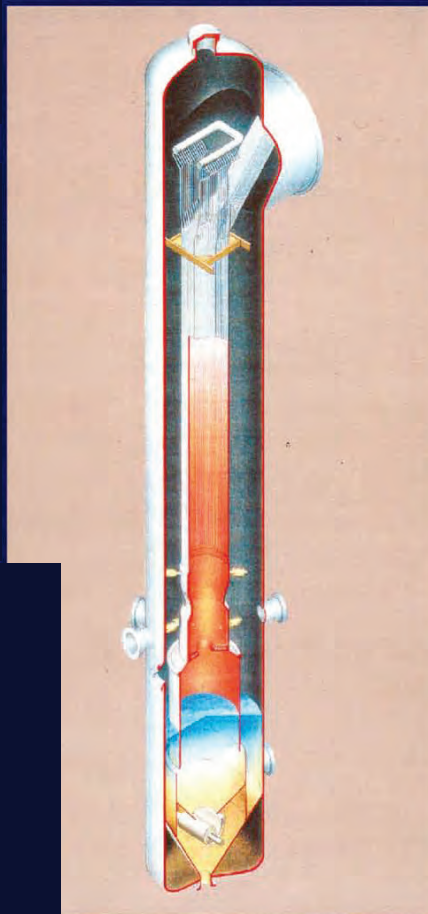
### IGCC: Integrated coal Gasification Combined Cycle

## ● 日本の最高の技術力を結集したIGCC クリーンコールパワー研究所 (CCP) 勿来 25万KW IGCC

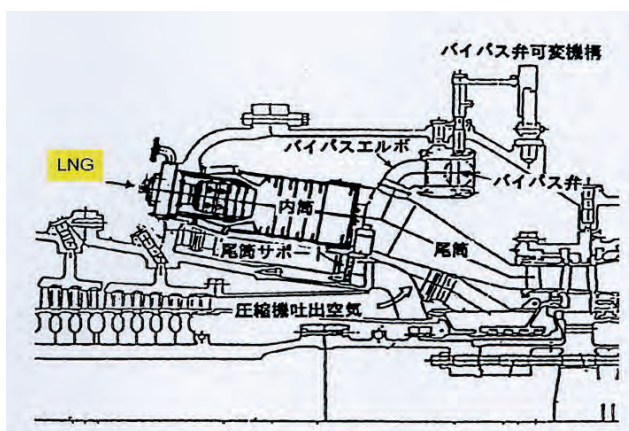
- ガス化炉: 1700 Ton/日、NO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub>、ばいじんが一桁の数値
- 2000時間連続運転達成 (2008年)
- 5000時間耐久運転達成 (2010年)
- 2011.3.11の大震災後、4か月で復旧、8月11日以降3カ月連続運転 (2238時間以上)
- 48% (送電端、HHV) の高効率を1600°C GTで実現可能 11.12
- 2013.4.1より常磐共同火力勿来10号機として商用運転中

# 石炭ガス化炉の特徴

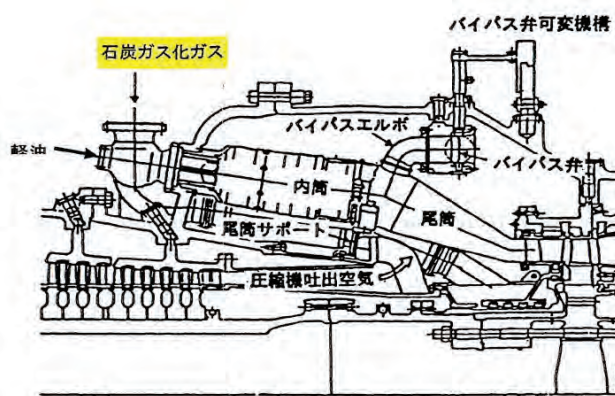
- 加圧容器に収納
- 噴流床方式
- 部分燃焼で石炭ガスを発生
- ガスタービンで燃焼可能となるので複合発電が可能(IGCC)
- 高効率に加え、微粉炭焚きに不向きな低灰融点炭が使える
- ガス化炉の連続運転で重要なのは溶融スラグの排出である
- 将来LNGの供給不安時、この石炭ガス化炉を追設することによりLNG複合発電をIGCCに転換できる



## ガスタービン比較 (LNG用と石炭ガス化用)

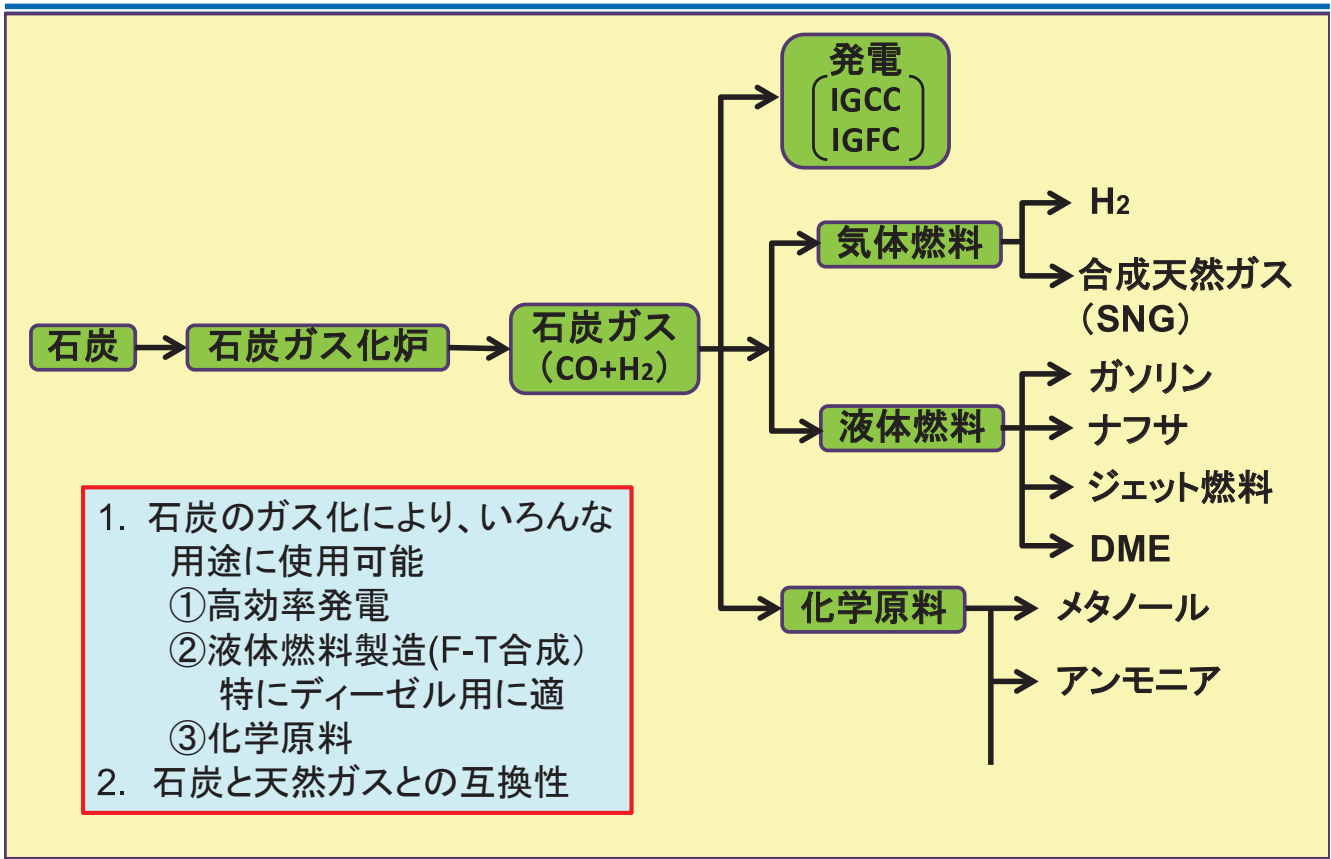


LNG焚き用



石炭ガス化焚き用

# 石炭ガス化の用途



## 福島県の産業復興への提案

500万kWのIGCCを建設!

世界最高効率で世界で最も環境にやさしい石炭火力発電所を!



相馬共同火力: 現設備能力 200万kW

★200万kW IGCCを建設!



東北電力原町火力: 現設備能力 200万kW

★100万kW IGCCを建設!



東京電力広野火力: 現設備能力 380万kW

★100万kW IGCCを建設!



★100万kW IGCCを建設!

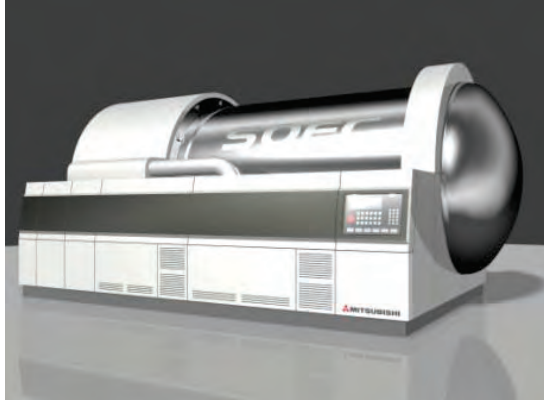
常磐共同火力 : 現設備能力 162.5万kW  
CCP : IGCC実証機 25万kW



成美堂出版: 地図で読む東日本大震災より

### ダブル複合発電からトリプル発電へ！

高温型燃料電池(SOFC)+ガスタービン+蒸気タービン



分散型: 250kW機



事業用: 1000MW級

➤ 2012年からAll Japan体制で事業用トリプル複合発電の  
国家プロジェクトが始まり、日本が世界を断然リードしている！

## 固体酸化物型燃料電池SOFCの概要 (Solid Oxide Fuel Cell)

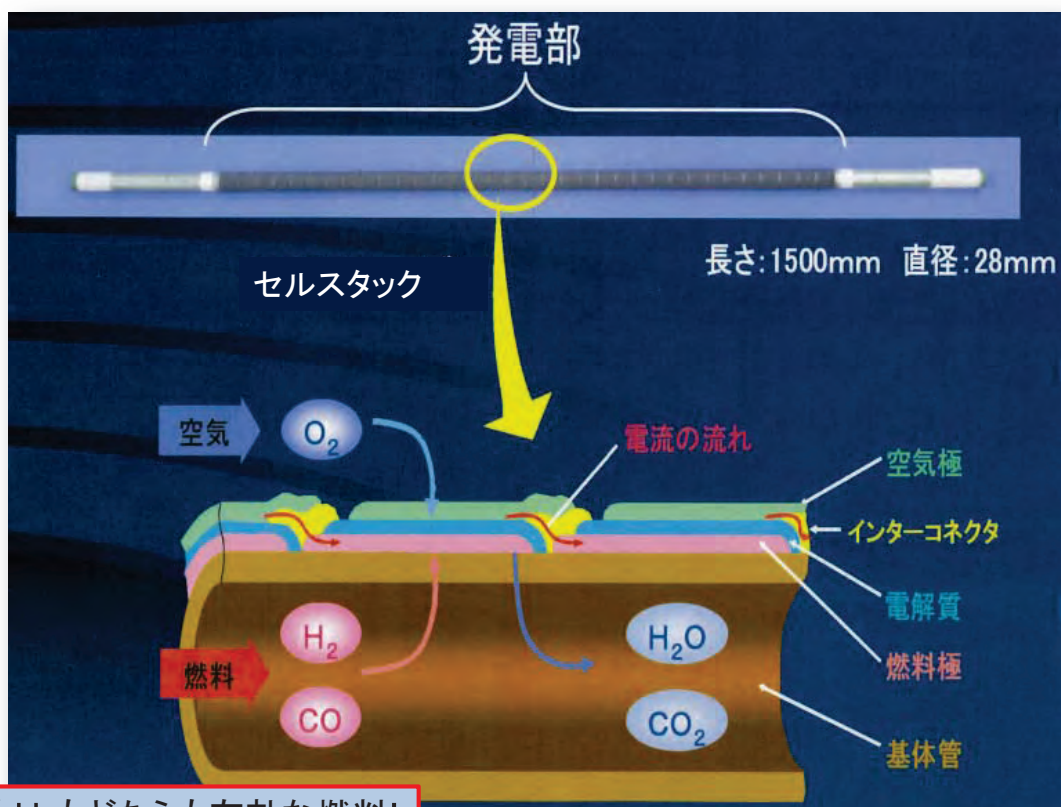
1. 電解質に酸素イオン導電性のあるセラミックスを使用
2. 約1000°Cの高温で使用
3. したがって排ガスが1000°Cの高温であるので  
トッピングとして複合発電に使え、高い総合  
効率が得られる
4. 燃料としてCOもH<sub>2</sub>もどちらも使える (他の電  
池ではH<sub>2</sub>しか燃料として使えないもの多し)
5. 耐久性に優れる
6. 急速起動や負荷変化にも強い
7. ガス化すれば石炭も利用可能

SOFC: 固体酸化物型  
第3世代の火力発電  
の切り札!



電解質: セラミックス  
(YSZ: ジルコニア化合物)

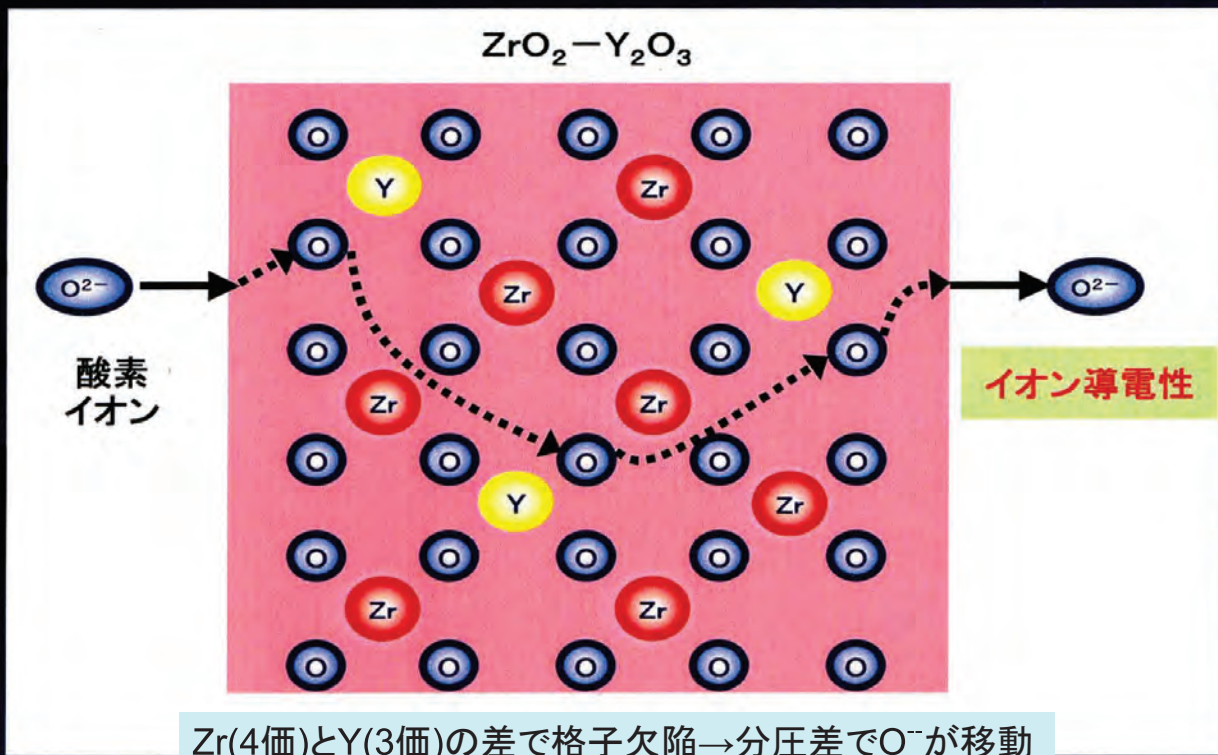
## 高温型燃料電池: 固体酸化物型 (SOFC) の構造



COもH<sub>2</sub>もどちらも有効な燃料!

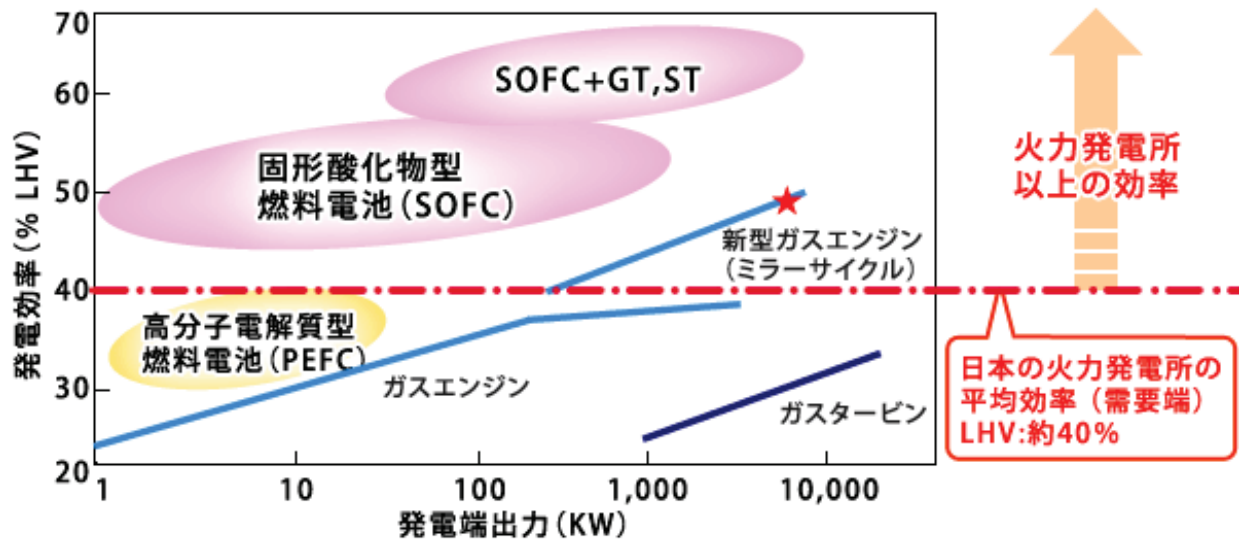


# SOFC電解質の特徴



種類	固体高分子型燃料電池 (PEFC)	固体酸化物型燃料電池 (SOFC)
燃料	H <sub>2</sub> のみ	H <sub>2</sub> , CO
作動温度	~80°C	~1,000°C
特徴	<ul style="list-style-type: none"> <li>●低温のため複合発電不可</li> <li>●低温のため活性化にPtが必要</li> <li>●電解質は高分子膜</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●高温のため複合発電可能</li> <li>●燃料がメタンCH<sub>4</sub>などの場合エクセルギー再生により効率2割UP CH<sub>4</sub>+H<sub>2</sub>O→CO+3H<sub>2</sub>-205kJ/mol</li> </ul>
用途	<ul style="list-style-type: none"> <li>●燃料電池自動車</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>●大型火力発電所</li> <li>●エネファームもSOFCに</li> </ul> 

# SOFCおよびトリプル複合発電の効率性



出典: 経済産業省ゼロ・エミッション・ビルの実現と展開に関する研究会  
 資料「ZEB実現に向けたエネルギーの面的利用について」  
 コージェネレーション・エネルギー高度利用センター  
[http://www.ace.or.jp/web/chp/chp\\_0040.html](http://www.ace.or.jp/web/chp/chp_0040.html)

## 250kW SOFC Hybrid機 (東京ガス千住テクノステーション)

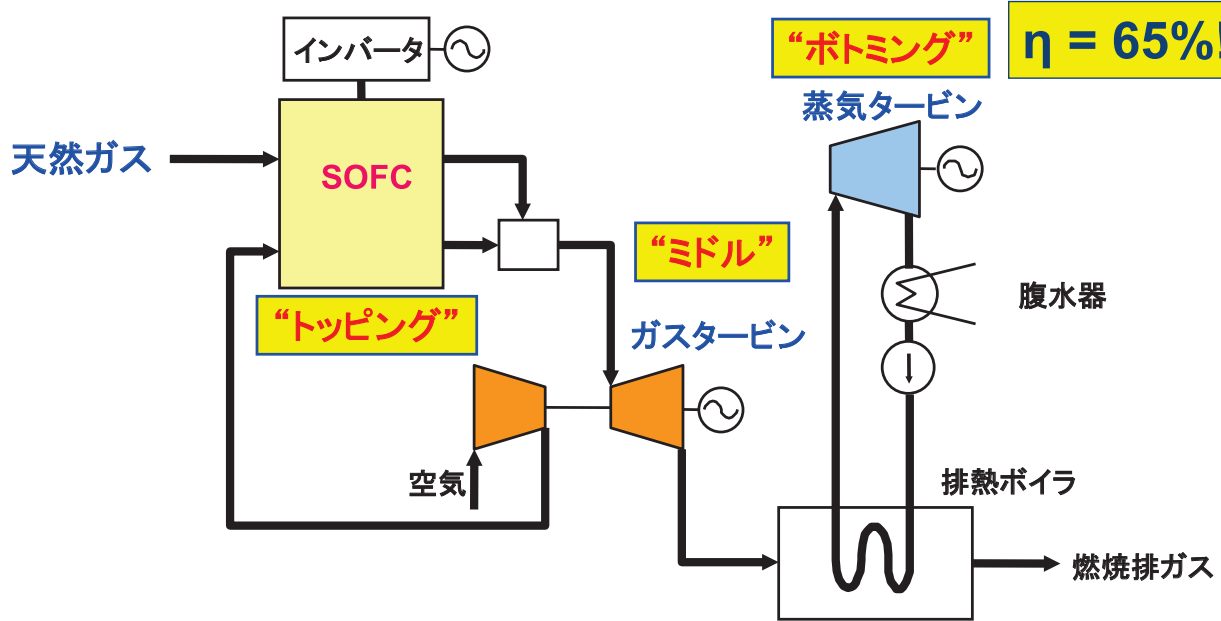
SOFCとマイクロガスタービンの組み合わせ

効率55%(LHV)



NEDOプロジェクト

# トリプル複合発電 ( LNG )



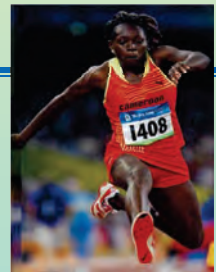
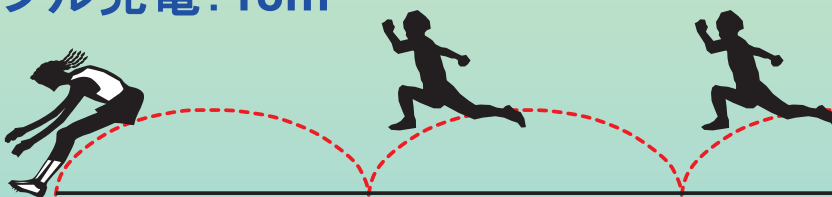
**トリプル複合発電：**  
高温燃料電池 ( SOFC ) とガスタービン・蒸気タービンの組み合わせ

Source : Thermal & Nuclear Power (vol.52, No.10), 2001, p.129

## トリプル発電は三段跳び

トリプル発電 : 18m

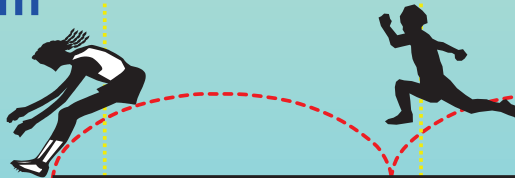
天然ガス 65% : 石炭 55%



3段跳び

ダブル発電 : 13m

天然ガス 55% : 石炭 48%



2段跳び

シングル発電 : 8m

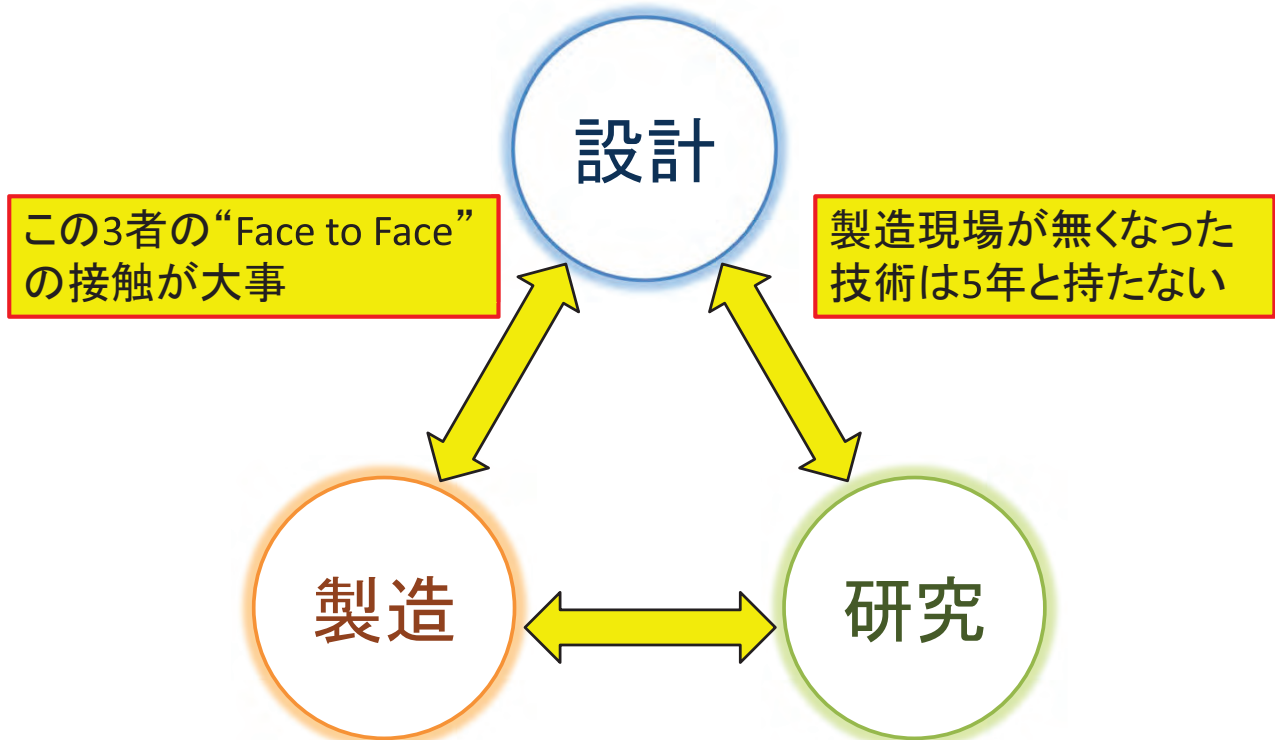
天然ガス 41% : 石炭 42%



1段跳び  
(走幅跳び)

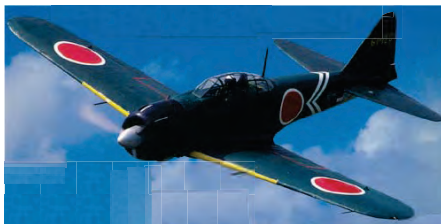
[注] 発電効率はいずれも高位発熱量基準、送電端

# “設計-製造-研究”の三位一体で 初めて画期的な製品が生まれる



技術は常に陳腐化する  
→新しいものへの挑戦が不可欠

- どんな優れた戦闘機でも平時で4年、戦時で2年で旧式となる(ゼロ戦設計者:堀越二郎)
- 東日本大震災の経験は太平洋戦争と同じくらいの危機感を持って捉えるべし



Mitsubishi A6M *Zero*



Republic P47 *Thunderbolt*



North American P51 *Mustang*

## 東北電力東新潟発電所



前例というものは、誰かがやらねば出来ないものだ。  
今度は、日本人の手で初めての事をやりたい。

東新潟火力発電所

東新潟火力5号系列コンバインドサイクル開発計画時  
若林社長が英断された時のお言葉

新しいものに踏み出す勇気---日本が初めて  
大容量複合発電に踏み切った東北電力東新潟火力

# 未来は明るい！ 日本人は強い！

## 提言

1. 原子力の比率低下と火力発電の増加が予想される中で、化石燃料の安定確保は最優先の課題である---エネルギーセキュリティ無くして日本は成り立たない。
2. 火力発電の最優先課題は徹底した高効率化とクリーン化にある
3. 第1世代の蒸気タービン単独の時代から、今や第2世代のダブル複合発電の時代に完全に突入した。世界をリードするダブル複合発電、とくにIGCC商用機の建設を急ぐべきである。
4. 技術開発では第3世代のトリプル複合発電の開発実用化を急ぐべきである。
5. 世界中が欲しがら高度技術を持つことが、軍事力も資源も語学力もない日本が世界から尊敬され、真の国際貢献を行う唯一の解決策である。
6. 燃料については天然ガスに偏重することなく石炭の利用も重要。  
“一つのバスケットにすべての卵を入れてはならない”
7. 電力料金をいかに低く保つかは日本産業維持のためにも極めて重要である。しかし“安値がすべて”と刹那的な安売り競争に埋没し、建設的なアクションを怠れば産業基盤を危うくする。

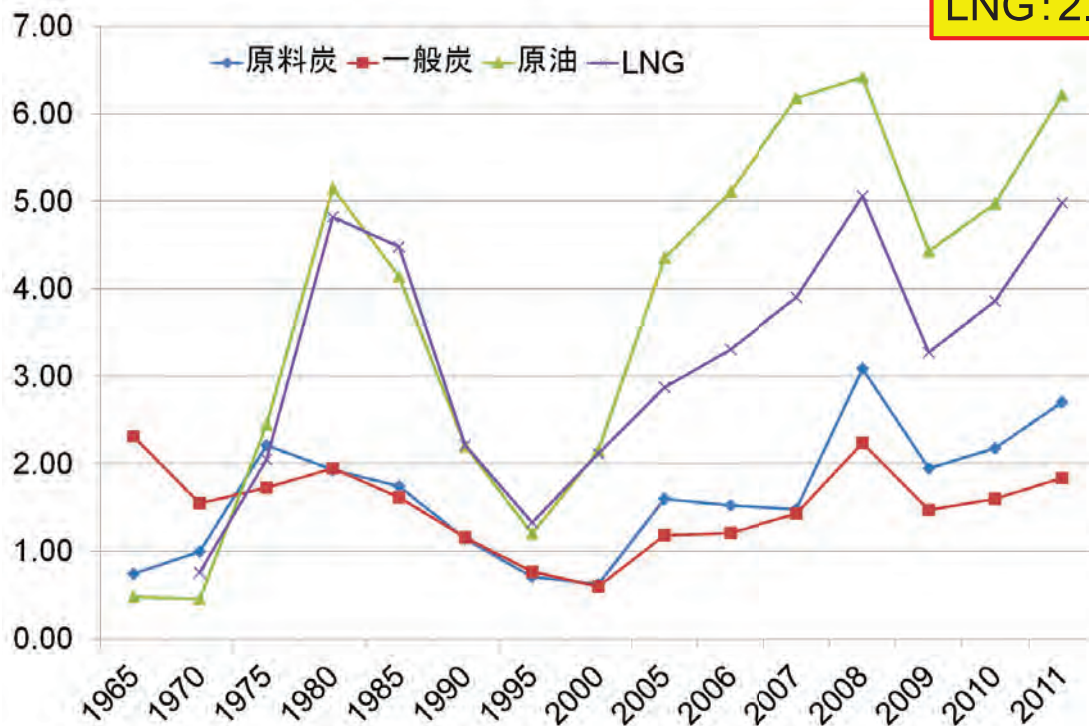
Thank you!

The End

## エネルギー源別価格(カロリー当たり)

石炭比:  
石油:3倍  
LNG:2.5倍

(円/千kcal)



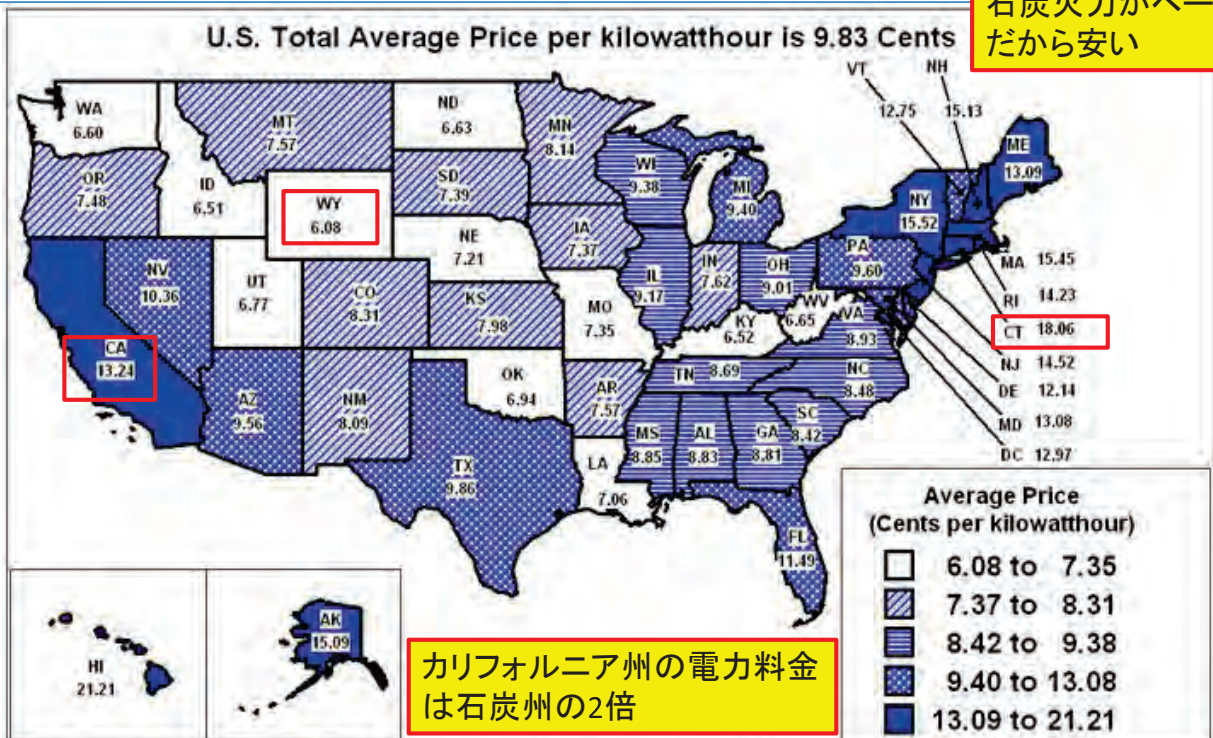
JCOAL 資料より作成

# 米国の石炭資源



## アメリカの電力単価 2009年

米国の電力料金は石炭火力がベースだから安い



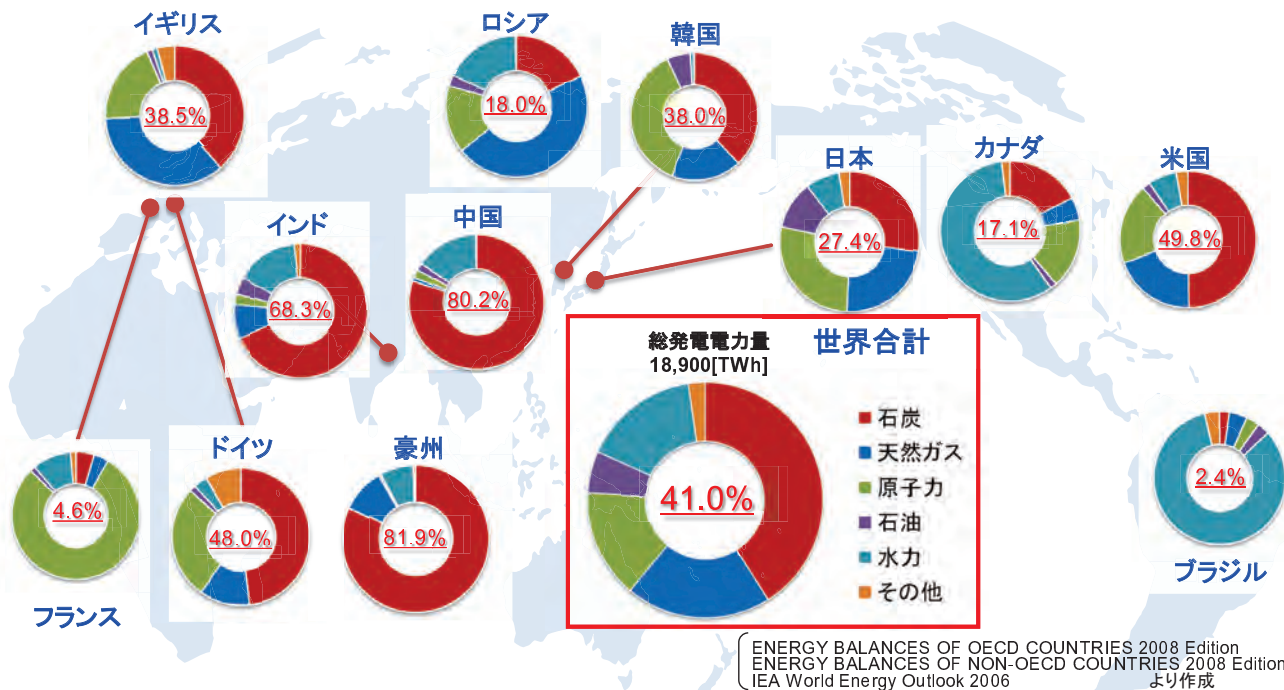
カリフォルニア州の電力料金は石炭州の2倍

Note: Data are displayed as 5 groups of 10 States and the District of Columbia.

Source: U.S. Energy Information Administration, Form EIA-861, "Annual Electric Power Industry Report."

出典: U.S. Energy Information Administration web site

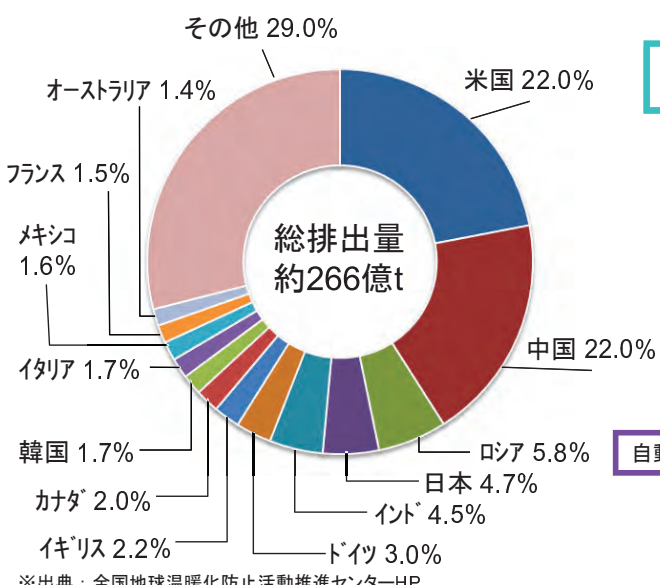
# 世界の主要国電源構成



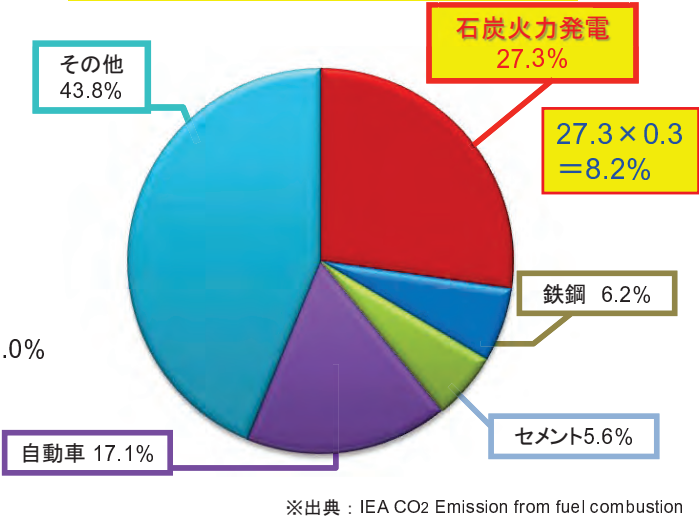
- 世界の電源構成に占める石炭火力の割合は40%
- 日本でも27%が石炭による発電
- 特に米国、豪州、中国、インドでは大半が石炭による発電

# 世界のCO2排出量

国別排出量内訳



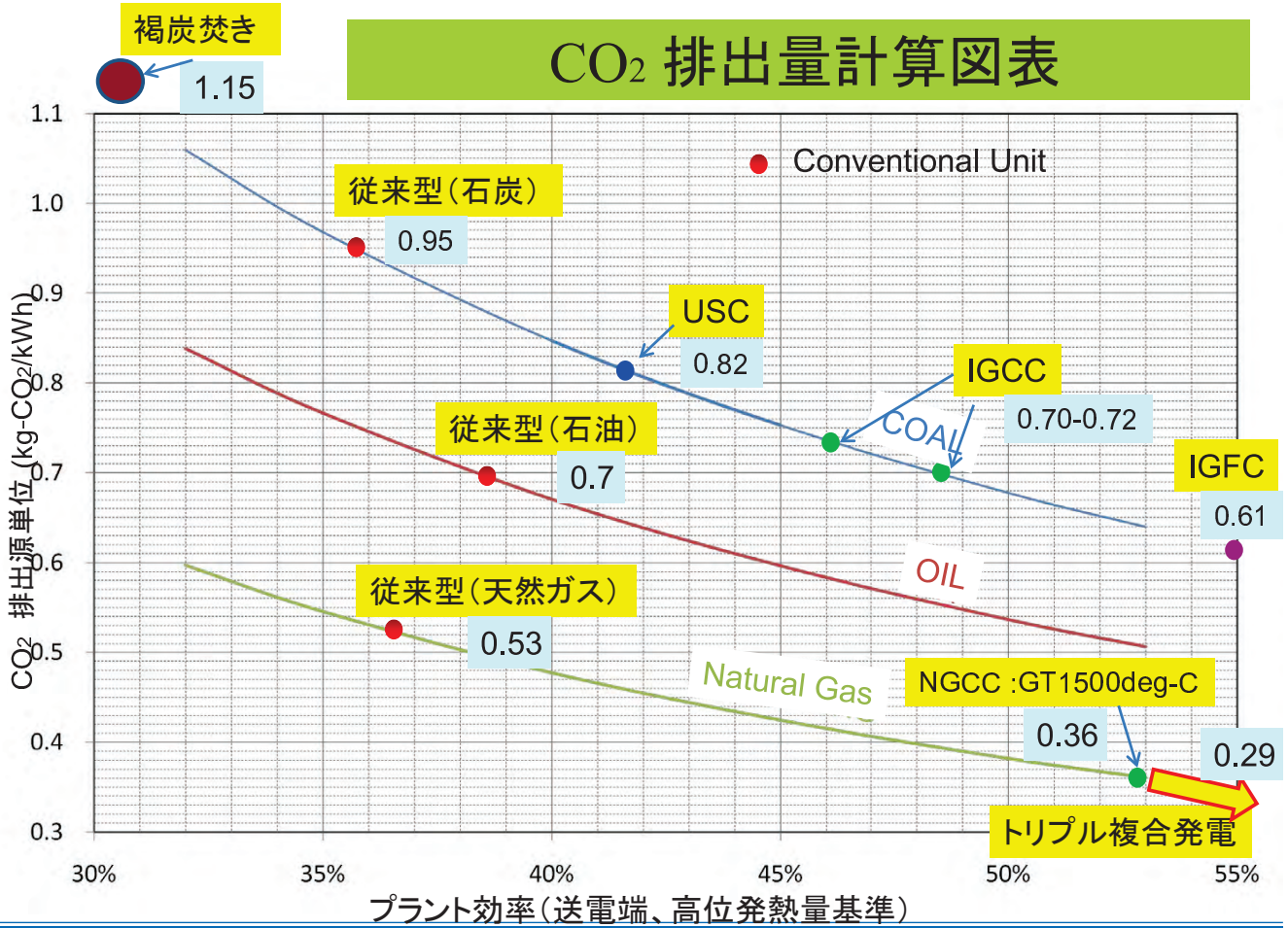
エネルギー起源CO2排出内訳



- 石炭火力発電の割合が多い米国、中国等はCO2排出量も多い
- 世界のCO2の約30%は石炭火力から排出
- 石炭火力の効率を30%向上できれば、日本の総排出量の2倍が減らせる

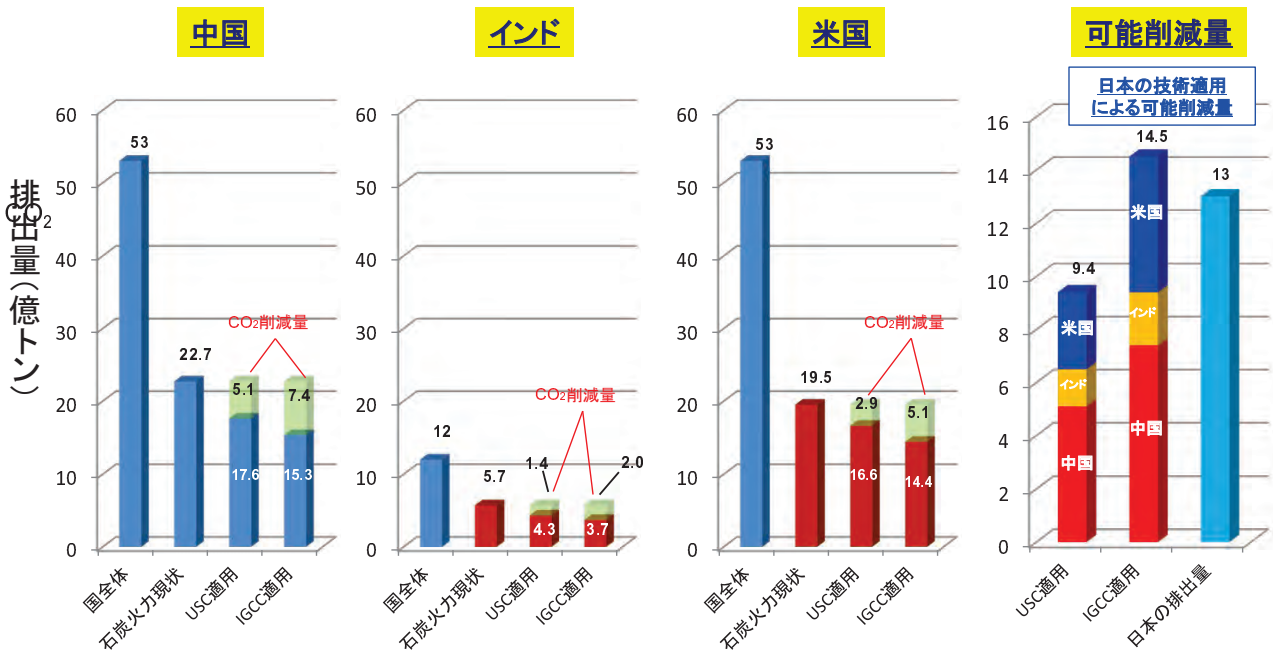


# CO<sub>2</sub> 排出量計算図表

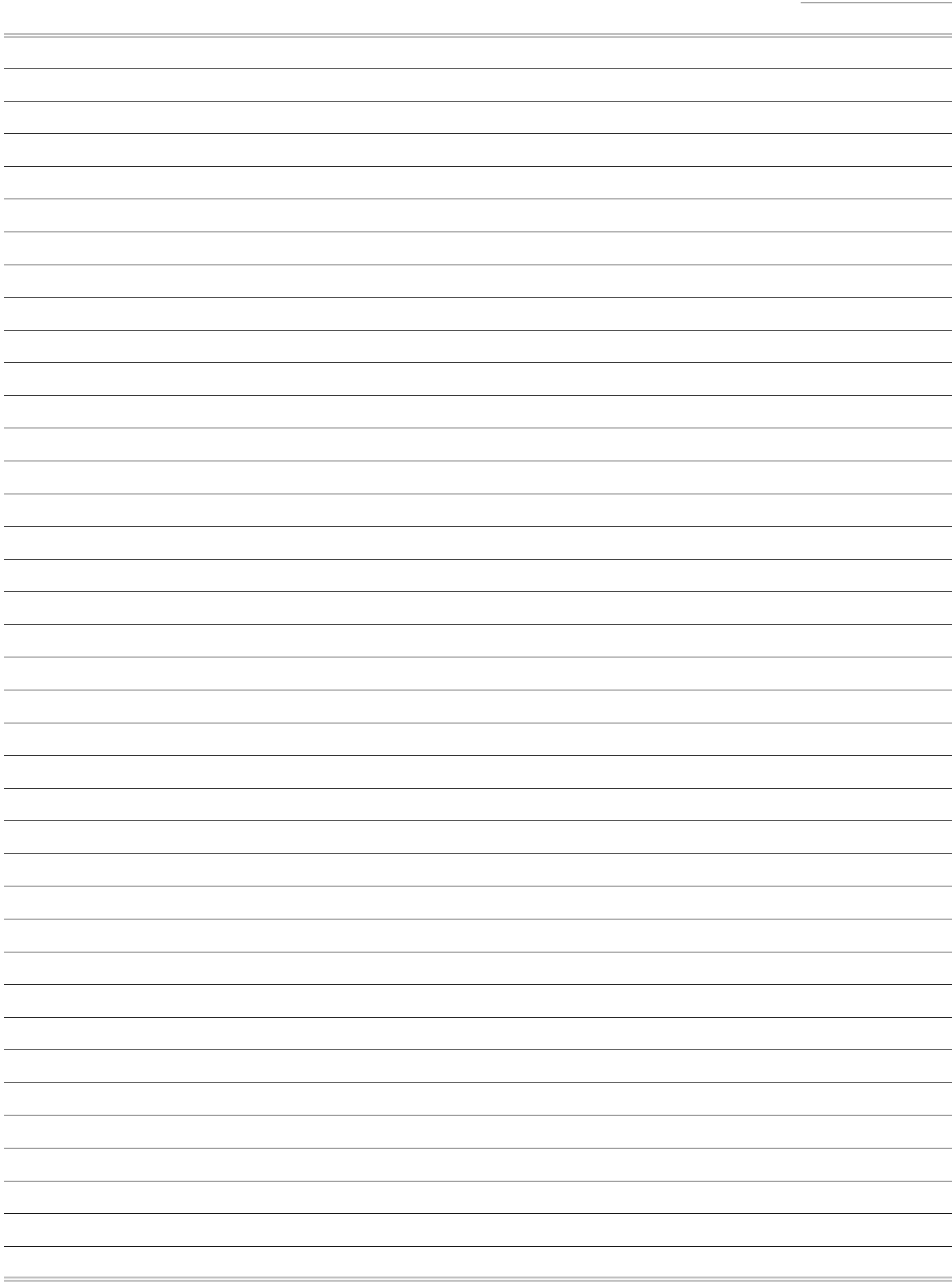


## 日本の石炭技術によるCO<sub>2</sub>削減の可能性

石炭高効率化の国際技術協力はIGCCさらにはIGFCが中心になる



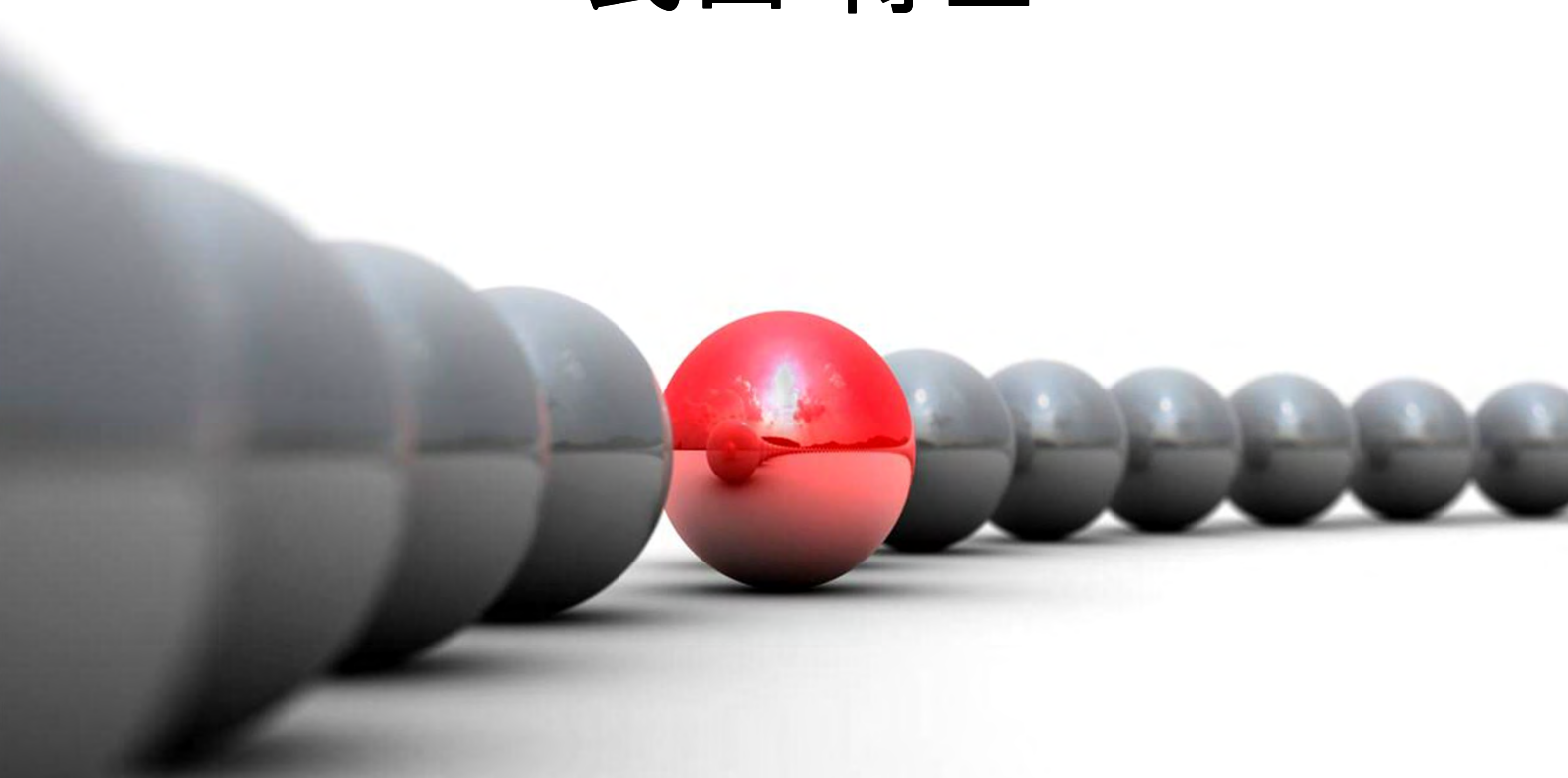
IGCCは高効率・低灰融点炭の多い中国・米国・豪州・インドネシアなどとの協力に有効!



# 原子力の役割と展望 について

東京工業大学 大学院理工学研究科  
原子核工学専攻  
特任教授

氏田 博士





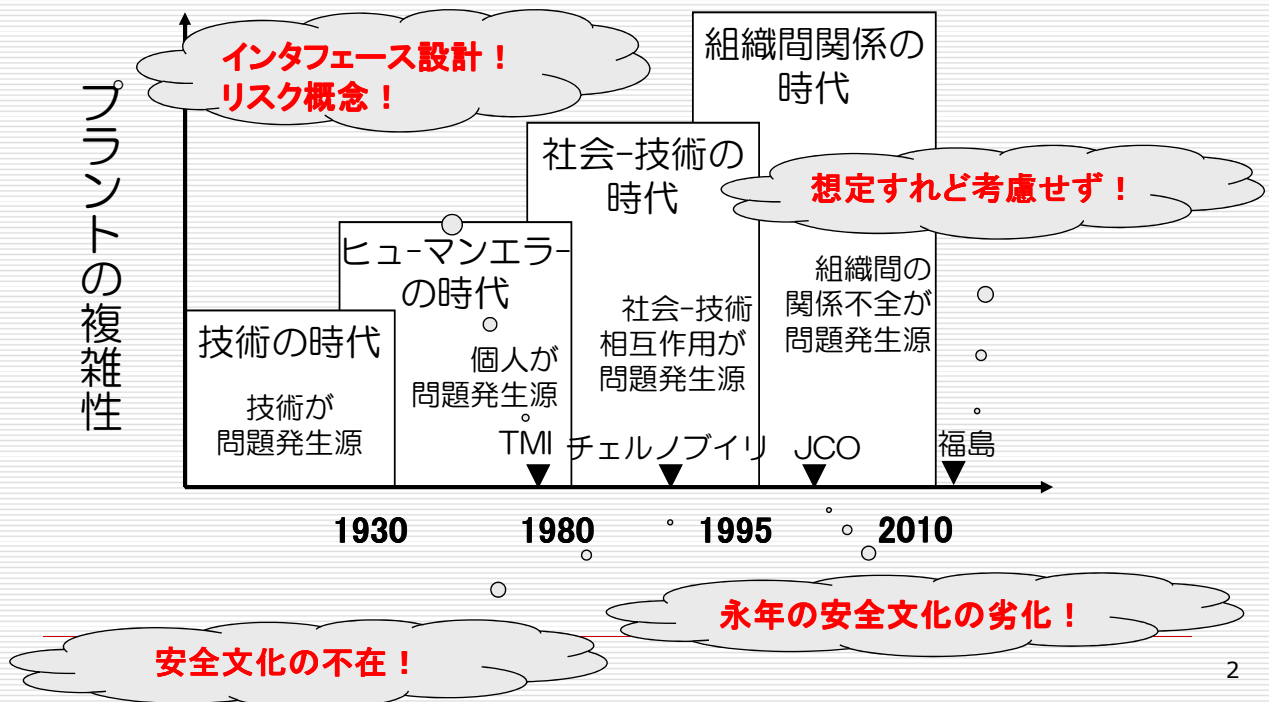
# 「原子力の役割と展望について」

- ・安全問題の考察
- ・原子力の研究開発動向
- ・エネルギーシステム予測

氏田 博士  
東京工業大学

1

## 安全問題のスコープの広がり (Reason, 1993)

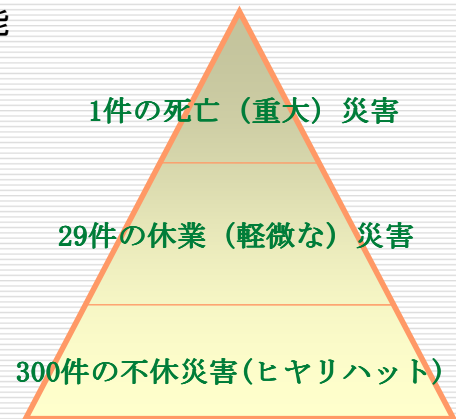


2

# 組織分析の新しい考え方

- レジリエンス
  - 柔軟で復元力がある
  - 複雑かつ変化していく環境に対する組織の適応能力
    - 「ISO 31000: リスクマネジメント—原則及び指針」
- レジリエンスエンジニアリング
  - システム環境は変化しても、破局的な状況を回避しつつ動作を継続させることを目的とする方策
  - 事故の予防に役立つ良好事例や事故の悪化を防止した行為や緊急時の柔軟な組織対応などの組織の良い点を更に強化
    - =ヒヤリハットの精神そのもの

「Heinrichの法則」: 労働災害の分野



3

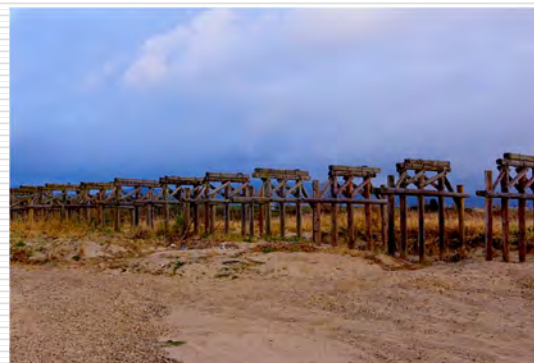
# レジリエンスの一例-流れ橋

- 日本やアイルランド、オーストラリアなどに見られる
- 固定されていない橋桁が洪水の際に流れてしまうことを想定
- 橋脚は流失せず、残された橋脚の上に新たに桁を架けることで簡単に復旧

「沈下橋」



上津屋橋 (木津川)



洪水によって橋桁が流された上津屋橋 4

# レジリエンスの能力による組織評価：福島第一1号機注水経緯分析

レジリエンスの能力		平時			有事			
		解析力			伝達力		実践力	
分析レベル		収集力	理解力	予測力	ネットワーク力 (情報発信)	コミュニケーション力 (影響力)	対応力(今ある 危機対応)	応用力 (抜本対策)
個人		・津波被害事故例	・津波被害のリスク認識	・電源喪失のリスク認識	—	—	・海水注入継続判断	・緊急時訓練
組織	現場	・事故例収集： 貞観津波	・地震・津波 PSA実施による影響範囲評価	・事故の大きさの認識	・現場の情報共有	・指揮系統(現場) ・免震棟での一元化 ・中装-緊対室連絡	・免震棟を緊対室として活用 ・消防車有効活用 ・淡水・海水注入 ・ベント操作	・指揮系統 ・津波対策 ・AM対策 ・被害の拡大防止
	管理部門	・事故例収集： 貞観津波、 JNES津波PSA、 ルプレイエ・マドラス炉浸水	・津波被害のリスク誤認識	・電源喪失のリスク誤認識	・本店/現場の情報共有	・TV会議システム(2Fも) ・本店-現場の指揮系統の乱れ		・免震棟設置 ・消防車配備 ・教育/訓練システム見直し
外部対応 (官邸、等)		・海外テロ対策事例収集：米国 9.11テロ-B.5.b.	・事故の重要性分類 ・地震・津波リスク誤認識	・外部事象の重要性 ・インフラ被害リスク誤認識		・メディア、地方自治体、海外広報 ・官邸/本店/現場の指揮系統の乱れ	・初期対応の遅れ ・政府指揮系統	・メーカ・協力企業・外部の支援 ・抜本対策：組織改革(規制/電力) ・保険制度見直し

・ 緑は良好事例、赤は失敗事例

・ 東京電力(株)、「福島原子力事故調査報告書」、H24.6.

・ 林 志行著「事例で学ぶリスクリテラシー入門」

5

## 考察 (成功と失敗)

- ・ レジリエンスの好例 レジリエントシステム !
  - ・ 事故例やリスク評価の知見の有効性
    - ・ 海水注入継続判断(個人ベース)
  - ・ 中越沖地震の経験を反映
    - ・ 免震棟・消防車有効活用(組織ベース)
  - ・ 指揮系統(組織ベース)
- ・ 組織としての学習(フィードバック)システムの確立 !
- ・ 組織学習の失敗、リスク認識の誤謬
  - ・ 津波被害・電源喪失のリスク誤認識(国家レベル、業界ベース)
  - ・ 危機管理対応の不手際(国家レベル、業界ベース)
- ・ 太平洋戦争の軍事的失敗から日本の組織の本質は不変
  - ・ 「失敗の本質」(戸部、野中、等)：非合理性では、対策が抽出困難
  - ・ 「組織の不条理」(菊澤)：限定合理性で説明すべき
- ・ 限定合理性を破壊する-命令違反を許容するシステムの確立 !
  - ・ 海水注入継続判断

6

# 福島第一事故 2011

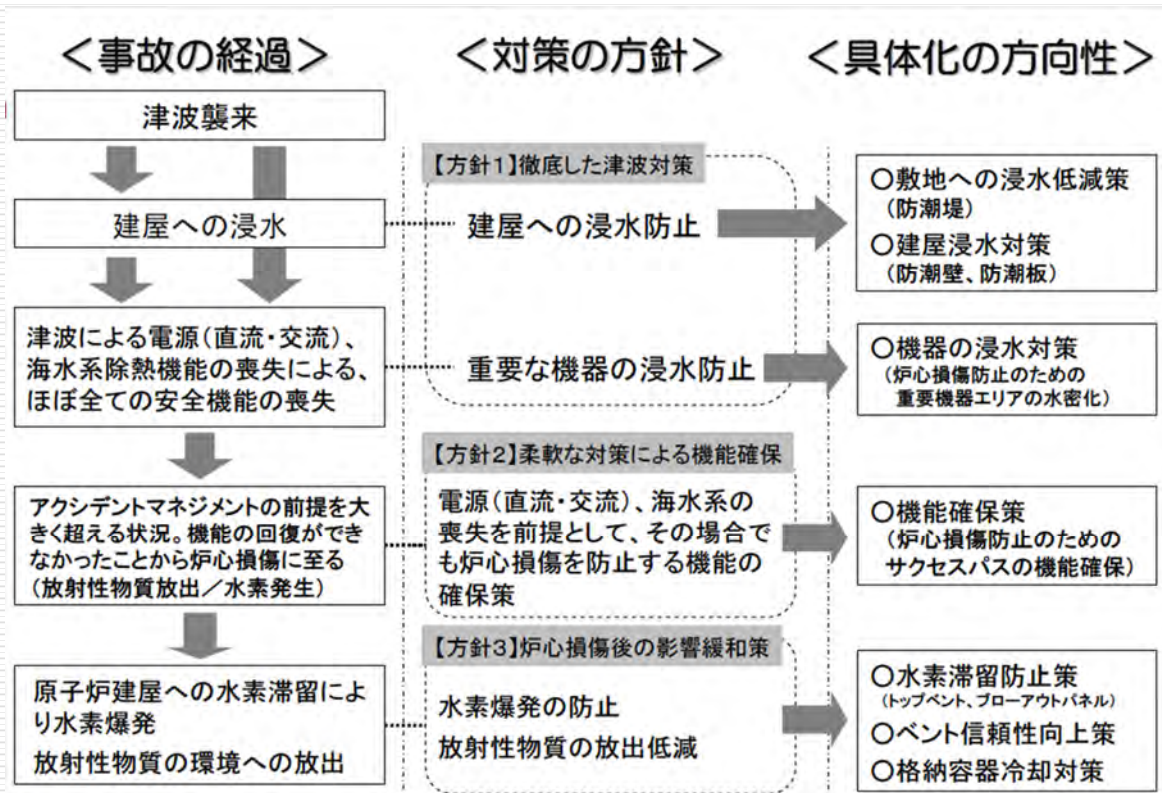
## 地震と津波による原子力発電所の状況

プラントの位置	原子炉数	地震後	津波後	津波の高さ
東通り	1	冷温停止	冷温停止	---
女川	1-3	自動緊急停止	冷温停止	設計: 9.1m 地盤高: 13.8m (実効高: 13m)
福島第一 (1F)	1-3	自動緊急停止	冷却材喪失	設計: 5.7m 地盤高: 10m (1F1-4)
	4-6	冷温停止	冷温停止	13m (1F5&6) (実効高: 14-15m)
福島第二 (2F)	1-4	自動緊急停止	冷温停止	設計: 5.2m 地盤高: 12m (実効高: 6.5-7m, Locally >14m)
東海第二	—	自動緊急停止	冷温停止	地盤高: 8m (実効高: 5.4m)

想定すれど考慮せず！

7

## 事故の経過と対応方針の関連





# 安全思想(深層防護)の再構築

リスクマネジメント: 1.安全想定

危険

レジリエントシステム !

リスクマネジメント:  
2.安全社会システム

最終的な  
ソフトバリア:  
危機管理

可動式冷却装置、  
ベントシステム、  
水源の多様性

シビアアクシデント対策  
(コアキャッチャー、PCVベント)

第3世代以降原子炉

建物の  
配置と設計  
電源供給の多様性  
長期冷却システム  
(動的・静的機器)

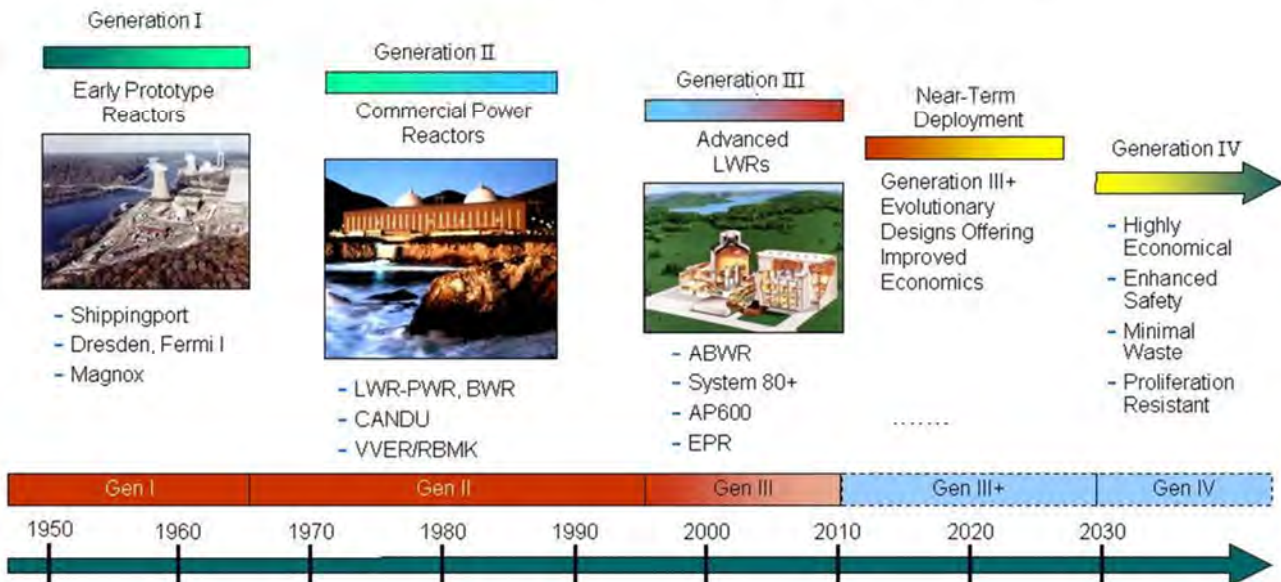
深層防護の誤謬-安全文化の劣化-組織事故  
の連鎖を断つ

- 3.安全設計(ハードバリア)の再構築
- 4.安全運用(ソフトバリア)の確立

9

## 原子炉の研究開発動向 Gen. IV International Forum

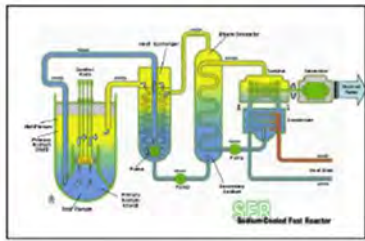
**Generation IV:** Nuclear Energy Systems Deployable no later than 2030 and offering significant advances in sustainability, safety and reliability, and economics



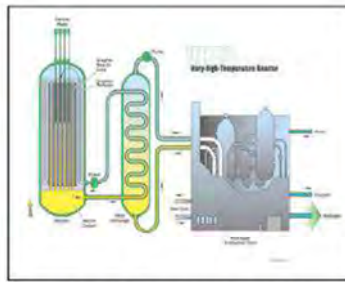
10

# Gen. IV International Forumにおける研究開発 (安全性、経済性、核不拡散、廃棄物消滅、熱効率、水素製造、増殖、トリウム)

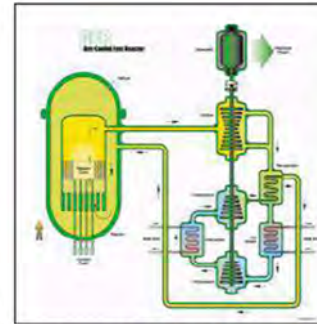
## 水素製造



Sodium-cooled Fast Reactor (SFR)



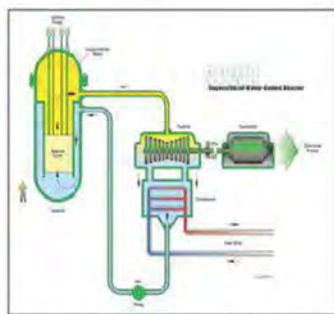
Very High Temperature Reactor (VHTR)



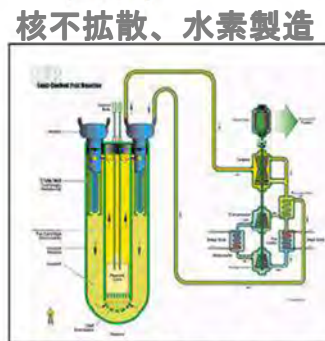
Gas-cooled Fast Reactor (GFR)

熱効率

増殖

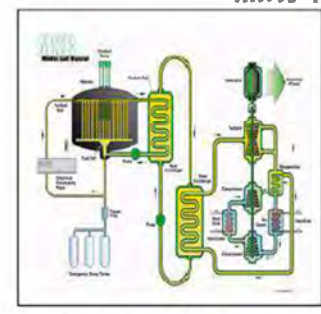


Supercritical Water-cooled Reactor (SCWR)



Lead-cooled Fast Reactor (LFR)

核不拡散、水素製造



Molten Salt Reactor (MSR)

熱効率

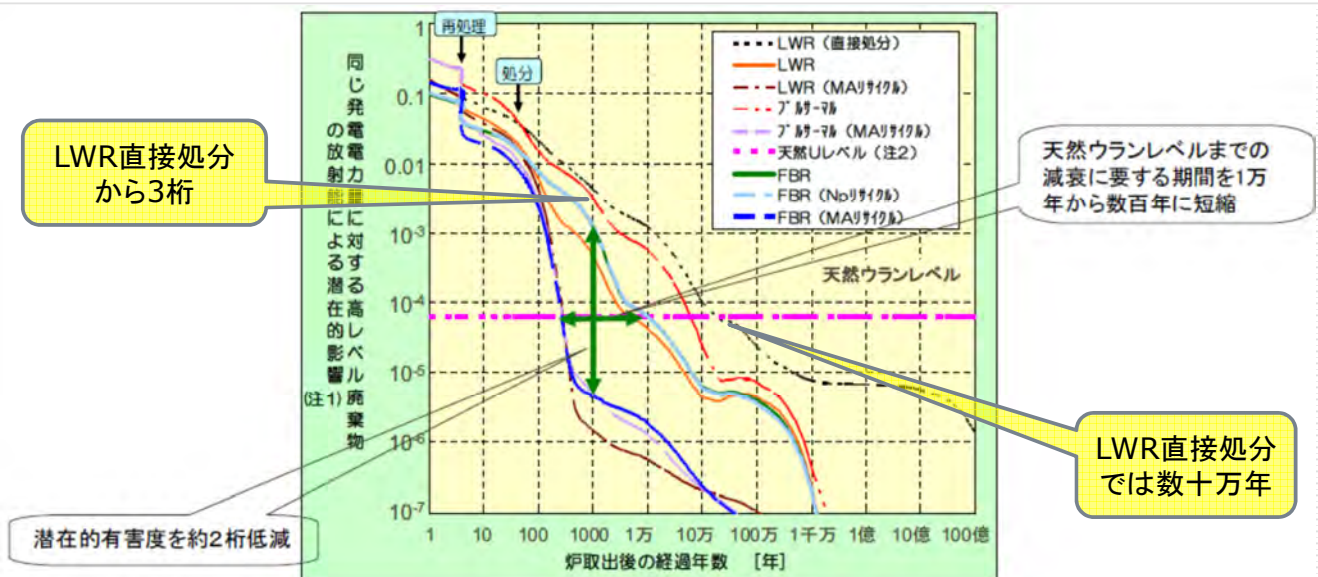
熱効率

# SMR (Small Modular Reactor) 研究開発: 静的安全、分散電源、核熱利用、産業・暖房

11

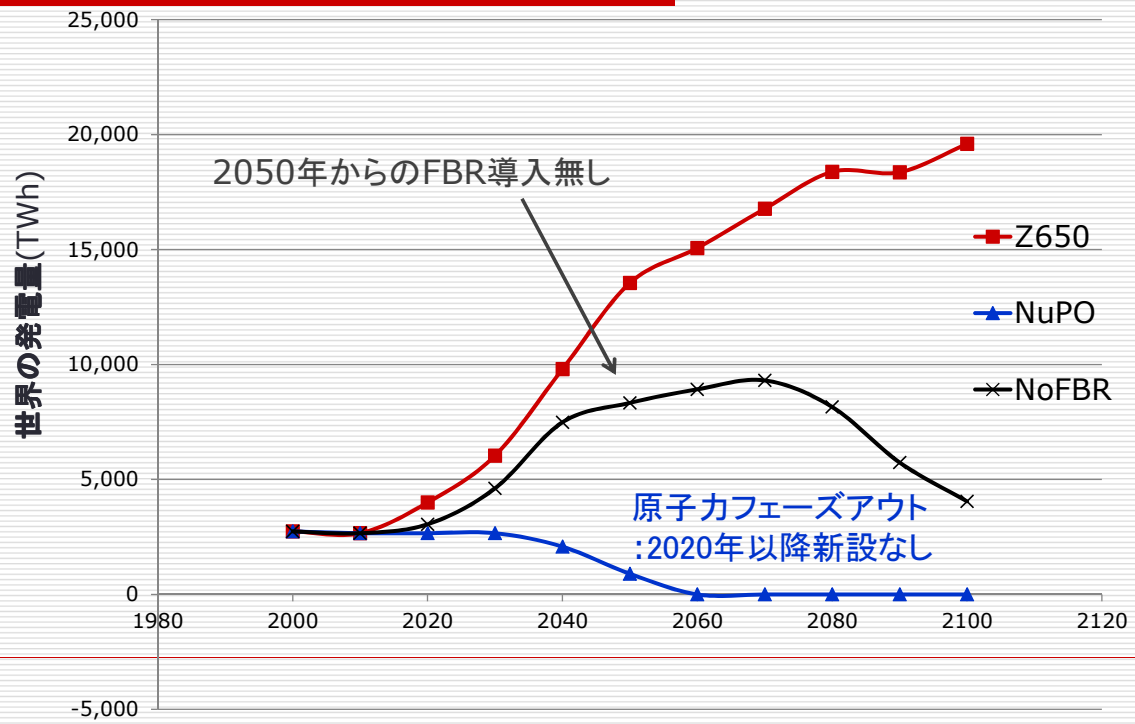
## 核燃料サイクルにおける消滅処理の意義

- ・発電炉(高速炉)内でMAを核変換
- ・核変換専用システム(加速器駆動システム: ADS 等)



MA: マイナーアクチナイド

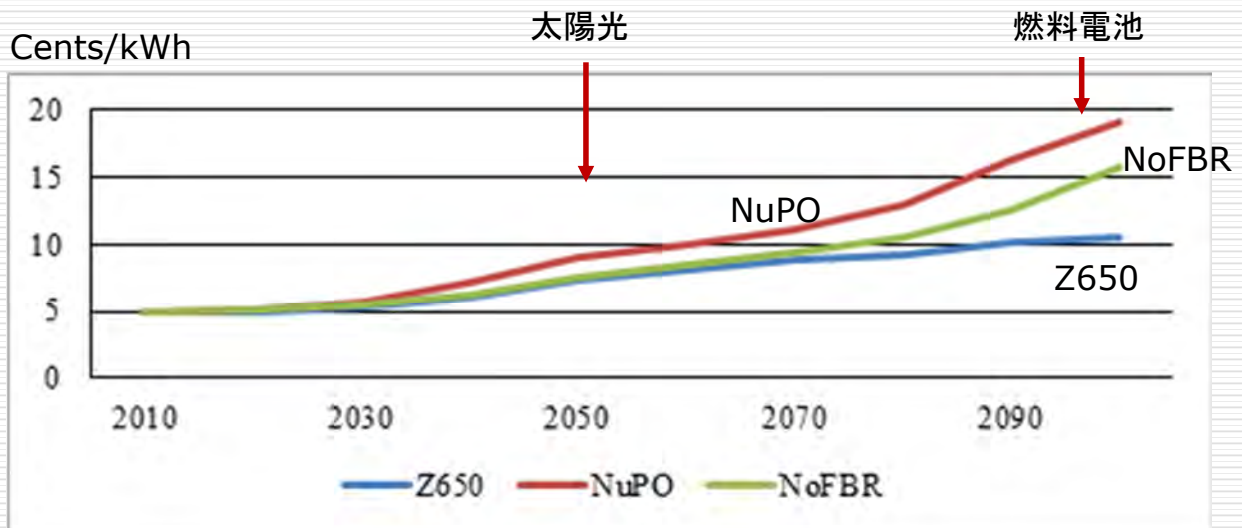
# エネルギーシステム予測 原子カフェーズアウト(NuPO)とFBR無(NoFBR) -世界の発電量



13

# 原子カフェーズアウト(NuPO)とFBR無(NoFBR) -発電コスト

原子カフェーズアウトは温暖化対策の社会的コストが増加

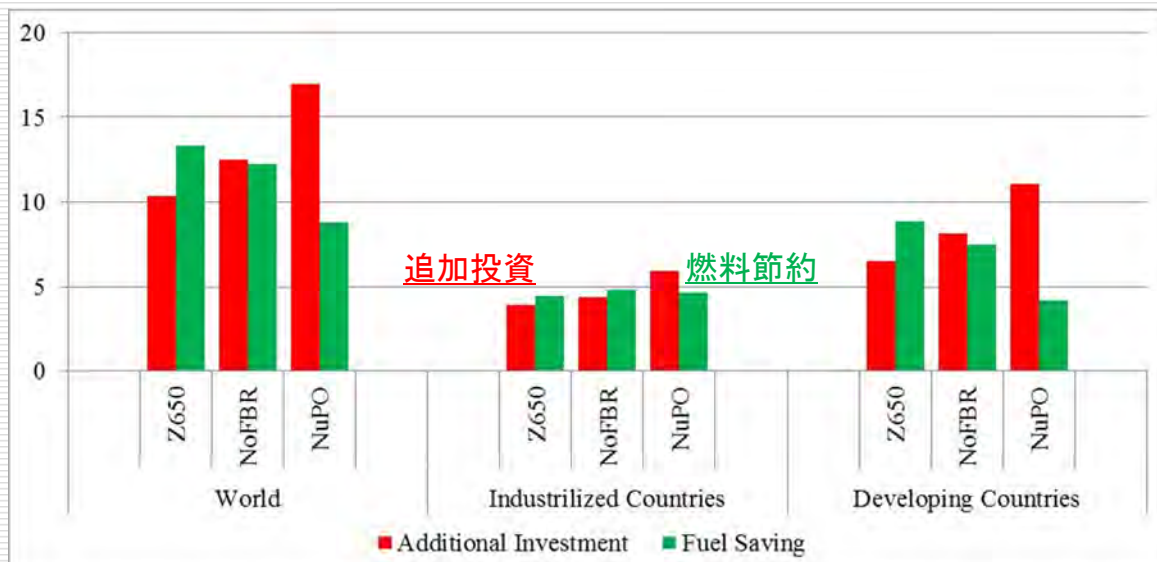


14

# 原子カフェーズアウト(NuPO)とFBR無(NoFBR) -発電コストとベネフィット

- ・原子カフェーズアウトでは、追加投資が増加し燃料節約が減少
- ・特に発展途上国で顕著

T\$ (2010年から2050までの累積)



世界

先進国

発展途上国

15

## 原発停止の日本経済へ影響

### 電力制約なし(原発あり)ケースと比較(2012年度)

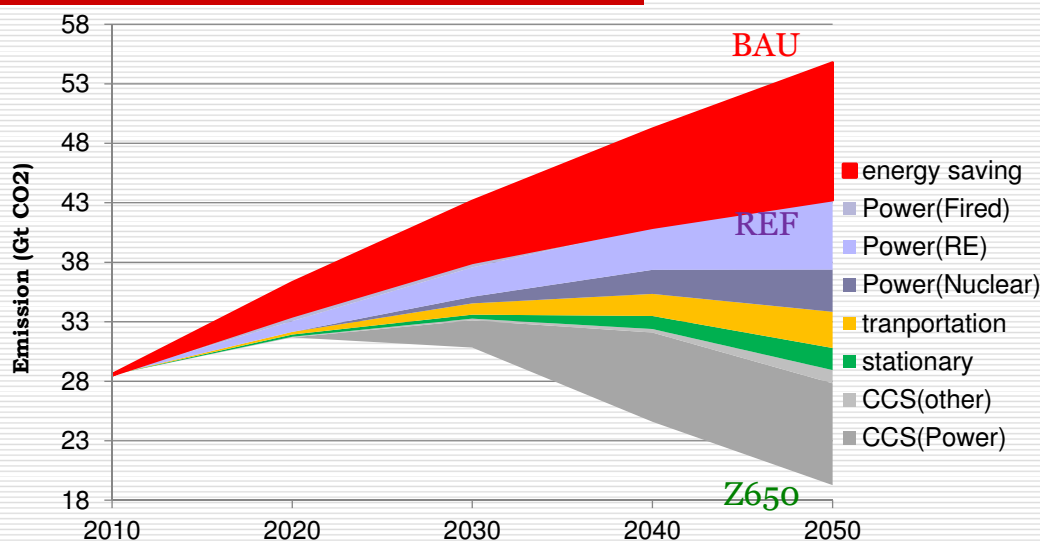
- ・GDP: 1.8%ポイント減(9.1兆円減、年度ベース)
- ・鉱工業生産指数: 3.4%ポイント減
- ・失業者数: 10万人増
- ・化石燃料輸入増: 2.0兆円増
- ・発電用燃料増: 2.3兆円増(2.5円/kWh相当)

# 福島第一事故後のエネルギーの課題と原子力の役割

- 「地球温暖化問題とエネルギーセキュリティの課題は不変！」
- 原子力フェーズアウトのシナリオは、地球温暖化問題を考慮しても成立するが…
  - (21世紀のエネルギー予測シミュレーションから)
    - エネルギーコスト倍増
    - 技術的な課題と不確定性の解決が前提(再生可能エネルギーの間歇性、等)
- 原子力を合理的に使うポリシーを明確に
  - それぞれの国の意思決定の問題
  - 中国、インド、ASEAN諸国は導入継続か
  - 日本やいくつかの欧州の国はフェーズアウトも有りえる
  - 日本がフェーズアウトするなら、理由を明確に(地震+津波だから)
- もう一度どこかで事故が起これば、世界的なフェーズアウトになる
- 世界で、統一的で合理的な安全基準(体制、規制・設計・運用)を見直すべき
- 日本が率先して 福島第一事故の分析と検証からその知見を世界に発信すべき

17

## エネルギーシステムの在り方 セクタごとのCO<sub>2</sub> 排出量削減

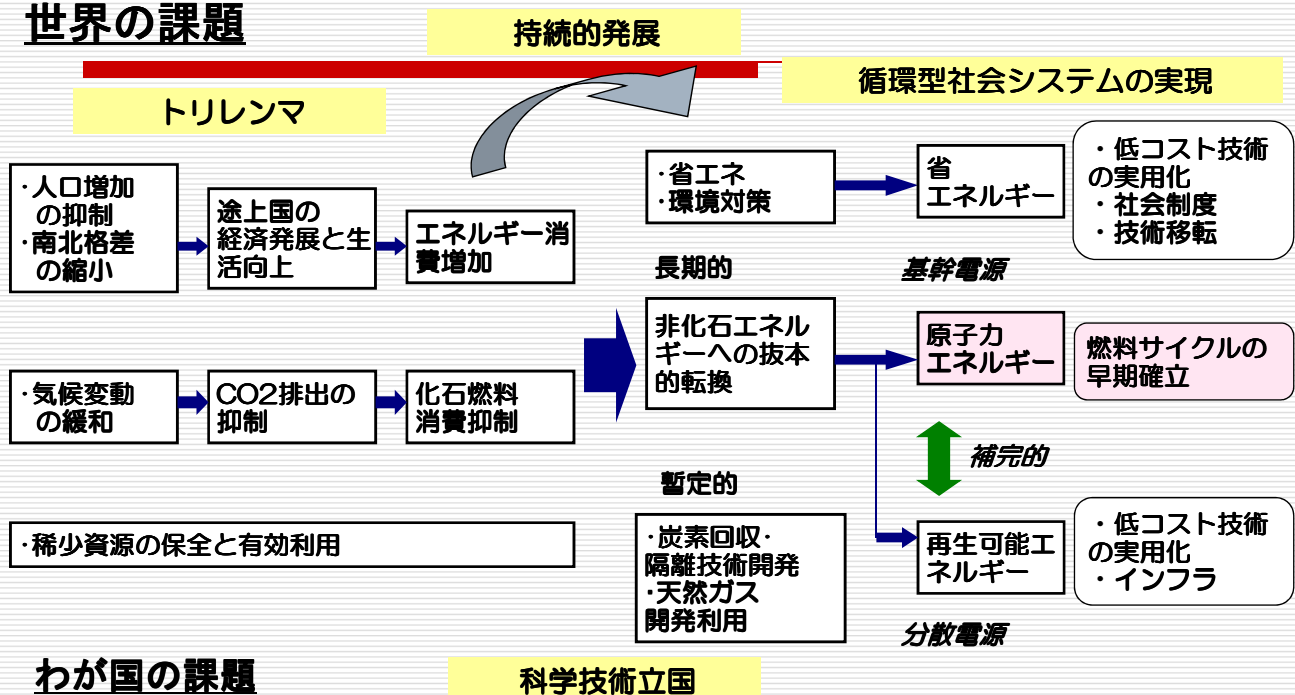


- まず重要なことは省エネルギーである
- 主要なセクタは発電部門で、2030年と2050年でそれぞれ70%と45%の削減に寄与する
- 内訳は、再生可能と原子力で30%と15%
- CCS (炭素回収隔離、Carbon Capture and Storage) は2040年以降30%以上の寄与
- 輸送部門の寄与は、全体の10-15%

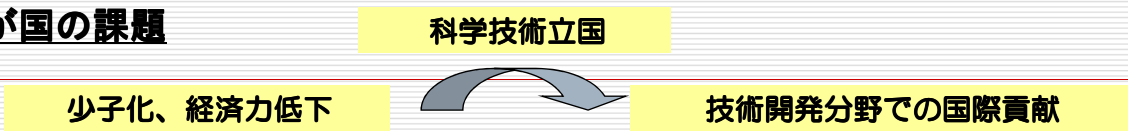
18

# 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



## わが国の課題



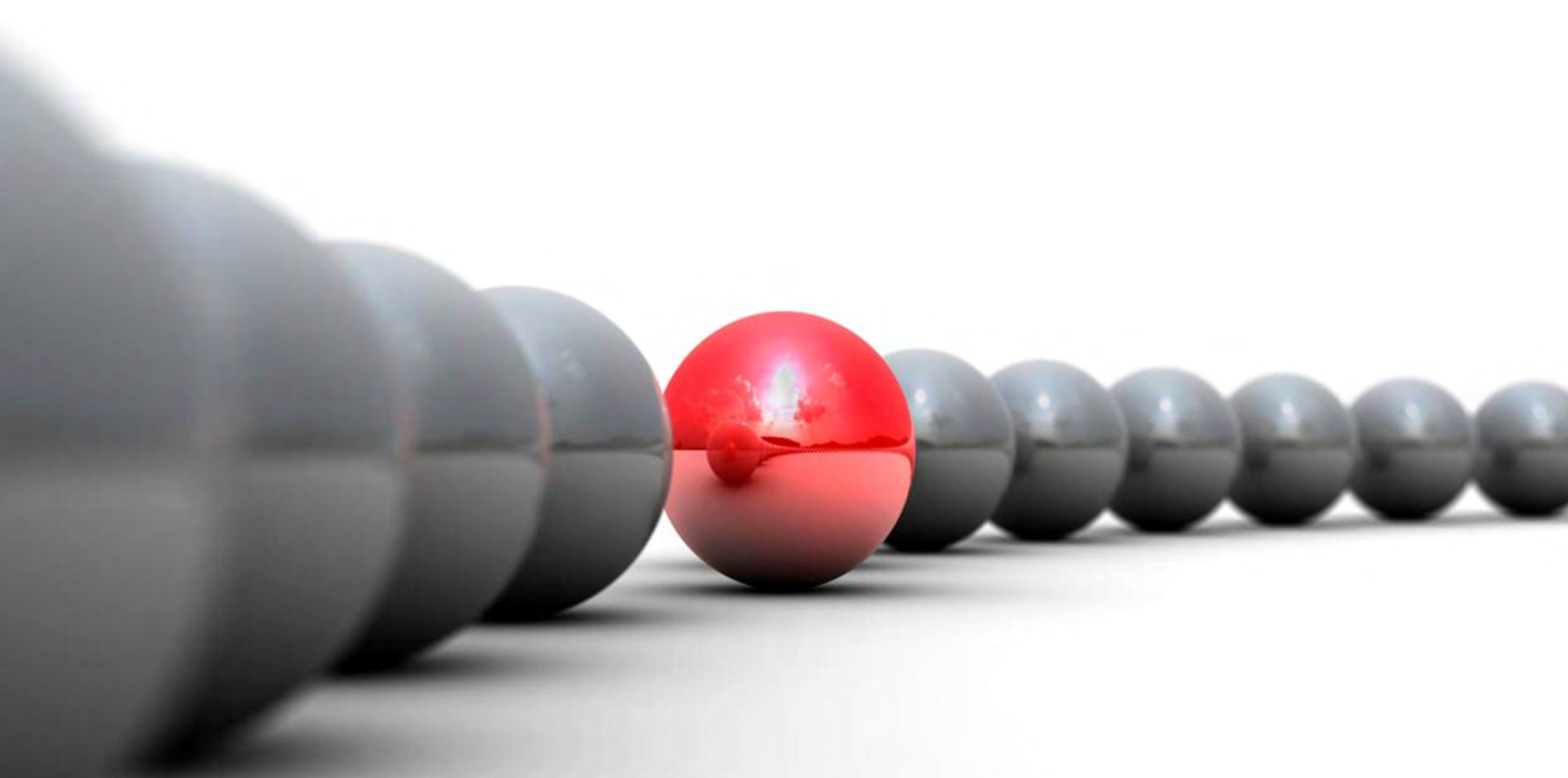
# まとめ

- ・ 原子力はレジリエントシステムであり、かつ安全思想の再構築により更なるレジリエント化を図りつつある
- ・ 安全性向上、利便性向上など新たな原子炉概念また消滅処理技術などの革新的研究開発が進められている
- ・ 地球温暖化とエネルギーセキュリティを考慮すれば、原子力は必須のエネルギー源である
- ・ 将来世代のために、省エネルギー、再生可能エネルギー、原子力、化石エネルギーの炭素回収隔離、の総ての技術開発が必要

# 地球温暖化抑制に おける日米中協力について

キヤノングローバル戦略研究所  
主任研究員

段 烽軍







# 世界ビジョン実現における日本の役割と貢献 日米中協力について

キャノングローバル戦略研究所  
段烽軍

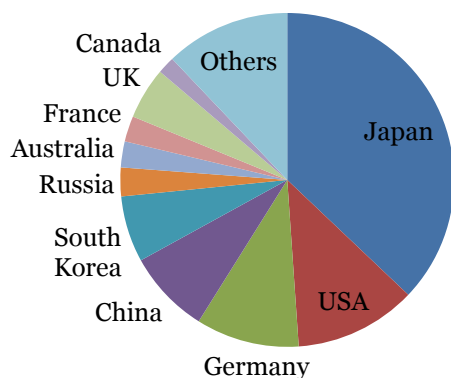
1

## 日本の役割と貢献

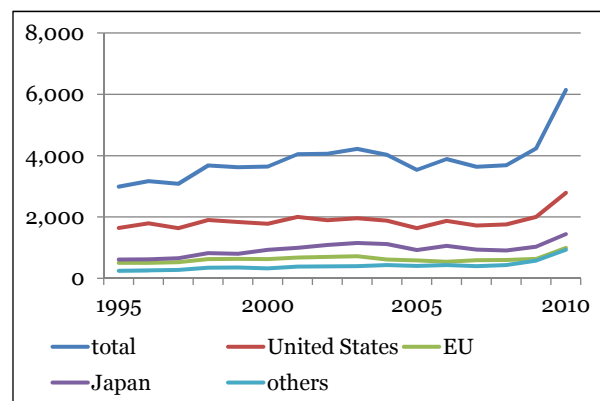
### -国内削減分

2005年比で、2030と2050年にそれぞれ20%と50%削減

### -優れる環境技術の海外普及により国際貢献



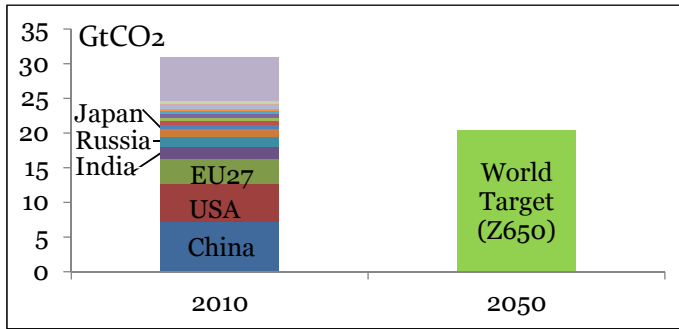
世界のCO<sub>2</sub>削減技術開発状況(2000-05)  
(A. Dechezlepretre, et al., 2009)



米国特許の国別発明数(USTOP)

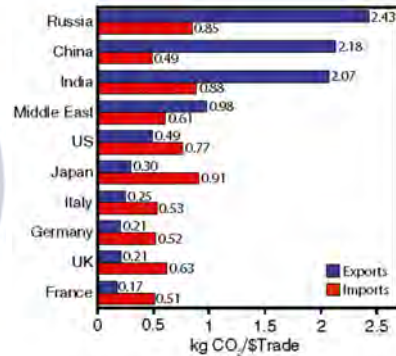
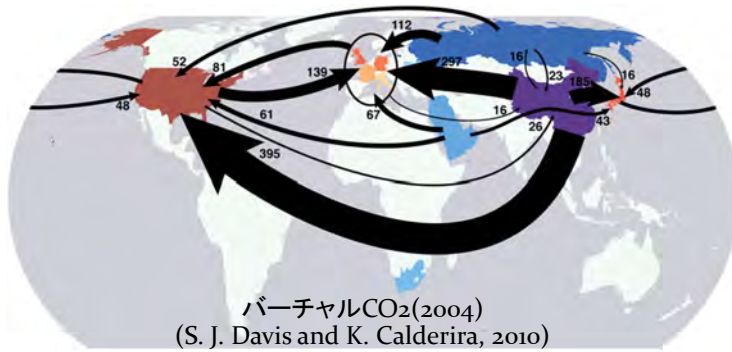
2

# どこと協力するか



世界のエネルギー起源CO<sub>2</sub>排出量(2010年)(IEA, 2012)

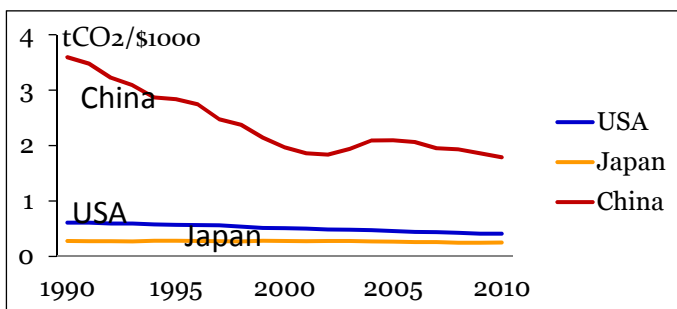
TOP15で、80%  
TOP6で、2050年世界ビジョンに相当  
中米欧で、半分強(53%)  
中米で、41%



最大の技術大国に相応しいのは、トップ排出国の中国と米国である

3

# 効果が期待できるか



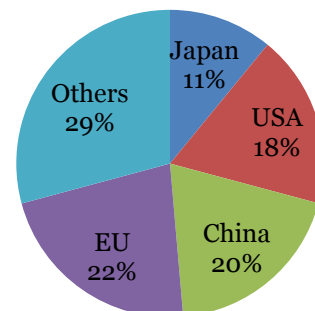
GDP当たりCO<sub>2</sub>排出量  
(IEA, 2012)

2010年、日本の排出原単位は  
米国水準の6割  
中国水準の14%

主要製造業のエネルギー原単位

	日本	米国	中国
粗鋼(2005)	100	130	123
クリンカ(2005)		133	157
紙・板紙(2004)		144	202(2007)
銅(2000)		154	122(2007)
石油製品(2004)		113	151(2007)

出典: RITE、Ecofys、IEEJ、ERIなど



世界製造業構成  
(NSF, 2012)

4

# なぜ協力するか

## -環境危機の回避

中国と米国における行動と日本の環境技術が不可欠

## -エネルギーセキュリティの確保

日本の省エネ技術と米国の資源開発技術は、日中のエネルギーセキュリティの鍵

## -産業競争力の維持・向上

製造業、エネルギー・環境産業

## -国際貢献

資源争奪戦の回避→アジア太平洋地域の安定  
途上国支援(ローカーボン成長方式の確立)

5

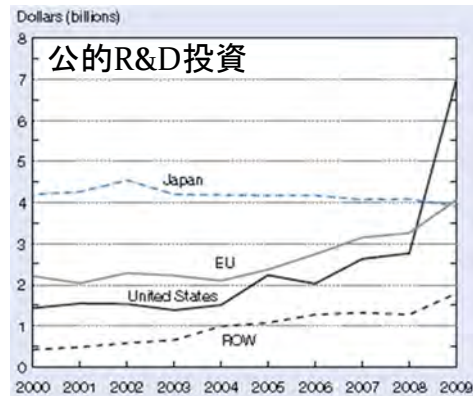
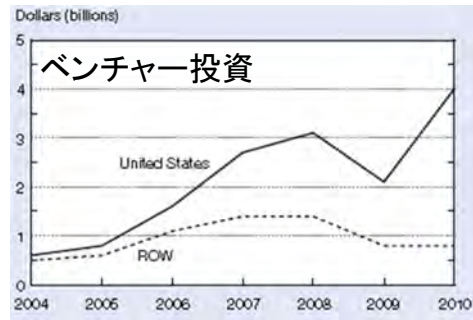
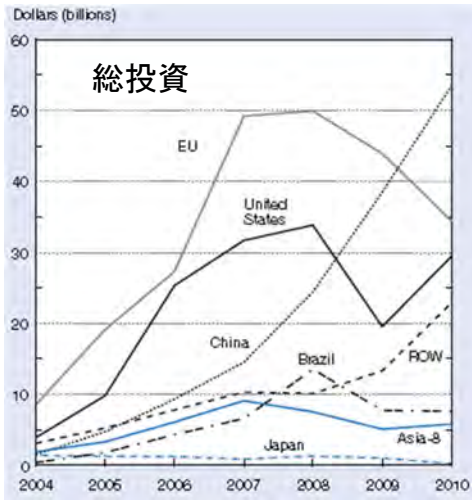
# WIN-WIN協力可能か

	China	Japan	United States
Resources Potential	△	×	○
Technology Capacity	×	○	△
Human Resources	○	×	△
Economic Capacity		○	

6

# WIN-WIN協力可能か

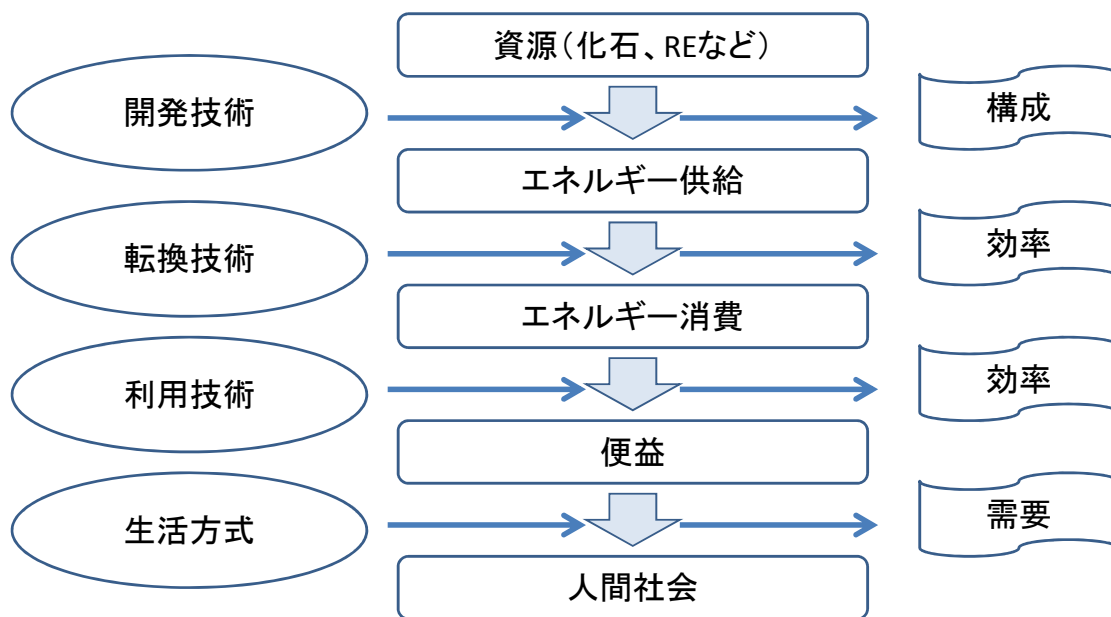
クリーンエネルギー産業と技術投資 (NSF, 2012)



日本: 基礎技術開発  
 米国: 実用技術開発  
 中国: 産業化

7

# エネルギーシステム



8

## 日米中の比較(2010年)

	日本	米国	中国
資源	RE	石炭、石油、 ガス、RE	石炭、RE
エネルギー構成 化石:再生:原子力	83:5:12	83:8:9	92:7:1
転換技術	石炭火力 天然ガス火力 原子力	石炭火力 天然ガス火力 原子力	石炭火力 RE
発電効率(%)	40	32	35
エネルギー消費効率(%)	50	59	49
産業	59	80	48
民生	65	80	68
運輸	18	25	28
一人当たり便益(toe/capita)	1.33	3.40	0.56

9

## 日米中の比較(2010年)

	日本	米国	中国
人口(世界の%)	1.87(11)	4.54(4)	19.71(1)
GDP(世界の%)	8.99(3)	25.55(2)	7.96(4)
エネルギー消費(世界の%)	3.89(6)	17.36(2)	19.35(1)
エネルギー効率	高	中	低
CO2排出(世界の%)	3.69(6)	19.34(2)	23.44(1)
CO2原単位	低	高	高
国際分業における位置付け	消費者 生産者	生産者 消費者	おもに 生産者
CO2削減技術力	高	中	低
資源賦存	×	○	△

10

## 協力分野、内容とアウトプット

	日本	米国	中国
クリーンエネルギー生産	RE	石油・ガス	RE
	ベストエネルギーミックス		
クリーン高効率 エネルギー転換	化石、原子力	原子力、RE、 CCS	原子力、RE、 CCS
	ゼロエミッション電源		
エネルギー消費効率向上	産業、民生	民生	交通
	エネルギー総合効率		
グリーンライフスタイルの確立	高度技術	社会システム	Reverse Innovation
	途上国の近代化モデル		

11

## 世界ビジョン実現のために (モデル計算より)

Target	United States		Japan		China	
	2030	2050	2030	2050	2030	2050
CO2 Emission (Ratio to 2005 levels)	0.96	0.47	0.79	0.47	1.48	0.82
Emission Intensity (tCO2/GDP)	0.28	0.09	0.12	0.06	0.40	0.12
Energy Intensity (TOE/GDP)	0.12	0.09	0.05	0.04	0.20	0.13
Energy Mix (FF: NE: RE)	8: 1: 1	5: 2: 3	7: 2: 1	6: 2: 2	6: 2: 2	4: 3: 3
Power Generation (FF: NE: RE)	7: 2: 1	3: 4: 3	4: 4: 2	3: 4: 3	4: 3: 3	2: 4: 4

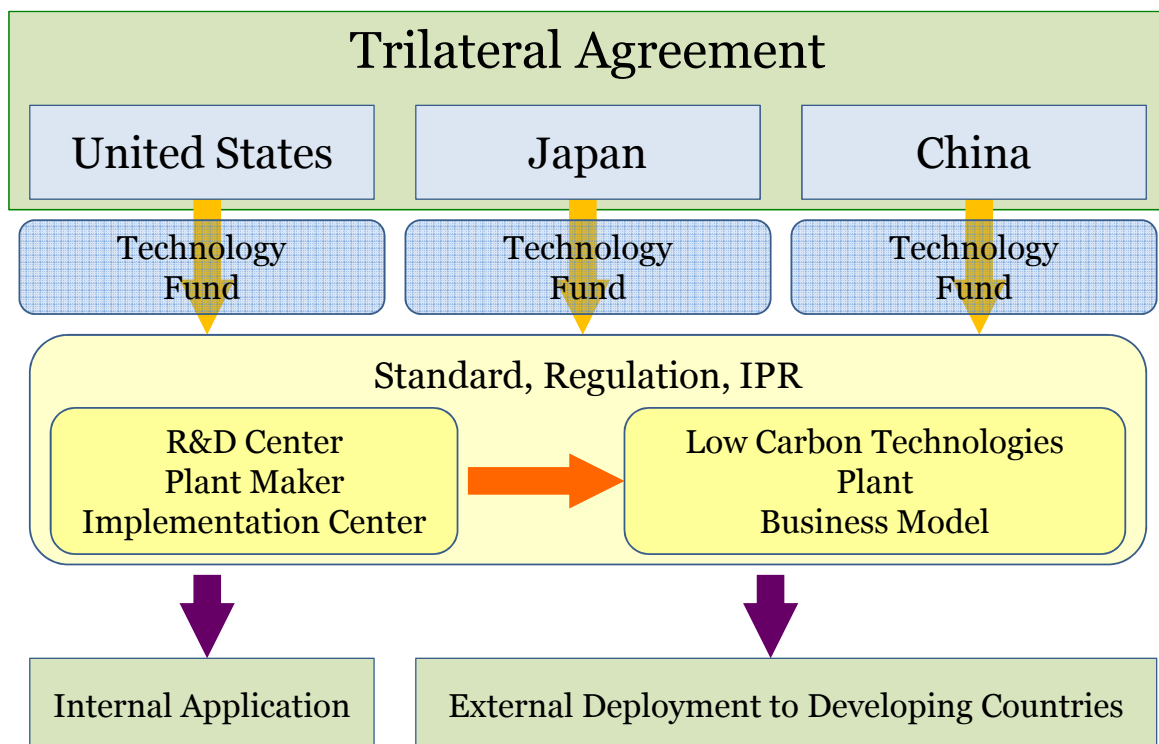
12

## 二国間協力の現状と限界(1)

	日中	米中	日米
政府間協定	気候変動コミュニケ (2008) 省エネ環境協力メモラ ンダム(2008)	エネルギー環境協力十 年フレームワーク (2008) クリーンエネルギー協 定(2009) 共同声明(2013)	共同声明(2007) アクションプラン (209) ファクトシート(2013)
実施体制	政府間対話 民間協力	政府間対話 シンクタンク交流	政府間対話 研究機関協力
実施内容	技術協力 プロジェクト実施	戦略制定 政策交流	研究開発
特徴	ビジネス志向	政策(政治?)志向	開発志向
限界	戦略性	実効性	普及性

13

## 期待する協力方式



14

## まとめ

- 日本は、地球温暖化抑制の世界ビジョンの達成に貢献するために、実現不可能に近い国内削減目標の設定より、高い技術力を持って積極的に国際協力をリードすべき。
- 温暖化抑制に向けて、日米中に相互依存と相互補完関係があり、三カ国協力により、環境危機を回避できるのみならず、エネルギーセキュリティの確保、産業競争力の維持向上にも貢献でき、さらに国際貢献もできる。
- 日米中協力より、自国の資源条件に適した調和型エネルギーベストミックスを実現し、途上国に普及できる低炭素成長方式を確立すべき。
- 既存の二国間協力の限界を超え、戦略性・実行性・普及性を備える協力方式を確立すべき。
- 政府間合意に基づいて、技術開発・実証・産業化・普及とのフルプロセスを推進できるインフラの構築が協力のベースになる。











キャノングローバル戦略研究所  
The Canon Institute for Global Studies

