

# 持続的成長を実現する エネルギー資源の選択

**2018年3月**

**エネルギー問題に発言する会**

<http://www.engy-sqr.com/media-open2.html>

本資料はエネルギー問題に発言する会が作成したものを、学生とシニアの対話ならびに教員研修会に向けた編集したものです。

編集：SNW学生とシニアの対話幹事会  
2018年4月

# 目次

	頁
はじめに	3
第1部 賢いエネルギー資源の選択 エネルギー・ミックス計画	4
1. 人類の文明とエネルギー利用	5
2. エネルギー資源選択の指針	9
3. エネルギー資源の特性	11
4. エネルギーミックス計画	17
5. 化石燃料の特性	21
6. 原子力の特性	22
7. 安定型再生可能エネルギーの特性	23
8. 変動型再生可能エネルギー・太陽光、風力の特性	24
コラム1. 変動再エネは自立電源でない	27
コラム2. 変動再エネは採算が取れない	29
コラム3. 原発停止の補完は化石燃料	31
コラム4. 日本のエネルギー安全保障に原子力は欠かせない	35
コラム5. 脱原発は日本経済を衰退させる	40
第2部 これからの原子力 福島第一原子力発電所事故を乗り越えて！	43
1. 原子力発電は安全性が大前提	44
2. 核燃料サイクルにより日本のエネルギーは盤石	53
3. 高レベル放射性廃棄物の地層処分	57
4. 原子力発電の産業基盤維持	68
5. 世界の潮流	72
6. これからの日本のエネルギー	76
あとがき	82

## はじめに

- 2014年に震災後の状況を反映したエネルギー基本計画が制定され、2030年のエネルギー・ミックス計画が決定。
- 今年はエネルギー基本計画、エネルギー・ミックス計画改定の予定。21世紀中葉は脱炭素がエネルギー選択の柱。
- 脱炭素エネルギーとして原子力が欠かせない。安定型再生可能エネルギー（水力、バイオ、地熱）も引き続き必要。
- 変動型再生可能エネルギー（太陽光、風力）は、貯蔵とバックアップ電源をセットにした自立型エネルギー・システムとして活用する必要がある。

# 第1部 賢いエネルギー資源の選択

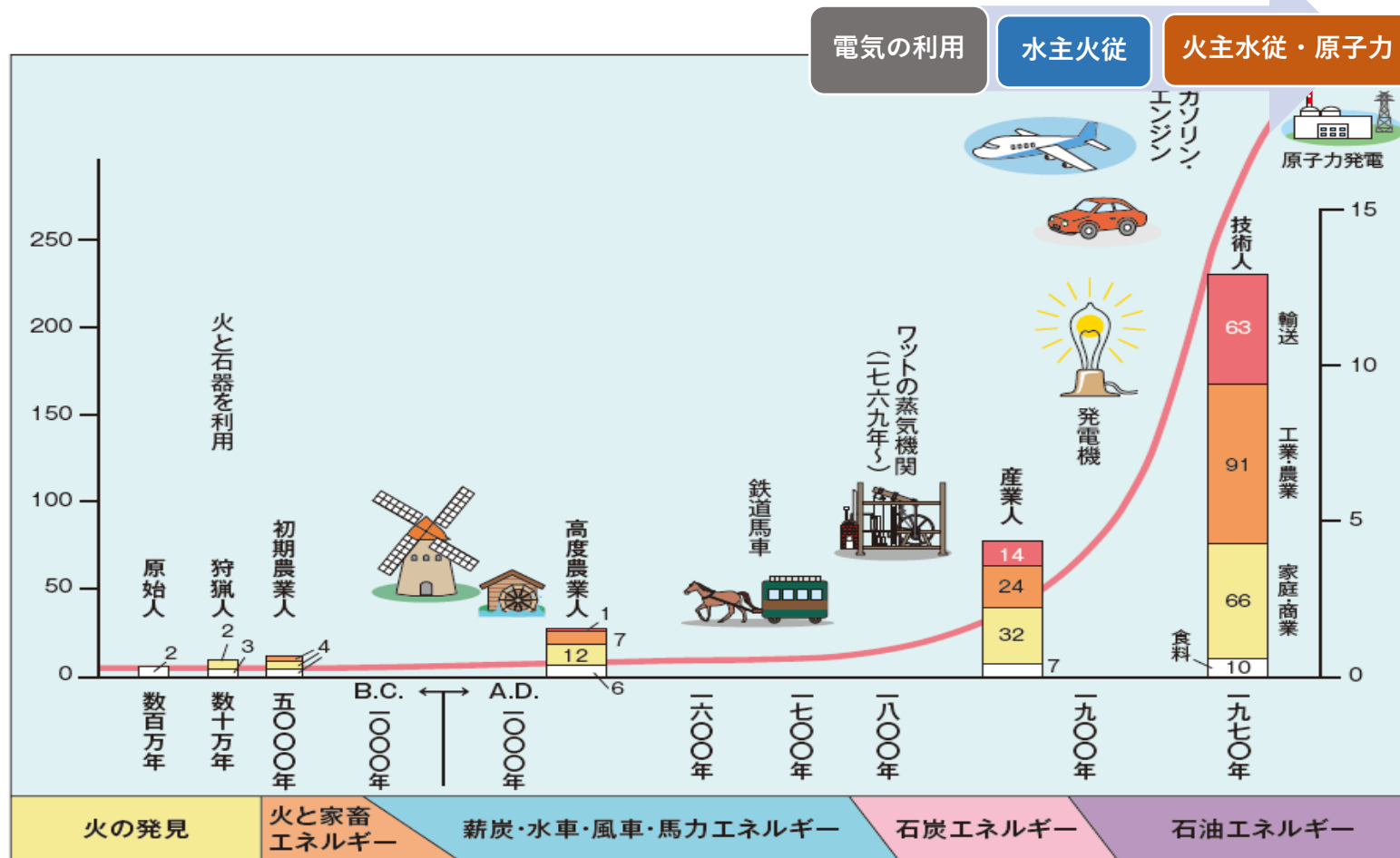
## エネルギーミックス計画

- 賢いエネルギー資源の選択と題して、人類の文明におけるエネルギー資源とのかかわり、エネルギー資源の特性を解説
- 現代文明を支えるエネルギー資源に要求される要件を明確にし、その要件に適う資源の選択結果を示す
- 資源選択の視点はS + 3Eと呼ばれている安全性、安定供給性（安定供給による国の安全保障）、経済性、環境適合性
- この視点で選択されたエネルギー資源群とそれぞれの分担割合がエネルギーミックス計画
- 脱原発を推進し、エネルギー供給を再生可能エネルギーだけで賄うという主張もあるが、S + 3Eの達成には原子力発電が一定の役割を担う必要がある

# 1. 文明とエネルギー利用

## 人類とエネルギーのかかわり

一人あたり消費量(二〇〇〇キロカロリー/日)・棒グラフ



原始人 百万年前の東アフリカ、食料のみ。  
狩猟人 十萬年前のヨーロッパ、暖房と料理に薪を燃やした。  
初期農業人 B.C.5000年の肥沃三角州地帯、穀物を栽培し家畜のエネルギーを使った。

高度農業人 1400年の北西ヨーロッパ、暖房用石炭・水力・風力を使い、家畜を輸送に利用した。  
産業人 1875年のイギリス、蒸気機関を使用していた。  
技術人 1970年のアメリカ、電力を使用、食料は家畜用を含む。

石油換算消費量(二〇〇万キロリットル/日)・曲線グラフ

# エネルギーの分類

一次エネルギー（資源による分類、日本は96%輸入）

（１）化石燃料 世界は85%～90%依存

- ・原油・石油、石炭、天然ガス、シェールオイル・ガス、オイルサンド、メタンハイドレート、etc.

（２）再生可能エネルギー

－ 安定型再生可能エネルギー

- ・水力、バイオマス、地熱

－ 変動型再生可能エネルギー

- ・太陽光、太陽熱、風力、潮流、波力、etc.

（３）原子力エネルギー

核分裂、核融合

二次エネルギー 一次エネルギーから生産

- ・電気、都市ガス、水素、ガソリン、灯油、etc.

# エネルギー資源が具備する条件

## • エネルギー資源の三要素

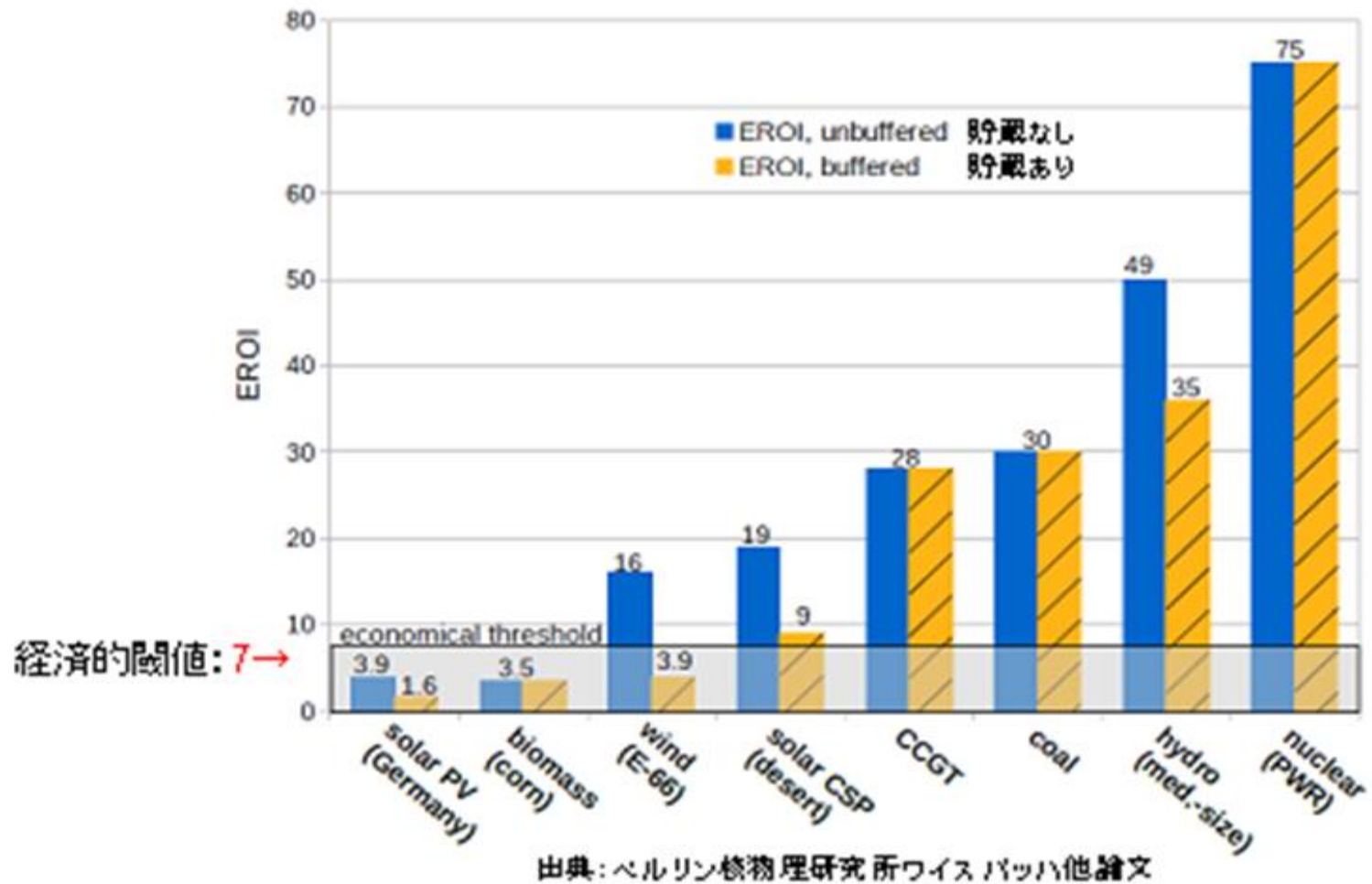
1. 大量にあること
2. 集中してあること
3. 密度が高いこと

太陽光、風力は大量利用の可能性はあるが、集中しておらず、エネルギー密度が著しく低い

## • エネルギー利用の条件・EPR

- エネルギーの質はエネルギー収支比の高さが指標
  - エネルギー収支比(EPR, Energy Profit Ratio)  
= 得られるエネルギー / 取り出すためのエネルギー
  - 化石燃料の代替はエネルギー収支比の高い資源が好ましい

# 資源のエネルギー収支



エネルギー収支 (EPR) = 資源から得られるエネルギー / 資源を得るために投入するエネルギー  
 EPR : Energy Profit Ratio



## 2. エネルギー資源選択の指標

- 持続性のある発展を目指し、最適なエネルギー資源群を選択し組合せる⇒エネルギー・ミックス
- 資源選択の4要素 **S + 3 E**
  - **S**          安全性          **S**afety
  - **3 E**        供給安定性      **E**nergy **S**ecurity
  - 経済性            **E**conomic **E**fficiency
  - 環境適合性      **E**nvironment **P**rotection
- **S + 3 E** の指標
  - 安全性                      : 国民の受容可能な安全性・安全目標
  - 供給安定性                : 震災前の資源国内依存率維持
  - 経済性                      : 国際競争力のある電気料金
  - 環境適合性                : 温室効果ガス削減目標達成

# リスクを踏まえた資源選択

## 資源の4要素

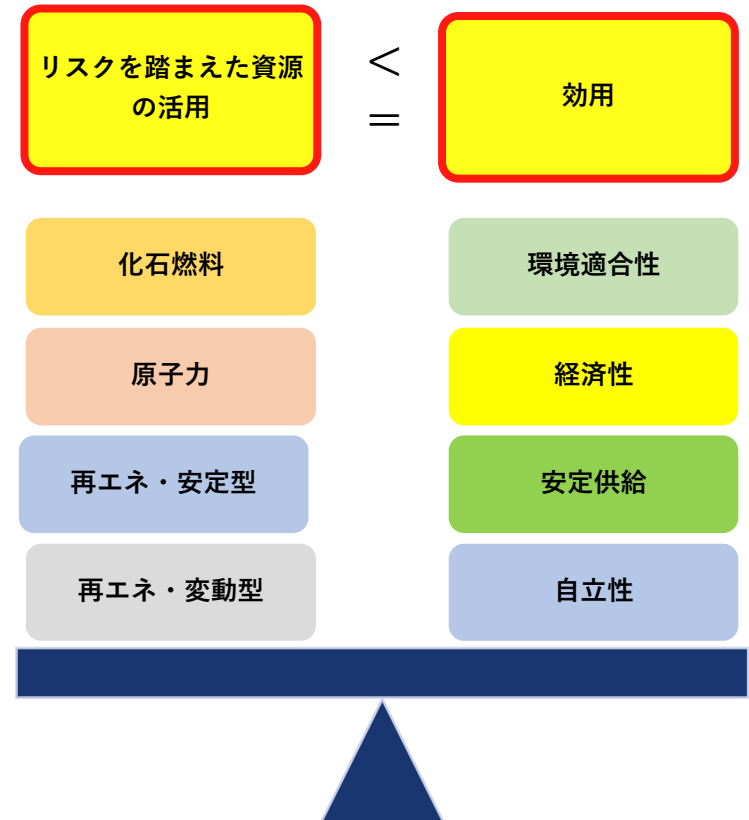
- 安全性 Safety
- 安定供給 Energy Security
- 経済性 Economic Measure
- 環境適合性 Environment Effect

## 各要素の評価指標 効用とリスク

- 効用
  - 安全性 安全目標達成、社会的合意
  - 安定供給 国内自給率
  - 経済性 遜色のない国際水準
  - 環境適合性 環境維持・持続、温暖化抑制
- リスク
  - 安全性 健康影響、環境破壊
  - 安定供給 エネルギー危機
  - 経済性 経済競争力低下
  - 環境適合性 福島事故を踏まえた対策

## 選択（エネルギー・ミックス）の評価

- 総合的な国力の持続
  - 社会の持続的な発展
- リスクとベネフィットを社会が受容
  - 健康で豊かな生活の可能性



### 3. エネルギー資源の特質

エネルギー資源		安全性	供給安定性	経済性	環境適合性
化石燃料	石炭	酸性雨健康影響など	資源量に限界（石油、天然ガスより豊富）	良好	CO2排出量高
	石油	同上	国際情勢の影響アリ、資源量に限界	変動	CO2排出量やや高
	天然ガス	同上	資源量に限界	変動	CO2排出量中程度
原子力	軽水炉	放射能汚染による健康影響など	準国産資源	良好	CO2排出量低
	高速炉		2000年程度		
再生エネ安定型	水力、地熱、バイオ	水害など	開発限界に近い	良好	CO2排出量低 森林破壊など懸念
再生エネ変動型	太陽光、風力	地域破壊など	発電は昼夜（太陽光）と天候の影響を受けない自立性（蓄電等）、もしくは火力等によるバックアップが必要	バックアップ含めると高FIT要	CO2排出量低

# 安全性の指標の例 原子力の安全目標

## • 定性的安全目標

- 原子力の利用活動に伴って放射線の放射や放射性物質の放散により公衆の健康被害が発生する可能性は、公衆の日常生活に伴う健康リスクを有意に増加させない水準に抑制されるべき

## • 定量的安全目標

- 原子力施設の事故に起因する敷地境界の公衆の個人平均急性死亡リスク、および施設からある範囲の距離にある公衆の個人のがんによる死亡リスクは、ともに年当たり100万分の1程度を超えない
- セシウム137の放出量が100TBq（福島第一原発事故の百分の1）を超える事故は、原子力発電所1基あたり100万年に1回以下に抑制する。
  - 福島第一原発事故の1/100程度に抑制するよう原子力規制委員会が制定

## • 性能目標

- 炉心損傷確立（CFD）： $<10^{-4}$ ／炉年
- 格納容器機能喪失確立（CFF）： $<10^{-5}$ ／炉年

### 参考 生活における身近なリスク

#### ➤ 個人死亡率 1/年

全死亡	$1.0 \times 10^{-2}$
悪性新生物（がん）	$8.0 \times 10^{-3}$
交通事故	$4.5 \times 10^{-5}$
転倒・転落	$6.4 \times 10^{-5}$



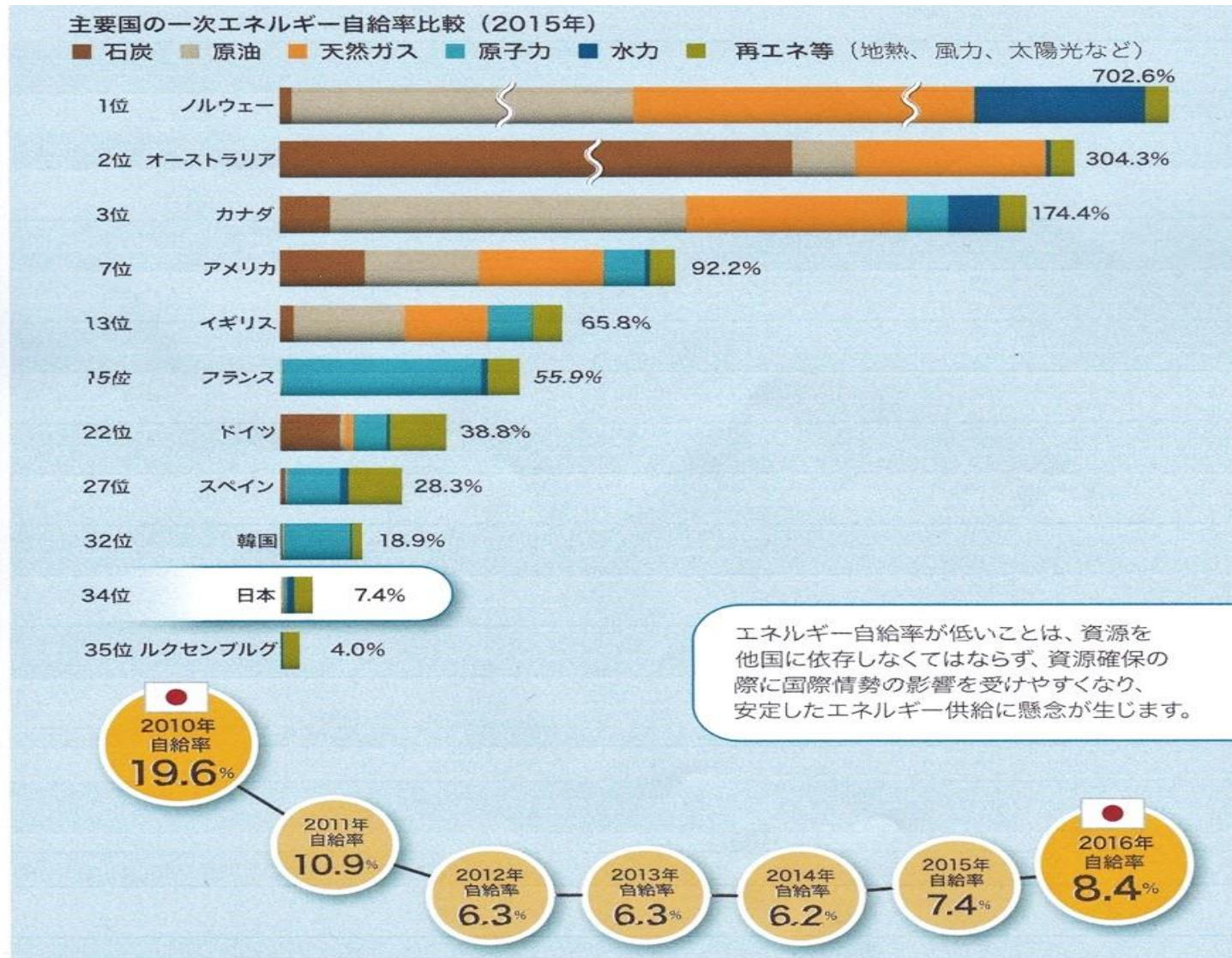
#### ➤ 原子力安全目標 $1.0 \times 10^{-6}$

- ✓ 身近なリスクにくらべ低い。
- ✓ 原子力事故による日本での死亡はゼロ
- ✓ むしろ汚染、被ばく回避のための避難が問題



#### ➤ セシウム放出量抑制目標設定

# 主要国の一次エネルギー自給率 日本は34位

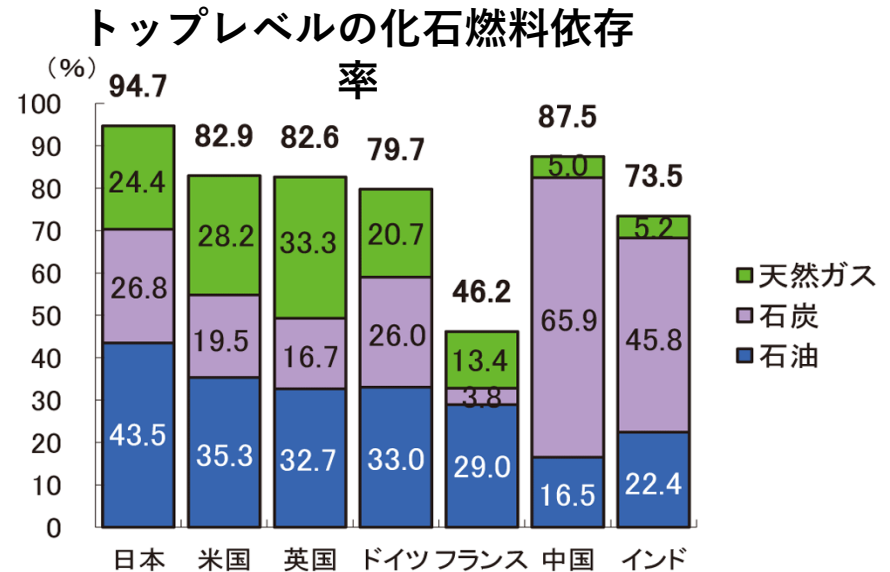


出典； 資源エネルギー庁 日本のエネルギー2017

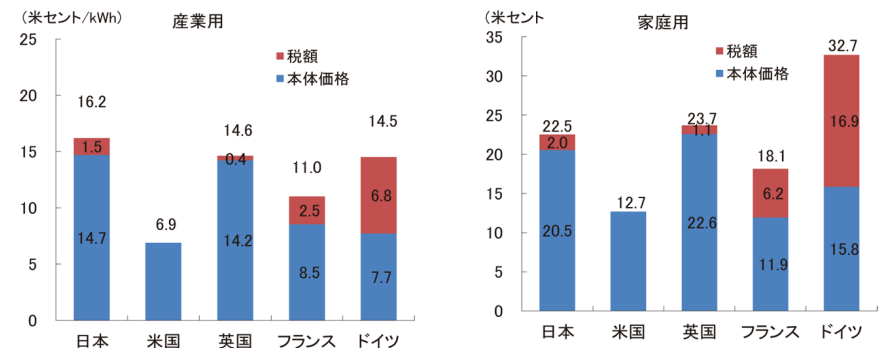


# 日本の電気料金は国際的に高水準

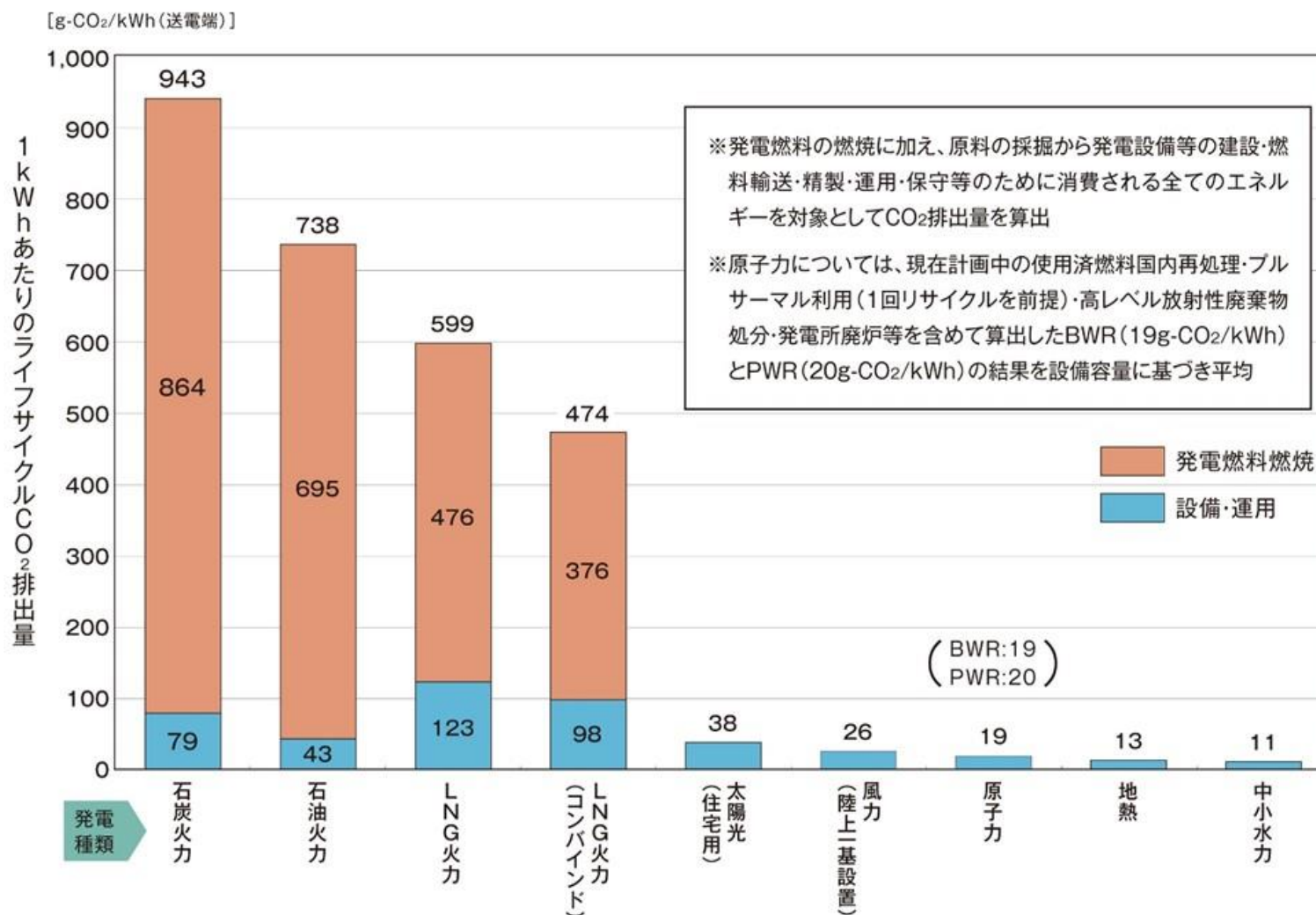
- 資源輸入国
  - － エネルギー源の9割以上が輸入化石燃料
- 日本の電気料金
  - － 国際的に高水準
  - － 化石燃料の国際市場価格依存と再エネ賦課金
- 国家百年の計で取り組むエネルギー政策
  - － 国際水準の経済力維持、強化
  - － ぜい弱な供給構造の改善



## 産業用は世界一、家庭用はドイツに次ぐ料金



# 各種電源別のライフサイクルCO<sub>2</sub>排出量



# 震災以降温室効果ガス排出量が増大

A5

東日本大震災以降、日本の温室効果ガス排出量は増加し、2013年度には過去最高となる14億トンもの温室効果ガスを排出しました。

2014年度以降は減少に転じていますが、2015年度でも13億2,500万トンもの温室効果ガスを排出しています。

今後、各国の目標と遜色ない水準で削減に向けた努力をしないとはいけません。



震災以降、原発代替のための火力発電の焼き増し等により、電力分野の排出量は5,500万トン増加しました。これは日本全体の温室効果ガス排出量の約4%分の増加に当たります。

出典：総合エネルギー統計、環境行動計画（電気事業連合会）、日本の温室効果ガス排出量の算定結果（環境省）を基に作成。※「電力分」は一般電気事業者による排出量。



## 4. エネルギー・ミックス計画

エネルギー 3 要素とエネルギー利用条件を基準にした

現代のエネルギー・ミックスの視点と評価

- － 安全性

- ・ 視点：健康影響、大気、土壌汚染
- ・ 評価：受容レベルの安全性（安全目標）

- － 安定供給性・安全保障

- ・ 視点：国内自給率
- ・ 評価：国産、準国産、国外調達資源の場合は供給地域の多様化

- － 経済性

- ・ 視点：国際競争力維持
- ・ 評価：エネルギー料金、GDP

- － 環境適合性

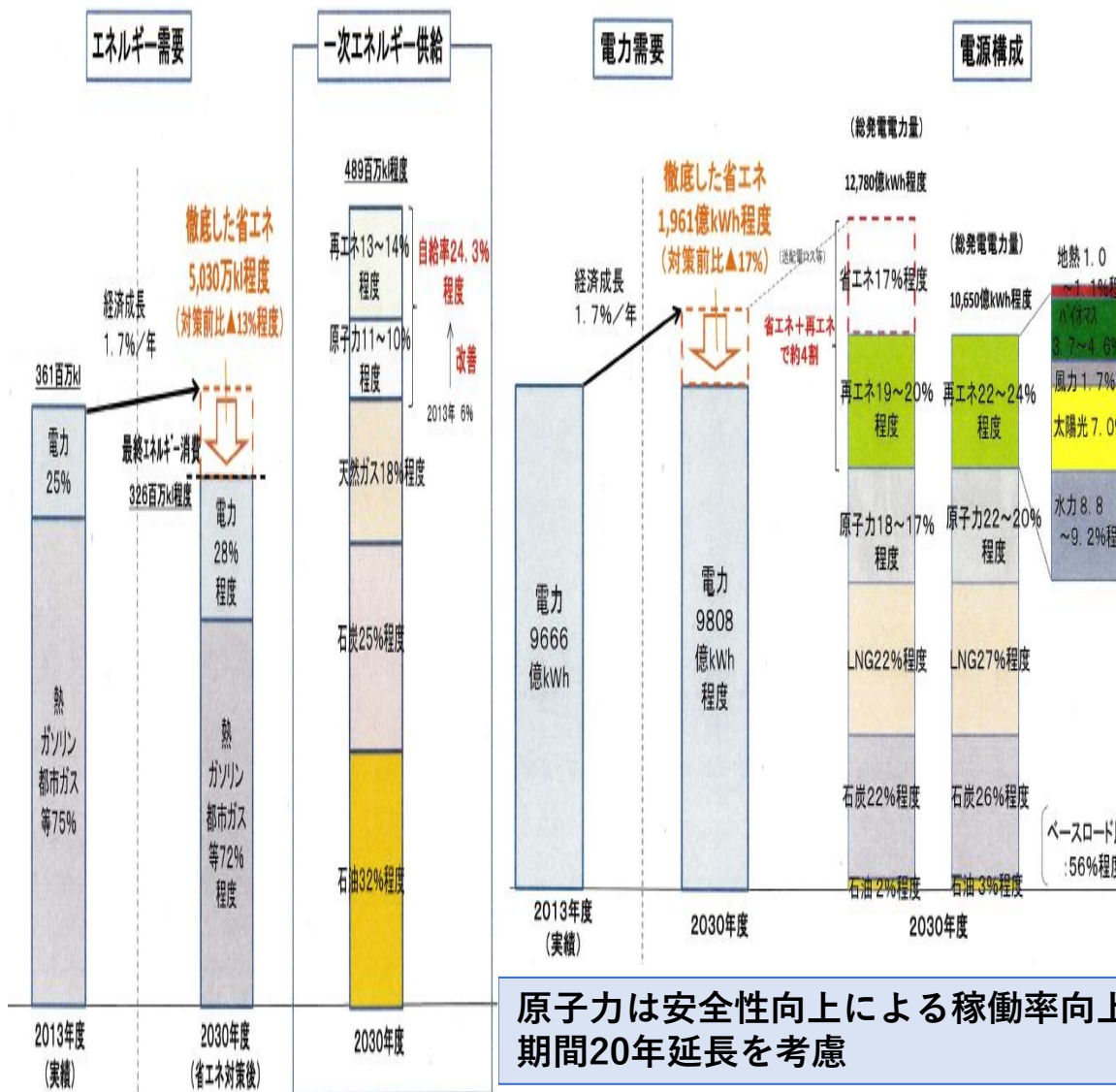
- ・ 視点：地球環境維持
- ・ 評価：温室効果ガス排出量削減

# 2030年を目指した各エネルギー資源の役割

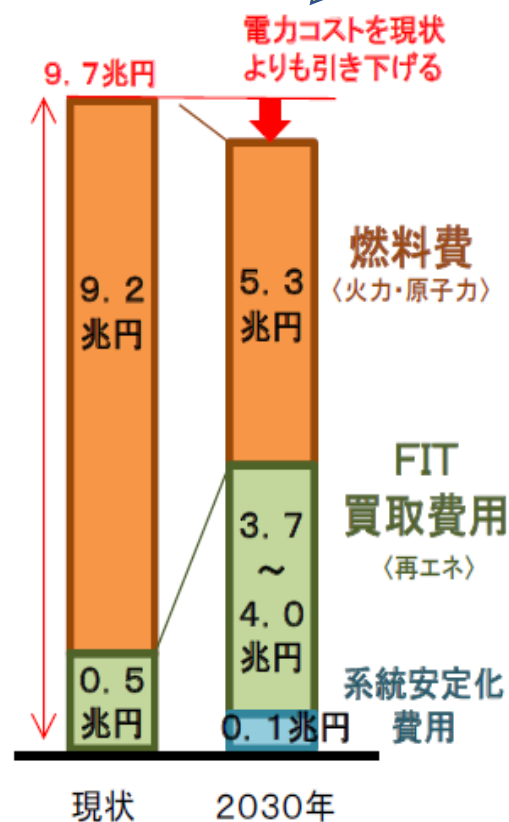
- エネルギー・ミックス計画の指針
  - 安定供給性
    - 震災前を上回る国内資源依存率（自給率） 25%
  - 経済性
    - 電気料金を現状より引き下げる
  - 環境適合性
    - パリ協定にもとづく温室効果ガス低減 2013年比26%低減
- 2030エネルギー・ミックス計画
  - 徹底した省エネ 電力需要を17%低減（1次エネルギー需要13%低減）
  - 発電量に対する比率
    - 化石燃料 54%
    - 原子力 20～22%
    - 再生エネ比率 22～24%
  - 原子力比率達成には30基程度の再稼働が必要

上記は2014年エネルギー基本計画にもとづく

# 2030年エネルギー・ミックスと電源構成



省エネと原子力活用により、  
再エネ導入による費用増大  
をカバー



# 22世紀を目指した各エネルギー資源の役割

- 2050年以降のエネルギー資源に対する要求
  - 環境適合性
    - 2050年の温室効果ガス低減目標
      - 政府の目標 2013年比80%
    - エネルギー部門全体で80%を達成するには、発電部門はゼロ・エミッションが必要となろう
- 想定されるエネルギー・ミックスの試案
  - 中核はゼロ・エミッション電源
  - ゼロエミッション80% + バックアップ用化石燃料20%
    - 原子力 40%
    - 安定型再エネ 20%
    - 変動型再エネ 20% (火力でバックアップ)
    - 化石燃料 20% (CCSでゼロ・エミッション化)
- 原子力40%実現のための施策
  - 運転期間20年延長とリプレース、新增設

# 5. 化石燃料の特性

- 産業革命を支えた動力源
  - 抜群の資源量、エネルギー密度、取り扱い易さ
  - 多様な用途：産業用、運輸用、民生・家庭用燃料、電気など
  - 抜群の資源量、エネルギー密度、取り扱い易さ
- 戦後復興・高度成長の原動力
  - 電源として
    - 戦後復興初期は水主火従
    - 石炭から石油へ、水主火従から火主水従に、高度成長期へ（1950年代後半から1960年代）
    - 安定したベースロード電源からピーク電源まで幅広く活用
  - 工業用、民生用燃料
  - 化学製品の原材料
- 課題
  - 供給の安定性
    - 資源の偏在 海外依存度大 ⇒ 輸入先の多様化
    - 枯渇の懸念 石炭：200年、石油：数十年、天然ガス：数十年、非在来型資源への期待？
  - 環境影響
    - 大気汚染問題はほぼ克服 SOX、NOX、煤塵の低減
    - 地球温暖化 CO2低減 ⇒ CCS技術などの活用に向けた取組

## 6. 原子力の特性

- 核分裂エネルギー エネルギー密度が高い
  - 10万kWの発電所を1年間運転するのに必要な燃料
    - 化石燃料 石炭約200万トン、石油約130万トン、天然ガス約100万トン
    - 核燃料 約20トン (10万分の1)
- 資源量が豊富 備蓄性が高い
  - ⇒ 準国産エネルギー、安定供給性高
  - 装荷した燃料は3～4年継続使用
  - 核燃料サイクル・再処理路線により、ウラン燃料をとことん利用できる (資源量の制約ナシ)
    - 軽水炉 再処理MOX燃料使用によりウラン輸入量低減
    - 高速炉 ウランのとことん利用により、2000年以上新規投入不要
- 社会的合意に向け安全性向上活動の持続
  - 新規規制基準と事業者努力による安全対策の充実
    - 福島第一原子力発電所事故の反省
    - 放射性物資放出量低減 (福島事故の1/100以下) によ新規規制基準による安全対策
  - 安全目標と達成度評価による安全性の確認

## 7. 安定型再生可能エネルギーの特性

- 安定型再エネは実績ある脱炭素エネルギー
  - 水力　：水車は中世から動力に利用、発電は19世紀後半から
    - 事業用では三居沢発電所（1888年、宮城紡績、現所有は東北電力）、商用では蹴上発電所（1891年、京都、現所有は関西電力）。
    - 1950年代までは発電の主力　水主火従
  - 生物エネルギー（バイオ）：古代から利用（薪、木炭など）
    - 直接利用と製造燃料利用（アルコール、メタンなど）
    - 量に制約　再生範囲を超えると環境破壊（森林伐採など）
  - 地熱　：日本は火山国なので、一定程度は資源あり
    - 発電地域に制約（観光地、温泉地）

## 8. 変動型再エネ・太陽光と風力の特性

- 発電量：太陽光は夜間ゼロ、太陽光、風力とも天候次第
  - 需要に応じた発電ができない
  - バックアップ電源が必要
    - 安定電源 火力 ⇒ CO2低減にならない
    - 貯蔵 バッテリー 揚水発電など
  - このような構造的要因により高コスト化（FITでカバー）
- 変動型再エネの特徴
  - 発電時は一齐に同じように発電・全発電所の発電が重複、余剰が生ずる 「共喰い現象」
  - 設備容量が需要容量を超えると発電量が過剰になる
  - 間欠発電からの供給を優先すると、バックアップ電源の経済性が低下、維持が困難になる
- 安定的供給には単独では成り立たない
- 変動再エネの**自立電源化**

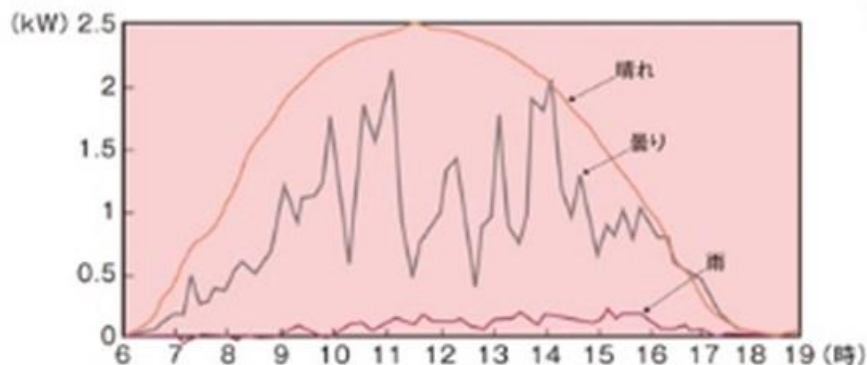


**変動再エネ・貯蔵&バックアップ電源システム**



# 変動再エネは変動を補完する仕組みが必要 変動再エネ・貯蔵／代替電源システム

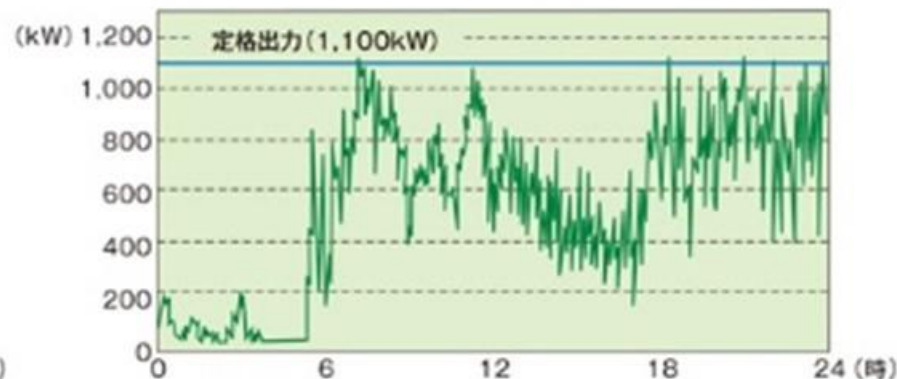
太陽光発電の出力変動(春季)



容量3.2kW、北緯34.4°、東経132.4°、方位角0°(真南)、傾斜角30°の場合

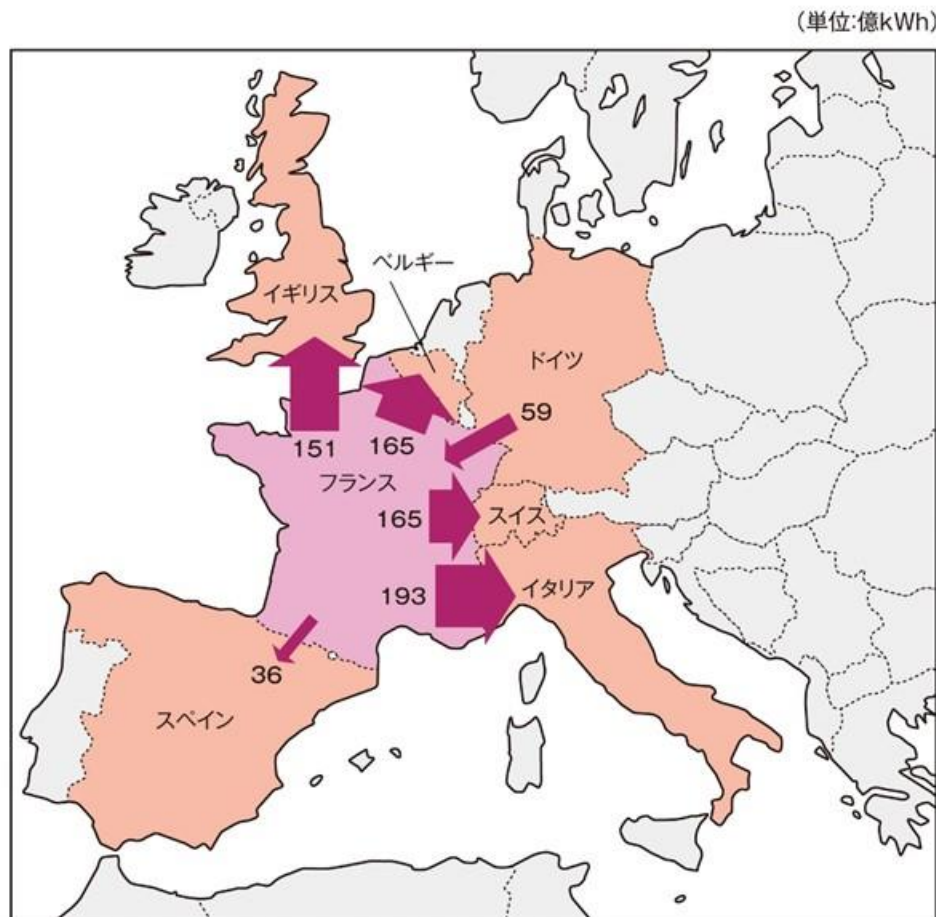
太陽光発電は  
時間と天気で  
発電量が変わる

風力発電の出力変動(冬季)



風力発電は  
風の強さで  
発電量が変わる

# ヨーロッパは送電網で各国と連携 日本は自国内で完結する必要がある



(2014年)

フランスからの輸出電力量 (A)	651億kWh
フランスの発電電力量 (B) (送電端)	5,404億kWh
輸出比率 (A/B)	12%

(注) 四捨五入の関係で合計値が合わない場合がある

## **コラム1. 変動再エネは自立電源でない！ 火力依存で温室効果ガスは削減しない**

- 太陽光、風力を補完する火力は大量の温室効果ガスを発生して、太陽光、風力発電による温室効果ガスの削減効果は薄められる
- 従って発電量kwh当たりの温室効果ガスの排出量はなかなか下らない
- ドイツでは1億kwにも及ぶ太陽光・風力発電設備ができ 運用されているが 実際の温室効果ガスの排出量は横ばいで下ならず、2020年、2030年目標の達成が絶望的な状態にある
- 温暖化対策の切り札は温暖化ガス発生が極少の原子力発電しかない

# ドイツにおける温室効果ガスの削減目標

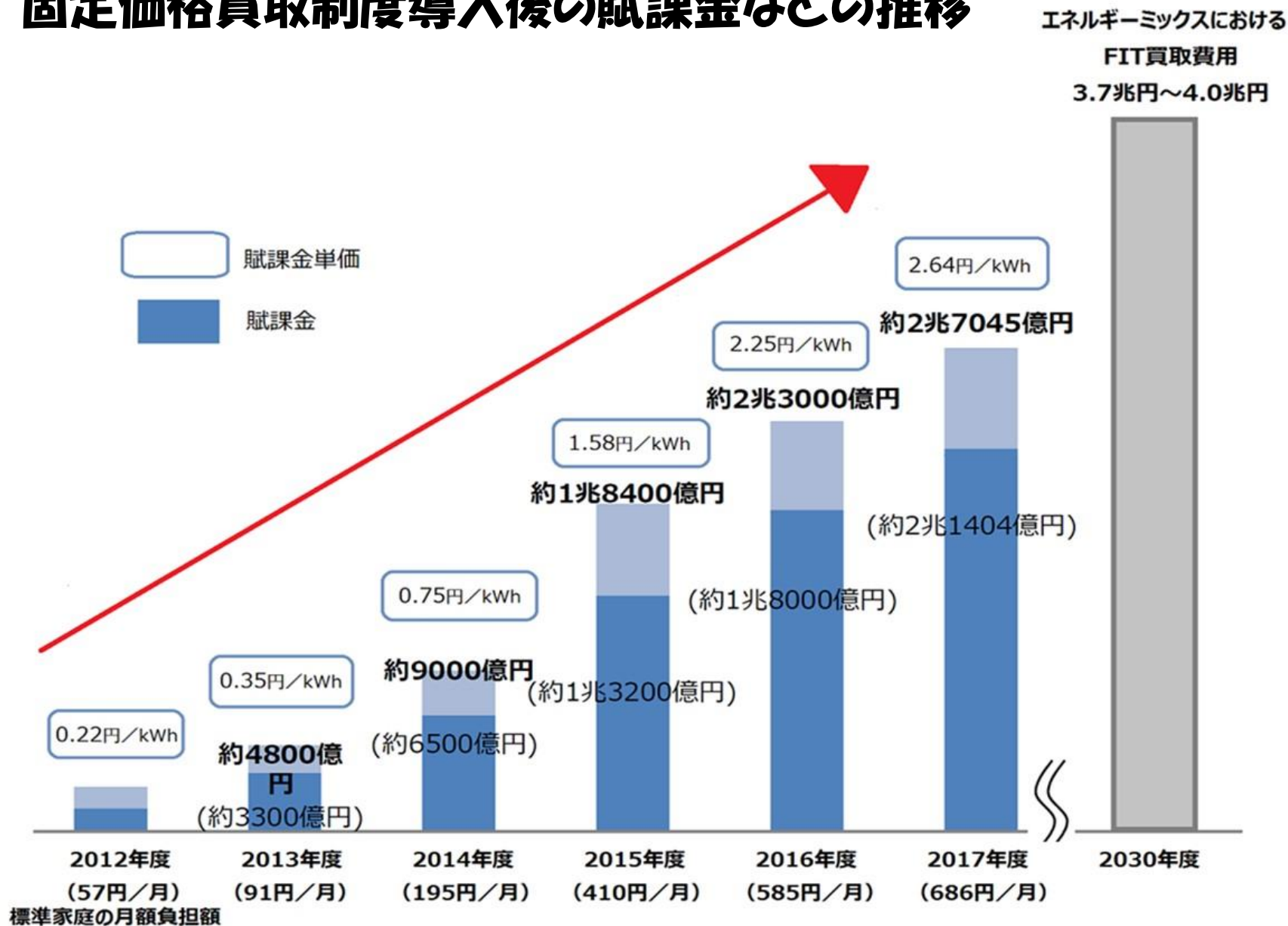


## コラム2. 変動再エネは採算が取れない！ 再エネ賦課金で導入

- 太陽光、風力の電気はエネルギー源が希薄、低密度であり、集めて利用するには沢山の設備と広い敷地を必要とする
- 太陽光、風力の発電設備は設備利用率が12%,20%と低く、設備利用率の高い火力、原子力（80%）に比べて、太陽光では7倍、風力では4倍の発電設備を必要とする
- 太陽光、風力の発電設備kwに対しその発電量kwhが少ないため、その発電コストは本質的に高価で、火力発電、原子力発電の2倍以上になる
- 固定価格買取制度による再エネ賦課金の補助なしでは競争力がない
- 再エネ賦課金は電気料金として負担⇒**国民負担が増大**
- 2017年の賦課金は総額で2.1兆円にも及び国民一人当たり年間1万7千円の負担に相当する



# 固定価格買取制度導入後の賦課金などの推移



## **コラム3. 原発停止の代替は化石燃料 大量輸入で貴重な国富が流出している**

- 先の震災後原子力発電は全面的に運転停止されており、その代替として火力発電を炊き増し、そのため化石燃料を緊急輸入して対応している
- その結果LNGを主体として2011年度は2.3兆円、2012年度3.1兆円、2013年度には実に3.6兆円の貴重な外貨が国外流失している
- これは1日当たり100億円に相当し、国民一人当たり年間3万円の負担、ムダ使いになる
- その後化石燃料の値下がりの動きもあり、幾分減少しているものの現在までに累計20兆円以上の国富が流出し、今後とも大幅に増大する

## 燃料費増加の見通し

1. 原子力発電の稼働停止に伴う火力発電の焚き増しによる2013年度の燃料費の増加について、直近の燃料価格等を踏まえて試算を行った結果、約3.6兆円と試算される。

電力9社計	2010年度実績	2011年度実績	2012年度実績	2013年度推計
総コスト	14.6兆円	16.9兆円	18.1兆円	18.6兆円+α
燃料費	3.6兆円	5.9兆円	7.0兆円	7.5兆円+α
原発停止分の 火力焚き増しに 掛かる燃料費 (試算)	—	<b>+2.3兆円</b> 内訳 LNG +1.2兆円 石油 +1.2兆円 石炭 +0.1兆円 原子力▲0.2兆円	<b>+3.1兆円</b> 内訳 LNG +1.4兆円 石油 +1.9兆円 石炭 +0.1兆円 原子力▲0.3兆円	<b>+3.6兆円</b> 内訳 LNG +1.9兆円 石油 +1.8兆円 石炭 +0.1兆円 原子力▲0.3兆円
燃料費増が総コスト に占める割合(%)	—	13.6%	17.1%	19.4%
原子力利用率	67%	25%	4%	2%

【参考】コストの諸元	LNG	石油	石炭	原子力
燃料費(2013年度)	13円/kWh	18円/kWh	4円/kWh	1円/kWh
焚き増し分の発電電力量(2013年度)	1,483億kWh	1,019億kWh	153億kWh	—

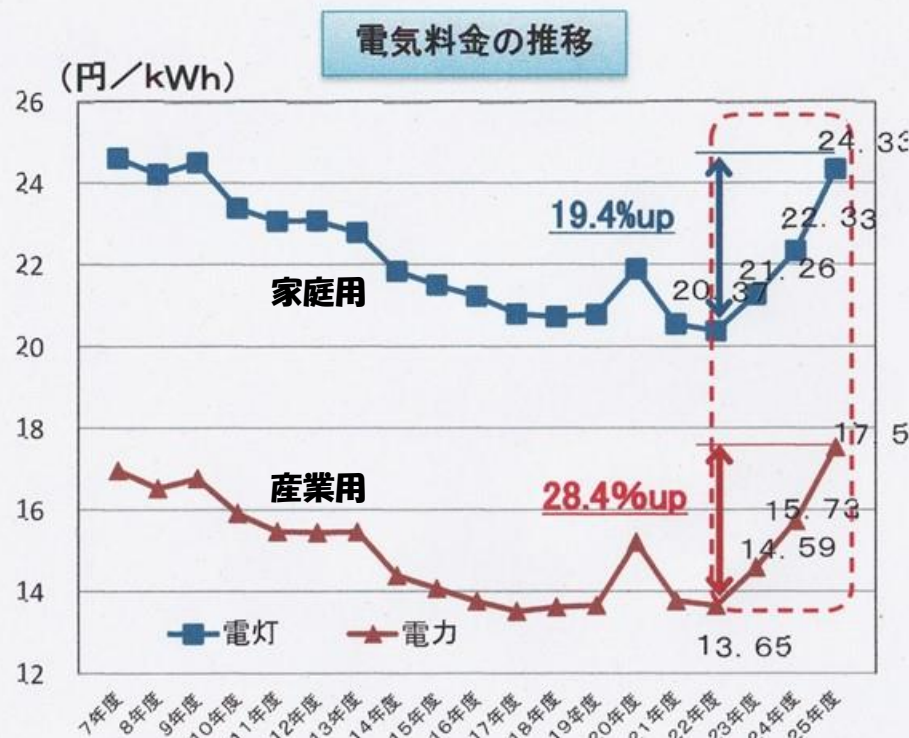


# 東日本大震災以降の新たなエネルギー制約③

## 2. 国民生活・経済への影響

### (2) 電気料金の高騰

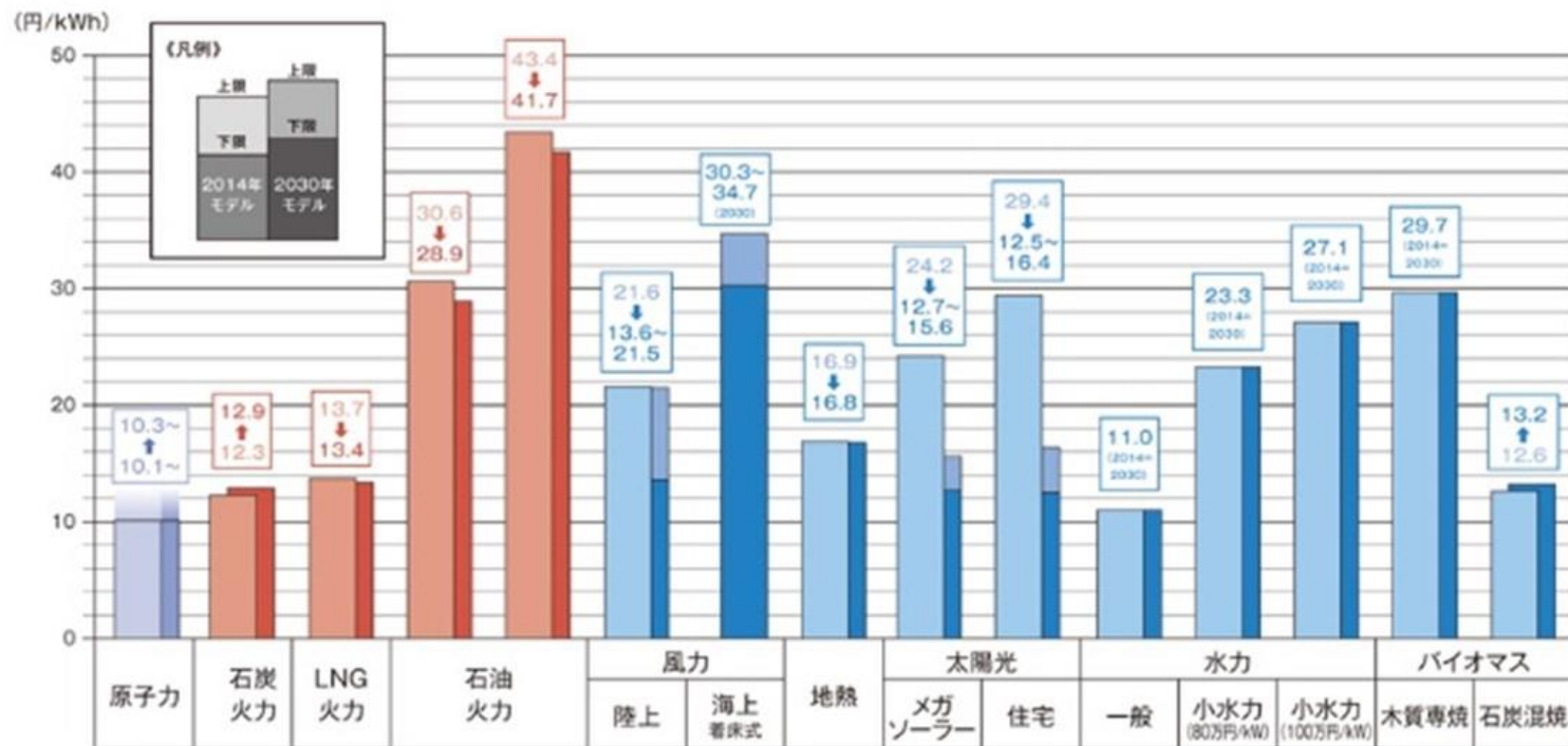
- 震災の前に比べて、家庭用の電気料金は約2割、産業用の電気料金は約3割上昇。
- 中小・零細企業の中には、電気料金の上昇を転嫁できず、経営が非常に厳しいという声も高まっている。



出典：電力需要実績確報(電気事業連合会)、各電力会社決算資料等を基に作成

業界	業界団体の声 (日商による調査結果のポイント)
鑄造	<ul style="list-style-type: none"> <li>中小企業が約8割。</li> <li>倒産・廃業が急増(2012年12社、13年14社)。</li> </ul>
鍛造	<ul style="list-style-type: none"> <li>中小企業が9割以上。</li> <li>電気料金上昇に対応するため、一時帰休、給与削減、人員削減等、労働面でコスト削減を行う企業が大幅に増加。</li> </ul>
金属熱処理	<ul style="list-style-type: none"> <li>従業員数平均26人とほとんどが零細企業。</li> <li>昨年末に2社、今春に1社が工場・部門閉鎖。</li> </ul>

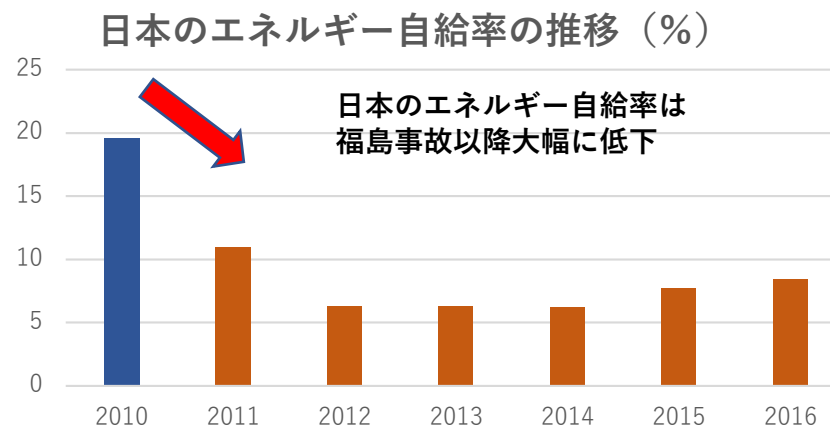
# 1 kWhあたりの発電コスト



設備利用率	70%	70%	70%	30%	10%	20%	30%	83%	12%	12%	45%	60%	60%	87%	70%
稼働年数 (2009年モデル)	40年	40年	40年	40年	40年	20年	20年	40年	20年 (30年)	20年 (30年)	40年	40年	40年	40年	40年

## コラム4. 日本のエネルギー安全保障に 原子力は欠かせない！

- エネルギー資源を全面輸入に頼る日本のエネルギー自給率は現状僅か7.4%
- 原子力は備蓄性が高いこと、再処理によりウラン燃料の利用拡大が可能なことから準国際エネルギーといえる
- 福島原子力事故以前の自給率は約20%⇒事故後は約6～8%に低下（右図）



- 1978年石油危機に味わった無資源国の悲哀を思い起こし万全の備えをとるべきではなかろうか
- 戦前の石油途絶が先の大戦の引金になった経緯を顧みるまでもなくエネルギー安全保障は国家安全保障に直結していることを肝に銘ずるべき

# **1978年石油危機に味わった無資源国の悲哀 を思い起こし万全の備えをとるべき**

- 第4次中東戦争に端を発した石油危機には、一次エネルギーの79%を石油に頼っていた日本は脱石油を目指し、原子力推進に方針転向した苦しい経験がある
- 震災前一次エネルギーの化石燃料依存度は81%であったが、現在では原発運転停止・火力発電の炊き増しで89%に増加している
- エネルギー資源を海外に全面依存して自給率の低い日本は資源確保の面で国際情勢の影響をもろに受けやすくその安定供給が懸念されている



# 原油輸入価格の推移



1-2-6

出典：石油連盟統計資料より作成

# エネルギー安全保障は国家安全保障

- エネルギー資源の途絶は国家の存亡に関わる事態であり、戦前に石油全面禁輸から無謀な戦争に突入した記憶も新しい
- 海外からのエネルギー資源の輸送ルートであるシーレーンの安定な確保は重要であり、とりわけホルムズ海峡、南シナ海、東シナ海等での軍事的紛争はその発生防止と抑止に努めねばならないが、できる限り海外資源に依存しない体質とすべきである
- 国際エネルギー機関の最近の見通しによれば既存の在来型油田からの原油生産量は2040年には現在の1 / 3に下がるとのこと
- 再生可能エネルギーの導入には限界があることから我々の子供、孫、子孫の世代のエネルギーをどう確保するかを真剣に考えることが我々の世代の使命である原子力なしでは成り立たないことを認識すべきである

# 石油輸送のリスク



## コラム5. 脱原発は日本経済を衰退させる

- 震災後の化石燃料依存急増（85%）⇒供給リスク、価格変動リスク増大
- 変動再エネ（太陽光、風力）増大⇒電気料金押上、CO2増大（変動バックアップ）
- 電気料金高騰⇒製造業の国際競争力低下
- 経済衰退
  - 一人当たりGDPの凋落 1996年世界第3位⇒2016年第22位
  - 2010年~2030年の年平均経済成長率 0.09%押し下げ
  - 2030年
    - 実質GNP 7.8兆円に縮小（1.7%減）
    - 化石燃料輸入18.7%増大、電気料金36.4%上昇、CO2排出量74.6%増大

出典： 季刊『国際貿易と投資』Spring2014/No.95『脱原発が日本の経済・産業に与える影響』



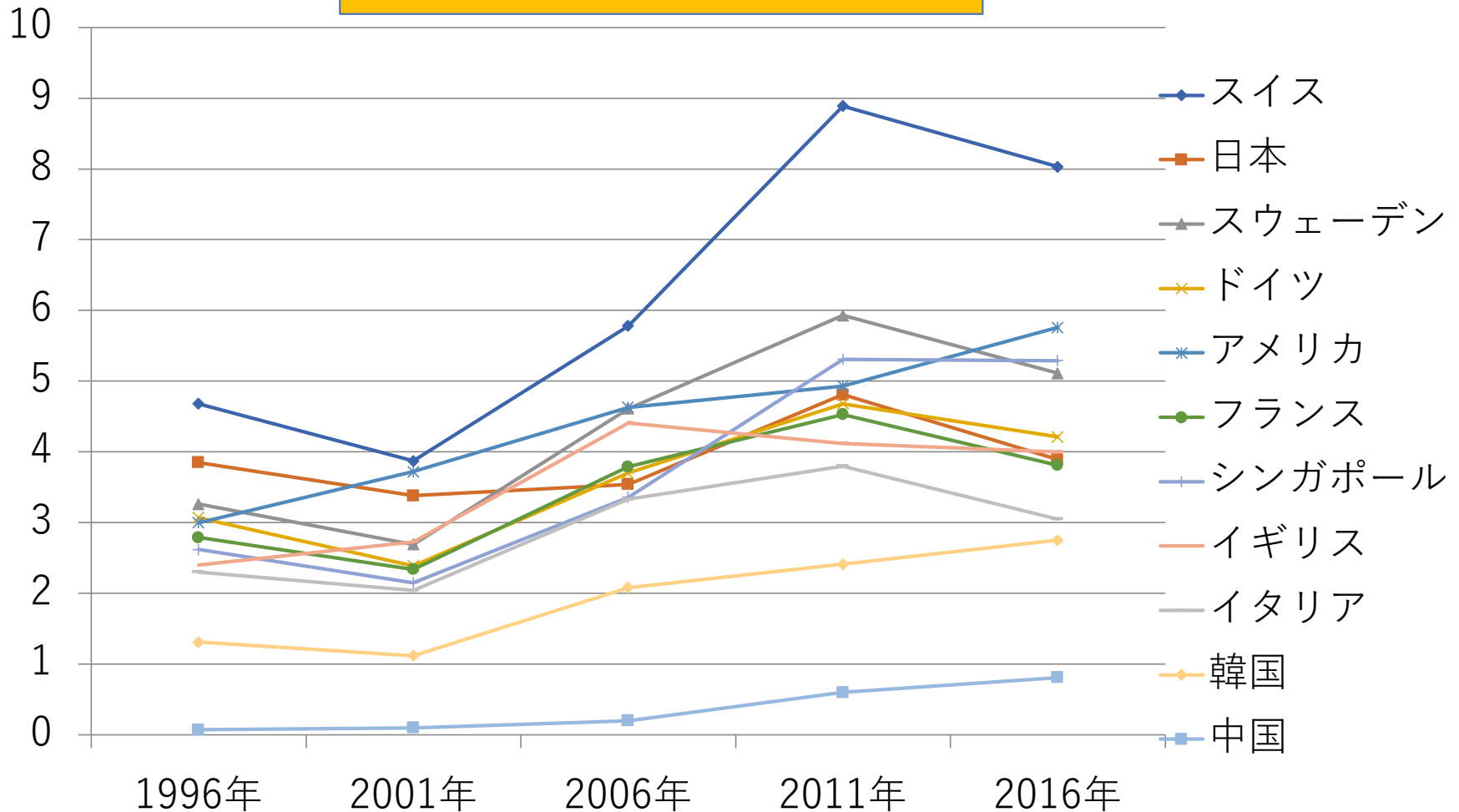
# 試算 原子力比率の低下が日本経済に与える影響

## 原子力発電比率がエネルギーミックス計画の20-22%から15%に低下した場合

- 2030年の実質GDPは原子力不足分をLNG火力で補てんすると2.5兆円、再生可能エネルギーで補てんすると2.7兆円、それぞれ減少する
- 2017-2030年までの累計ではLNG火力で補てんする場合は約11兆円、再生可能エネルギーで補てんする場合は約13兆円の減少となる
- 家計への影響を一人当たりのGDPで見ると、2030年で年間2.1-2.3万円の減少となり、これを消費税の支払いに換算すると、一人当たり2か月分程度の負担となる

# 日本の経済的豊かさは凋落している

一人当たり名目GDP（万USドル）



日本の一人当たりGDPは、1996年世界第3位であったが、2016年には第22位まで凋落した

出典：IMF-World Economic Outlook Databases（2017年10月版）

## 第二部 これからの原子力

### 福島第一発電所事故を乗り越えて！

第一部では脱原発を主張する方々もおられますが、地球環境を維持しながらエネルギー需要にこたえるには、一定規模の原子力発電が不可欠なことを示しました。

第二部では東日本大震災に際して発生した、福島第一原子力発電所の津波に起因する炉心損傷事故の反省を踏まえたうえで、原子力発電の役割を果たすためにはどうすればよいのかについて、私案を示します。

安全に対してリスクゼロは不可能ですが、国民が受容できる程度にリスクを抑制することがまず求められます。そのうえで、核燃料サイクルを推進することにより、長期的に安定供給を可能とし、エネルギー資源面での安全保障が実現できます。更に経済性、地球環境問題の解決を目指し、21世紀全体を通したエネルギー選択、エネルギー・ミックス計画をどうすれば実現できるかを検討しました。

ここでは検討結果をお示します。

# 1. 原子力発電は安全性が大前提

- 東電福島第一原子力発電所事故の反省を原点とした、社会の合意が得られる安全水準の達成

社会的合意が得られる安全水準 S

安全水準の指標は安全目標

- 原子力選択の視点・便益とリスクの天秤

便益・3E  $\geq$  リスク

安全水準Sはリスクの許容水準

- もう一つの天秤

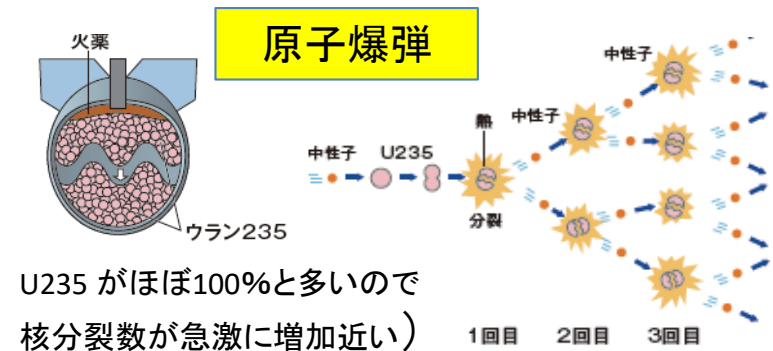
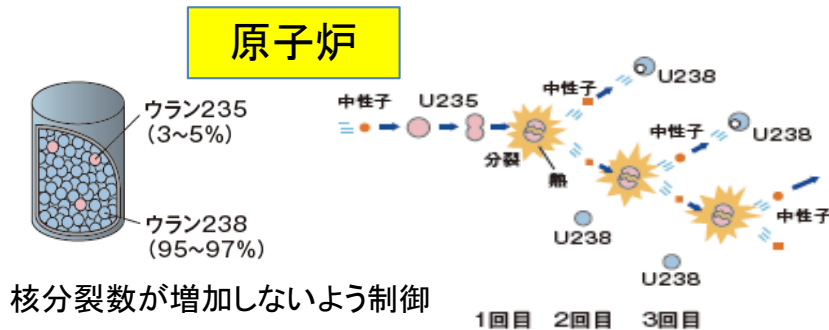
便益・3E  $\geq$  脱原発のリスク

## 参考

- － 東電福島第一原子力発電所事故による被曝死亡者はゼロ
- － しかし15万人以上の長期強制避難者を出してしまった

# 原子力発電の基礎

- 原子力発電のエネルギーは核分裂のエネルギー
- 核分裂が連続的に反応 中性子の生成と消失が均衡状態(外から中性子を補給することなしに連鎖反応が持続する状態)を臨界という
- 原子力炉では必要な出力で一定レベルの連鎖反応を行わせるため、制御棒(中性子を吸収)で中性子の量を臨界レベルに制御している



- 核分裂の際に放出されるエネルギー
  - $\text{U235} + \text{中性子} \Rightarrow \text{核分裂生成物} + \text{中性子} + \text{エネルギー (MeV単位)}$
- 1グラムの質量から得られるエネルギーは化石燃料の燃焼から得られるエネルギー(eV単位)の300万倍程度(大概算)
- 100万kWの発電所、1年間運転するのに必要な燃料
  - 濃縮ウラン 21トン、天然ガス 95万トン、石油 155万トン、石炭 235万トン
  - 原子力発電の廃棄物は、毒性は高いが量は著しく少ない

# 事故後の安全対策

過酷事故を想定した深層防護対策を充実・・・特に第4層、第5層  
深層防護　：　defense in Depth　多重防護とも言われる

## 第1層から第5層までの深層防護対策の要点

### 第1層　異常の発生防止

- － 余裕ある設計：安全設計、フェールセーフ、インターロック

### 第2層　異常の拡大防止

- － 異常・過度事象防止：止める、冷やす、閉じ込める

### 第3層　炉心損傷防止

- － 工学的安全設備：非常用炉心冷却系など

### 第4層　周辺への放射性物質放出防止

- － 過酷事故緩和策：冷却、フィルターベントなど

### 第5層　被ばく防止・環境汚染防止・復旧活動

- － 避難、復興：循環冷却、除染など



# 規制基準の高度化 世界一厳しい基準に！

## 新規制基準を制定

(世界一厳しい基準)

- 深層防護第1層～3層の充実
- 第4層、5層によりシビアアクシデントを防止

### <従来の規制基準>

自然現象に対する考慮
火災に対する考慮
電源の信頼性
その他の設備の性能
耐震・耐津波性能

### <新規制基準>

意図的な航空機衝突への対応
放射性物質の拡散抑制対策
格納容器破損防止対策
炉心損傷防止対策 (複数の機器の故障を想定)
内部溢水に対する考慮(新設)
自然現象に対する考慮 (火山・竜巻・森林火災を新設)
火災に対する考慮
電源の信頼性
その他の設備の性能
耐震・耐津波性能

(テロ対策) 新設  
(シビアアクシデント対策) 新設

強化又は新設

強化

# 安全性は格段に高まった！

①地震で受電設備が破損  
(外部電源喪失)



受電設備の耐震性向上  
(碍子対策、ガス遮断器採用)

②津波で非常用電源や  
電源盤、直流が使用不能



浸水防止対策(水密ドア、高所  
設置など)、非常電源多様化

③原子炉冷却・注水不能・  
炉心溶融・水素発生



冷却水源・注水手段多様化  
安全弁や除熱の強化など

④格納容器の過温破損  
水素爆発と放射能飛散



速やかなベントと格納容器  
冷却、フィルター付ベント

⑤計測監視と通信不能  
過酷事故時の防災遅延

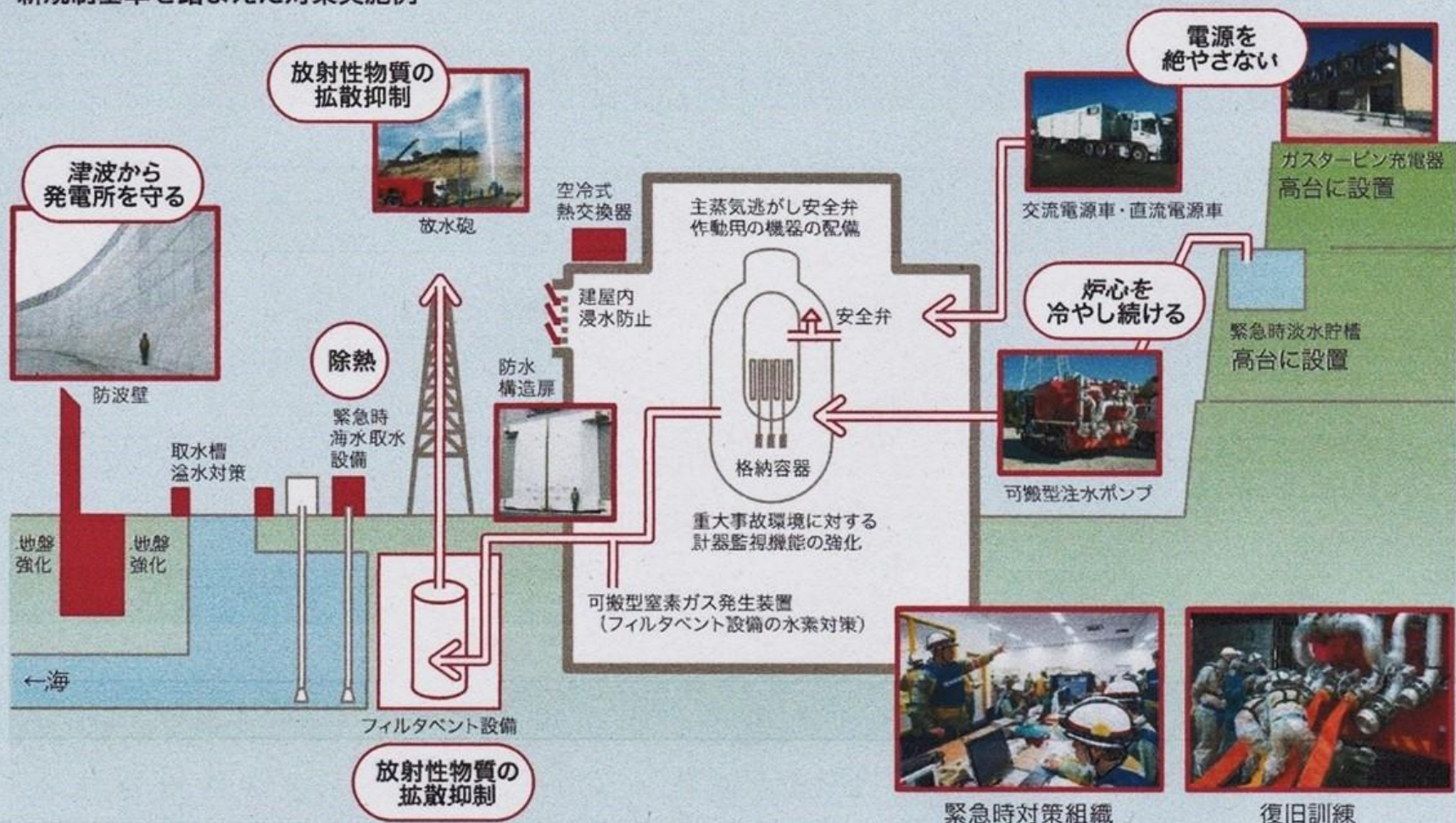


非常時の訓練・対策強化  
原子力防災体制強化



# 事例 事故対策 その1

新規制基準を踏まえた対策実施例

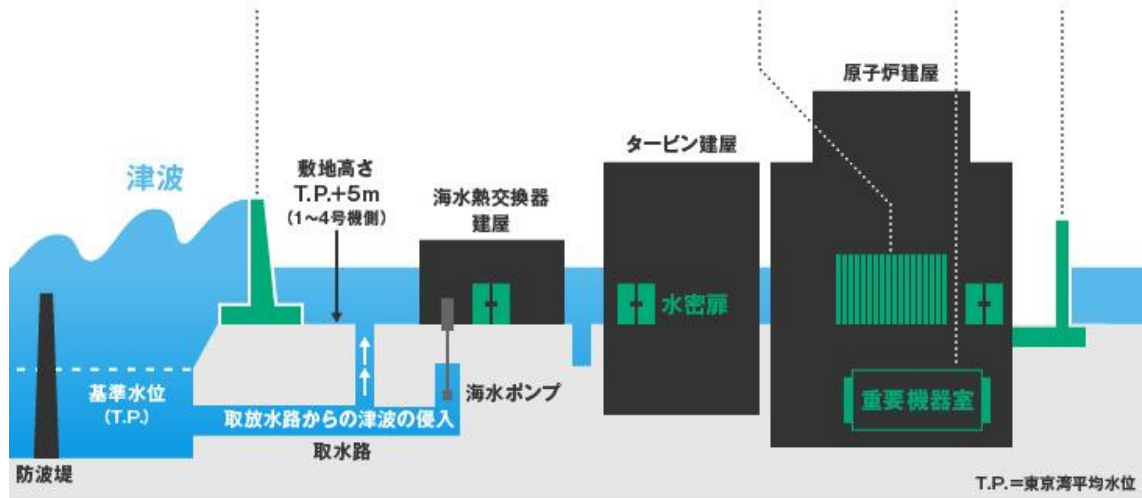


写真提供：中部電力株式会社

日本のエネルギー 2017 <http://www.enecho.meti.go.jp/>

# 事例 事故対策 その2

遮水対策（東電柏崎刈羽原発）

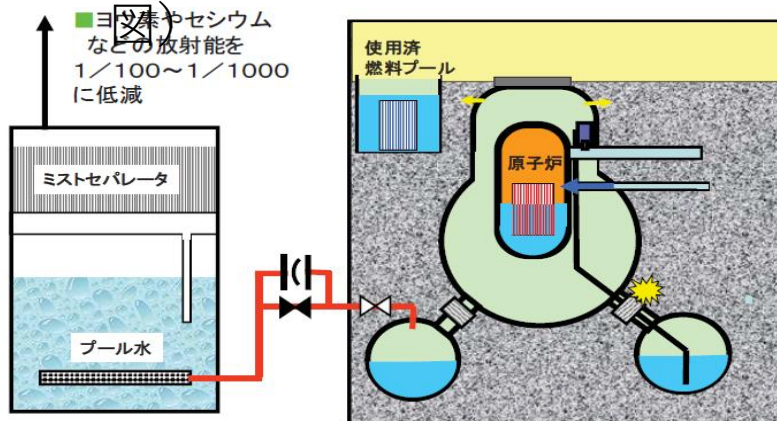


(イメージ)

防潮堤（関西電力）



フィルターベント概念



水密扉（関西電力）



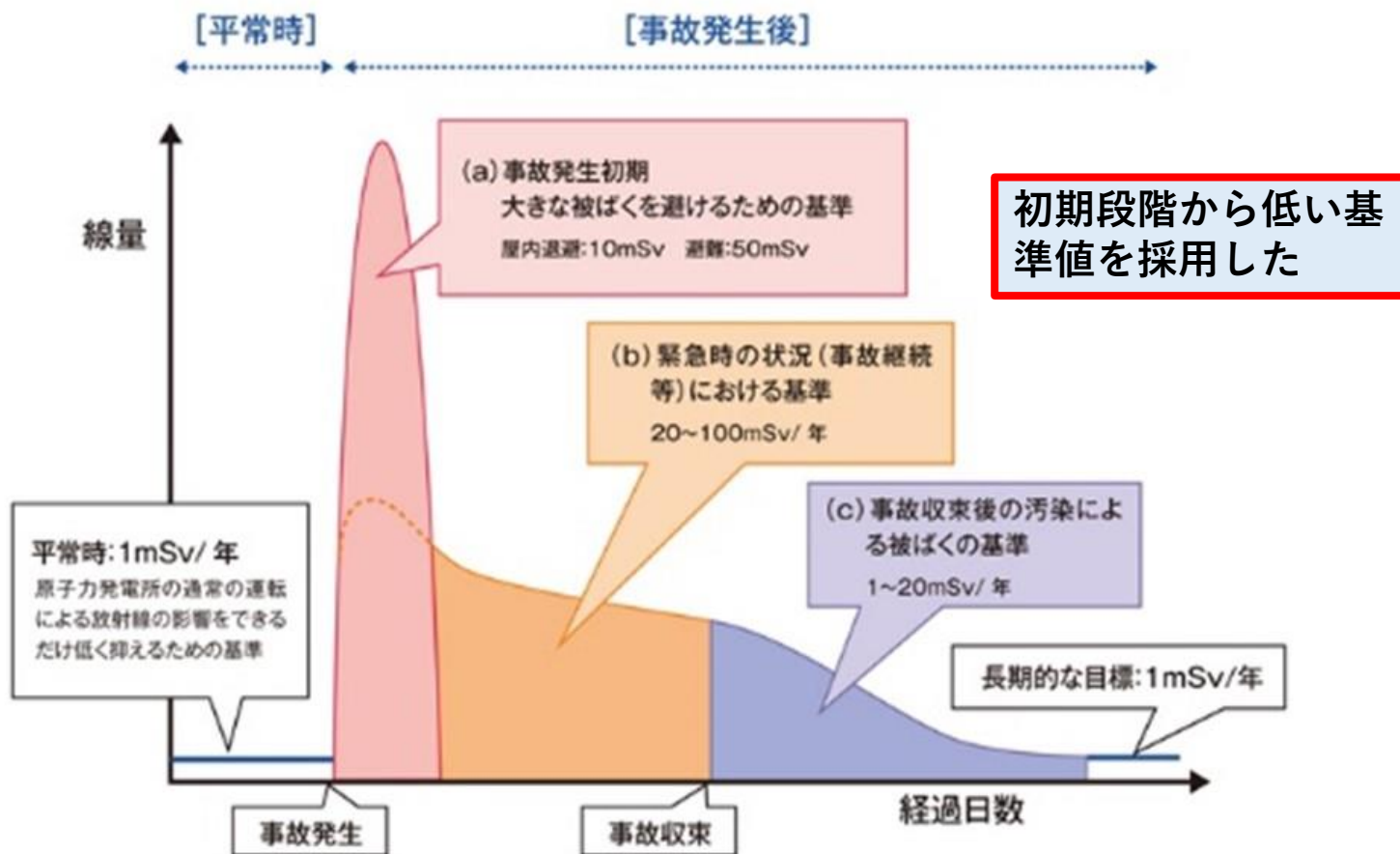


# 事故後の日本の食品基準は世界厳しい

(単位:ベクレル / キログラム)

核種	各国 食品群	日本	米国	EU
放射性 セシウム	乳児用食品	50	1,200	400
	牛乳	50		1,000
	飲料水	10		1,000
	一般食品	100		1,250
食品基準値の考え方		被ばく線量が年間1ミリシーベルト以内になるように設定。 一般食品は50%、飲料水と牛乳、乳児用食品は100%が汚染されていると仮定して算出。	被ばく線量が年間5ミリシーベルト以内になるように設定。 食品中の30%が汚染されていると仮定して算出。	被ばく線量が年間1ミリシーベルト以内になるように設定。 食品中の10%が汚染されていると仮定して算出。

# 事故対応の被ばくは低い基準値で管理





## 2. 核燃料サイクルによりエネルギーは盤石

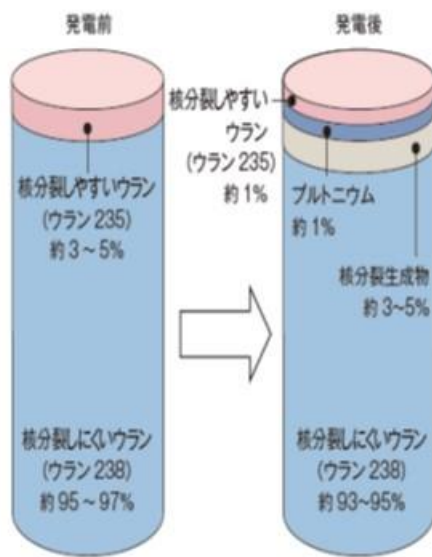
- 核燃料サイクルにより使用済燃料を有効利用
  - 使用済燃料を再処理し、残存ウランと生成されたプルトニウムを取り出し、核燃料をとことん活用
  - 当面の再処理MOX燃料の軽水炉利用（プルサーマル）により、ウラン燃料を約20%有効活用
    - MOX燃料の軽水炉利用：欧米諸国で活用中
  - 将来は高速炉利用により数千年のエネルギー資源が確保
    - 高速炉：ロシア、中国、フランスで稼働、開発中
- 再処理による高レベル放射性廃棄物の処分は、使用済核燃料の直接処分より有利
  - 発熱量が少ないため処分場の面積を少なくできる
  - 再処理廃棄物にはPuが含まれないため放射性毒性が少ない
- 再処理の有無に関わらず、使用済燃料の処分は避けられない

 **再処理が最善の選択**

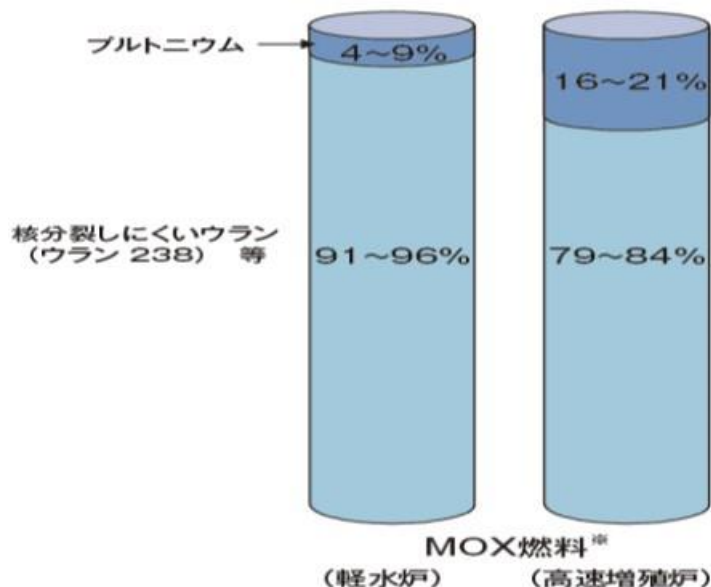
# 核燃料サイクル 再処理によるPu利用

- 軽水炉の初期燃料と使用済燃料の組成
  - 初期燃料 U235 3～5%、U238 (残り) 95%～97%
  - 使用済燃料 Pu 1%、U235 1%、U238 93%～95%、核分裂生成物 3～5%
- 再処理により使用済燃料中のPuとU235からウラン燃料とMOX燃料を生成
  - 軽水炉用ウラン燃料 (軽水炉初期燃料と同程度)
  - 軽水炉用MOX燃料 Pu 4～6%、U238 94～96%
  - 高速炉用MOX燃料 Pu 16～21%、U238 79%～84%

## 使用前と使用後のウラン燃料

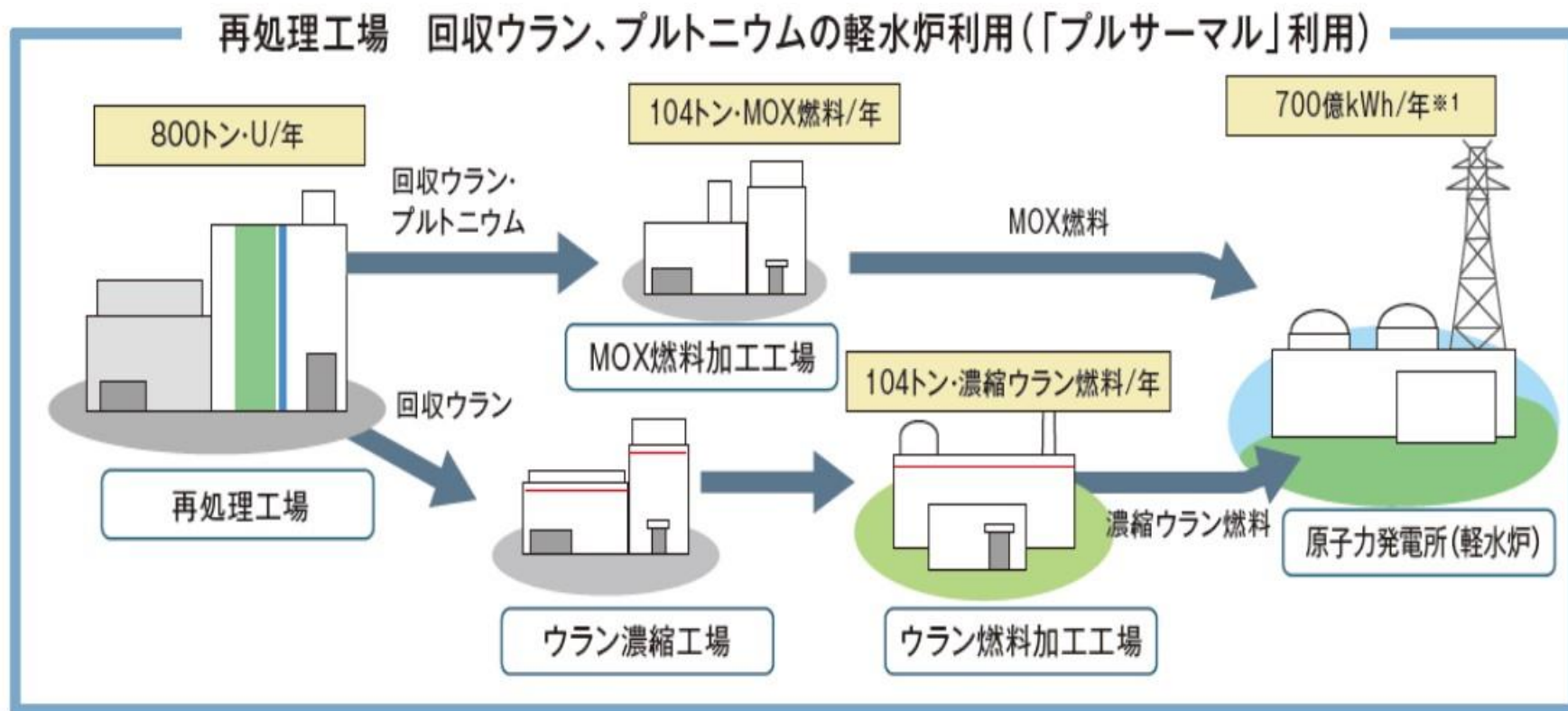


## ウラン燃料とMOX燃料



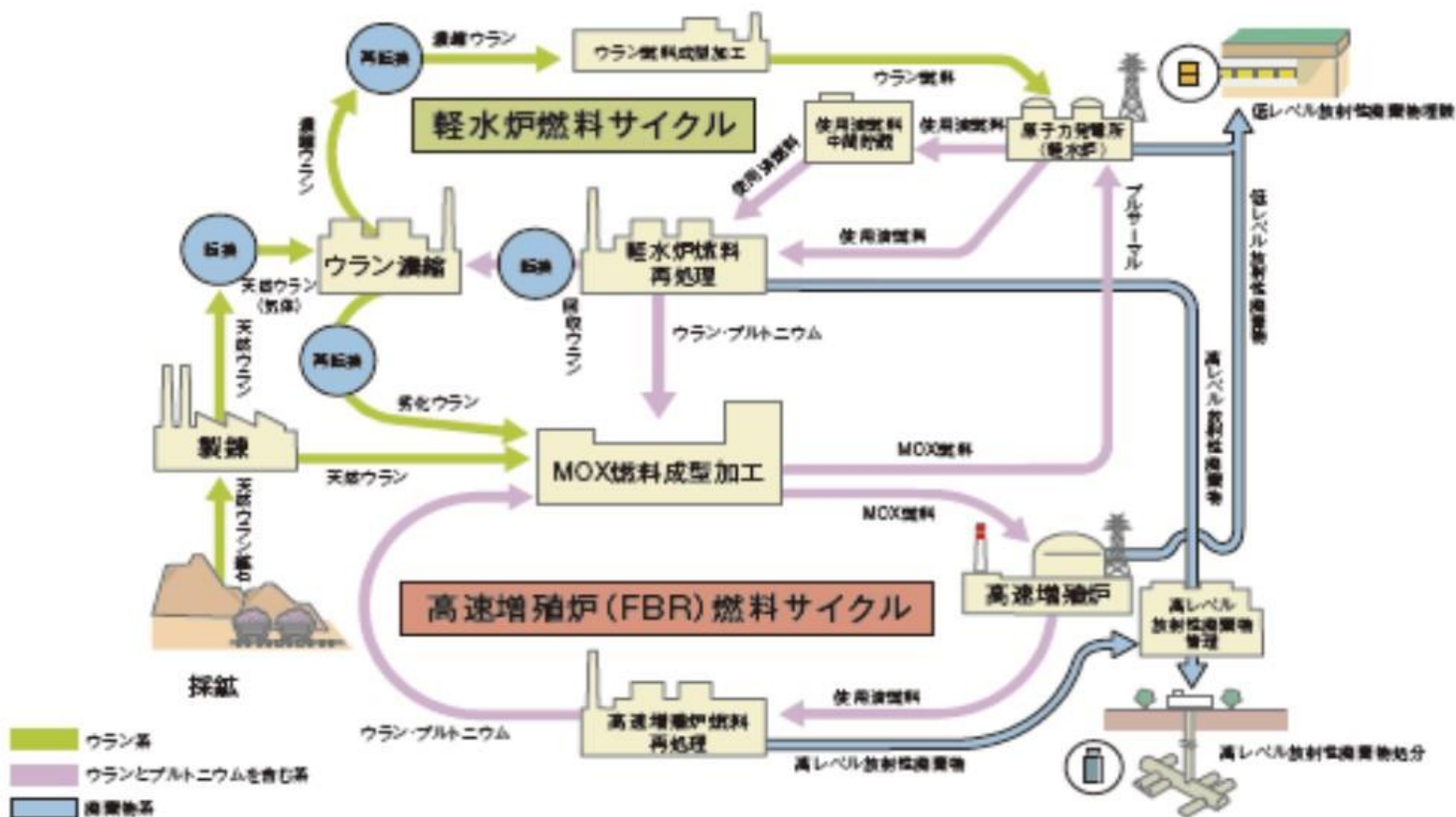
# 核燃料の有効利用1 プルサーマルの軽水炉活用

- 再処理工場（設備容量800t-U/年）で使用済核燃料から生成される核燃料の量
  - MOX燃料の年間生成量 : 104 t/年（MOX燃料加工工場で生産される）
  - ウラン燃料の年間生成量 : 104 t/年（ウラン燃料加工場で生産される）
- この燃料による年間発電電力量 700億kWh（100万kW発電所約10基分に相当する）
  - 従って年間に発生する使用済燃料から発生するPuはMOXで消費することができる
  - 備蓄Puは高速炉導入時の立ち上げ燃料としては活用（FBR2機分程度）→余剰Puの心配は無用



## 核燃料の有効利用2 高速炉での活用

- 高速炉はウラン資源の99.3%を占める非核分裂性ウラン（U238）を核分裂性Puに転換することにより、ウラン資源をとことん利用できる。
  - U238→Pu への転換比 約1.2 （軽水炉では 0.6程度）
- これにより数千年間の資源が確保できる



### **3. 高レベル放射性廃棄物の地層処分**

- これまでの原発の運転に伴い、既にガラス固化体換算で25,000本相当の使用済燃料が発生
- 再処理廃液の高レベル放射性廃棄物はガラス体に溶かし安定化处理
- ガラス固化体は安定した深い地層に安全に埋設
- ガラス固化体の放射能は当初は高いが長期埋設後には低レベル廃棄物並みの放射能に減衰
- 日本列島にはガラス固化体の地層処分に適した場所が多い



# 直接処分とガラス固化処分

○我が国は、資源の有効利用(※)、高レベル放射性廃棄物の減容化・有害度低減等の観点から、使用済燃料を再処理し、回収されるプルトニウム等を有効利用する核燃料サイクルの推進を基本的方針としている。(エネルギー基本計画(2014年4月閣議決定))

※国内にウラン資源がほとんど存在しない我が国において、国内で得られる資源を効率的に最大限活用することは、エネルギー安定供給やエネルギー安全保障の観点からも重要。

## 高レベル放射性廃棄物の減容化・有害度低減の比較

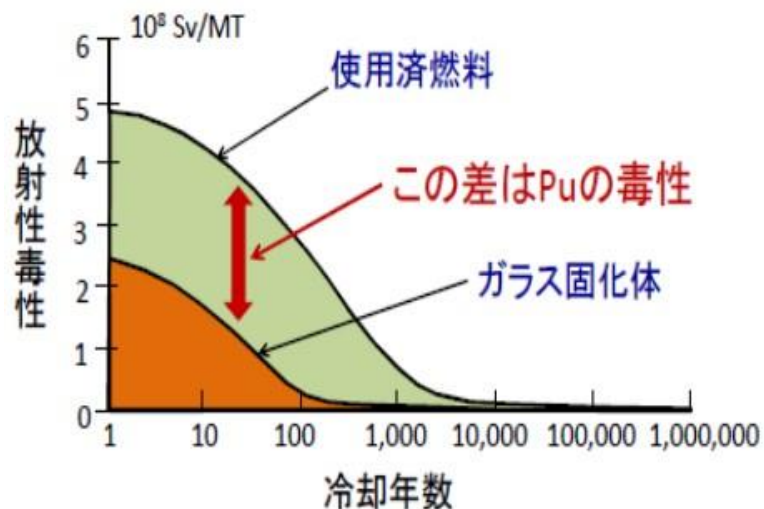
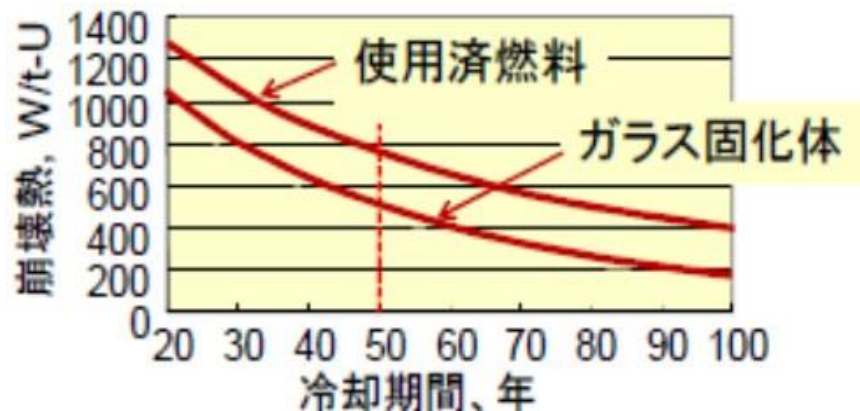
	使用済燃料をそのまま処分 (直接処分)	ガラス固化体にして処分
廃棄物の量	ウラン、プルトニウム等も含めて、使用済燃料をそのまま処分するため、廃棄物の量は多くなる。	使用済燃料からウラン、プルトニウム等を取り出すため、廃棄物の量は少なくなる。
	約4分の1に減容化	
廃棄物の放射能 の有害度	半減期の長いウラン、プルトニウム等も含めて、使用済燃料をそのまま処分するため、廃棄物の放射能レベルが高いまま処分される。	使用済燃料から、半減期の長いウラン、プルトニウム等を取り出すため、廃棄物の放射能レベルは低くなる。
有害度が天然ウラン並 になるまでの期間(注)	約10万年	約8千年
	約12分の1に低減	

(注)1GWで1年間発電するために必要な天然ウラン量の潜在的有害度と等しくなる期間を示す。(出典:原子力政策大綱(2005年))



# ガラス固化処分と直接処分 処分場体積と属性比較

- 処分場の広さ
  - ガラス固化体は直接処分にくらべ体積が1/4以下
    - 軽水炉再処理 : 0.22
    - 高速炉 : 0.15
  - 再処理により体積の減少とともに発熱量も減少
    - 発熱量大きい程まばら配置で面積也大
- 放射性毒性低減
  - 直接処分10万年
  - ガラス固化体処分ではPuが除去されるので毒性が低減
    - ⇒ 軽水炉再処理 8千年
    - ⇒ 高速炉 3百年



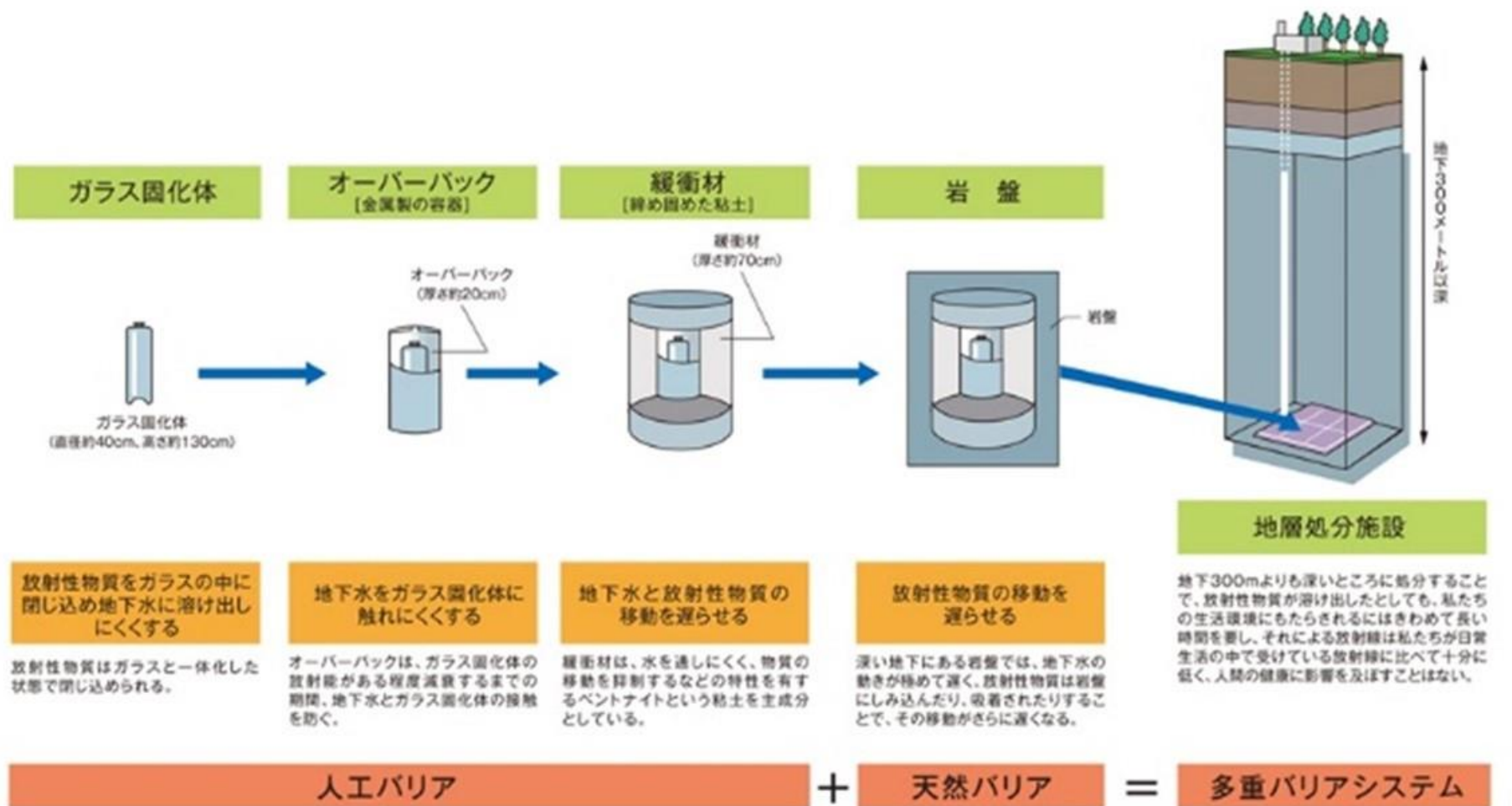
## 再処理廃液の高レベル廃棄物は ガラス体に溶かし安定化処理する

- ガラスは色々な物質を溶かし込む性質があり、一旦溶かし込んだ物質はガラスが解けでもしない限り外に漏れ出ることはない性質を持っている
- ガラスに物質を溶かし込むと色が付くがエジプト時代に 作られた色ガラスは3000年以上たった今でも色あせてはいない
- エジプトの歴史が証明したように、ガラスが長期に亘り 物質を閉じ込めるという自然の原理を利用したものである

# ガラス固化体は 安定した深い地層に安全に埋設

- ガラス固化体はオーバーパック(金属製容器)に収めて粘土の緩衝材を詰めた人工バリアを深さ300メートル以上の安定した岩盤に埋設して地層処分する
- 地下300メートル以上とは、人間の生活環境から完全に隔離できる深さで地表での人間活動や自然現象の影響を受けない環境にある
- 深い地下は酸欠状態で腐食が進まないという利点もあり、かつ岩石主成分のケイ素濃度が飽和して岩石の水への溶け出しが抑えられるという自然の鎧になっている
- この地層処分は、フィンランド、スウェーデン、フランス等の 欧州で先行しており、フィンランドの最終処分場は既に建設が始まっている
- ガラス固化体に含まれる放射性物質が地下水で運び出されようとしても人工バリア周辺で放射能は減衰する

# 高レベル放射性廃棄物多重バリアシステム



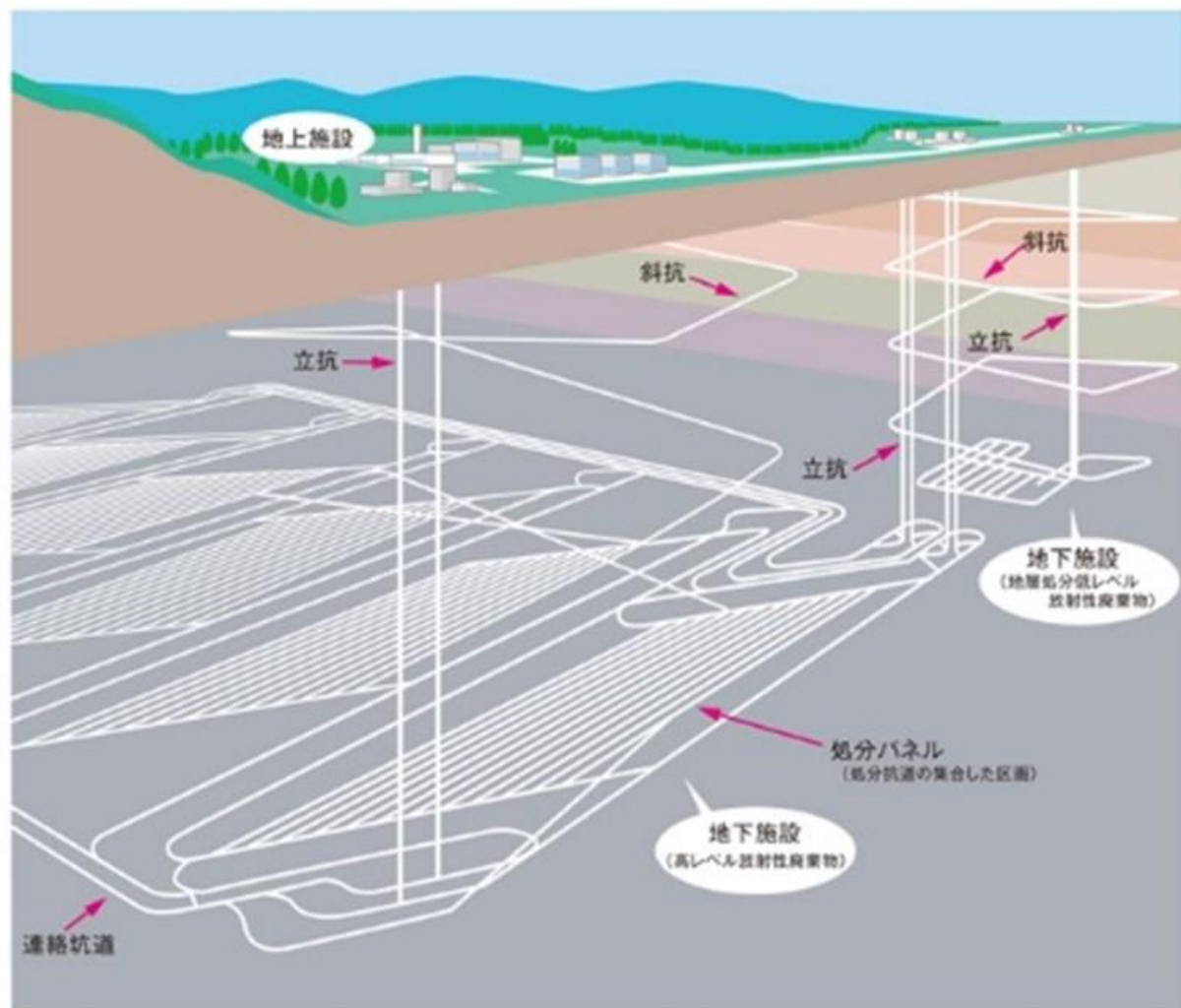
# 高レベル放射性廃棄物の地層処分の概念図

## 地層処分施設のレイアウト例

高レベル放射性廃棄物と地層処分低レベル放射性廃棄物の地層処分施設を併置した例

仕様の一例(結晶質岩、深度1,000mの場合)

地上施設	敷地面積1~2km <sup>2</sup>
高レベル放射性廃棄物の地下施設	大きさ(平面) 約3km×約2km
地層処分低レベル放射性廃棄物の地下施設	大きさ(平面) 約0.5km×約0.3km

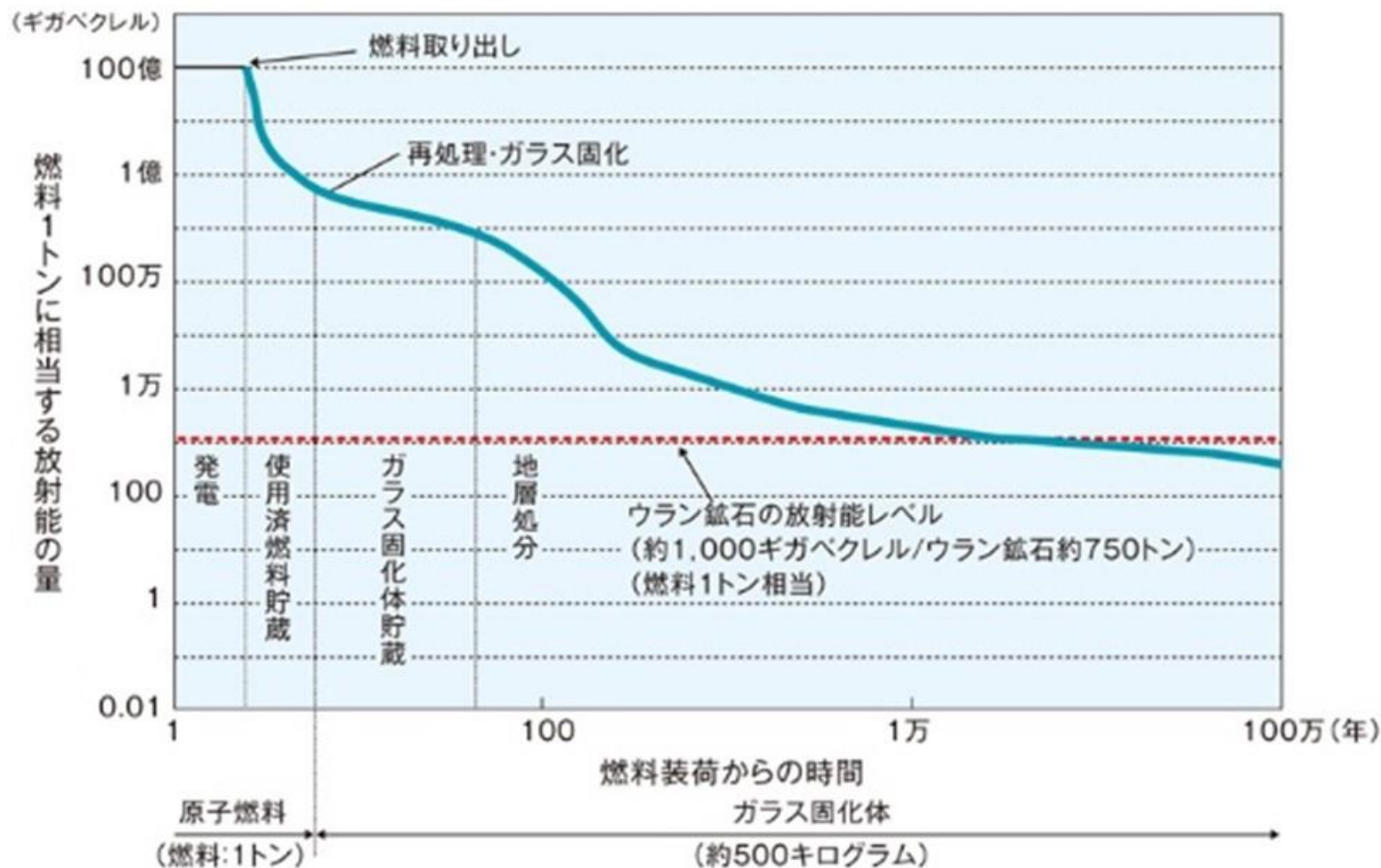


## **ガラス固化体の放射能は当初は高いが 長期埋設後には低レベル廃棄物並みの放射能に**

- ガラス固化体の放射能は地下埋設の当初は強烈であっても1000年後には 3000分の1 程度に低下して、もはや低レベル放射性廃棄物並みの放射能になる
- ガラス固化体の発生量は極めて少量で、国内全原発の稼働でも国民1人当たり年間5グラム（10円玉1枚相当）しか発生しない
- 一般廃棄物・産業廃棄物は合せて国民1人当たり年間4トン（2トトラック2台分）も発生している状況に比べてもいかに 少量であるかが理解できる

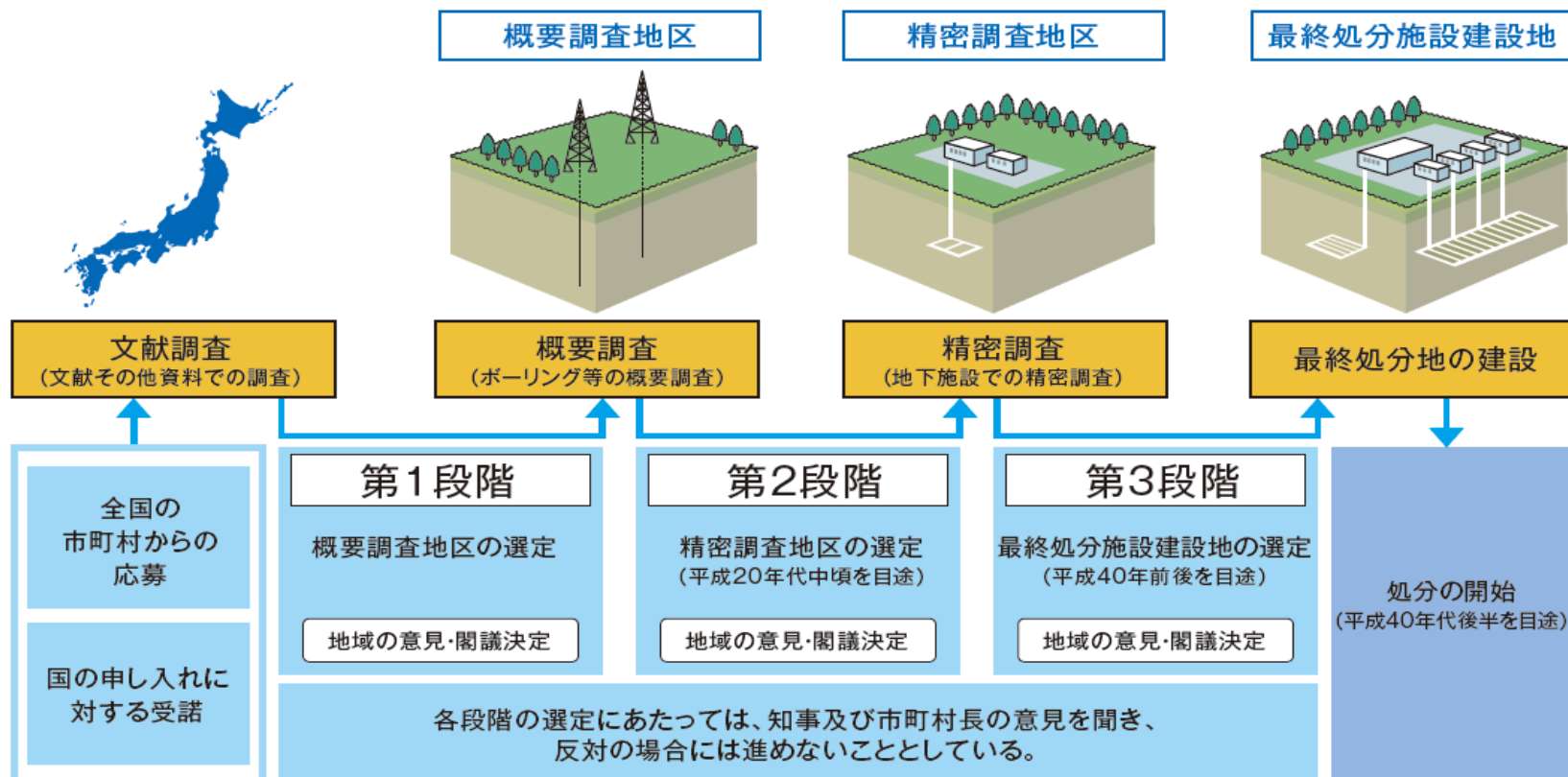


# 高レベル放射性廃棄物の放射能の減衰



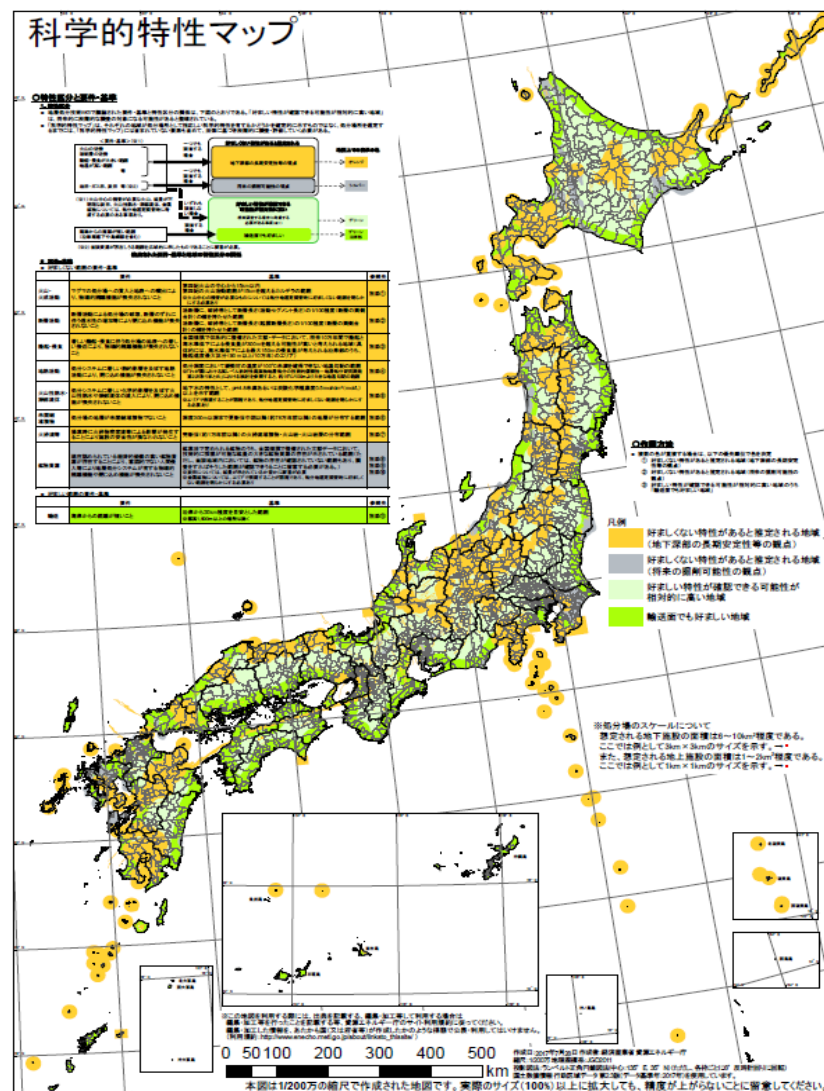
# 高レベル廃棄物処分地選定プロセス

- 科学的特性マップが公表された



# 地層処分候補地の科学的特性マップ

- グリーン
  - － 好ましい特性が確認できる可能性が高い
- 濃いグリーン
  - － 輸送面でも好ましい
    - 海岸から15km以内
- オレンジ
  - － 地下の長期的安定性等に懸念アリ
    - 火山から15km以内、活断層付近、隆起浸食の可能性アリなど
- シルバー
  - － 将来掘削の可能性アリ
    - 油田、ガス田、炭田等



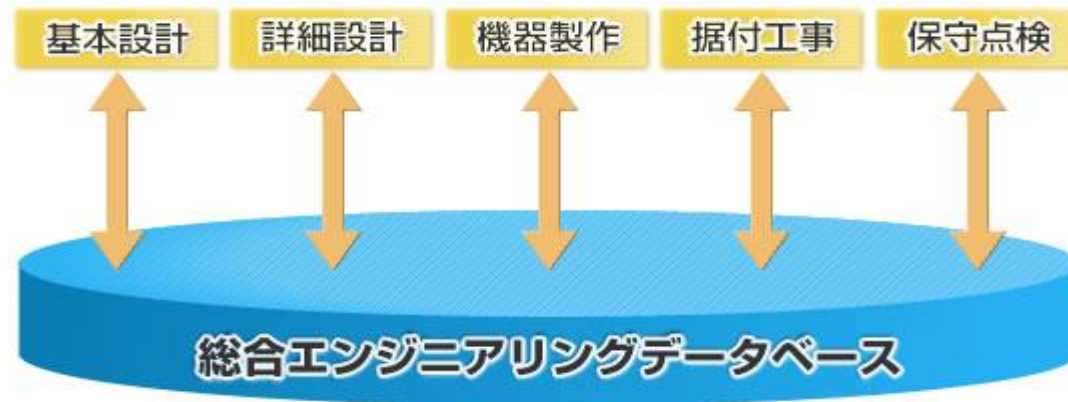
## 4. 原子力発電の産業基盤

- 原子力発電所のような大規模プラント建設総合的なマネジメントが不可欠
- 総合的なマネジメントの基盤
  - プロジェクト・マネジメント技術
    - プロジェクトを統合的にマネージ
      - 必要な時に必要なものを投入
  - プラント・エンジニアリング技術
    - 全体が調和のとれたエンジニアリング
    - モデルエンジニアリングからCAD/CAE統合システムに！
- 総合マネジメントシステム技術の維持には、人材と経験が不可欠
  - 新增設
  - 海外での建設



# 原子力総合エンジニアリング

全てのデータの一元管理 → 品質向上、工期短縮、原価低減

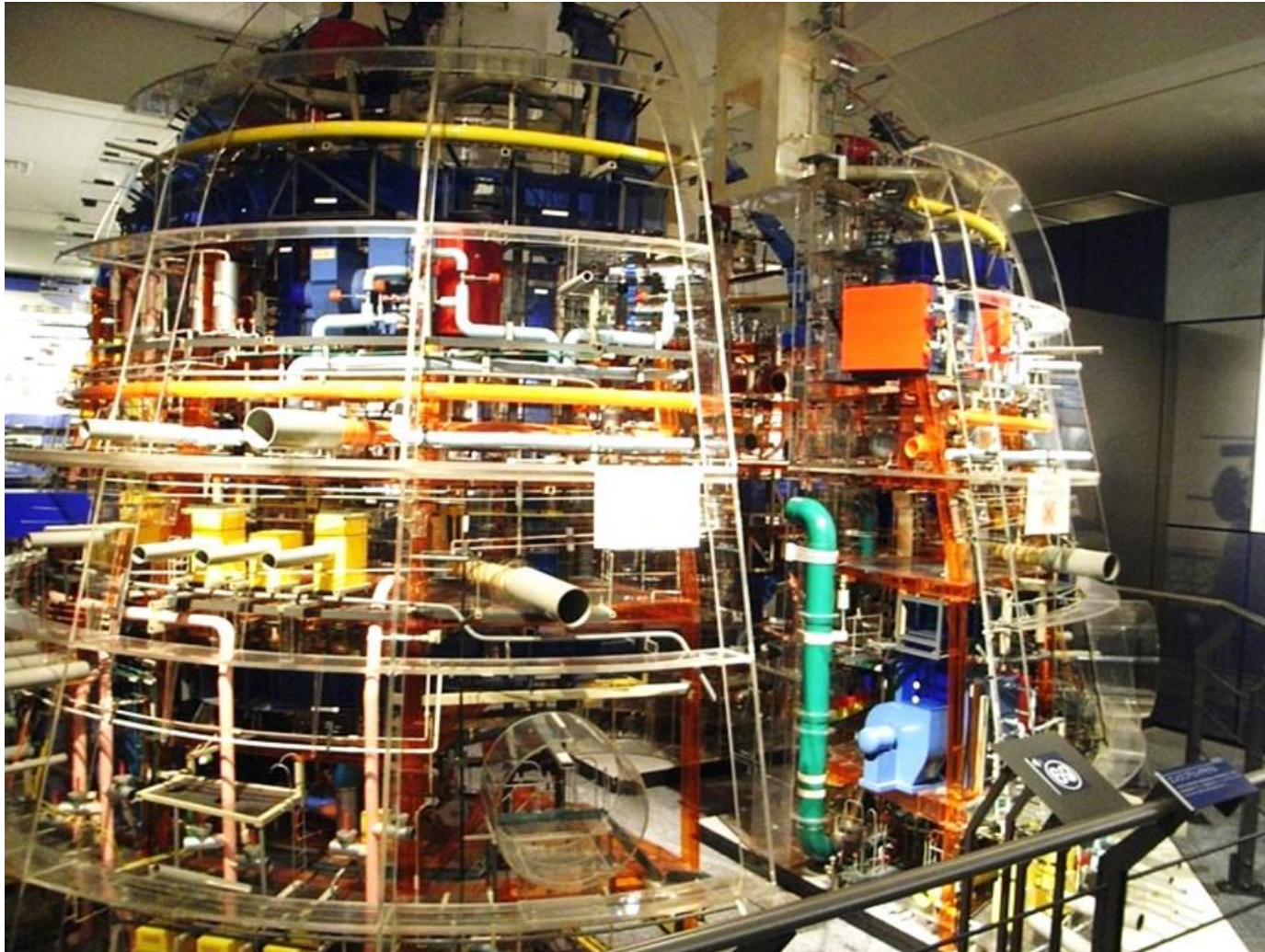


建設計画のビジュアル化



保守点検のビジュアル化

# 総合エンジニアリング エンジニアリングモデルからスタート





# 日本の原子力産業が没落しないために！

- 再稼働が進まず、新規建設もめどが立たない状況では産業界が弱体化、人材育成と技術維持の困難が懸念
- 中国、韓国等の原子力産業は拡大、国内外の市場で実績、経験を積み、独自技術の開発も進めており、先進国の原子力産業にとって代わろうとしている
- 我が国は22世紀に向けた長期戦略を構築し、官民一体となったエネルギー政策に格段の配慮が必要
  - － さもなければ、中国、韓国、ロシアから輸入することになる

# 5. 世界の潮流

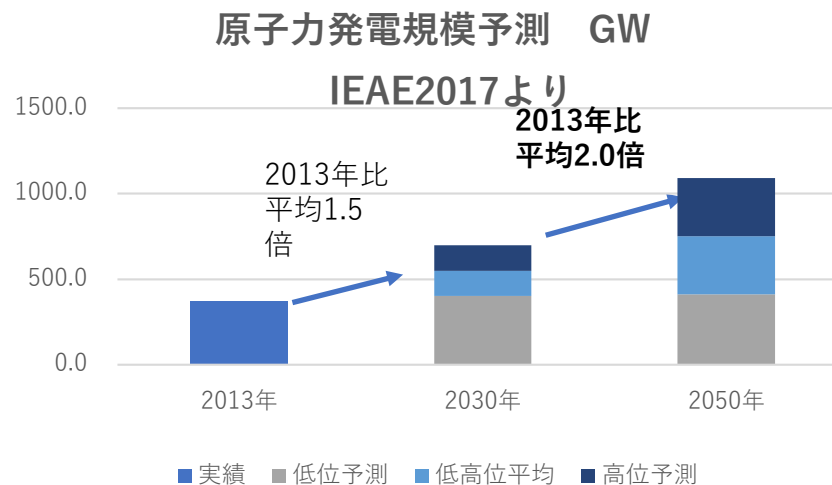
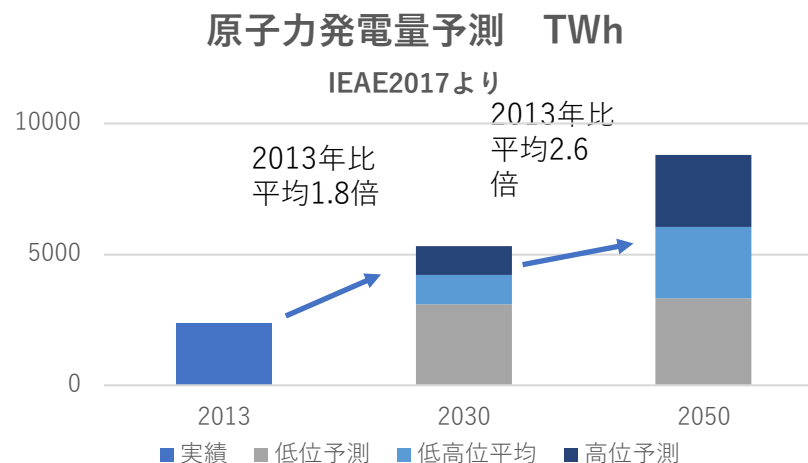
## 2030年と2050年の原子力発電予測

世界は原子力発電の依存が増大する

2030年、50年における原子力発電量と発電規模予測は以下の通り（2013年比、低、高位予測の平均値）

- 発電量（TWh）
  - 2030年 1.8倍
  - 2050年 2.6倍
- 発電規模（GW）
  - 2030年 1.5倍
  - 2050年 2.0倍

出典 IAEA「世界の原子力発電予測」  
（IAEA2017）



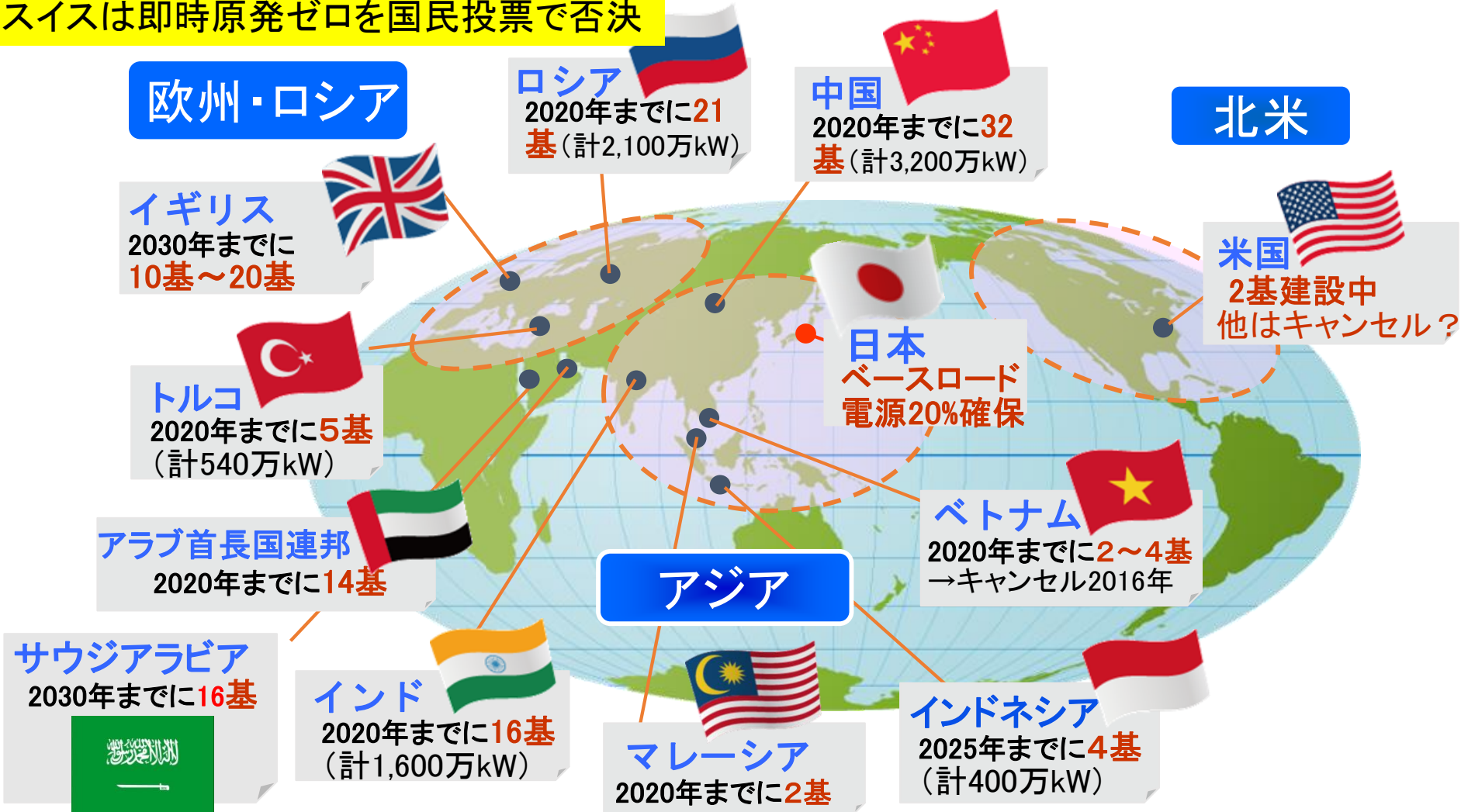
## **欧米先進国の原子力開発は停滞気味と言われるが アジア諸国を中心に原子力推進の潮流は強い！**

- 世界で現在運転中の原発は439基4億600万kwで過去1年間に8基が運転開始した（中国5基、米国、韓国、ロシア各1基）
- 新規に建設着工した原発は中国で3基、パキスタン1基で現在建設中の世界の原発は69基、7,290万kwである
- 新設計画の進展も見込まれ、世界各国で98基、1億1,116万kwの新規建設が計画されている。
- 世界では原子力発電は必要欠くべからざるものとして認識され、脱原発に向かっている国はほんの一部のみで、明らかに世界の潮流は原子力推進へと鮮明に向かっている

# 原子力発電所の建設は続く

■ 欧州・中国・ベトナム・インドネシア・アラブ諸国を中心に今後150基以上が建設

スイスは即時原発ゼロを国民投票で否決



## **中国、ロシア、インド、韓国等で 原発の新規建設が目白押しである**

- 中国では最近5基500万kwが運転開始して、原子力発電容量は35基、3350万kwとなり、日本に次いで世界第4位の規模だが近々第3位の原子力大国に
- インドでは21基が運転中で、6基が建設中、2032年までに原子力規模を6,300万kwとし、2050年までには原子力の割合を25%に拡大する目標
- 韓国では世界初のAPR-1400新古里1号機が運転開始、原子力設備容量は25基、2,310万kwに、原子力発電量は約30%を占めている



## 6. これからの日本のエネルギー

- 2030年のエネルギーミックス計画
  - CO2削減目標26%を、原子力発電比率20~22%、再エネ発電比率26~24%で実現
- 2050年と21世紀中葉以降のエネルギー供給
  - 資源選択の軸はCO2削減目標80%の実現
  - 電力分野は脱炭素発電が必須。
    - 対応可能は発電方式：原子力、安定再エネ、自立変動再エネ（太陽光と風力＋電力貯蔵＋CCS火力バックアップの統合システム）
- 時間軸を設定した戦略にもとづく政策が必要

# 21世紀中葉以降も原子力が柱

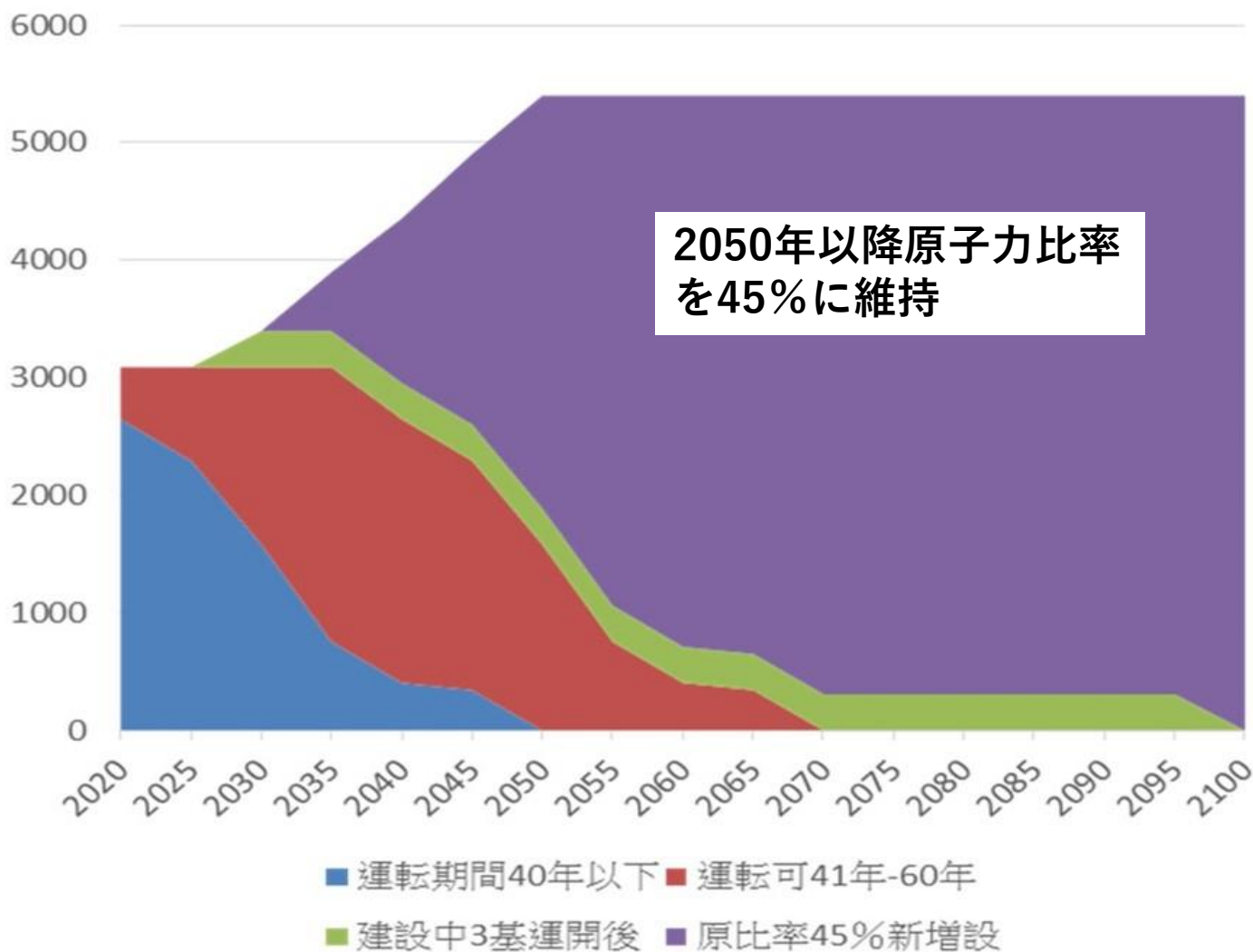
## 2050年CO2削減80%の対応策の一例

- 変動再エネ電源（太陽光、風力）は同量のゼロ・エミッション電源が必要となる
  - ゼロ・エミッション電源 80%
    - 原子力発電 40%
    - 安定再エネ 20%
    - 変動再エネ 20%
  - 化石燃料電源 20%
    - CCS付でゼロ・エミッションとする
- 原子力発電40%の実現には原発のリブレース・新規増設が不可欠

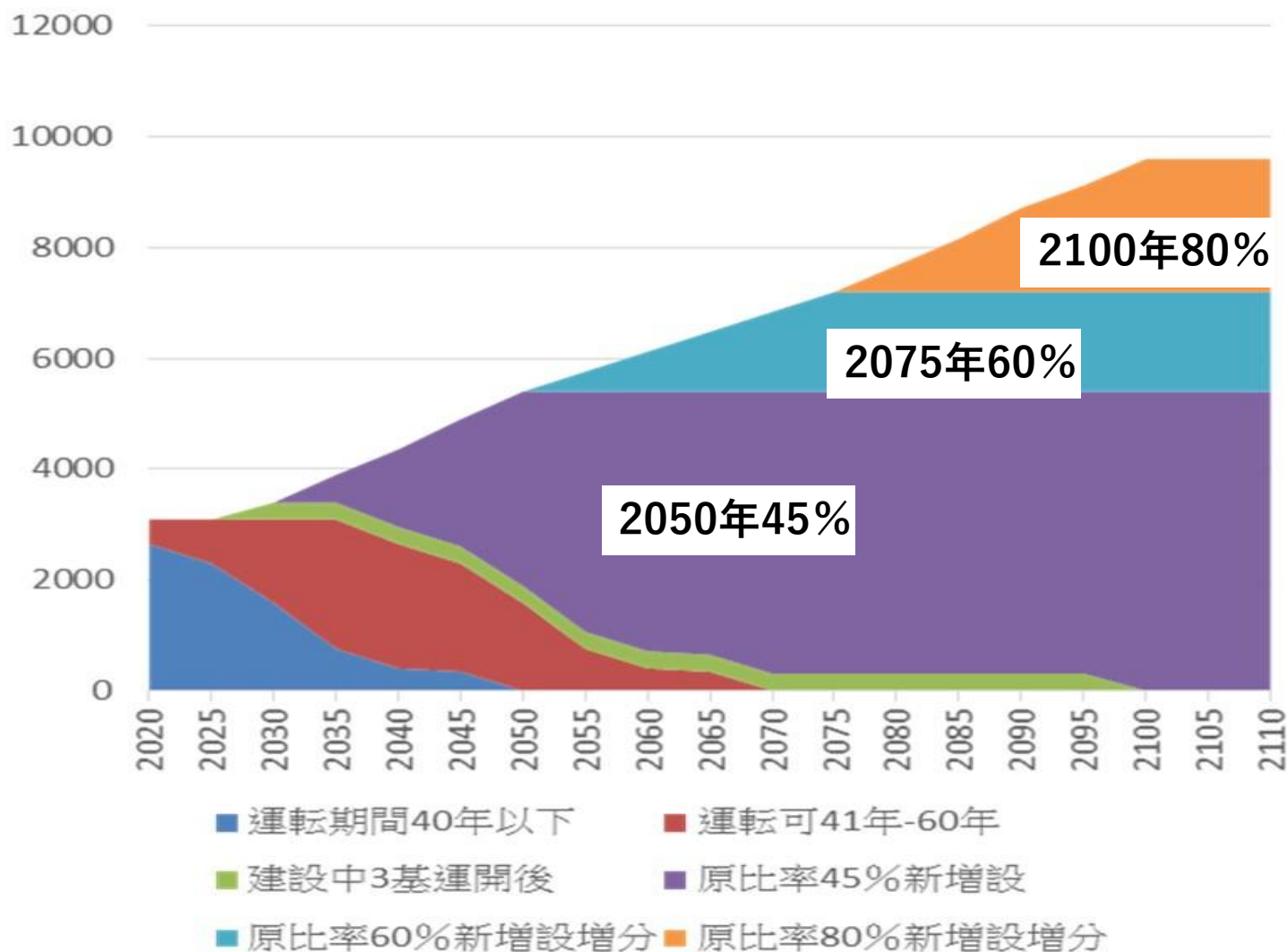
# 22世紀のゼロ・エミッションは原子力なしでは不可能

- 22世紀はゼロ・エミッション時代
- 対応できるのは原子力と再エネのみ
  - ✓ 変動再エネのバックアップはCCS付化石燃料
- 原子力発電の比率の段階的引き上げが必要となろう
  - ✓ 2050年 45%
  - ✓ 2075年 60%
  - ✓ 2100年 80%
- 自立した変動再エネ・貯蔵システムの増強オプションは電力貯蔵のイノベーション次第
  - ✓ 実現可能性は不確実
  - ✓ イノベーションに頼れる段階ではない
  - ✓ 現段階ではオプションの一つ
- その他のオプション
  - ✓ 化石燃料のクリーン化
  - ✓ 軽水炉から高速増殖炉への以降

## 2050年原子力比率45%の発電量 億kWh/年



## 2100年に向けた原子力比率と発電量 億kWh/年





# 参考 1970年代の石油危機は 原子力の備えができたから乗り越えられた

- 日本の原子力開発の経緯
  - 1954 Atoms for Peace アイゼンハワー演説
  - 1955 原子力基本法の制定
  - 1956 原子力委員会、科学技術庁原子力局が発足
  - 1963 原研動力試験炉が初発電に成功
  - 1966 原電東海発電所が運転開始
  - 1970 原電敦賀1号機、関電美浜1号機が運転開始
  - 1971 東電福島第一1号機が運転開始
- 1970年代は原子力発電時代の幕開
  - 石油危機を乗り越えることができた！備えあれば憂いなし
  - 1960年代 東海発電所運開
  - 1970年代 敦賀1、美浜1、福島第一1等20基運開
  - 以降、1980年代16基、1990年代15基、2000年代6基が運開
  - 2010年までに57基が稼働、エネルギーの安定供給に寄与

## あとかき

- 再生可能エネルギーの大量導入には不確実性がともなう。確実性の高い資源の選択を優先する必要がある。
- 世界は人口増加、経済成長が進み、エネルギー需要は増加する。原子力発電も増加の潮流にある。特に途上国は導入ラッシュ。
- 我が国では原発停滞で代替火力の燃料輸入で年間3兆円の国富流出と、再エネ賦課金2兆円の負担で、財政を圧迫している。
- フランス人のように「アラブの油に頼らず、自国の科学技術を信頼したい」といえないものだろうか？

教員研修・学生対話向け編纂

学生対話幹事グループ：若杉和彦、大野崇、松永一郎、早野睦彦、針山日出夫  
金氏顕、工藤和彦、石井正則、

オリジナル版 「脱原発政策は国家を滅ぼし国民を不幸にする」

作成：エネルギー問題に発言する会 チームE

林勉、小野章昌、石井正則、大野崇、坪谷隆夫、川合将義、小川修夫