

Fukushima事故から学ぶこと —エネルギーの未来動向—

事故調提言フォローアップ委員会(内閣官房)
福島第一原発事故独立検証委員会(民間事故調)
エネルギー政策の選択肢分科会(学会会議)
エネルギー供給問題検討分科会(学会会議)

北澤 宏一

原子力発電の魅力

「止められるものなら止めたいが止められない」理由

- **100万倍大きなエネルギー(対化石エネ)**
1kgウラン235 v.s. 1000トン化石燃料(100万kw発電所1日)
化石エネ輸入総額 (5-25兆円で高騰の危険抱える)
原子力は電力の3割、総エネの15%程度であった(2010)
- **温暖化ガス排出ゼロ**
- **必要面積小 (100万kWeで1平方km) 自然エネの約100分の1**
例:太陽電池—56平方km (効率13%、稼働率12%として)
日本の全電力を太陽電池で賄うには6000平方km必要
6000 km² / 日本の面積37万km² = 1.6%
比較(駐車場3000、屋根4000、耕作放棄地3960km²)
- **原子力産業労働生産性高い:従事者数少 6万人—8万人(日本これまで)**
例:再生可能エネでは5-10倍の労働力必要(米、ドイツの例)

原子力のリスク

安全対策を施しても、リスクは残留(どこで妥協するか)

- **100万倍のエネルギーは「放射線」の形で出る**
巨大なエネルギーは放射能と縁を切ることにはできない
大量の放射性物質の閉込め失敗→「国がもたない」巨大リスク
- **現在の軽水炉は fail safe でない(失敗すると暴走を始める)**
大量の水連続供給必須—福島ではこれに失敗
→燃料棒損傷(メルトダウン)→放射性物質拡散
日本の他の炉(BWR,PWRとも)も固有安全炉ではない
→固有安全炉の開発が将来的には望ましいが・・・
既存の炉は「巨大事故」のリスクがゼロでない

危険率

- **使用済燃料に放射能蓄積、高レベル廃棄物発生**
放射能除去：半減期を待つしかなし(化学処理無効)
数万年以上 地層処理の実績なし
将来世代との衡平・倫理的問題残る

再稼働の条件

国が破滅しないレベルで収まる一絶対条件

←新規性基準で事故の起きる確率はある程度低下するが・
残る「想定外」（巨大直下型、テロ、人為ミス）も
起きてからの事故拡大確率一炉により危険度に差

・ **巨大事故（国家をあやめる）に拡大させない対策は必須**

☆ **大量の放射性物質を置かない**

4号炉：使用済み燃料を大量保管→最大の脅威だった

☆ **多数の原子炉や燃料プールを過密配置しない**

瓦礫、放射能レベル上昇で隣接設備に近づけなくなる

☆ **ベントできず→格納容器爆発の恐れー放射能の全面漏洩**

知識不足、関連配管の破損？設計不十分：対策あり

☆ **迅速海水注入を可能にー配管系設計変更など**

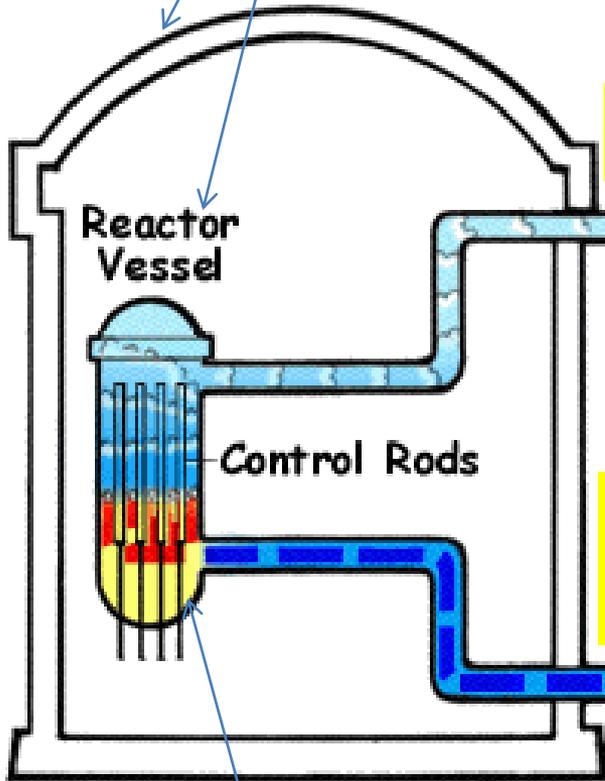
☆ **操作員が撤退せずに続行できる複数の安全環境操作室**

いざという時の迅速ベント、航空機衝突に耐える頑丈さに

屋根裏の使用済み燃料保管プール：危機招く



Containment Structure



長期的には固有安全炉 開発必要

付随配管
の耐震性

津波で海水
取入れ
困難→対
策必要

停電しても水供給できる
対策を多重多様に

沸騰水型原子炉の成り立ち：米国原子力
規制委員会HPより

[http://www.nrc.gov/reading-rm/basic-ref/students/
animated-bwr.html](http://www.nrc.gov/reading-rm/basic-ref/students/animated-bwr.html)

福島第一事故

- **地震を感知→制御棒挿入→炉の連鎖反応停止**
- **地震で外部からの電力供給途絶（電柱の崩壊）**
 - 非常用ディーゼル発電機津波で喪失**
 - 非常用直流電源も津波で喪失**
- **定常時用冷却水ポンプ停止**
 - 非常用冷却水循環装置停止（他国に比し操作不勉強）**
 - 制御用直流電源働かず→操作不能に**
 - 水位計誤作動→判断誤り（空焚き状態に）**
 - SR弁操作遅れ（設計ミス？）（格納容器爆発危機）**
 - ベントバルブ操作不能（地震による配管洩れ？）**
 - ベントフィルター備え欠如（他国はやっていた）**
- **非常用電池、救援電源車による電源供給失敗**
 - ←接続具非整合、電圧非整合（準備不十分）**

福島第一事故

電源回復が見込めない状況の中で

- ベントをして炉心圧力を下げ、外部からの注水
数トン/時間 必要
→燃料棒損傷は避けられる
- ベントの遅れ
決断の遅れ（淡水がない、海水は炉に有害）
マニュアルベントに不慣れ、電池、圧縮空気
ベントシステムの改良放置 設置場所、フィルター
設備破損（地震による？）、設計ミス（水漏れ）
- 避難の遅れ←避難などの訓練欠如

国際的にも不名誉な恥ずかしい事故であった

国際レベルの対策は最低限必要

国際レベルの規制に改善必要

避難エリア
(1mSv/y)
20mSv/y
50mSv/y
安心？
除染と移染

仙台

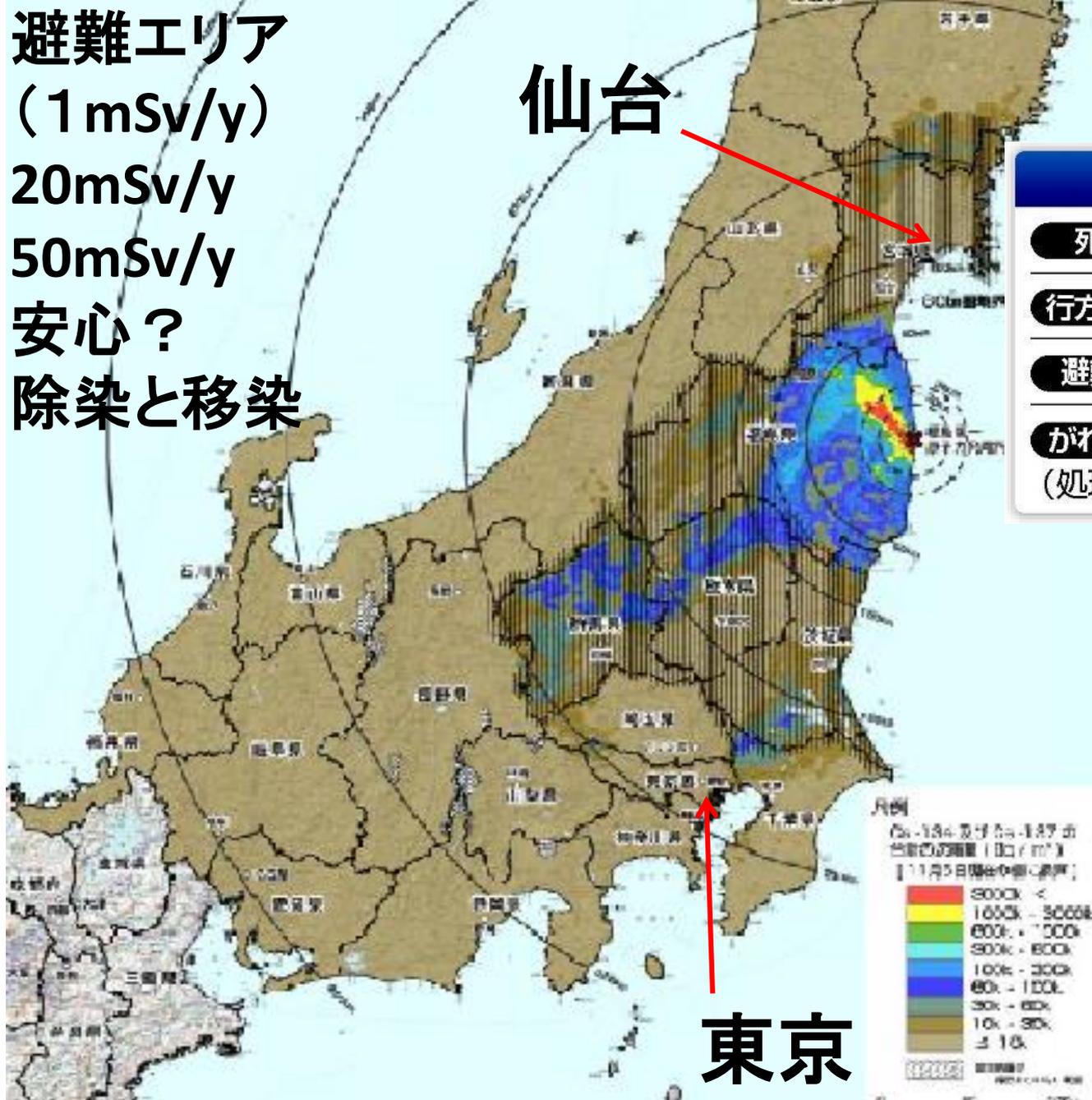
2013年現在

震災被害状況

死者	1万5881人	3月8日現在、 警察庁まとめ
行方不明	2668人	
避難者	31万5196人	2月7日現在、 復興庁まとめ
がれき	3県で1628万トッ (処理量は46%の754万トッ)	1月末現在、 環境省まとめ

原発事故で
故郷喪失
避難命令
8万人
自主避難
>7万人

東京



福島事故大規模化の恐れ—事故後1週間

- 炉の過密配置と大量の使用済燃料の炉建屋内貯蔵
並行連鎖事故→「巨大事故化」（一桁大きくなった）
~~例：一人の所長 一か所に6つの炉、7つのプール~~
監視の注意力散漫に
放射線レベル上昇（隣接炉対処不可）
瓦礫飛散（隣接炉ベントラインを破壊）
隣接炉水素リーク爆発誘起
→4号機使用済燃料プール最大の危機
現場からの撤退問題浮上していた
外国人の国外脱出、官邸は首都圏避難も覚悟

日本でのみ大量の使用済み燃料を建屋内屋根裏プールに
(~~建屋の水素爆発で最大危機に~~)

国の存亡の危機を招く大量放射性物質の一か所貯蔵止める

3つの事故調(政府、民間、国会)の共通見解

原子力安全・保安院、原子力安全委員会の責任放棄

■ 安全委:「全電源喪失後の備え不必要」とする指針

■ 安全保安院:「民間事業者の自主性に任せる」

■ 米国スリーマイル時の対策→改善のチャンス

■ しかしNRC勧告など無視:電源・冷却水喪失への備え

■ 規制・推進側:安全神話→30年間の自縄自縛状態

政府・電気事業者・メーカー

改善せず、むしろ虚偽の強弁→「人災」

→新たな独立組織(第3条委員会)と法改定(ノーリターン)

→原子力規制委員会、規制庁の設立、バックフィット

事故調見解の差

- つなみか地震か

不明点は今後の実地検証必要

(1号機の緊急水冷装置の地震による破損)

- 全面撤退か一部撤退か

それが問題となっていたことは確か

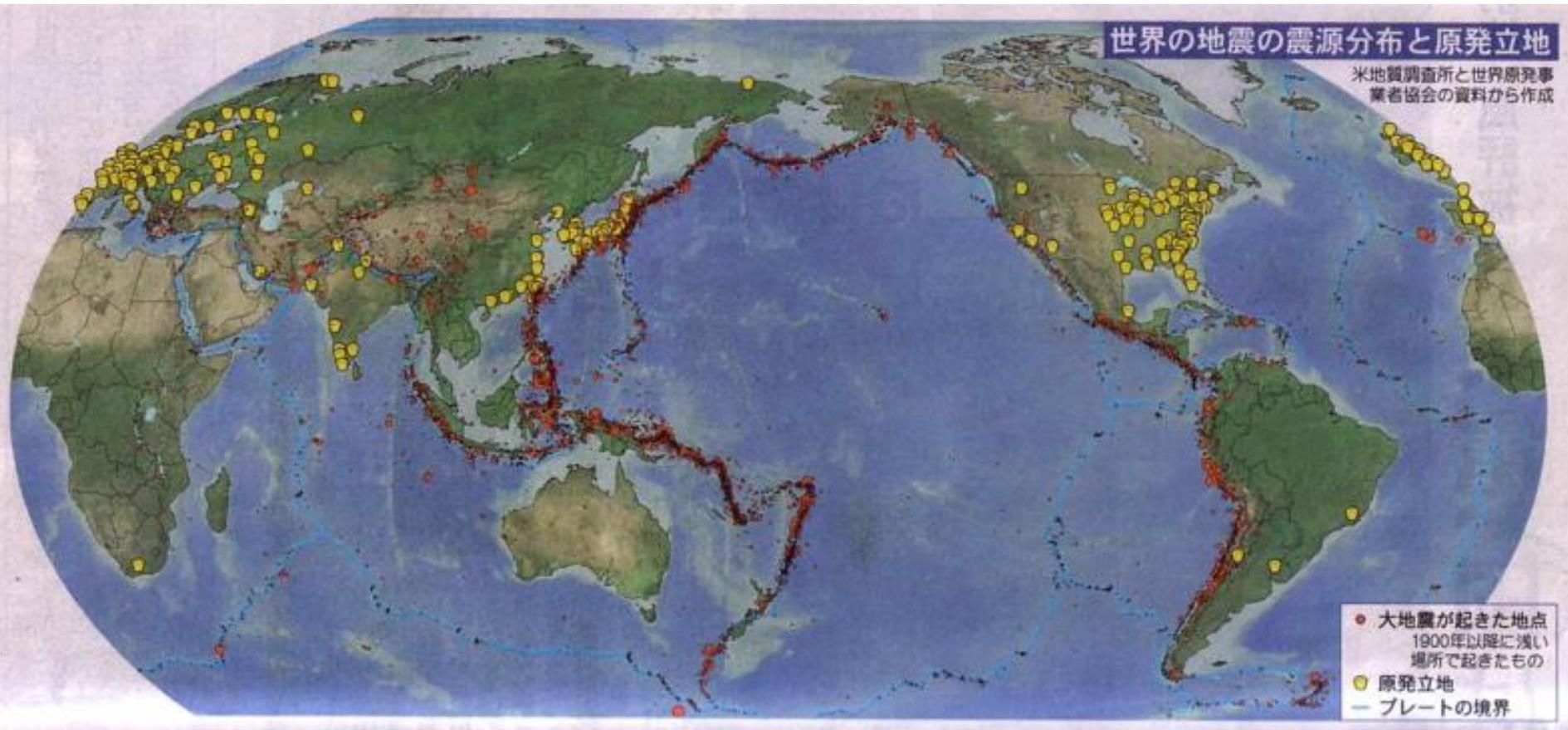
(最終決定はされていなかったが・・・)

留まったことが事故拡大をあのレベルに止めた

- 設計ミスは

緊急時ベントや給水の配慮不足(NHK)

大地震(マグニチュード6以上)の起こる場所● 環太平洋エリアに集中、世界の2割は日本



● : 原発立地 地震多発地帯と原発の立地

日本と台湾: 地震耐性の実験国の側面

日本の動き（独立規制組織設置へ）
（国際レベルの規制一恥ずかしかったこれまで）

原子力規制委員会（3条委員会）設立 2012.9

事務局（原子力規制庁）455名 推進官庁より独立

安全、財産、環境を守ることのみ義務付け

ノーリターン・ルール

独立性、中立性、透明性を要求

JNES（原子力安全基盤機構）を傘下に

問題点：大学、研究所との関連希薄

バックフィット導入（原子炉等規制法）

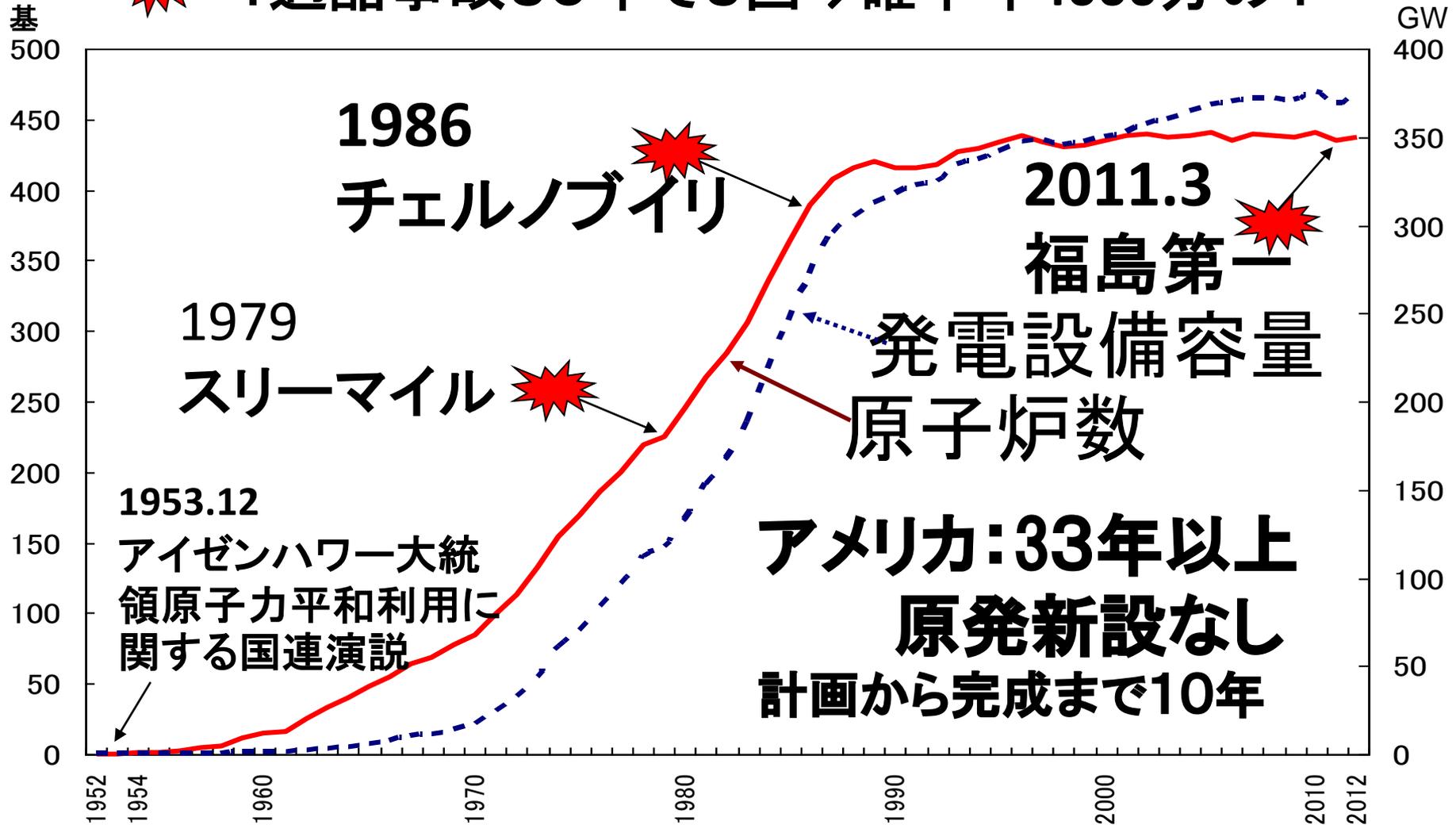
最新の基準を満たす必要

国際レベル規制を設置法が要求

世界の原子炉稼働数と発電設備容量の推移

2013年3月末現在
・437基、373. GW

★ : 過酷事故30年で3回 → 確率年4000分の1



国土の広さと原子力受容の差:「北澤の経験則」

(国土面積:

露 > 米、中、伯 > 印 > ウクライナ > 仏 > 西、瑞典 >
日 > 独 > 伊 > 英 > 韓 > 澳 > 瑞 > 台 > 白

「日本より国土の狭い先進国は脱原発を決意する ○」

←「一度でも福島が起きたら国がおしまい、

観光客が来ない」

広大国:「福島が起きても一部人口の移住のみ、

国は崩壊しない」

東欧: 原発リスク < 隣国にエネ供給頼る危険

途上国: まず経済 > 原発リスク

現在微妙
な国



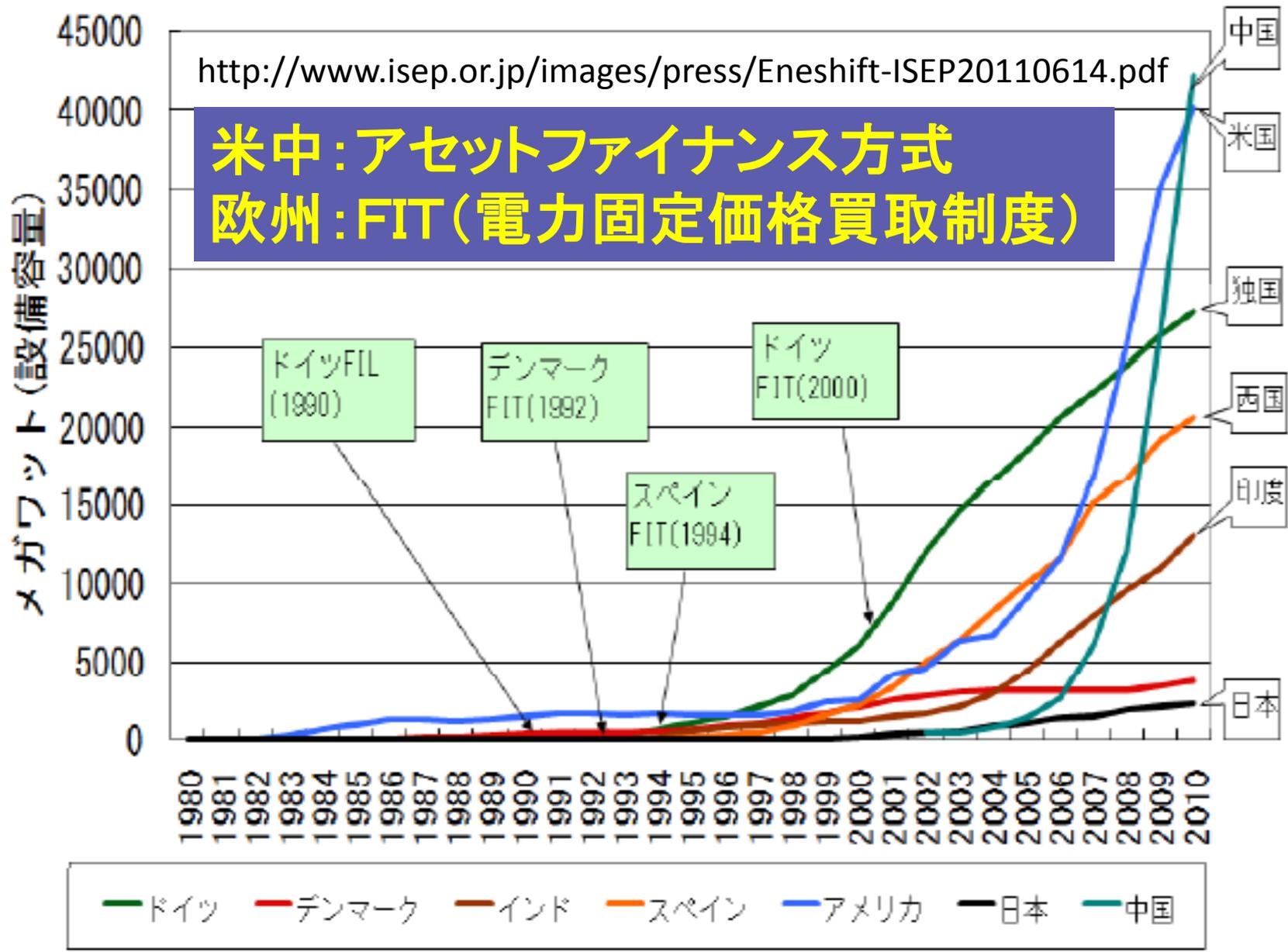
各国のエネルギー戦略特色

- スウェーデンの方針 CO2削減まず優先
炭素税を基盤に、原子力のリスク当面容認
2012 原子力30% 再生69% 化石0%(電力)達成2012
- ドイツ(+西欧)の方針 原子力倫理・リスク重視 2022年全廃
当面化石エネ増を容認 2012:温室効果ガス排出 1.6%増
2012: 原子力16% 再生17%
- 米国:この4年風力が新設電力の42%、州の自治に任す
テキサス州のこの10年 電力自由化、系統整備、経済原理
→シェール+オイル+風力10GW、原発新設中止、
ピークパワー用にソーラー導入
- 中国の方針 当面石炭、風力、原子力、あらゆるエネルギー
精一杯伸長の方針←エネの深刻不足
2012 風力発電量が原子力を追い抜く、風力世界一に
2030 原発計画 80GW→60GW(沿岸)、太陽光製造世界1

再生可能エネルギー

- 欧州、米国の一部の州ではすでにこの2-3年でベストミックス（化石＋原子力＋再生）を達成
（急速に再生エネ増加）（福島が加速）
- 経済性をほぼ達成（テキサス、スウェーデン）
風力：competitive に、家庭用：competitive に、
太陽光：ピークパワー用で経済性
- 日本のコスト高 “made-in-Japan cost” 克服？
非効率許認可 電力系統による受入（北海道は8割拒絶）
アセスに長期必要 多数省庁の縦割り認可

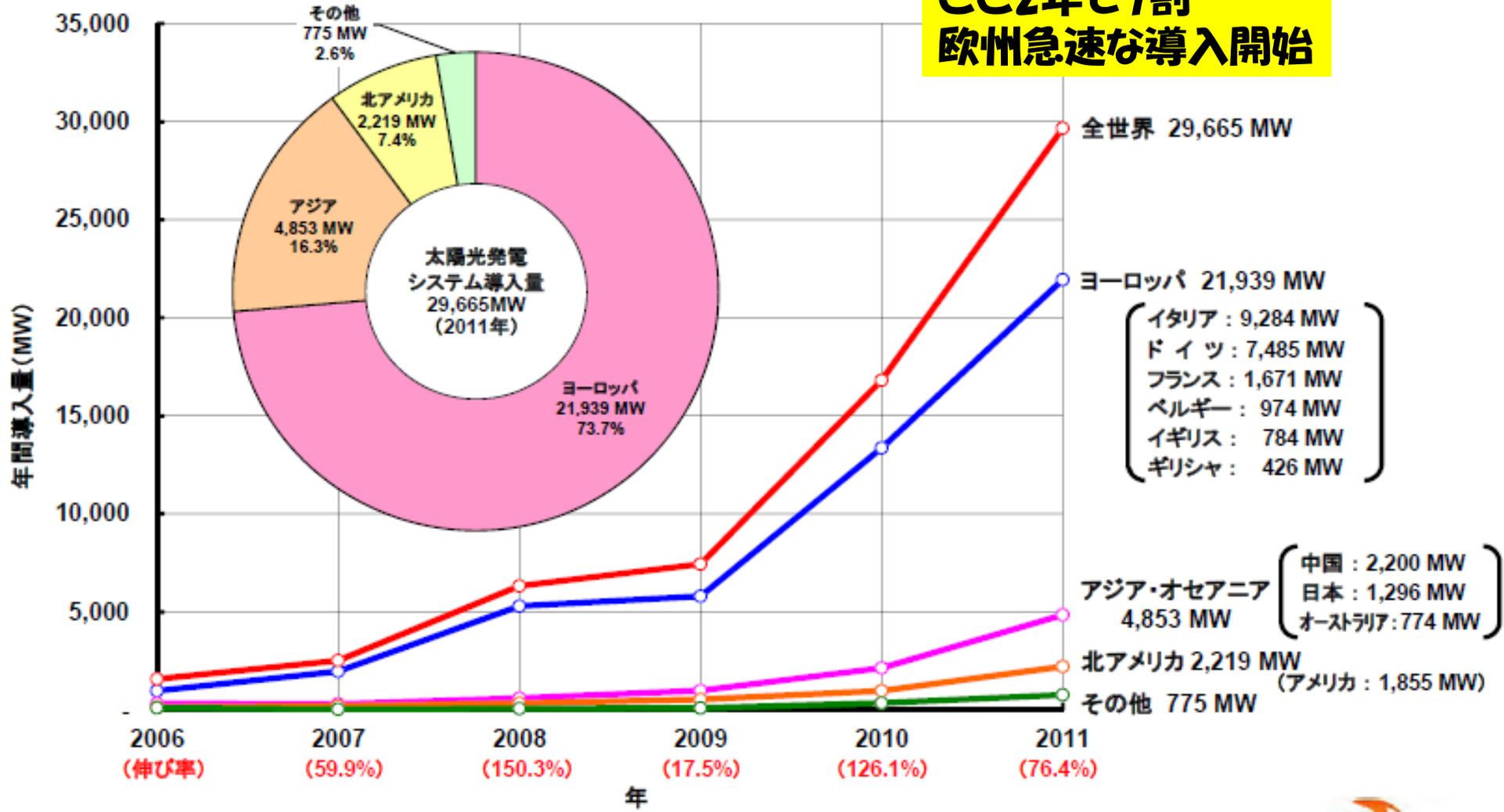
風力発電設備容量(欧州はここ10年、中・米が3年で急追)



データ: GWEC

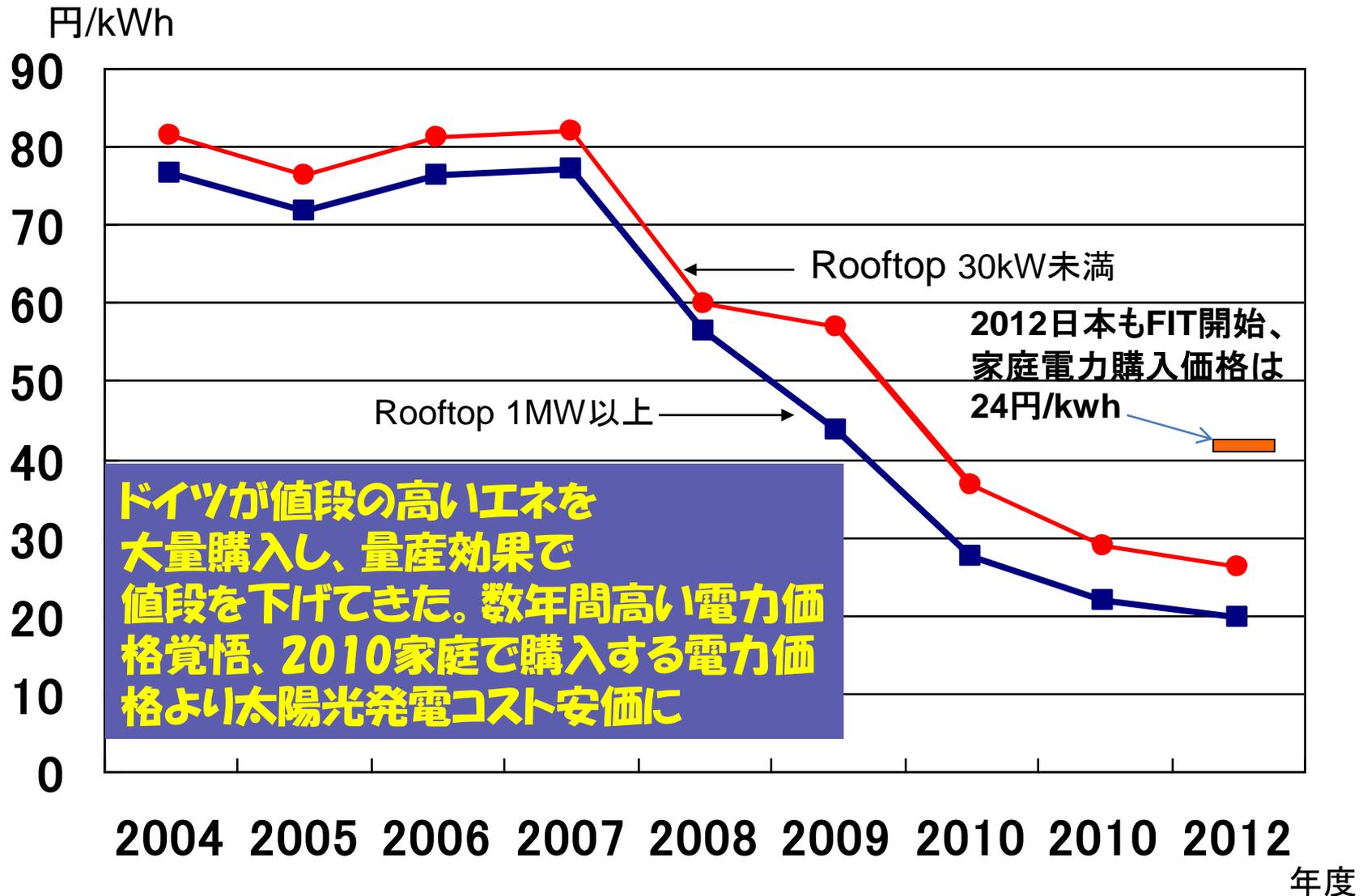
1.1 太陽光発電システム世界地域別導入量推移

**ここ2年で7割
欧州急速な導入開始**



出典: EPIA“Global Market Outlook for Photovoltaics 2016”(2012年5月)

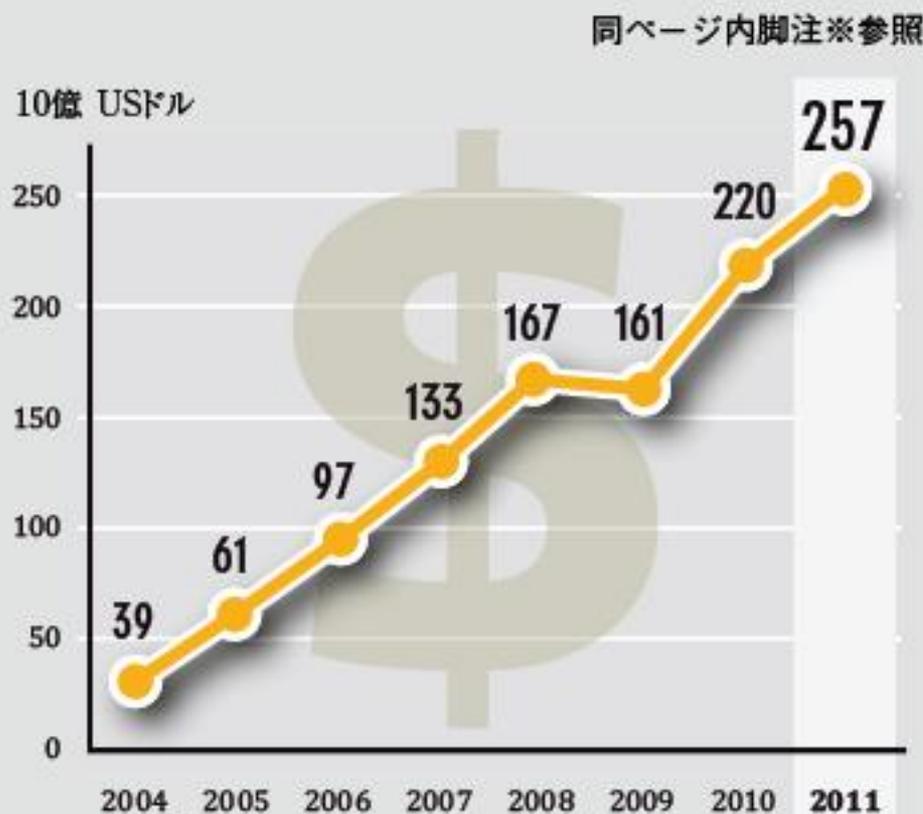
ドイツのFIT太陽光電力買取価格の推移



http://en.wikipedia.org/wiki/Feed-in_tariff#Germanyより作成

世界の再生可能エネルギー投資額推移

図20. 世界の自然エネルギーへの新規投資
2004～2011



2011年25兆円産業に
7年で7倍
自動車産業と並ぶ可能性

再生可能/全電力
スウェーデン 69%
脱化石エネ電力達成 '12
ドイツ 17%
スペイン 28-70%
日本 11%
(各国とも原子力20-30%)

自然エネルギー世界白書2012より
※50MW以上の水力を除く

スペイン再生可能エネ監視制御センター(CECRC)電力調節の実績

2009.12.31(冬) 電力需要調節の実態、電池なくても調節可

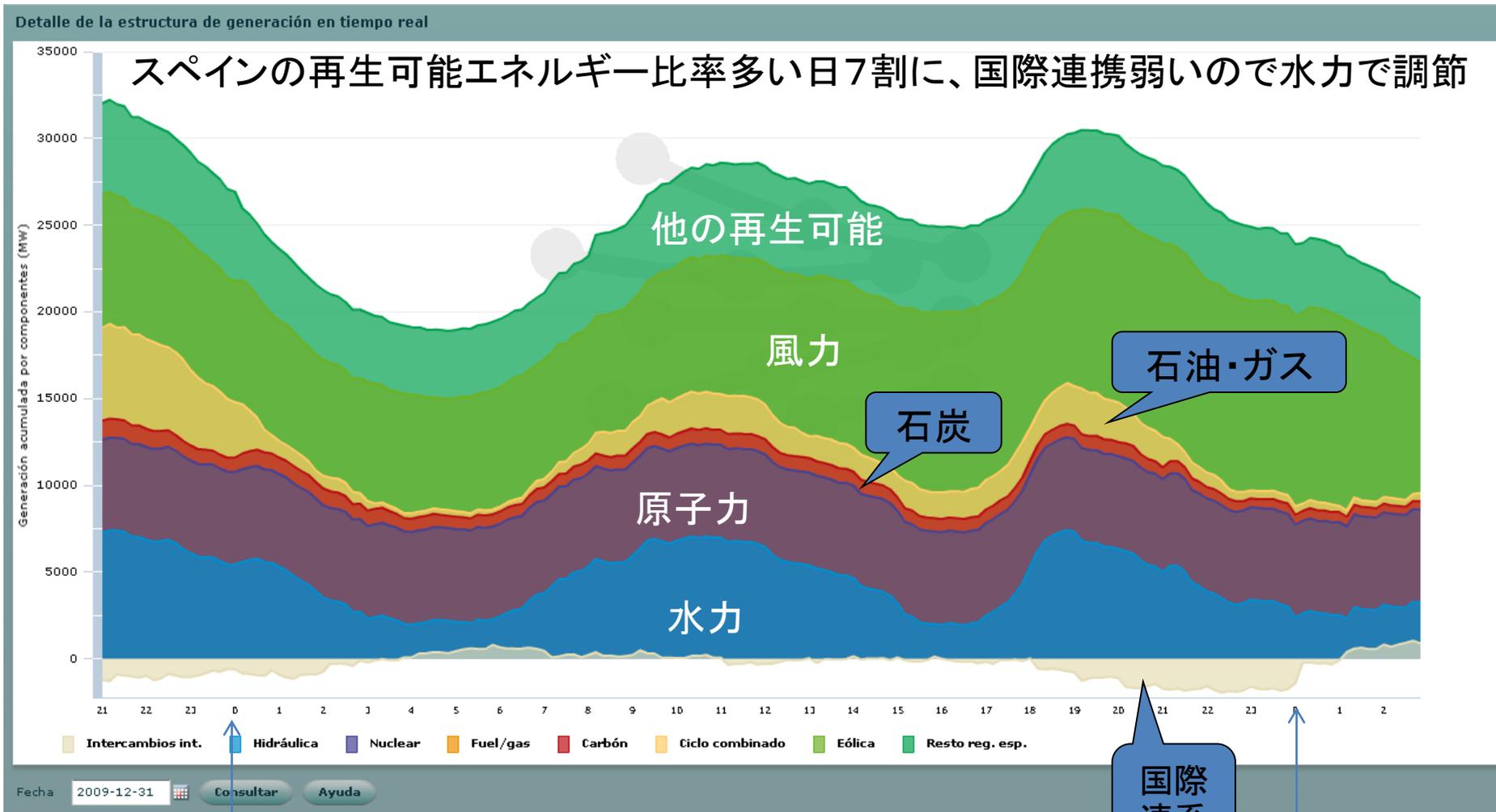
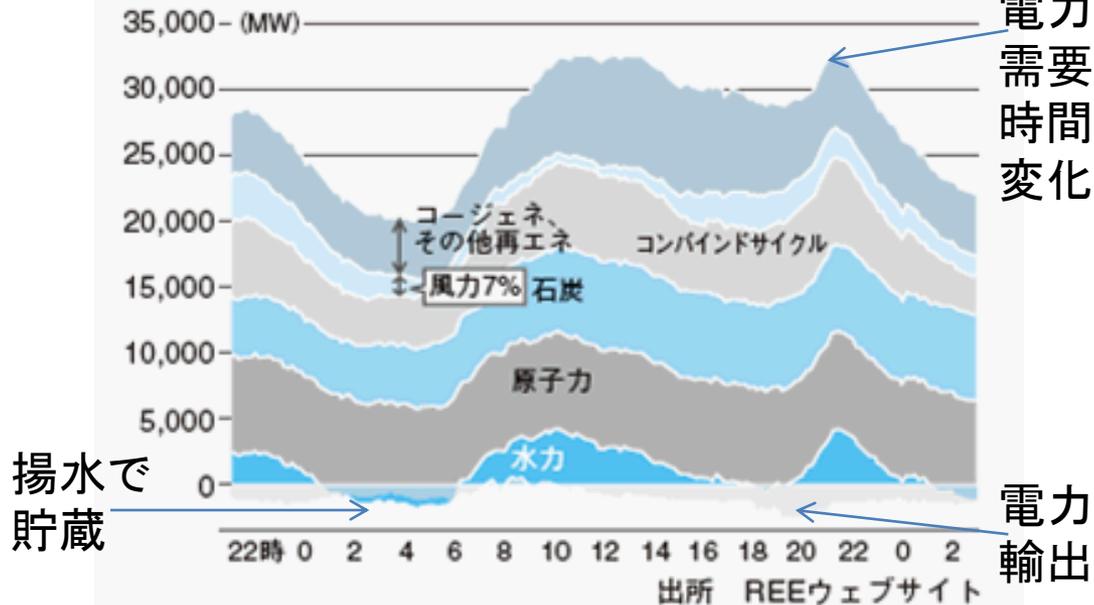


図-8 2012年4月2日(月)の電源別供給曲線



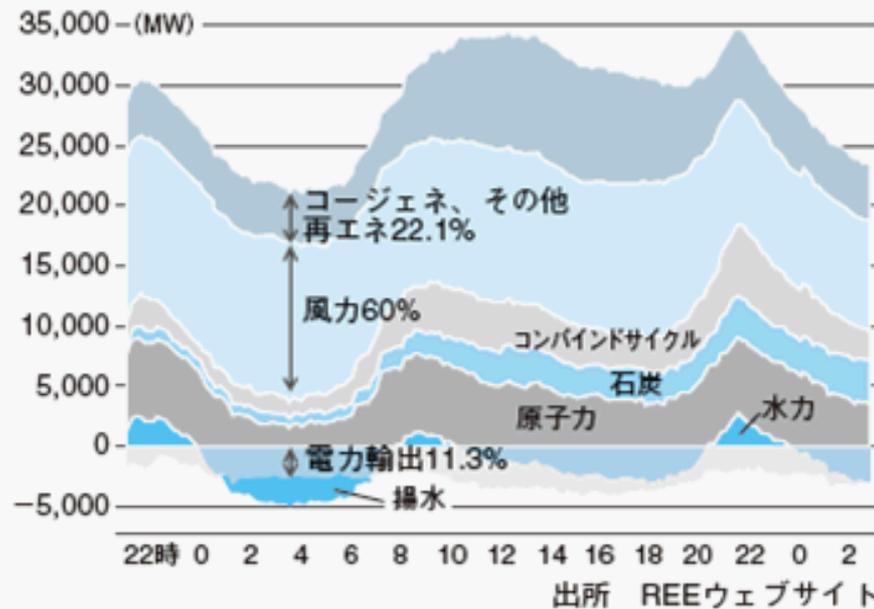
スペイン再生可能エネ監視制御センター (CECRC) 電力調節の実績

電池がなくても

水力と石炭でこまめに調節

多い日で再生可能エネ発電は電力の7割に

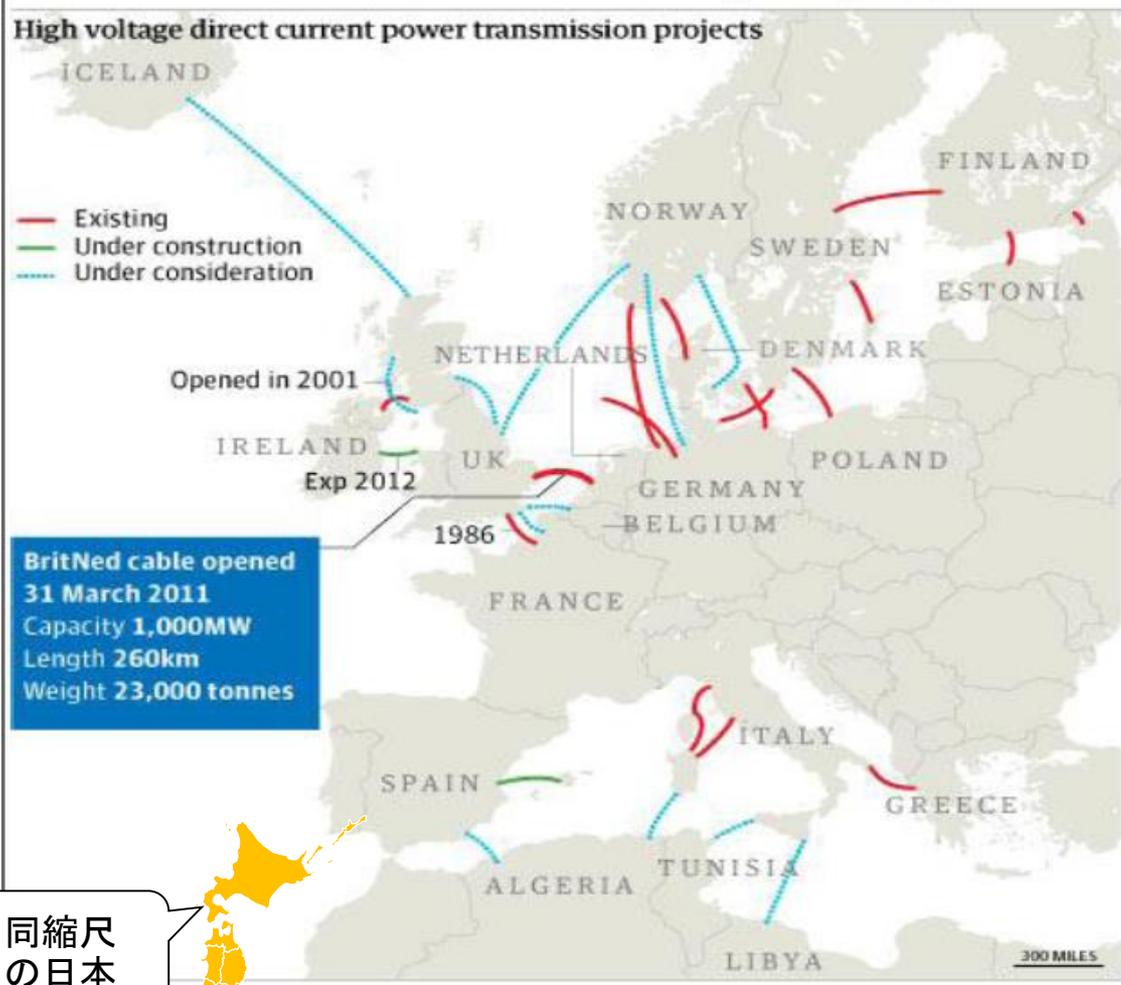
図-9 2012年4月16日(月)の電源別供給曲線



不安定電源→欧州電力融通 海底ケーブルで広域融通

The European supergrid

http://www.smartgridnews.com/artman/publish/Business_Global/Denmark-smart-grid-playbook-The-road-to-happiness-3779.html



HVDC cable network: the key to “weather-proofing” the large scale use of renewable energy. It will develop over 10-15 years, leg by leg.

longest subsea power cable 580km, 450kV



経産省 .. 北海道・東北で系統強化計画

太陽光パネル必要面積

農地
46100km²

宅地
21500km²

駐車場
1820km²

屋根
4000km²

耕作放棄地
3960km²

■ 山手線内
63km²
(原発1基分)

20km圏内

6550km²

国内年間総消費電力を
賄うに必要なパネル面積
福島県面積の半分弱

現実的な面積試算:

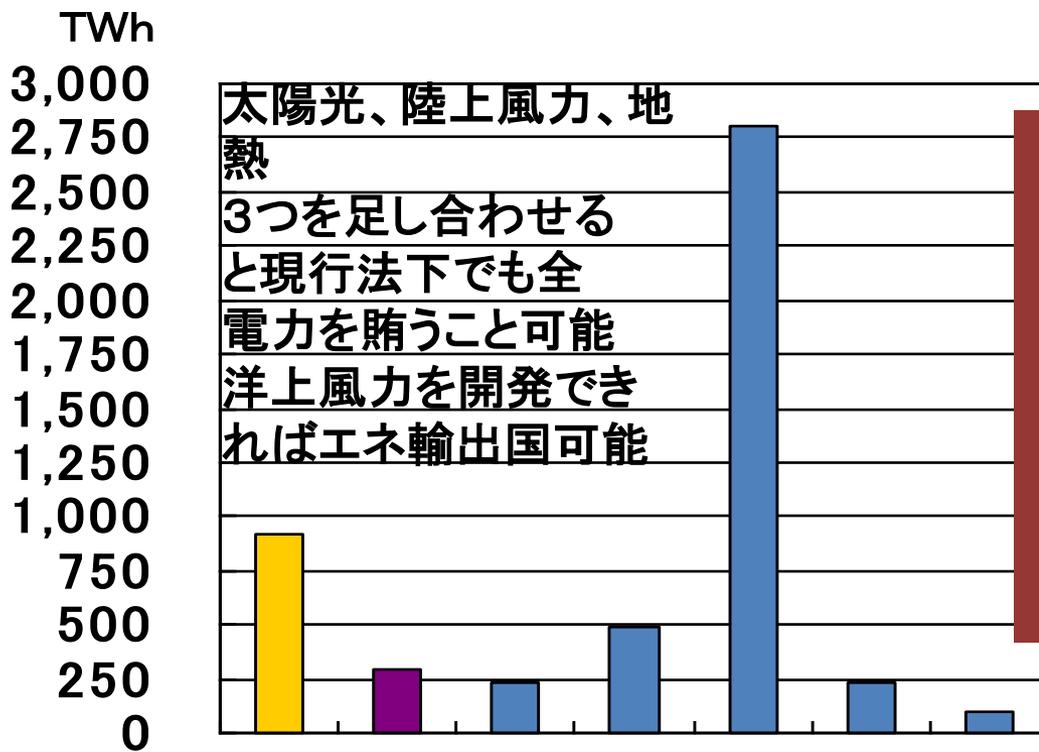
省エネで半分に、風力と太陽光の土
地併用、地熱導入でさらに半分

計算に用いたソーラーパネル仕様:
144 W/m² 165 kWh/m²/年

農電業と農家所得倍増策

- **農業：65歳以上68%(2012) 若者夫婦帰って来ない**
所得倍増必要
- **農家戸数は約250万戸、平均農業所得 120万円**
- **農家1軒当り250平米の太陽電池設置したとすると**
→農業所得倍増可(2012現在のFIT価格) 142万円
- **そのための投資 約900万円**
- **ヒント 神奈川県「8万円ぽっきいプラン」**
一般家庭が8万円払うと電池を屋根に載せてくれる
最初の10年は発電量の2割もらえる、
10年経つと設備全体が屋根提供者のものに。
風車を追加 → 農家所得3倍、4倍増も可(デンマーク、スウェーデンのやり方)→地域農電業に展開

再生可能エネルギーの最大開発可能性(環境省試算) (年間発電量に換算)



- ・設置可能発電設備量に稼働率を乗じて試算
- ・「ポテンシャル」は、現行法規制を前提に試算。制約要因を除いて想定される「賦存量」は更に大きい。

(環境省調査)

【稼働率】

太陽光:12%

風力:20%

地熱・小水力:80%

総発電量(2010実績)

原子力(2010実績)

太陽光

風力(陸上)

風力(洋上)

地熱
中小水力等

環境省「平成22年度再生可能エネルギー導入ポテンシャル調査」から試算
※原子力は資源エネルギー庁統計より

日本は
世界第
6位の
排他的
經濟水
域面積
→洋上
浮体式
夢の技
術



日本の得意技術概観－1

- **風力現状** 風車翼材料、変速機、騒音、景観、鳥 に強み
(九州大学レンズ風車方式など) 洋上風力に展開
国内は規制、電力系統問題で低調
- **太陽光技術の今後** 効率向上計画20→40%、薄膜化
有機、色素、プロセス:塗布型など安価軽量型に可能性
- **地熱** 世界過半の設備日本製、国内は規制で低調
- **波力、潮汐力、海流発電、海洋温度差発電** 技術未知
国あるいは国際共同で大型実証試験必要
- **電池→電気化学蓄発電業に展開** 日本に技術蓄積
自動車電池の活用(各家庭)+
大型揚水発電所+中型電気化学蓄発電所

洋上浮体式風車：全エネを再生エネ化する時代の切り札

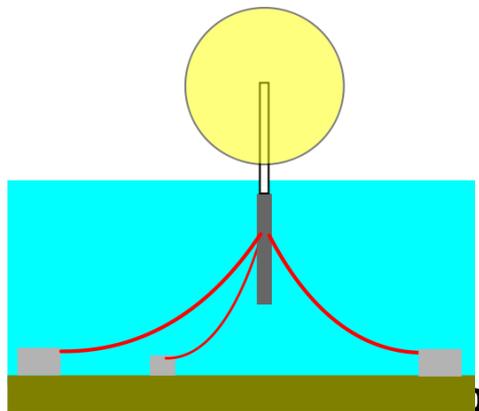


ノルウェーHywind 製



九州大学大屋-経塚教授ら
開発中 レンズ風車タイプ
洋上浮体魚養殖プール型

<http://webronza.asahi.com/global/2011041400011.html>



レンズ風車：
騒音低下10dB
出力 2.5倍に(同半径風車で)
バードストライクなくなる

風力

景観問題が大切

山口県白滝村



九州大学大屋教授らの
レンズ風車

文科省、経産省など
のプロジェクト試験中

日本の現状技術概観－2

- **化石エネ発電は効率向上 40%から60%→80%へ**
コンバインド・サイクル→トライ・サイクル
すぐに始められる技術水準 輸出技術として重視
世界の室温効果ガス排出削減に寄与→CDM
- **自動車のエネ消費1/4予測－HV, EV、FCV化 近未来**
都市再開発→スマート都市化 (EVなどがキー)
家庭・オフィスの省エネ化→スマート都市化
エネファーム、LED、ヒートポンプ、断熱ガラス、断熱壁
地中熱利用 (欧州先行)、スマートグリッド (米先行)
- **スマートシティ総合技術段階 → 日本のお家芸に育成**
日本の新公共事業、海外途上国支援、中心的輸出技術

日本の製造業とオイルショック

- **第1次、2次オイルショック(1974. '79)**
中東危機→価格5倍に、物不足、インフレ、
重厚長大産業→軽薄短小への産業移行(当時の通産政策)
組立産業に主力シフト→現在の日本の輸出競争力の基盤に
- **2005年ごろより第3次オイルショック 価格5倍へ**
ホルムズ海峡危機+オイル生産飽和→さらに原発事故→輸入金額増大
→シェールガス革命によりオイル供給豊富に+欧州のベストミックス達成
原子力コストアップのため米国の一部の州では
炉新設はオイルやシェールに敵わなくなった 石炭減でCO2減
- **製造業 日本の製造業はエネ価格に応じた対応 現在の省エネ国家に**
オイルショック当時環境投資は「ネガティブ投資」と言われた
しかし現在:日本の省エネ・低公害設備→国際競争力の基盤に
- **第3次オイルショック(現在)→日本の製造業・社会はどう変わるのか**
より高次の省エネ技術は必須、
エネ多消費産業の変化、エネ供給は当面ベストミックスへ

核エネルギーを使っていくための技術開発

- **核融合 原理的○、技術的？、経済性？？**
資源枯渇○ 研究段階（50年は無理）
- **高速増殖炉 原理的○、技術的△、経済性？**
露中印が研究進める 米欧は諦め？
燃料再処理コスト・リスク△、資源枯渇○
溶融塩炉（フルトニウムリスク低減）原理OKだが
- **軽水炉 暴走しない固有安全炉はできるか？**
東芝4S炉、高温ガス炉など自然放冷OK 経済性に問題
10-20年間である程度の目途をつける研究は可能
- **高レベル廃棄物（子孫との衡平、都市・地域間衡平）**
核変換による無害化の提唱（有馬氏ら）：
原理的○、技術的？経済性？？

再生可能エネ産業の展開

2012

政府補助金制度→民間と国民の投資へ切替え（FIT制度）

政府による「儲かるしくみ」の導入

再生可能エネ産業の雇用（原子力産業の5-10倍）労働集約型

ドイツの再生可能エネ雇用100万人（電力シェア：27%で）

日本原子力雇用6-8万人（電力シェア：30%時代）

地域自律分散型電力システム v. s. 中央集中型電力供給

農電業、漁電業、温泉電業などの必要 都市住民の投資

地域コーディネーターの必要

スマートシティ・スマートグリッド社会への転換

ドイツの速度では年間5-10兆円（日本で）の民間投資必要

電気料金は過去15兆円→20-25兆円産業へ拡大：国民の価値観

日本の行き方は何によって決まるか

**原子力の巨大リスク低減のコスト v.s.
再生可能エネルギーの経済的負担
両者比較から決まっていく ← 国民の価値観の変化**

原子力の安全は1かゼロではない

ある確率で起こる事故は面積の小さな国には国家の存亡をかけるリスクになる

日本位の広さの国が稼働する場合には、その面積の国にとってあまりに

巨大なリスク(国家存亡に関わる)だけは避ける

(Fukushimaは日本より小さな先進国にとっては「大きすぎた」)

つまり大量の放射性物質を蓄えず、格納容器は爆発しない構造設計を

しかし、安全性を高め、巨大リスクを下げようとするほど高コストに

再生可能エネルギーの経済学

急ぐほど高いものにつくが、すでに欧州諸国が頑張っかないコストを

下げてきてくれた。日本は有利な位置からスタート

当面、ベストミックス水準達成はもはや日本にとっては容易(多諸国に例)

そこから先は日本の総合技術努力が試される領域