

# 地球温暖化に対する 世界のエネルギービジョンと 原子力開発の役割

2014年2月24日

湯原哲夫

キヤノングローバル戦略研究所シンポジウム

地球温暖化問題に対する原子力開発の役割  
－高温ガス炉と廃棄物消滅処理について－

# 化石燃料の輸入総額の激増は ①価格交渉力を失ったこと ②原発停止による化石燃料輸入増

| 鉱物資源 輸入量と価格 (財務省貿易統計から) |            |           |             |           |             |             |              |
|-------------------------|------------|-----------|-------------|-----------|-------------|-------------|--------------|
|                         | 為替         | 2010年     |             | 2013年     |             | 2013/2010   |              |
|                         |            | 量         | 価格(兆円)      | 量         | 価格(兆円)      | 量増減         | 価格増減         |
|                         |            |           | \$88        |           | \$98        |             | +11%         |
| 鉱物資源                    | 単位         | 量         | 価格(兆円)      | 量         | 価格(兆円)      | 量増減         | 価格増減         |
| 全体                      |            |           | 17.400      |           | 27.433      | 10兆円        | +57%         |
| 石油                      | 百万kl       | 245       | 11.00       | 239       | 14.24       | -2%         | +29%         |
| <b>LNG</b>              | <b>百万t</b> | <b>70</b> | <b>3.47</b> | <b>87</b> | <b>7.06</b> | <b>+24%</b> | <b>+103%</b> |
| LPG                     | 百万t        | 12        | 0.78        | 12        | 1.07        | 0%          | +37%         |
| 石炭                      | 百万t        | 185       | 2.11        | 192       | 2.30        | 4%          | +9%          |

| 資源輸入単価 |      |       |       |     |
|--------|------|-------|-------|-----|
|        |      | 2010年 | 2013年 | 増減  |
| 石油     | ¥/kl | 44900 | 59600 | 33% |
| LNG    | ¥/t  | 49570 | 81140 | 64% |
| LPG    | ¥/t  | 65000 | 89160 | 37% |
| 石炭     | ¥/t  | 11410 | 11970 | 5%  |

# 地球温暖化の進行と国際的枠組みの現状

|   |  |
|---|--|
| 1 | <p><b>地球温暖化進行と気候変動問題の報告</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>• 温室効果ガスGHGの排出は過去最高を更新し続けている。</li><li>• 化石燃料の出す二酸化炭素が原因とみられる異常気象が世界各地で発生している</li><li>• 海洋の温暖化が進み、海面上昇も進行し続け、海水温度上昇と酸性化が進んでいる。</li><li>• 海氷、氷河、氷床が減少し続けている。</li><li>• 1998年以降、地球全体の温度上昇ペースは鈍化している。</li><li>• 共有目標2°C—GHG450ppm安定化に基づく「2050年GHG50%削減目標」の見直しが示唆される。</li></ul> |
| 2 | <p><b>国際的な枠組みと京都議定書・排出量取引の危機</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>• 京都議定書の第二約束期間に入ったが、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。</li><li>• 排出量取引市場は低迷し、取引価格は下落し、制度存続の危機にある。</li><li>• <u>2020年以降の温室効果ガス削減の国際的枠組みは削減目標を自主的に設定する案で一致</u>(次期枠組みは2015年末のCOP21で採択予定)。</li></ul>  |
| 3 | <p><b>日本の対応</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>• 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し、新たな目標をCOP19で表明した。</li><li>• エネルギー基本計画を見直し、原子力発電を維持する、新しい基本計画が間もなく決定される。</li><li>• 定量的な目標は明示されない方向</li></ul>  |

# CIGS「世界で共有できる削減目標と長期エネルギービジョン」

(#1-2009,#2-2011,#3-2013年国際シンポジウム)概要

- 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濃度安定化シナリオ:450ppmで温度上昇2°C以下(2080年頃マイナスの排出)から「オーバーシュート&ゼロエミッションシナリオへ」(今世紀中の2°C以下を維持し、排出総量を規制し、来世紀中ごろにゼロエミッションを達成するシナリオ)
- ② この制約下で、世界全体で最適化(コストミニマム)するエネルギー構成(削減費用を均等化)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を追求し、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を指向する。
- ⑤ 化石燃料:原子力:再生可能エネルギーのバランス良い組み合わせと投資と回収のバランスする組み合わせの可能性を見いだした。
- ⑥ 実現可能性と課題について
  - CCS(二酸化炭素の分離・隔離・貯蔵)の火力発電における全面的な導入の実現可能性、
  - 産業・民生における大規模な省エネルギーの実行(特に産業用熱供給のための化石燃料の削減)の実現可能性、
  - 再生可能エネルギーの大規模導入による経済性の確保や安定性の確保(バッテリー技術の普及)の不確定性を有する。
- ⑦ CCSしないケースや、原子力のフェーズアウトのケースでは、途上国の負担が大きく、経済成長へ大きく影響する。
- ⑧ 化石燃料利用の高効率化、原子力熱利用による産業用プロセスヒートの低炭素化、経済的で安定な再生可能エネルギーの開発(地熱、海洋、バイオマス)が不可欠な課題である。

# シンポジウムの目的

- 地球温暖化が進行し、その影響が顕在化している。地球温暖化抑制のための世界の長期エネルギー構成は高効率な火力発電とCCSの併設、原子力発電の維持、産業用熱利用の低炭素化が不可欠な要件。
- 安全性を高めた第三世代、それに加えて環境に配慮した第四世代炉の開発と普及が世界的に進む中で、日本はこれまでの自主開発技術を見直し、技術導入体質からの転換を計ることが必要である。
- 次世代軽水炉と高速炉に加えて、長年開発を続けてきた高温ガス炉にもっと注目すべき。ガス炉は本質的な安全炉で、熱利用を始め多目的な原子力エネルギー利用を可能とする。
- 原子力にとって放射性廃棄物の処理処分は最重要。特に 高レベル廃棄物については、従来の地層処分を進める努力に加え減容化と低レベル化を同時に図るべきである。世界の現状を展望しつつ、自主開発による商業化を目指して消滅処理に関わる研究開発を推進すべきである。

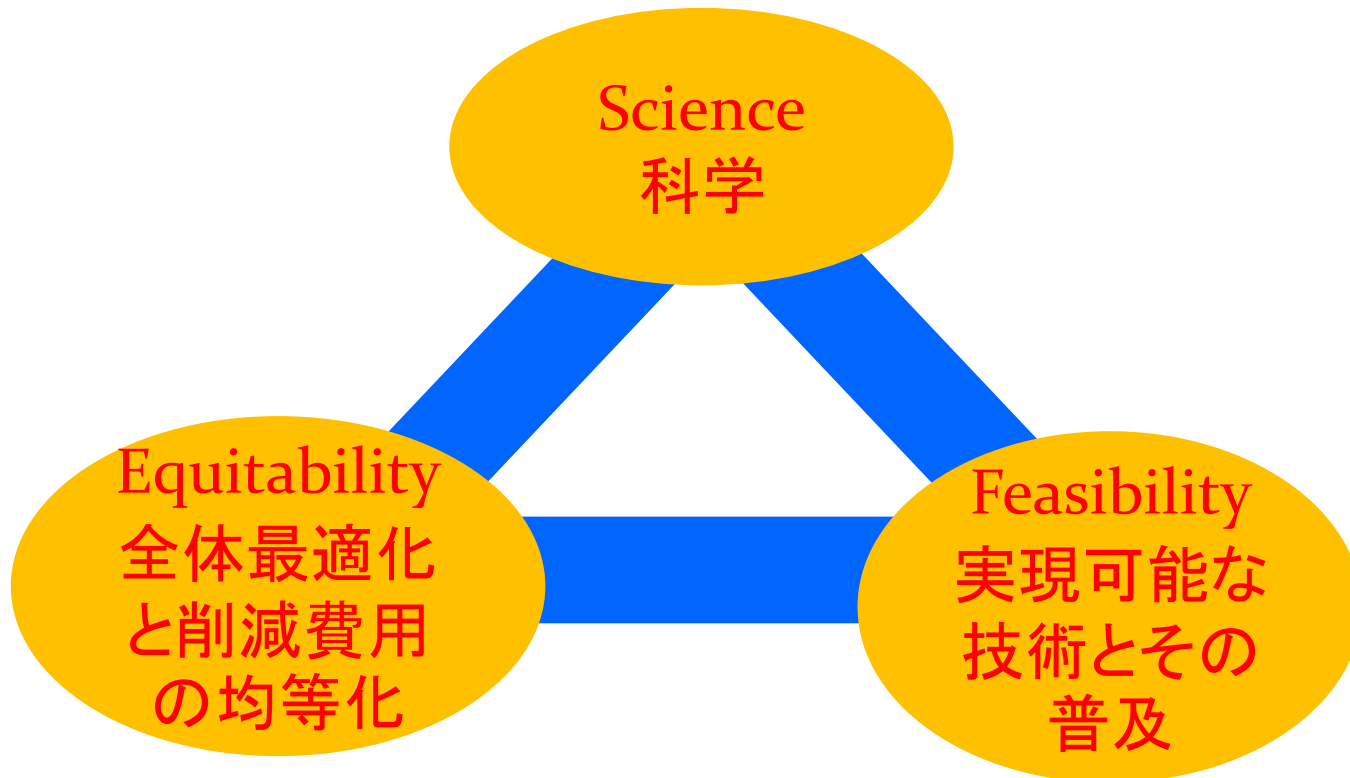
# 原子炉の種類と日本の自主開発炉

| 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                       |
|        | 高温ガス炉 | HTGR       | 濃縮ウラン           | 黒鉛  | ヘリウム  | □                            | HTTR(1998~)                    | 米                        |
|        |       | AVR        | トリウム            | 黒鉛  | ヘリウム  | □                            | □                              | 米、ドイツ THTR<br>→南ア、中国     |
| 軽水炉    | 沸騰水型炉 | BWR        | 濃縮ウラン           | 軽水  | 軽水    | □ BWR (GE) □<br>□ PWR (WH) □ | ABWR(1996~)<br>むつ(1974~)       | 米 GE, WH<br>SMR<br>仏、ロシア |
|        | 加圧水型炉 | PWR        |                 |     |       |                              |                                |                          |
| 重水炉    | 軽水冷却  | GCR        | 天然ウラン           | 重水  | 軽水    | カナダ CANDU<br>□               | □□□<br>□□ふげん□<br>□(1978~2003)□ | 米、中国・インド                 |
|        | 重水冷却  | ATR        | 天然ウラン<br>MOX    | 重水  | 重水    |                              |                                |                          |
| 高速増殖炉  |       | FBR        | 濃縮ウラン<br>プルトニウム | なし  | ナトリウム | □                            | 常陽(1977~)<br>もんじゅ(1994~)       | 米、仏、独、英、<br>ロシア、中国、印     |
| 溶融塩炉   |       | MSR<br>FHR | トリウム            | 黒鉛  | 溶融塩   | ORNL                         | □                              | 米中、印                     |

# 參考資料

# Towards the harmony

- Principles for the new climate regime-

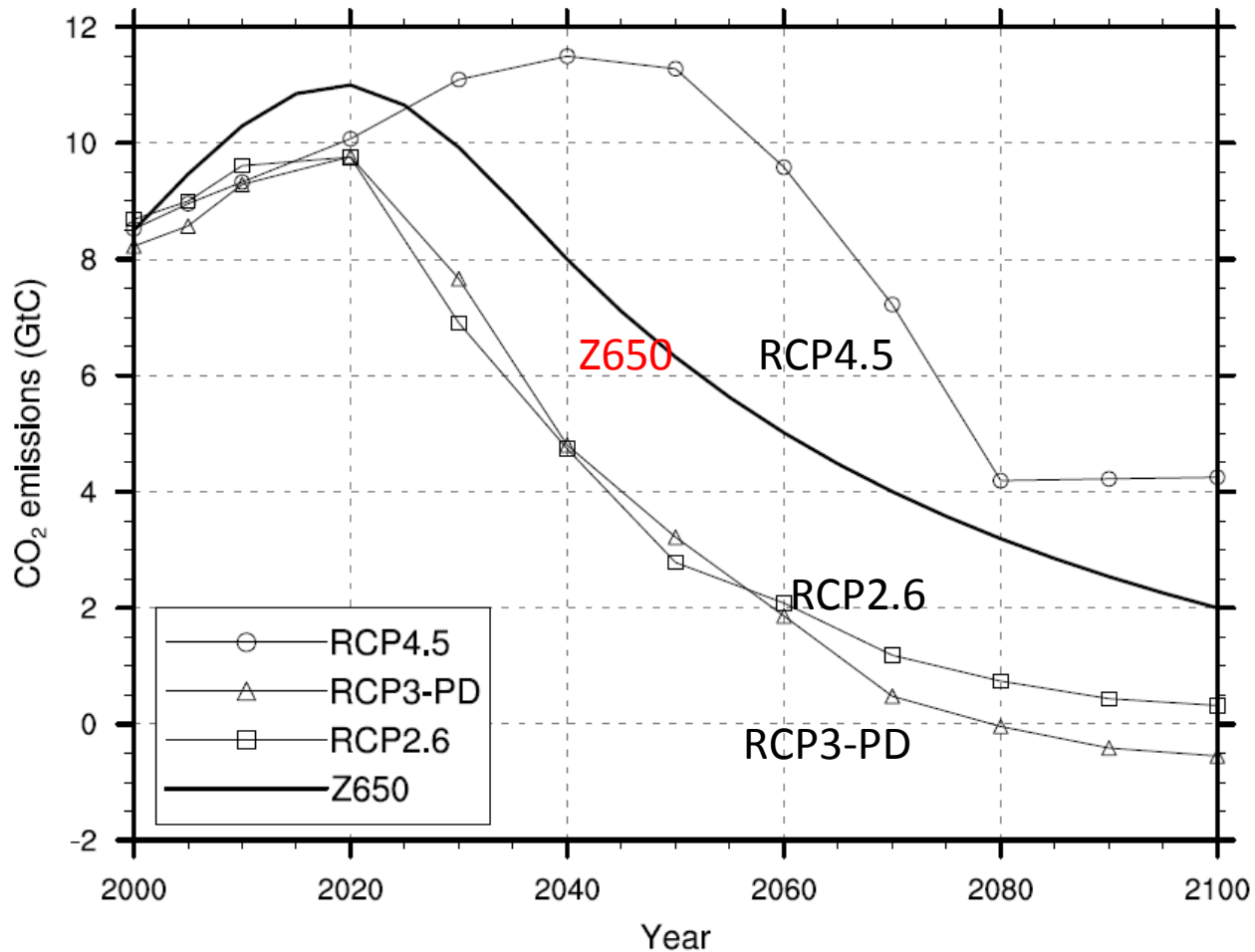


**Tetsuo YUHARA, Prof.**

**The Canon Institute for Global Studies**



# AR5用RCP排出パス群と松野等の提案する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。BAUで1480GtC

## 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

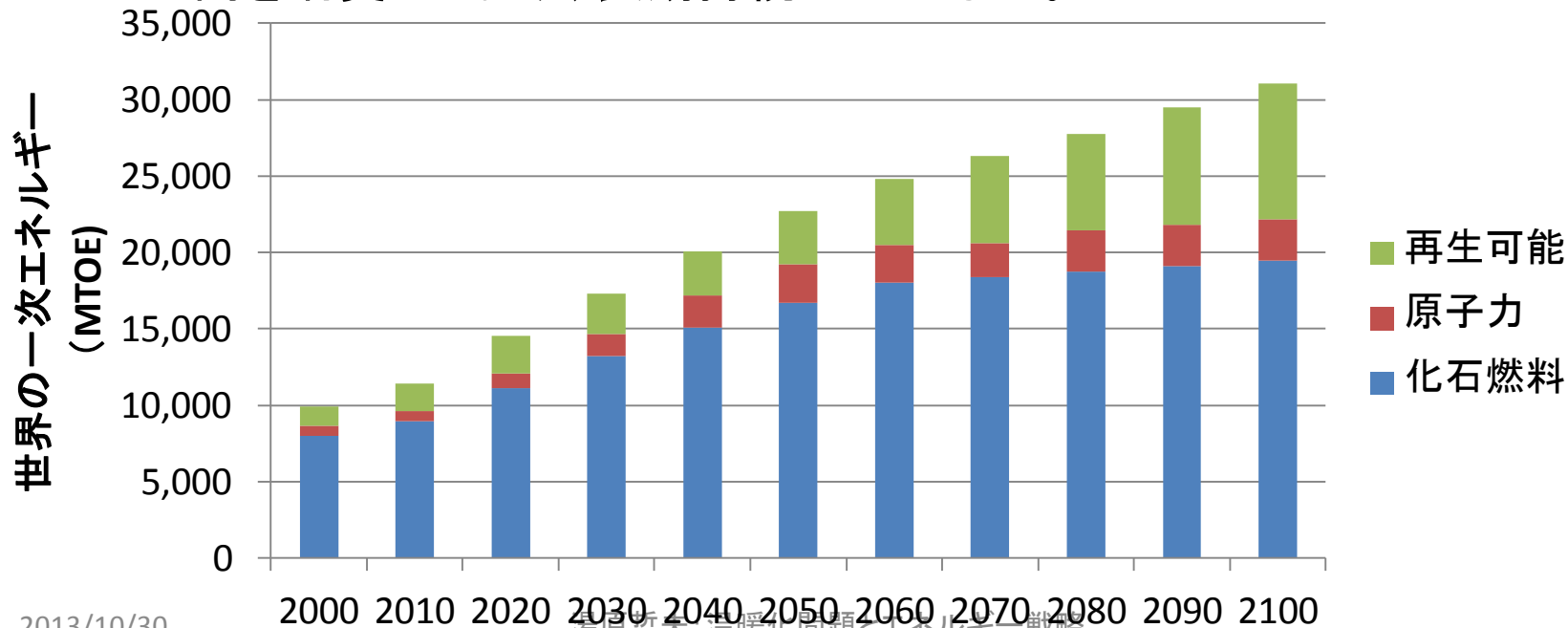
#### ◆ CO2排出

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  
→650GtCへ(Z650 オーバーシュートシナリオ)

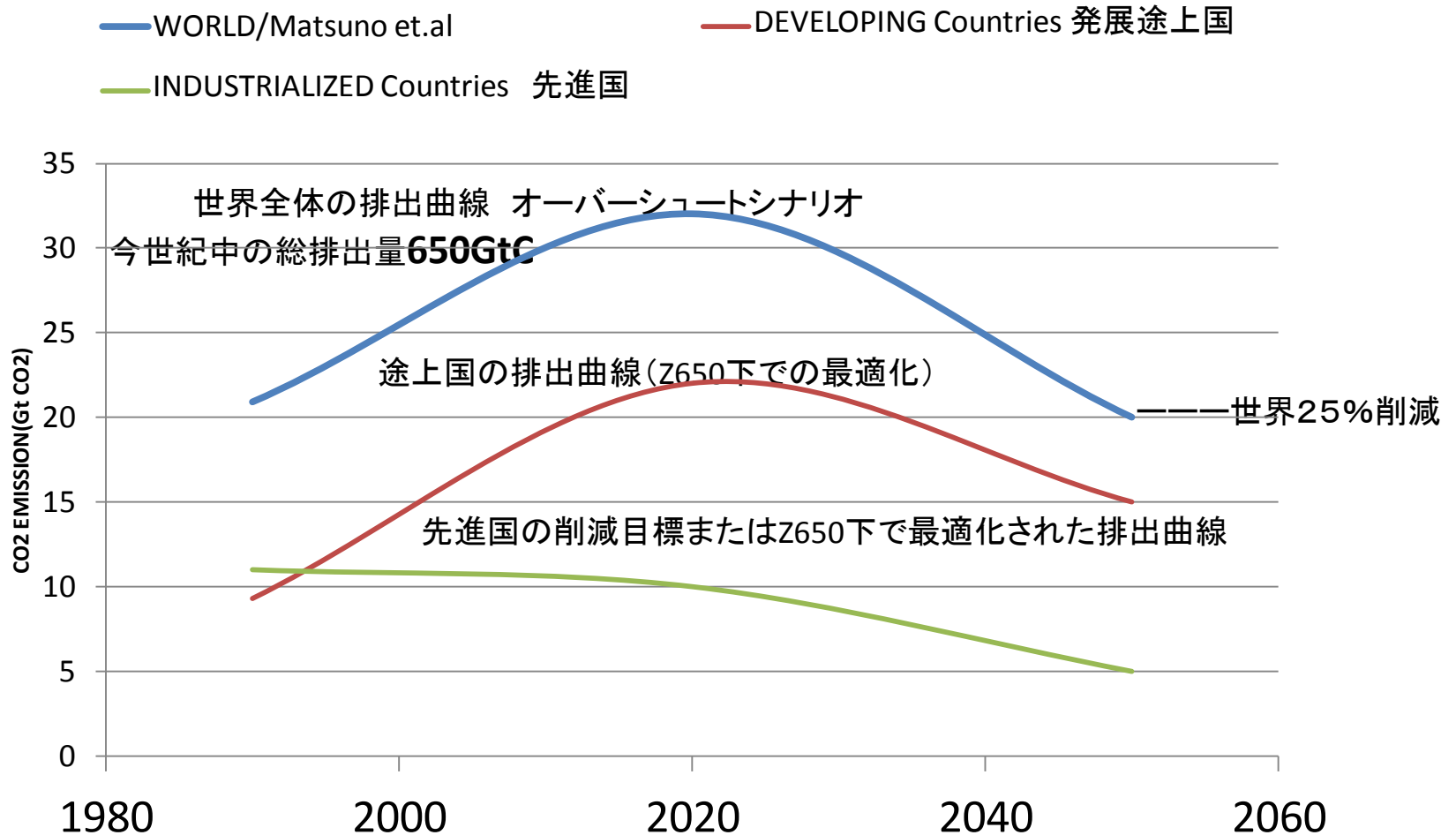
#### ◆ 資源制約

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。



# 「世界が共有する排出シナリオ案 Z650」

温暖化予測の科学(2°C)と先進国の削減曲線(2050年50%削減)が途上国の削  
[気候変動予測の要求(2°C以下)]-[先進国の削減目標]=[途上国の排出曲線]

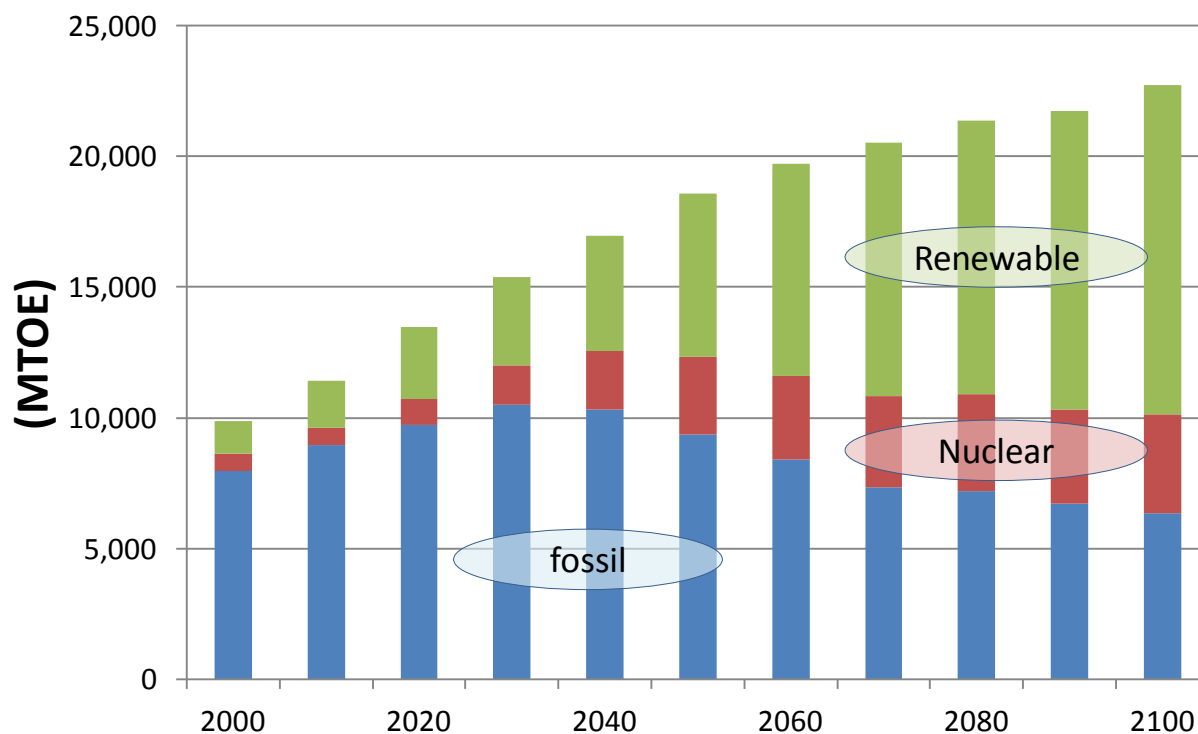


## 2. 一次エネルギー構成② Z650

- 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)

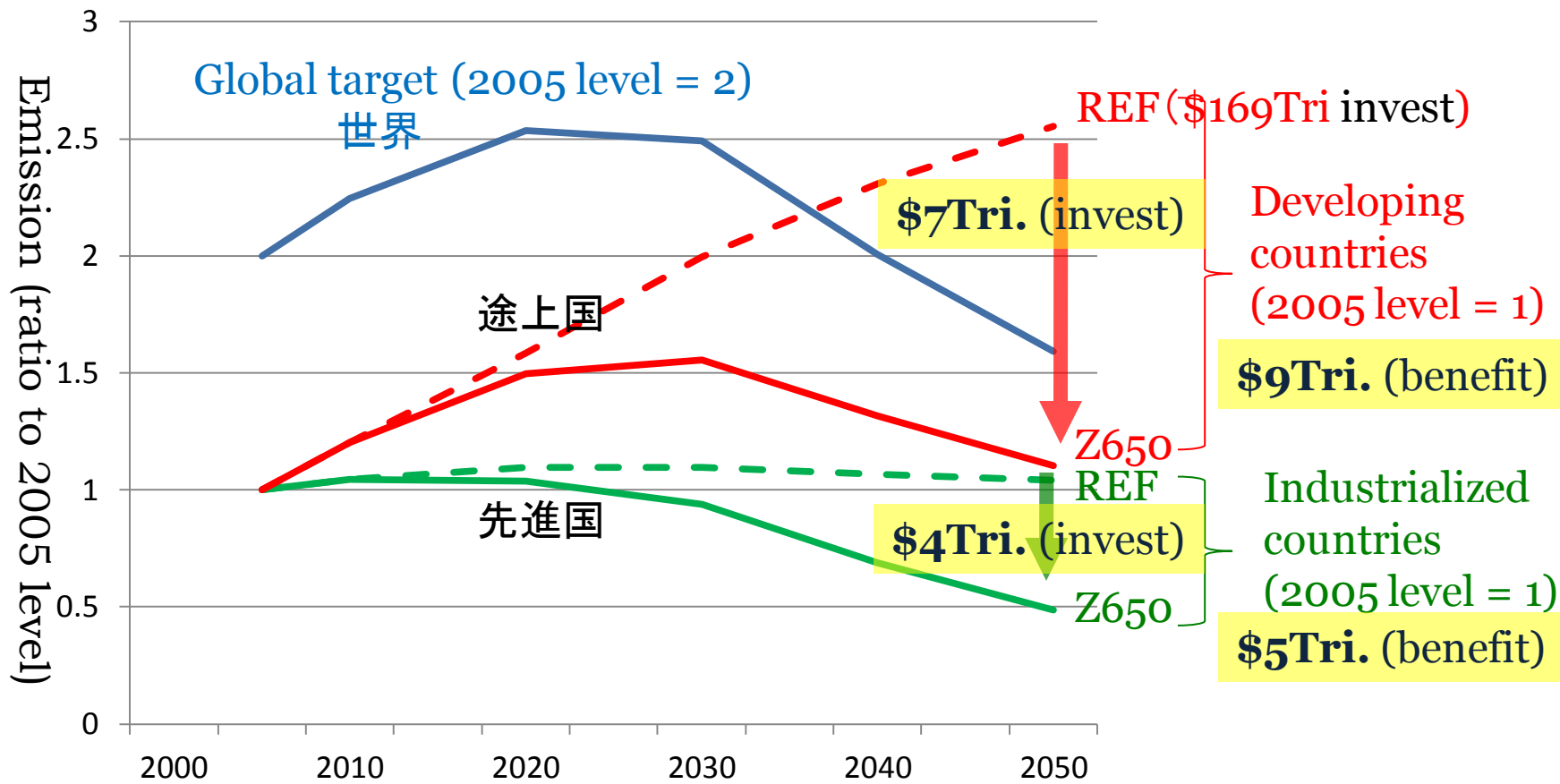
3 : 2 : 5 (2100)



世界の一次エネルギーの推移

# Additional Investments vs. Fuel Saving Benefits

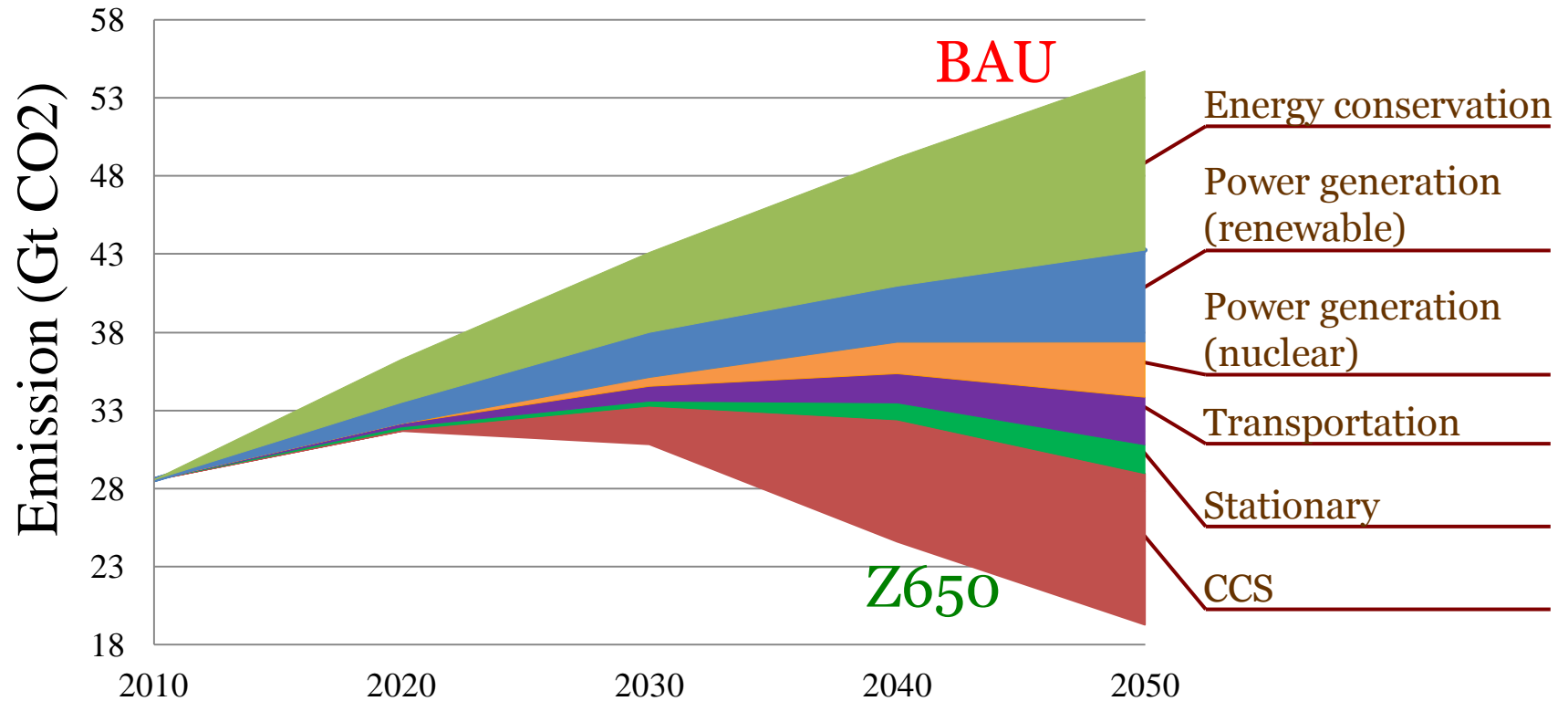
世界全体で最適化し、投資と燃料削減費がバランスするエネルギー構成が存在する  
 Global and regional emissions of Energy Related CO<sub>2</sub>



註: \$ 1 Tri/40年間 = 25B \$ /年 = 2兆円 /年

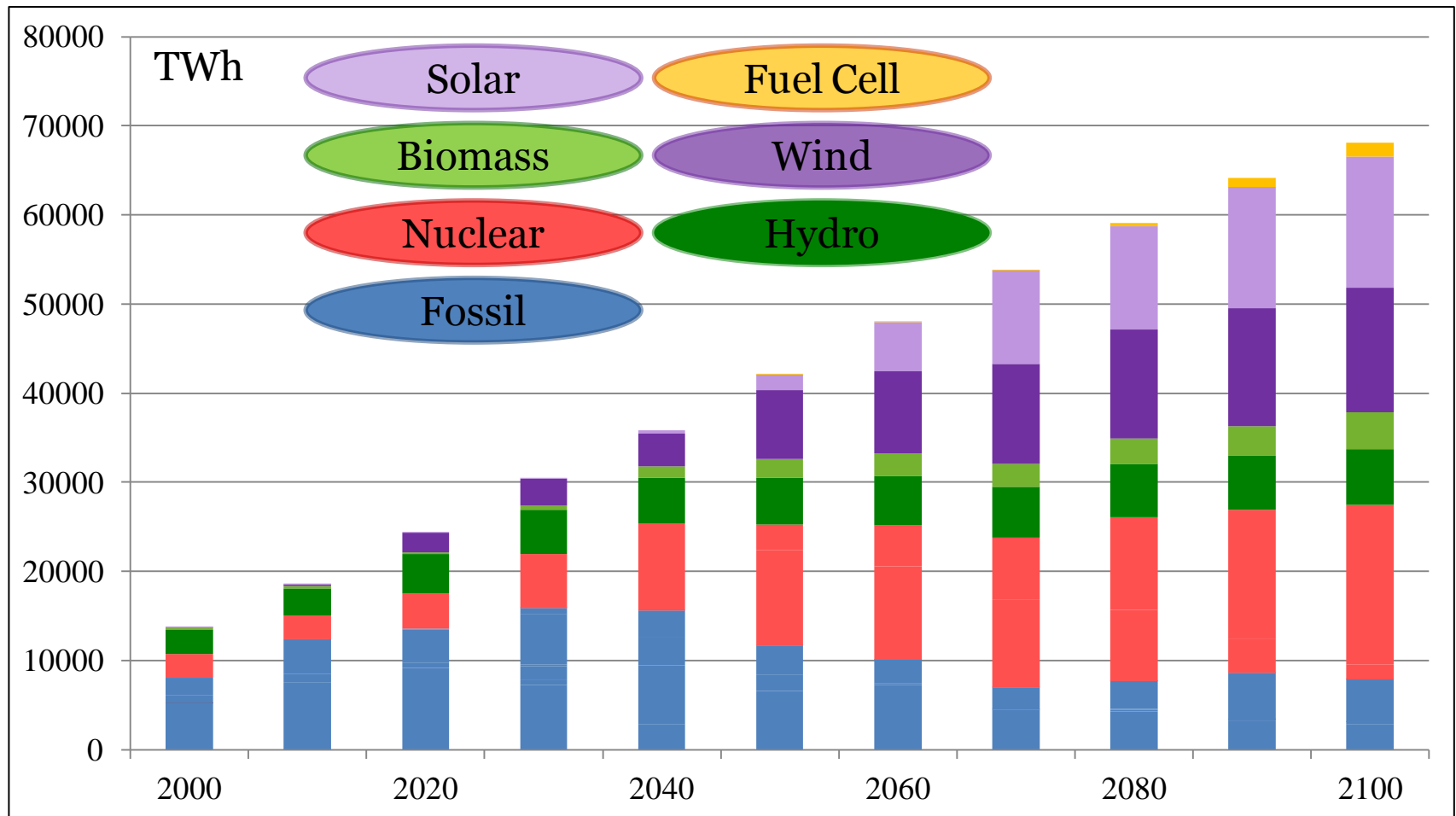
先進国2050年80%削減ケースでは 追加投資 \$38Tri, 燃料削減メリット = -\$10Tri; net \$28Tri

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



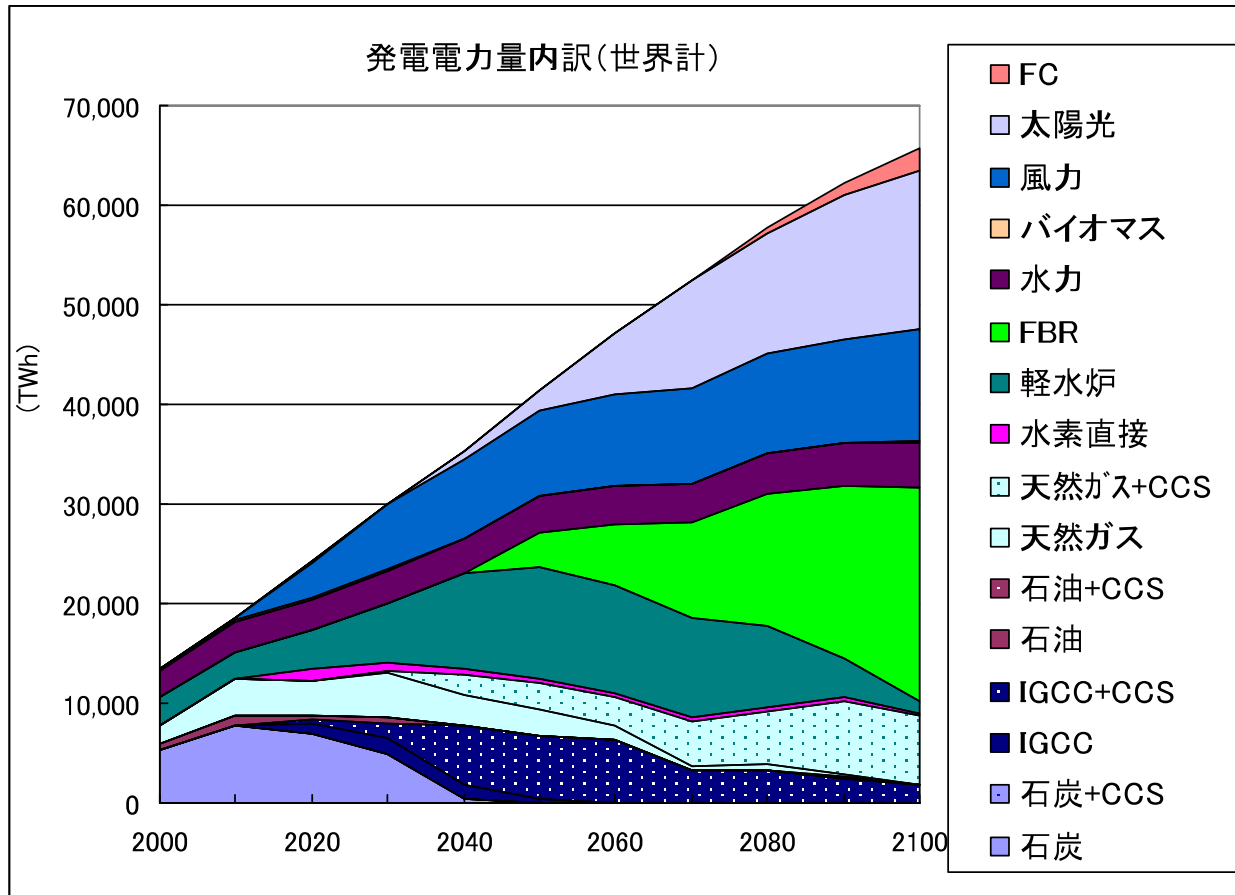
Energy saving and renewable energy play an important role during the whole period, while nuclear, transportation and CCS play an increasing role during the later stage.

# Electricity: Global Power Generation of Z650



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

# 原子力、火力、再生可能エネルギーのバランスの良い構成が得られた



「気候変動予測の要求(2°C以下/2650)」に対応する、世界全体のコストミニマムで最適化された電源構成(GRAPEによる長期シミュレーション)



# Cost and Benefit

## Differences from REF Scenario ▪ Nuclear phase-out, CCS

Unit : Trillion USD

| 原子力<br>フェーズ<br>アウト | Emissions 2050<br>(ratios to 2005) | With Nuclear |            |           | Without Nuclear |           |          | Addition<br>al Cost |
|--------------------|------------------------------------|--------------|------------|-----------|-----------------|-----------|----------|---------------------|
|                    |                                    | cost         | benefit    | total     | cost            | benefit   | total    |                     |
| World              | <b>0.75</b>                        | <b>11</b>    | <b>-14</b> | <b>-3</b> | <b>17</b>       | <b>-9</b> | <b>8</b> | <b>11</b>           |
| Developed          | <b>0.5</b>                         | <b>4</b>     | <b>-5</b>  | <b>-1</b> | <b>6</b>        | <b>-5</b> | <b>1</b> | <b>2</b>            |
| Developing         | <b>1.1</b>                         | <b>7</b>     | <b>-9</b>  | <b>-2</b> | <b>11</b>       | <b>-4</b> | <b>7</b> | <b>9</b>            |
| CCS有<br>無          | Emissions 2050<br>(ratios to 2005) | With CCS     |            |           | Without CCS     |           |          | Addition<br>al Cost |
|                    |                                    | cost         | benefit    | total     | cost            | benefit   | total    |                     |
| World              | 0.75                               | 11           | -14        | -3        | 24              | -17       | 7        | 10                  |
| Developed          | 0.5                                | 4            | -5         | -1        | 7               | -5        | 2        | 3                   |
| Developing         | 1.1                                | 7            | -9         | -2        | 17              | -12       | 5        | 7                   |

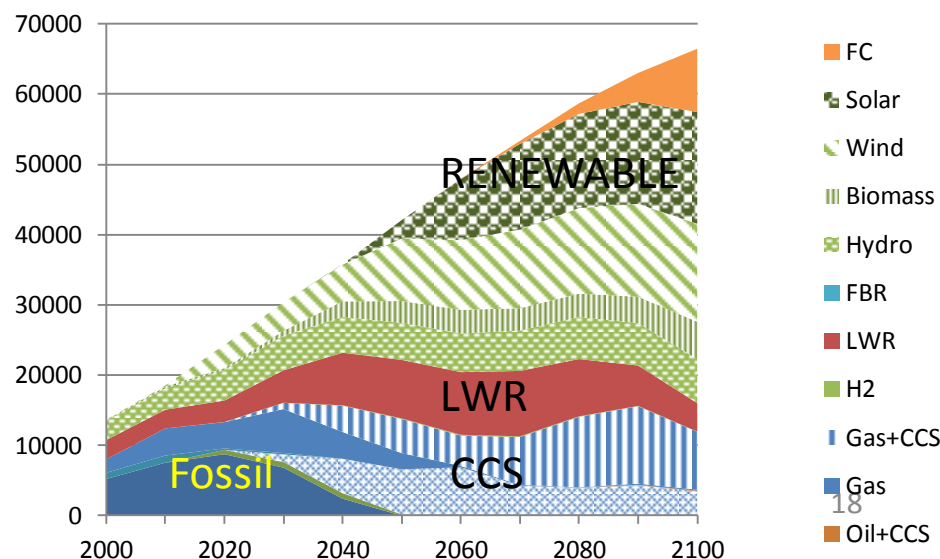
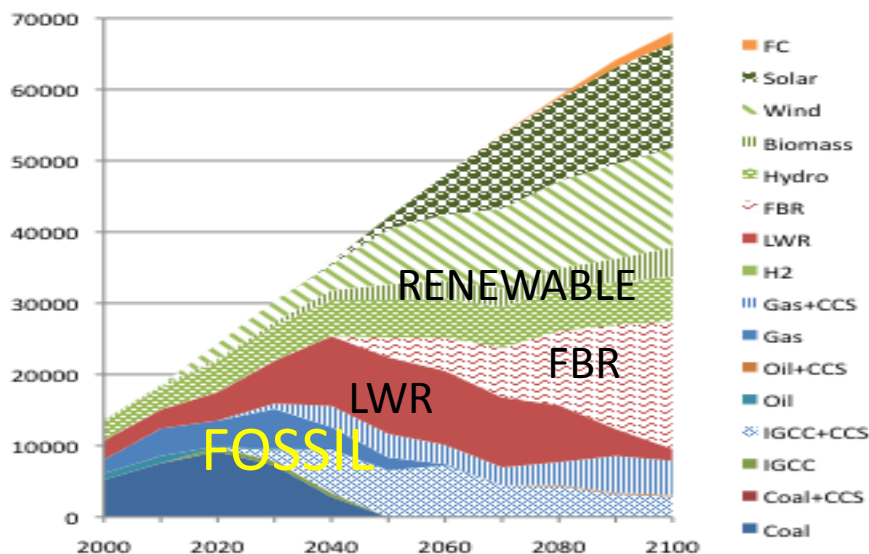
# 温暖化抑制と成長の両立への条件

## Z650制約化の最適エネルギー構成

- 1。濃度450ppm安定化曲線に比べて、かなり緩和されたZ650 排出削減カーブにも関わらず、温暖化抑制と成長を両立させるエネルギー構成は(1)天然ガス・石炭火力発電とCCS(炭素隔離貯蔵) (2)原子力の役割が不可欠である。
- 2。原子力は長期的にはウラン資源の枯渇性から、持続可能な高速増殖炉サイクル(使用済み燃料を再処理し、プルトニウムを燃料とする)が不可欠である。
- 3。原子力フェーズアウト、CCSなしの場合、投資とベネフィットが大きくバランスを崩し、その影響は特に途上国で顕著に現れる。
- 4。削減シナリオ Z650 は 原子力、CCS、再生可能エネルギーの応分の分担(電源構成では3者はそれぞれ3分の1をになっている)。

原子力-軽水炉(LWR) + 高速増殖炉(FBR)

FBRのないケース



## ・・・高速増殖炉と核燃料サイクルー2・・・

### 高レベル放射性廃棄物の低減とは

高速増殖炉サイクルは、高レベル放射性廃棄物に含まれる長寿命の放射性物質を燃料として燃やすことにより、高レベル放射性廃棄物中の放射能による潜在的有害度を低減させるとともに、高レベル放射性廃棄物の量を削減できる可能性があります。これらによって、環境に与える負荷を少なくすることができます。

|                                     | 放射能レベルの減衰<br>(注1) | 高レベル放射性廃棄物の<br>発生量(体積比)   |
|-------------------------------------|-------------------|---------------------------|
| 直接処分                                | 10万年              | 1 (使用済燃料)                 |
| 軽水炉を用いる<br>核燃料サイクル<br>(プルサーマル)      | 1万年<br>(注2)       | 0.3~0.4 (ガラス固化体)<br>(注4)  |
| 高速増殖炉を用いる<br>核燃料サイクル<br>(高速増殖炉サイクル) | 200~300年<br>(注3)  | 0.3~0.4以下(ガラス固化体)<br>(注5) |

(注1) 同じ量の発電に必要な天然ウランの放射能による潜在的な有害度(最大値)に減衰するまでの期間を示します。

(注2) 回収率:プルトニウム99.5%、ウラン99.6%

(注3) 回収率:プルトニウム99.9%、ウラン99.9%、マイナーアクチニド99.9%

(注4) 再処理した場合、直接処分の場合に比べて体積で30~40%程度に抑制されます。

(注5) マイナーアクチニド回収を行う高速増殖炉サイクルでは、さらに体積を減少できる可能性があります。

出典:原子力委員会 新計画策定会議 第13回、第17回資料