

# 嵐の中のエネルギー戦略 持続可能な原子力技術とは

2016-4-13 日本原子力産業協会 年次大会

国際エネルギー機関(IEA) 前事務局長  
笹川平和財団理事長  
田中伸男

ポイント

- 原油安続くと中東依存が一層高まる懸念
- エネルギ―安全保障と温暖化回避両立を
- 日米原子力協定改定を見据え未来図描け

田中 伸男 元国際エネルギー機関理事



東日本大震災からの数年がたつたが、エネルギー情勢は依然として不安定だ。エネルギーの安定供給は、経済成長の基盤だ。エネルギーの安定供給を確保し、温暖化対策を進めることが、今後の課題だ。

今年、一年の計画を立て、エネルギーの安定供給を確保し、温暖化対策を進めることが、今後の課題だ。

● ● ● ● ●

エネルギーは、人類文明の発展を支える重要な資源だ。エネルギーの安定供給を確保し、温暖化対策を進めることが、今後の課題だ。

日本米独と事情違いつ

原油安続いても原発必用

電力需要(0.9)の回復が、供給国(0.9)の回復ペースを押し上げている。ロシアや中東の供給国は、原油価格の暴落を歓迎している。しかし、日本は原油価格の暴落を歓迎していない。日本は原油価格の暴落を歓迎していない。日本は原油価格の暴落を歓迎していない。

● ● ● ● ●

原油価格暴落は、日本にとって大きなチャンスだ。しかし、日本は原油価格の暴落を歓迎していない。日本は原油価格の暴落を歓迎していない。日本は原油価格の暴落を歓迎していない。

電力の需要が急増している。電力の需要が急増している。電力の需要が急増している。電力の需要が急増している。電力の需要が急増している。

● ● ● ● ●

日本は原子力発電の安定供給を確保し、温暖化対策を進めることが、今後の課題だ。日本は原子力発電の安定供給を確保し、温暖化対策を進めることが、今後の課題だ。



持続可能な原子力を探れ

大震災から5年

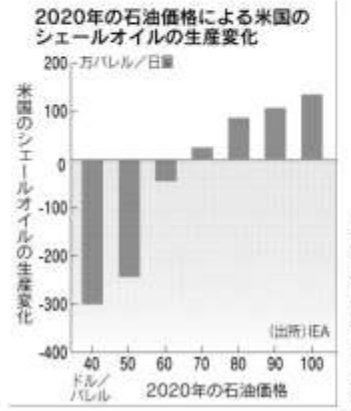
エネルギー政策

大震災から5年が経ち、日本のエネルギー政策は大きく変化した。エネルギーの安定供給を確保し、温暖化対策を進めることが、今後の課題だ。

エネルギー政策は、日本の未来を左右する重要な課題だ。エネルギーの安定供給を確保し、温暖化対策を進めることが、今後の課題だ。

日本は原子力発電の安定供給を確保し、温暖化対策を進めることが、今後の課題だ。日本は原子力発電の安定供給を確保し、温暖化対策を進めることが、今後の課題だ。

エネルギー政策は、日本の未来を左右する重要な課題だ。エネルギーの安定供給を確保し、温暖化対策を進めることが、今後の課題だ。

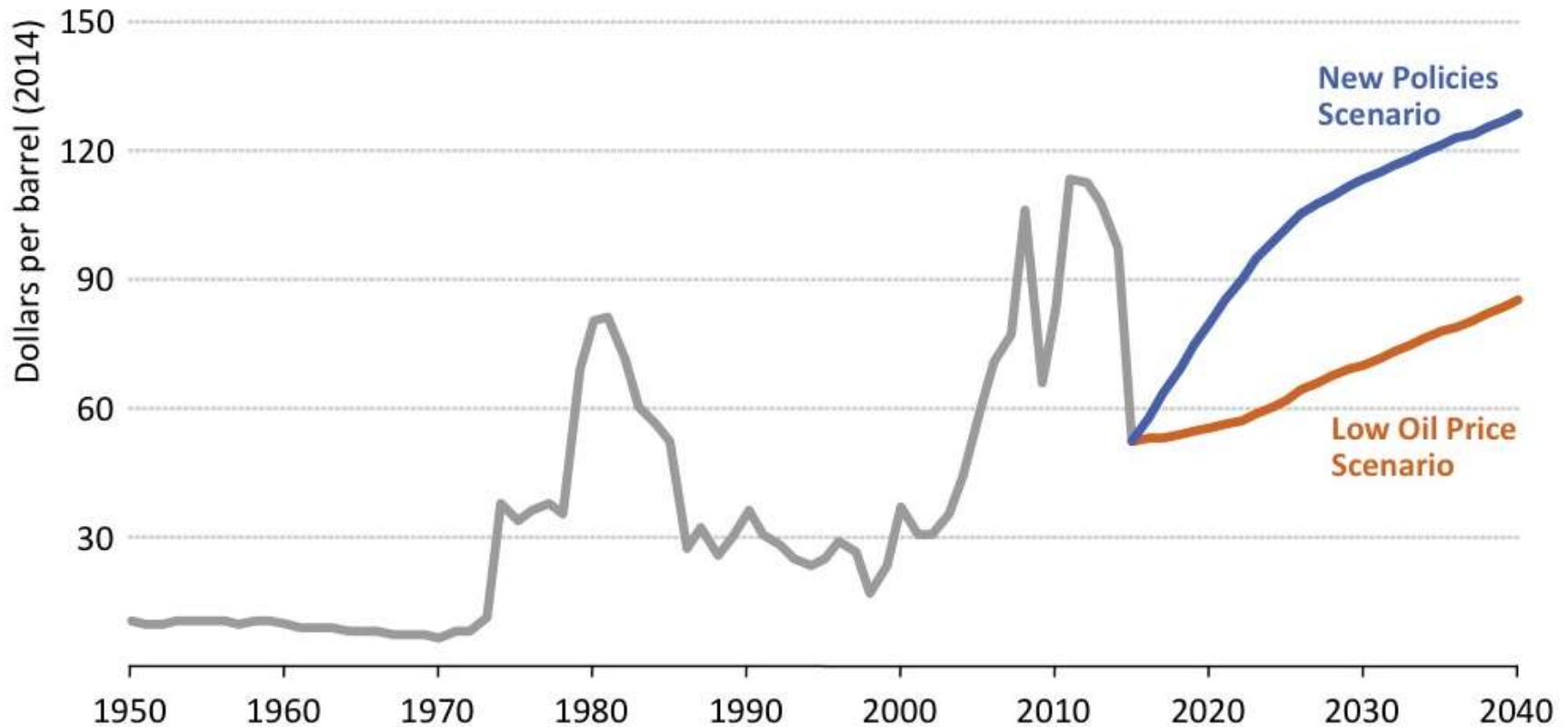


原油価格の暴落は、日本にとって大きなチャンスだ。しかし、日本は原油価格の暴落を歓迎していない。日本は原油価格の暴落を歓迎していない。

日本は原子力発電の安定供給を確保し、温暖化対策を進めることが、今後の課題だ。日本は原子力発電の安定供給を確保し、温暖化対策を進めることが、今後の課題だ。

# 国際エネルギー機関(IEA)の 石油低価格シナリオ

**Figure 4.1** ▶ Average IEA crude oil import price by scenario



バレル50ドル程度の価格が2020年代まで続くと何が起こるか？

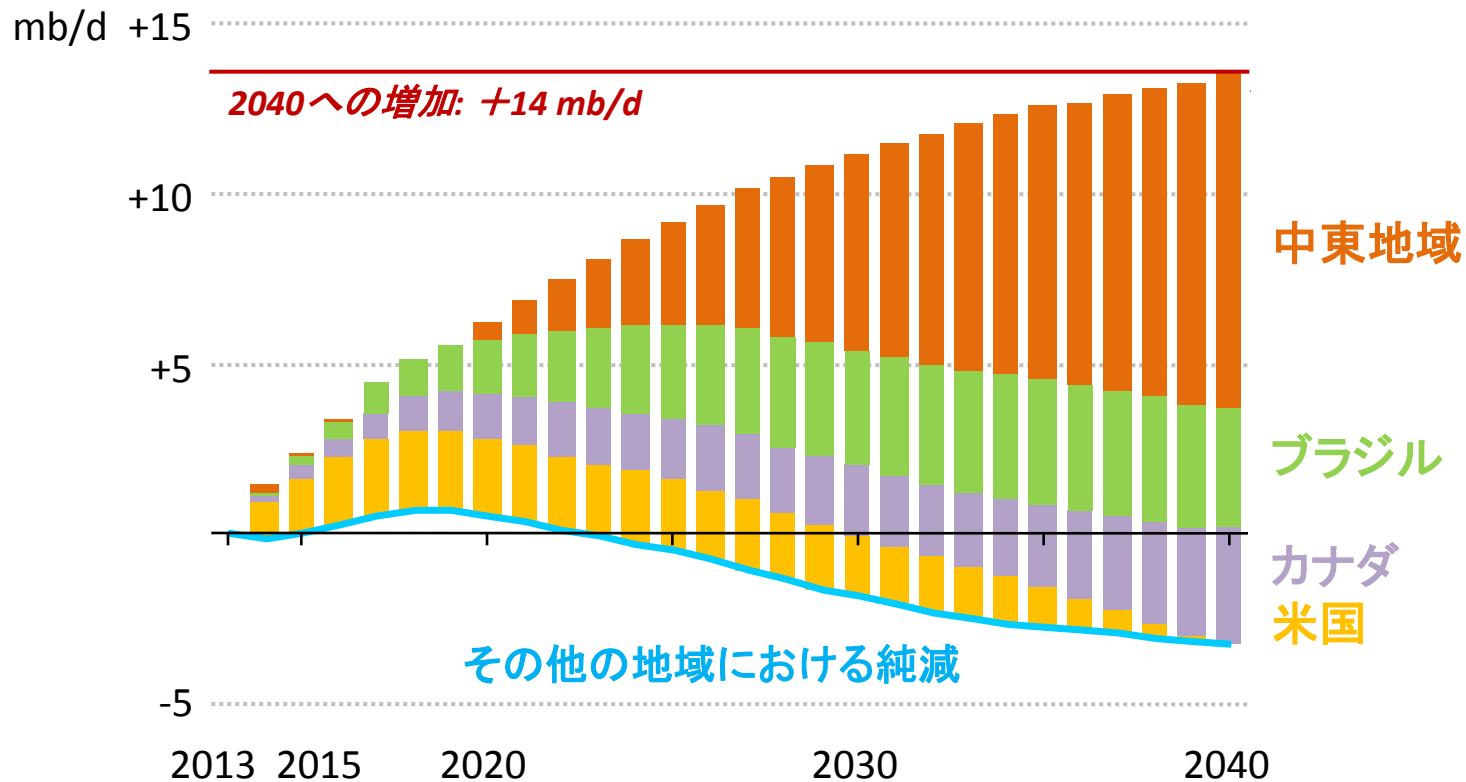
WEO2015

# 中東の不安定性が石油市場にとってより大きなリスクとなる。 低価格ならなおさら。

## 石油生産の伸び

### 米国、カナダ、ブラジル、中東地域

WEO2014



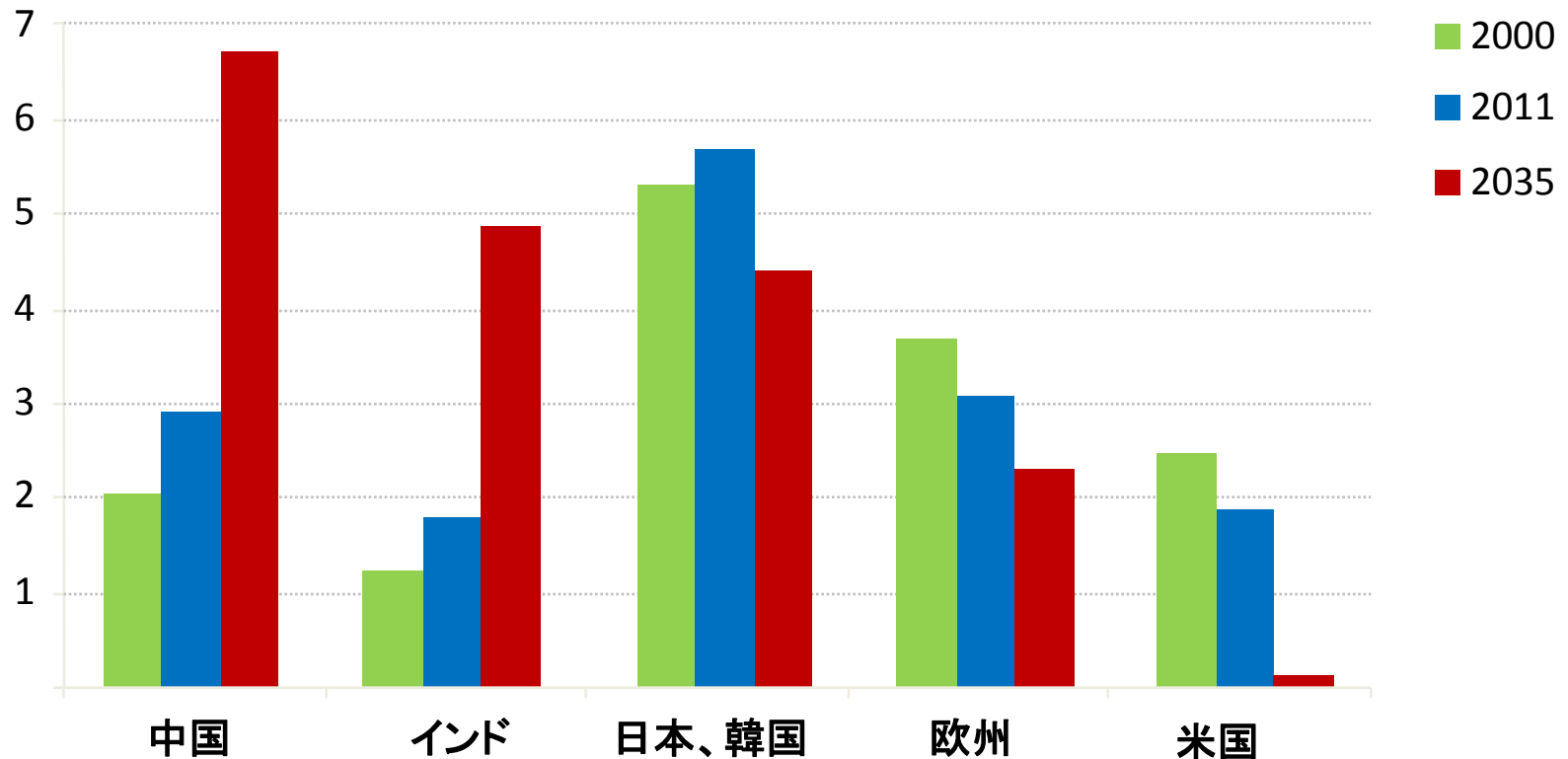
足下の石油価格下落で目を曇らせるな。需要が1千4百万バレルを超えたときのリスクは大きい。イラクとその他の中東への依存が上昇するからだ。

# 米国の中東からのエネルギー自立。 中東の石油がアジアへ: 新たなシルクロード

## 中東からの石油輸出(仕向け地域別)

IEA WEO 2012

日量百万バレル

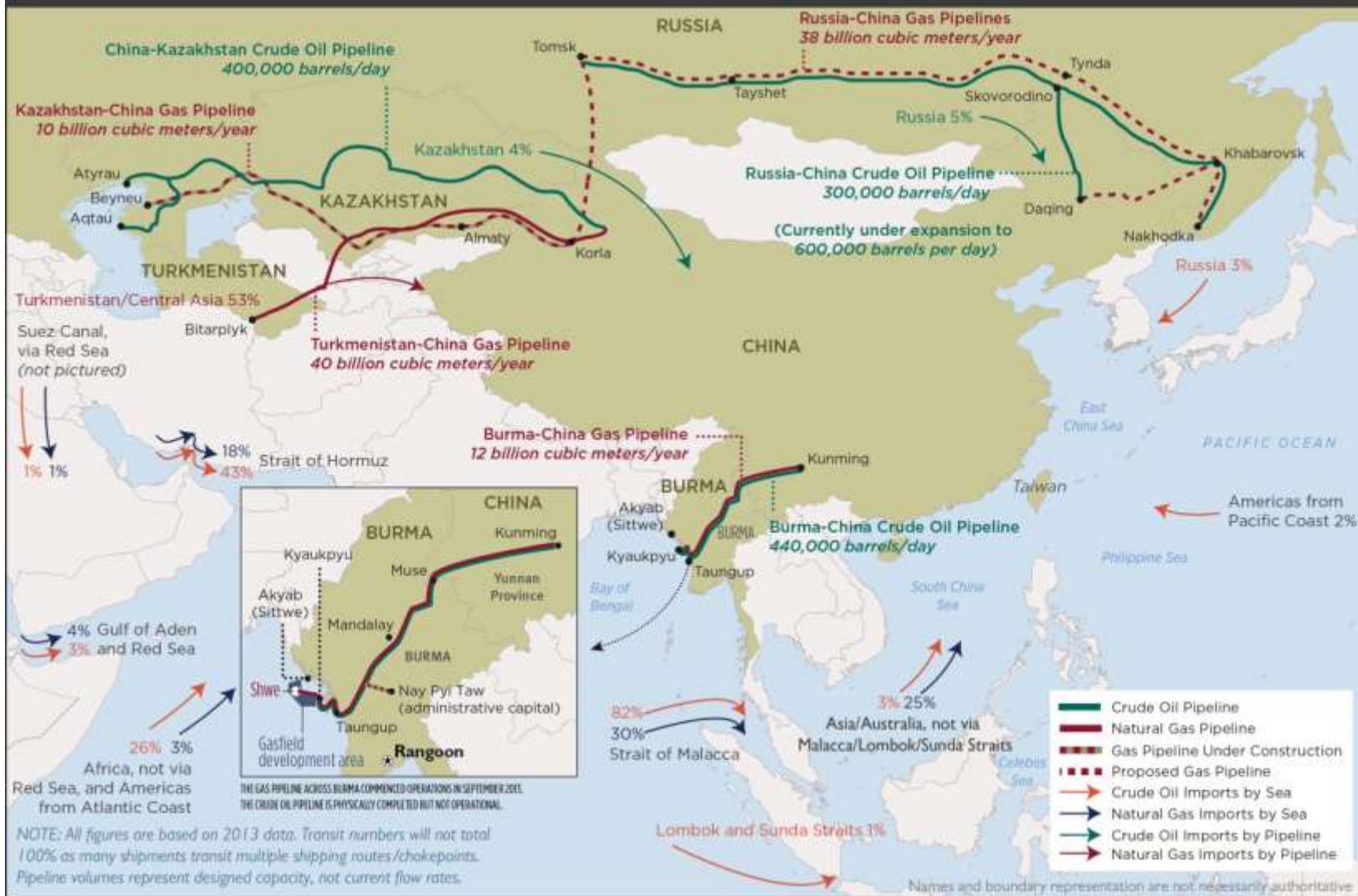


**2035年までに、中東産石油の90%近くがアジアへ輸出される。  
北米の純輸出地域としての台頭がこの東方シフトを加速**



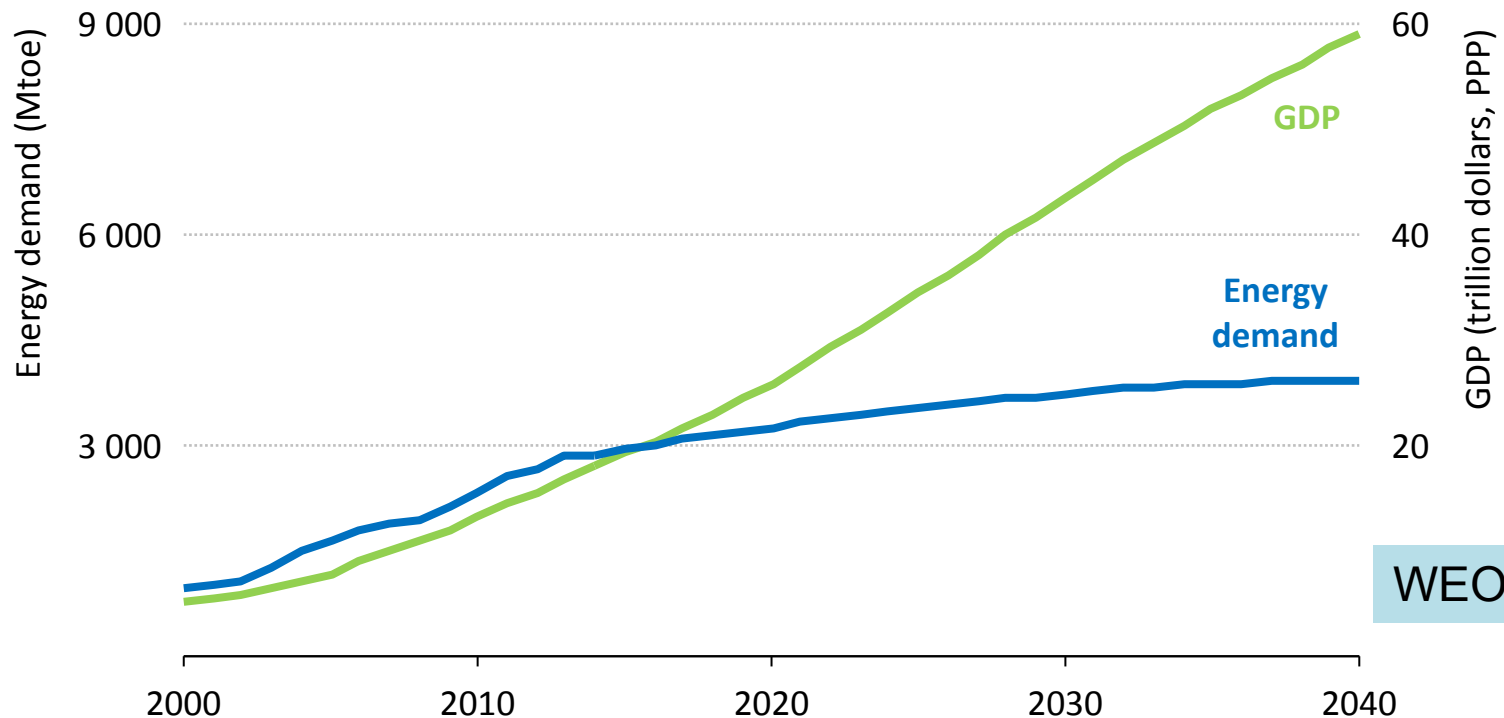
# 中国の石油・ガス輸入戦略：一帯一路

(U) China's Import Transit Routes/Critical Chokepoints and Proposed/Under Construction SLOC Bypass Routes



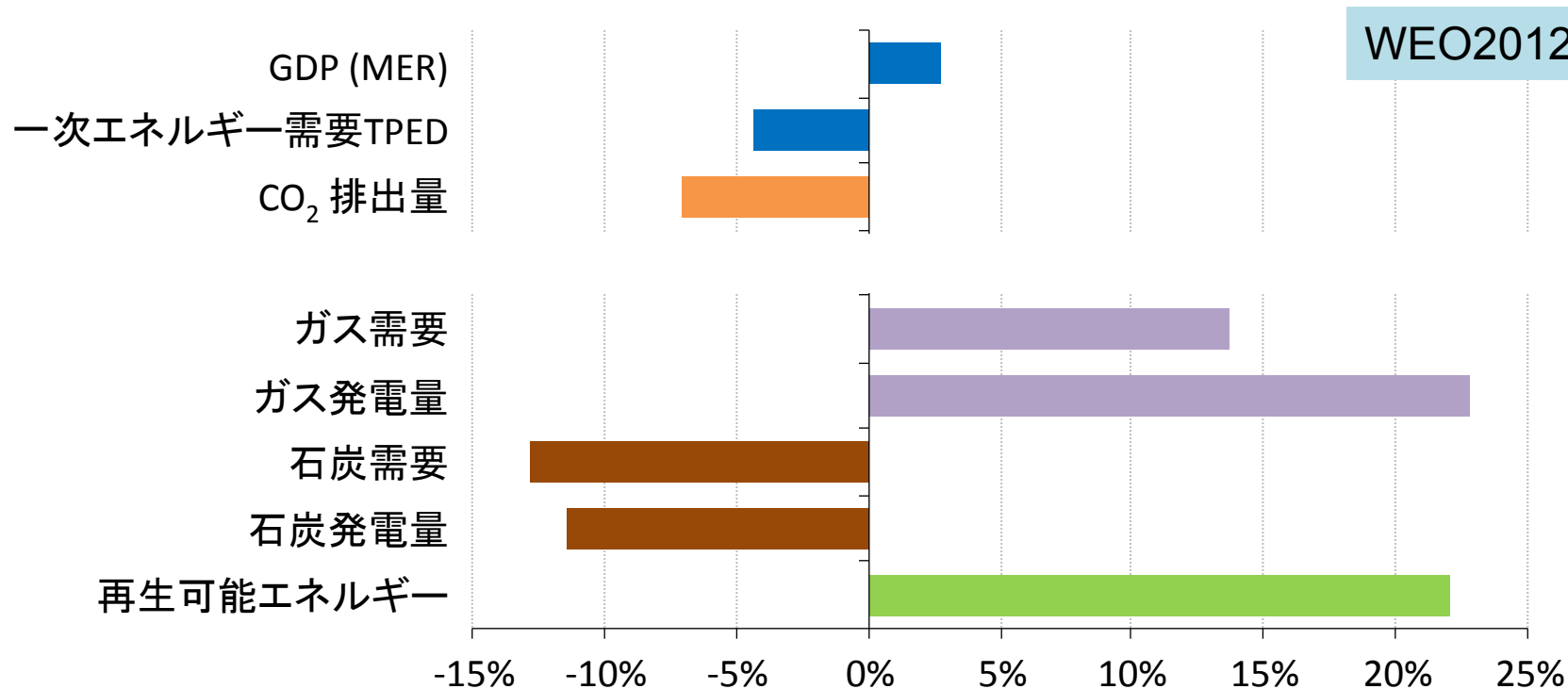
# 中国の成長は新しい局面に。

## 中国におけるエネルギー需要の推移



**中国は省エネ努力とサービスを中心とする経済構造改革を進める。それに伴い経済成長に要するエネルギー原単位は低下すると考えられる。**

# 「ガスの黄金時代」は北米に到来。 シェール革命による燃料転換で米国はWin-Win-Win。

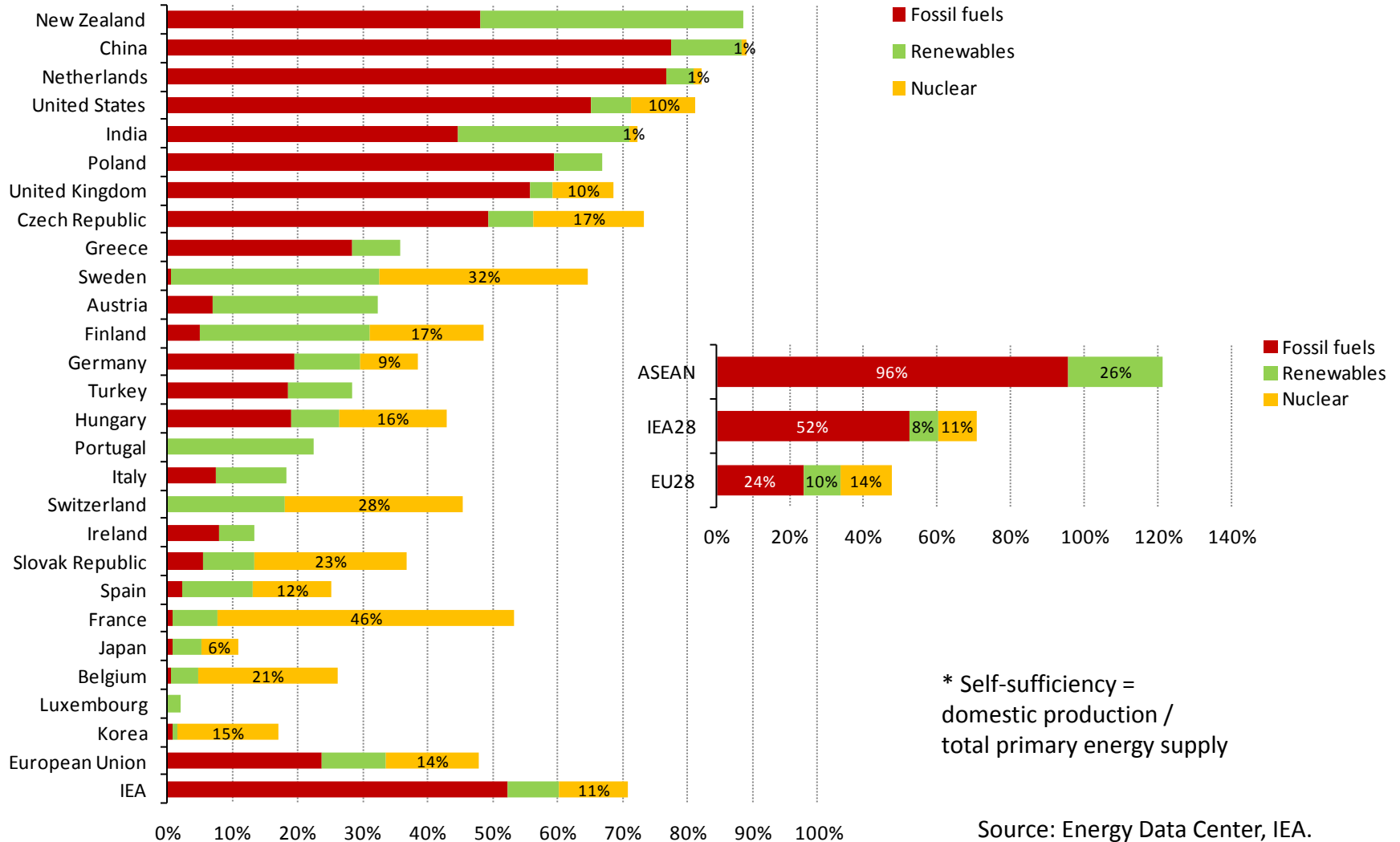


**2006-2011年の間に米国では経済成長と7%のCO<sub>2</sub> 排出削減。  
石炭からガスへの燃料転換、燃焼効率の改善、再生利用エネルギー活用、  
原子力などで、今後2030年までにさらに30%の削減をめざす。**



# エネルギー安全保障 = 多様性 + 関係 + 原子力

## 2011年自給率とエネルギーミックス



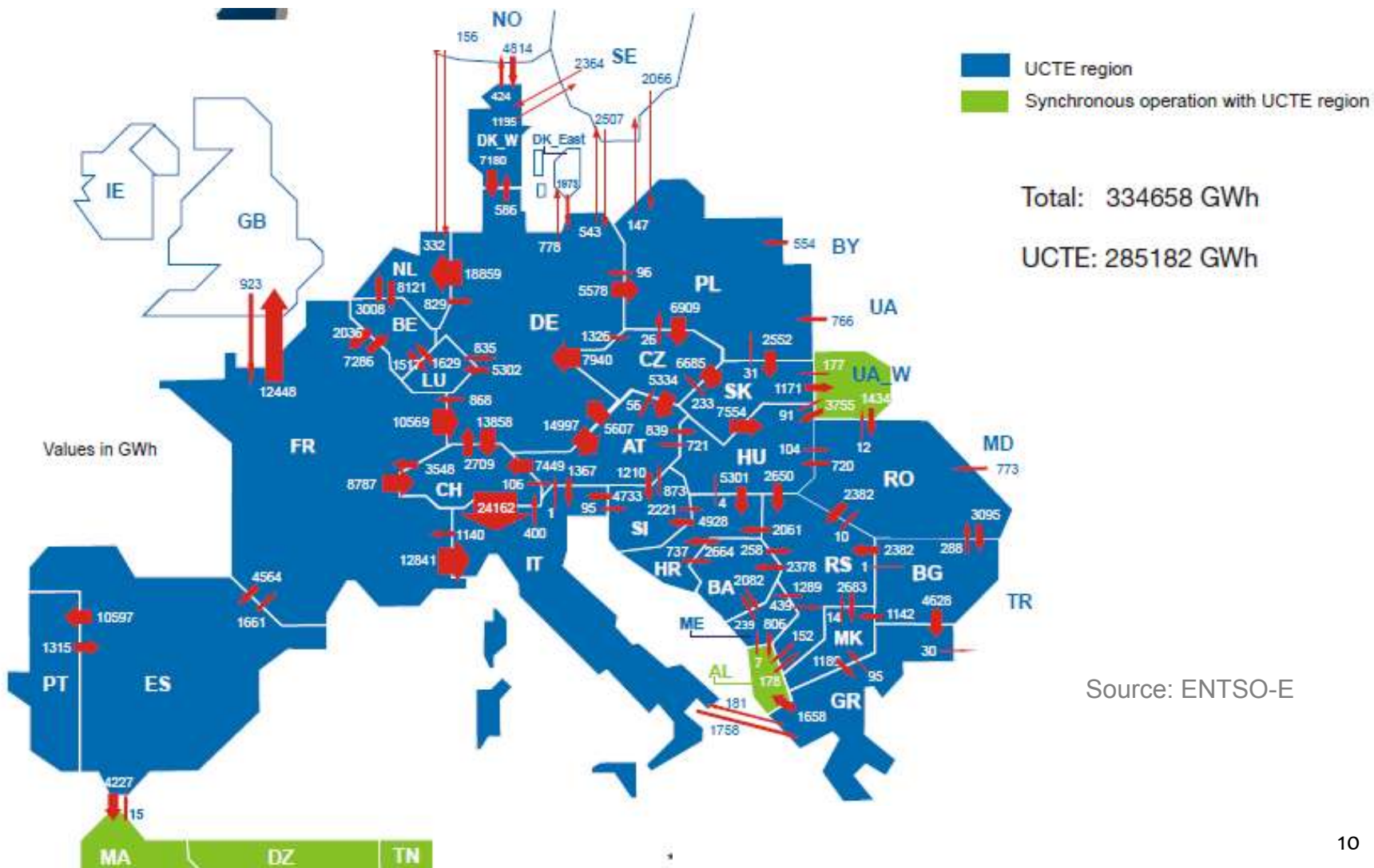
\* Self-sufficiency =  
domestic production /  
total primary energy supply

Source: Energy Data Center, IEA.

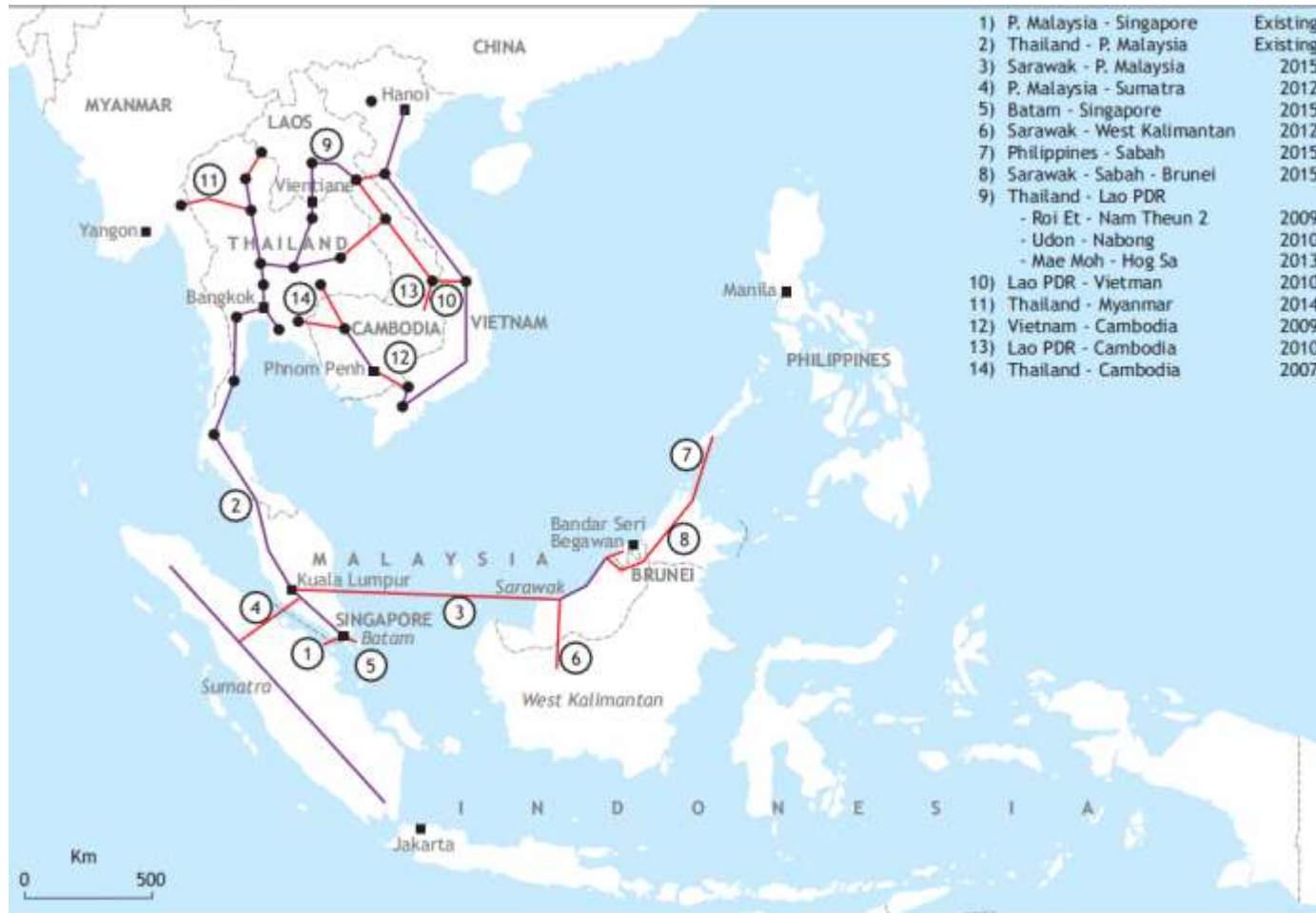
Note: Does not include fuels not in the fossil fuels, renewables and nuclear categories.

# ヨーロッパは系統線関係で集団的エネルギー 安全保障と持続可能性実現を目指す

Physical energy flows between European countries, 2008 (GWh)



# ASEAN諸国の系統線連係



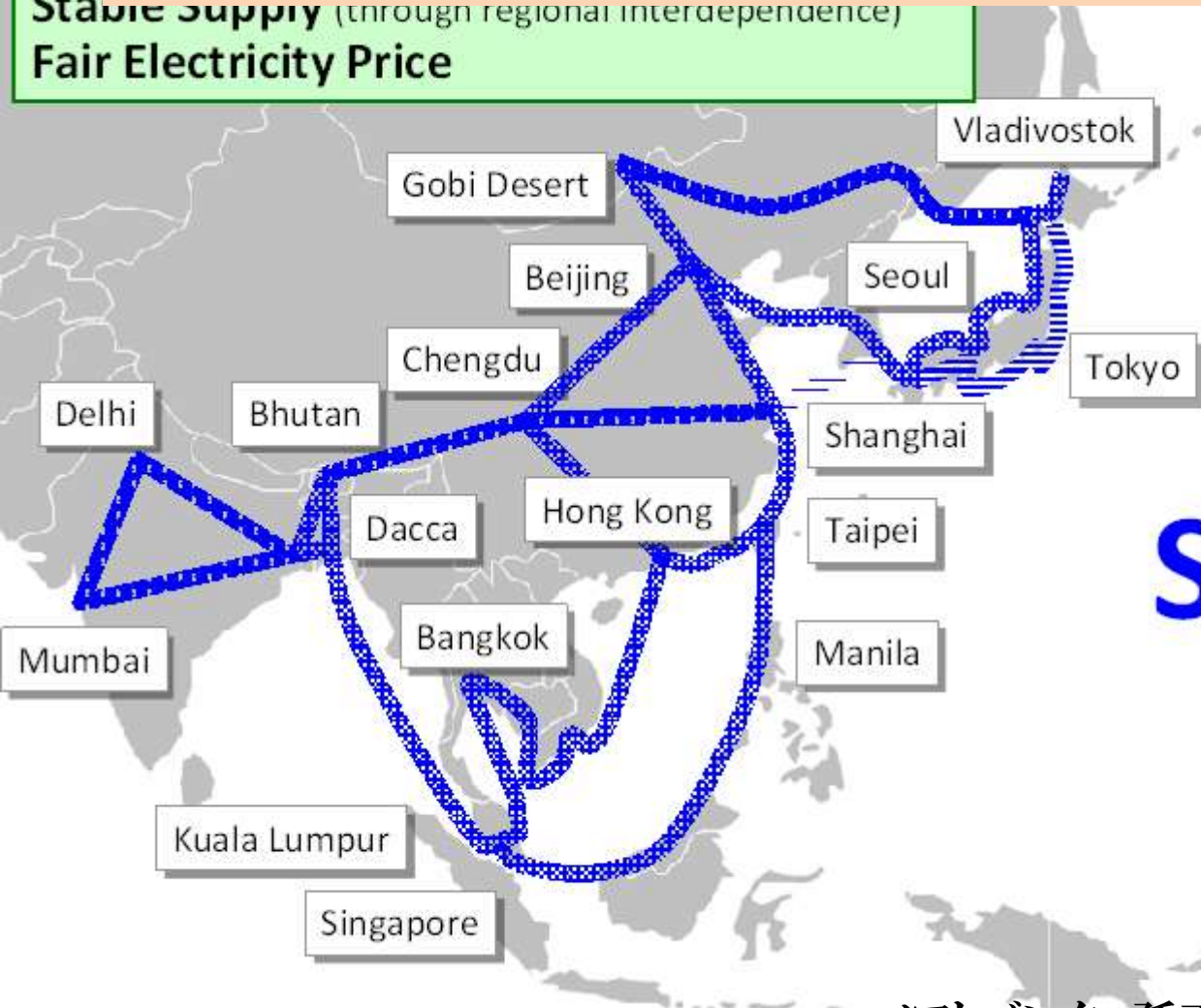
The boundaries and names shown and the designations used on maps included in this publication do not imply official endorsement or acceptance by the IEA.

# アジアスーパーグリッド構想

“Energy for Peace in Asia”

New Vision?

Der  
Stable supply (through regional interdependence)  
Fair Electricity Price



Phase 3

# Asia Super Grid

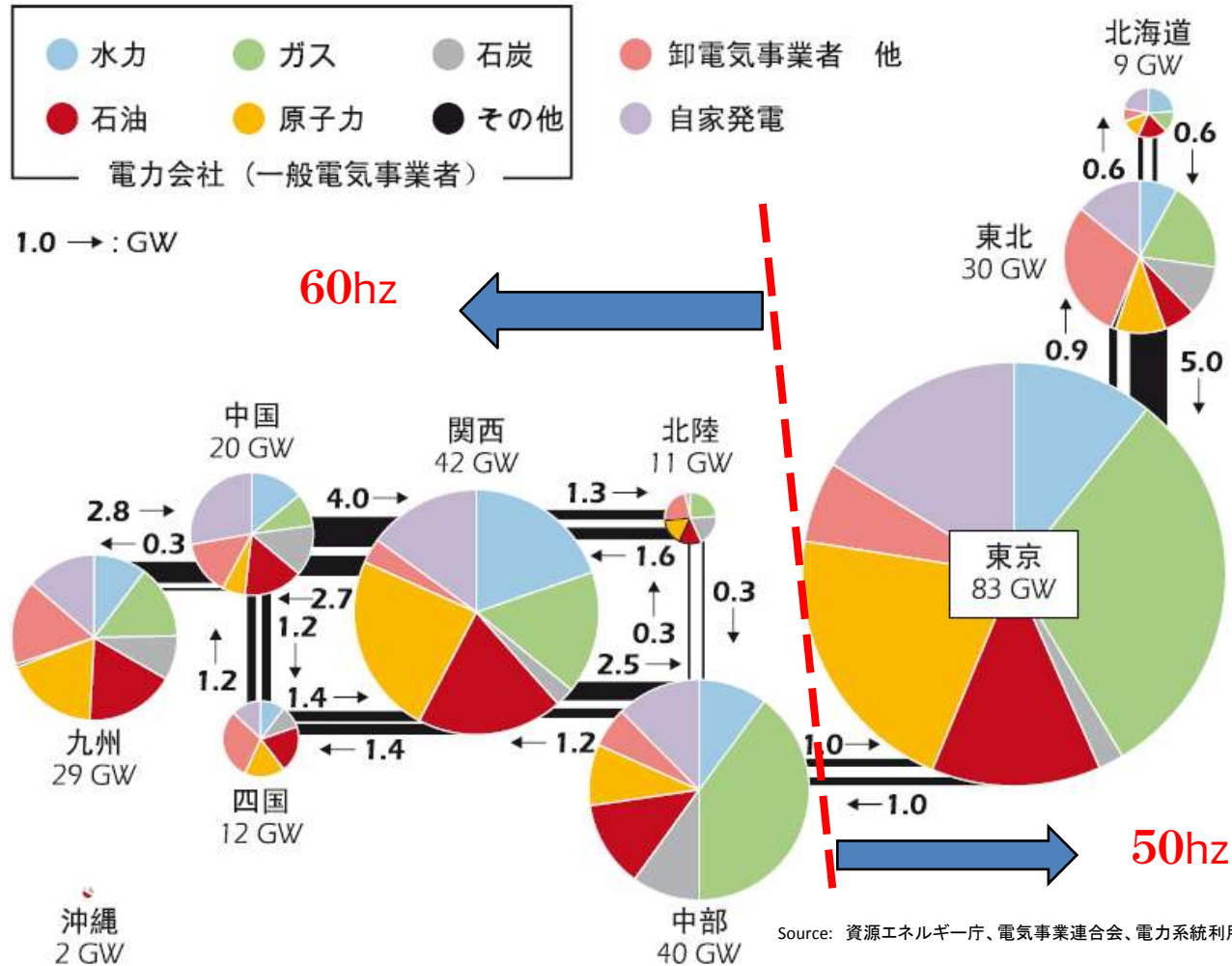
Total 36,000km

ソフトバンク 孫正義氏のプレゼンテーションから



「日本では電力市場改革と系統網の周波数統一が必要。」と I E A は福島以前から提言してきたが、

### 地域・事業者・発電種別設備容量と地域間連系線



国内のエネルギー市場が一層統合されることで、変動型の再生エネルギー発電利用を拡大しつつ、供給の安定性及び経済効率性が確保される。



# 持続可能な原子力技術とは？

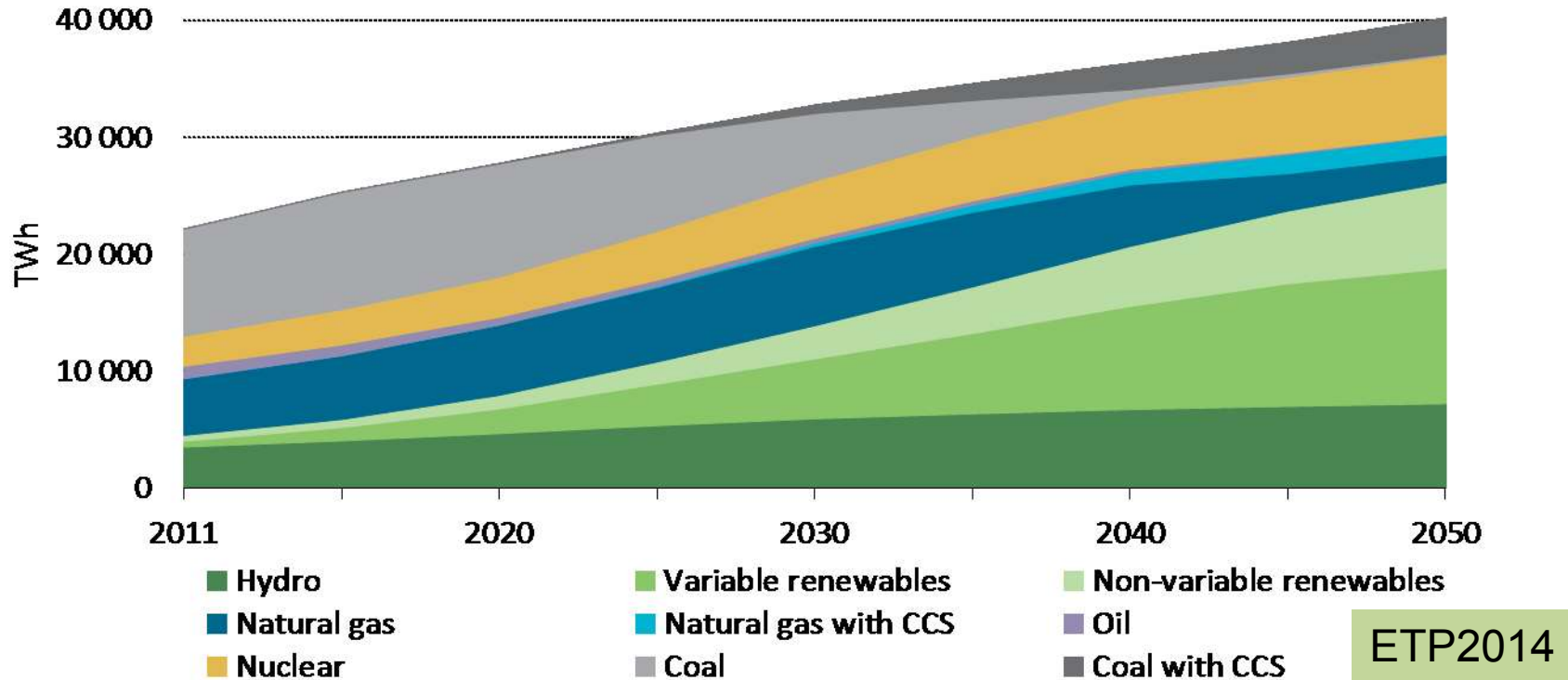
福島事故を踏まえたグローバルな視点からの一試案

各国がパリで開かれたCOP21で約束した気候変動対策はかなりの規模に達した。問題は今後、規制レベルが強化される可能性が高いこと。



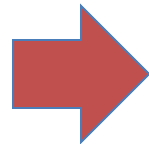
各国の約束を合計するとたい気温上昇は2.7度に抑えることが可能である。そのためには2030年までに低炭素技術開発と省エネに13兆ドルの投資が必要である。

IEAエネルギー技術見通しは化石燃料と再生エネルギーの逆転の2DS(摂氏2度)シナリオも用意。  
 この場合原子力発電は毎年2300万KWの設備追加が必要。



● 現在の発電シェア

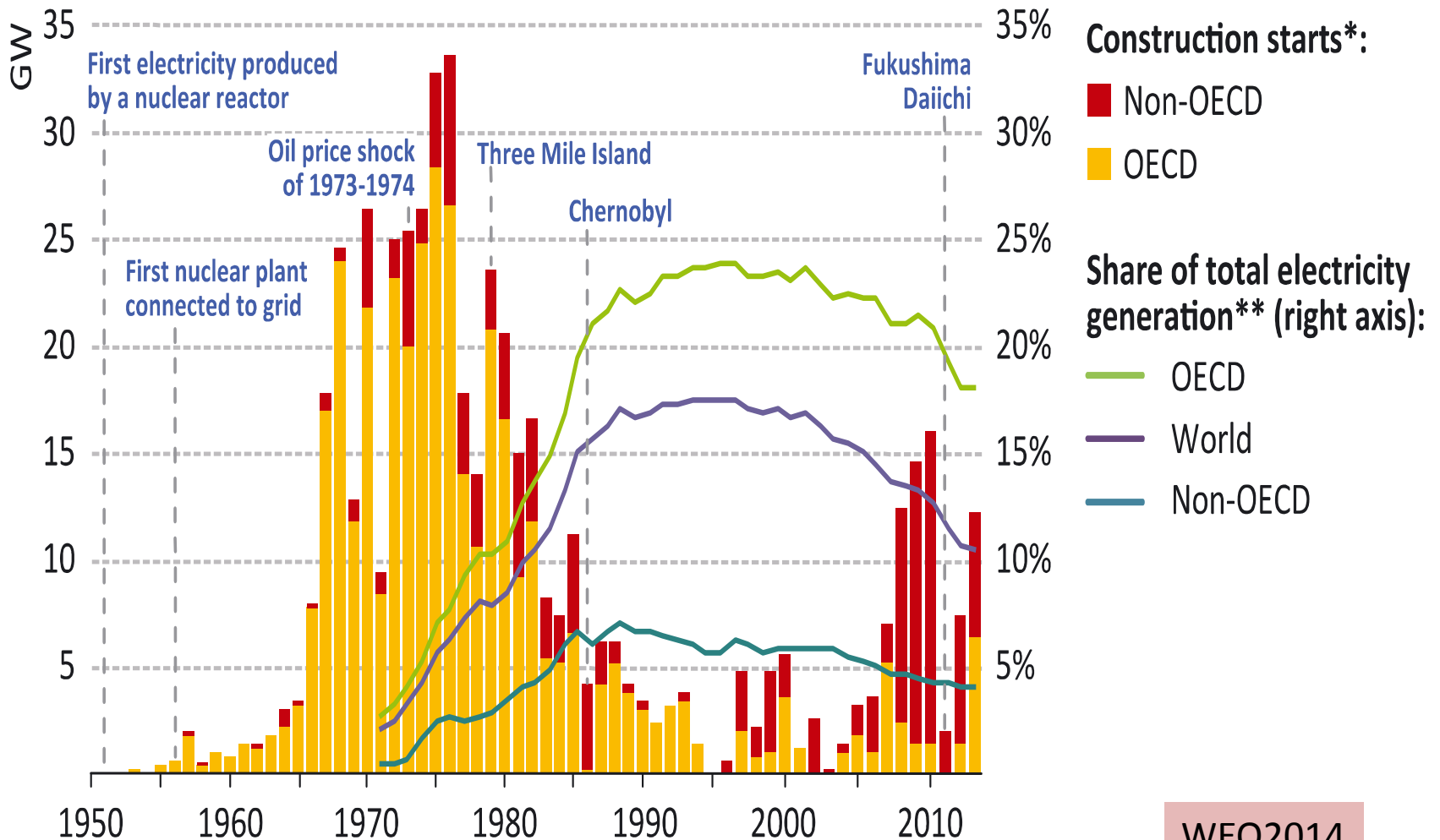
- 化石燃料: 68%
- 再生可能エネ: 20%
- 原子力: 12%



■ 2DS 2050の発電シェア:

- 再生可能エネ: 65%
- 化石燃料: 20%
- 原子力: 15%

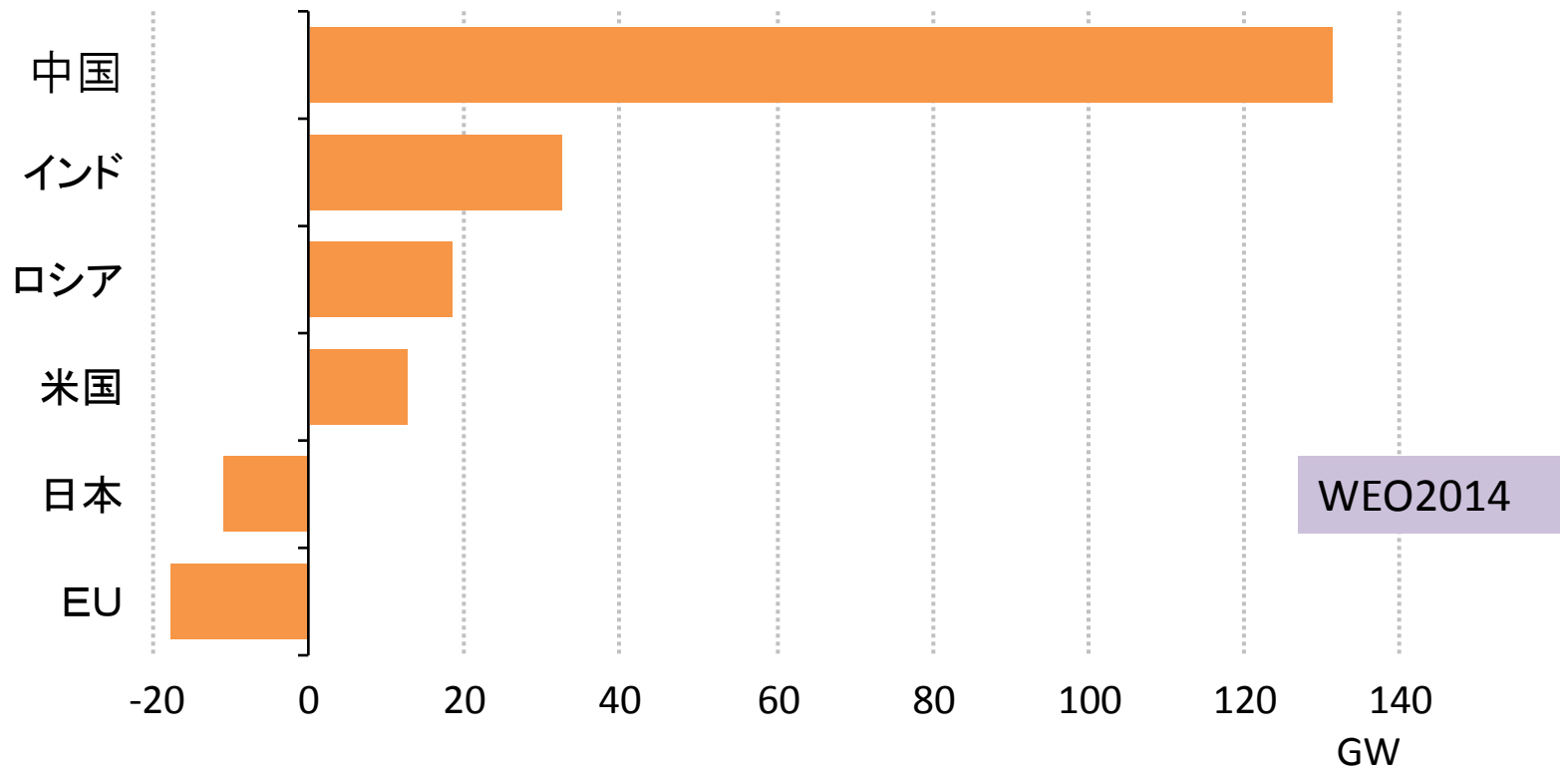
# 原子炉建設の推移



WEO2014

# 原子力発電能力は60%増加するが、 「原子カルネッサンス」とは言いがたい。

発電能力(ネット)変化, 2013-2040 (ネット=新設-廃炉)



**2040までに原子力発電の拡大で現在の二酸化炭素排出量四年分を削減、  
また、ある国にはエネルギー安全保障の向上と貿易収支改善をもたらす。**



# 福島第一原発事故の教訓

## 国際的に共有すべき原則的教訓

- 安全文化の確立。想定外のことを想定する。(津波、全電源喪失、テロ、大規模電源喪失)
- 過酷事故に対する深層防護、同一事象による危機、複合災害などへの準備。安全に加えテロ対策への重点化。(NRCのB5b条項問題の反省)
- なぜ他の発電所(福島第二(HBR)、女川(IAEA)、東海第二)で防げた事故が、福島第一発電所で防げなかったのかを客観的に明らかにすべし。

## 安全性を確立する措置

- 「人災であり、防げたはず。」(畑村政府事故調委員長、国会事故調報告)
- NRC, IAEA などとの国際協力。共同委員会によるピアレビューなど。国際的サイクルメカニズム。失われた信頼回復措置。
- 安全の科学的判断のためのNRC型独立規制委員会による基準及び規律。
- 安全規制の透明性、プライオリティ付け、バックフィットなど。

## 電力供給の安定性確立

- 発電所の分散と集中のバランス
- 系統線連携強化、50hz・60hz問題、国際的関係も視野に

## それでも災害が起こってしまったからの回復措置: 安心のための措置

- 米国で同じことが起こったらどうだったのか? FEMA(米国連邦緊急事態管理庁)型緊急時対応組織。専門スタッフの訓練育成。原子力技術への自衛隊の参加。現場力。スマートメーターによる停電回避。

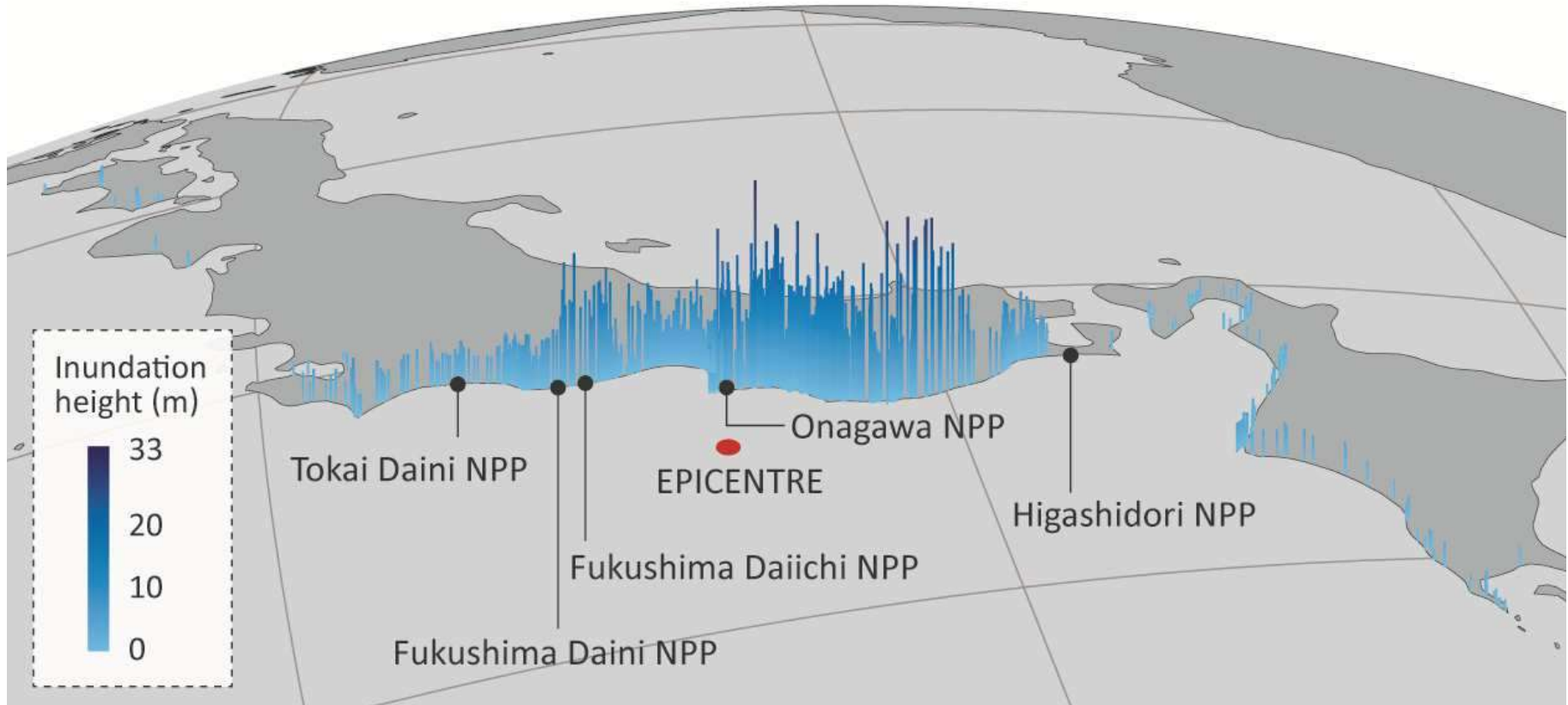
14:46, 11 March 2011

Great East Japan Earthquake

Loss of off-site power, all operating reactors automatically shut down .

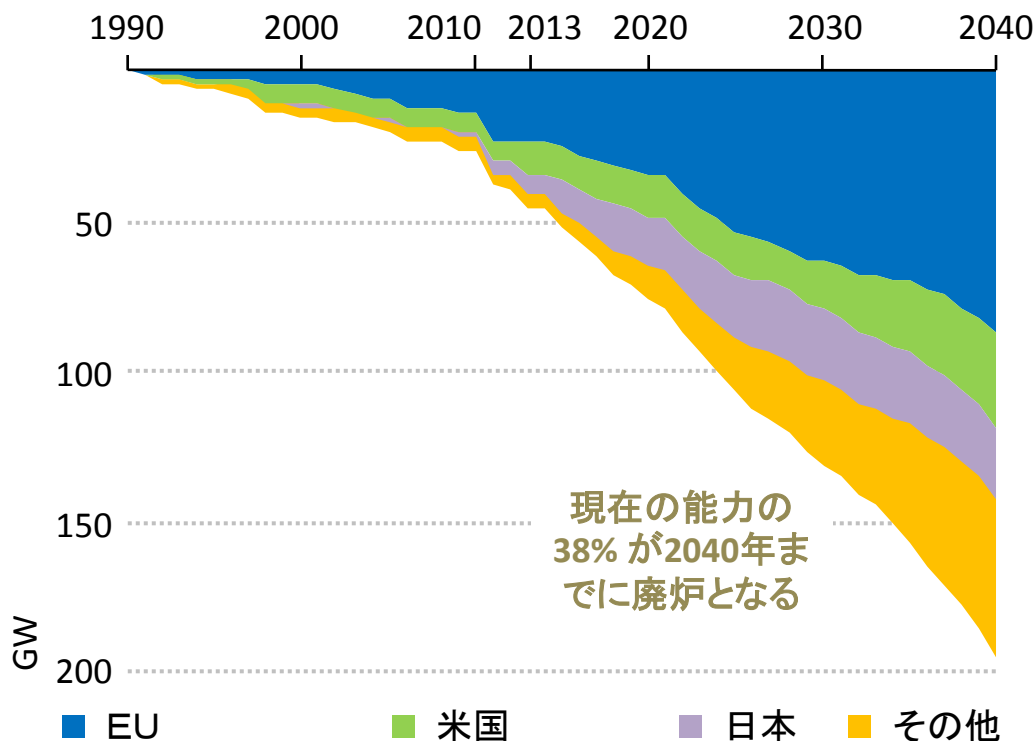
15:27-15:37 Tsunami waves hit the shores.

津波に襲われた発電所の中で、なぜ福島第一発電所  
だけで事故が発生したのか？

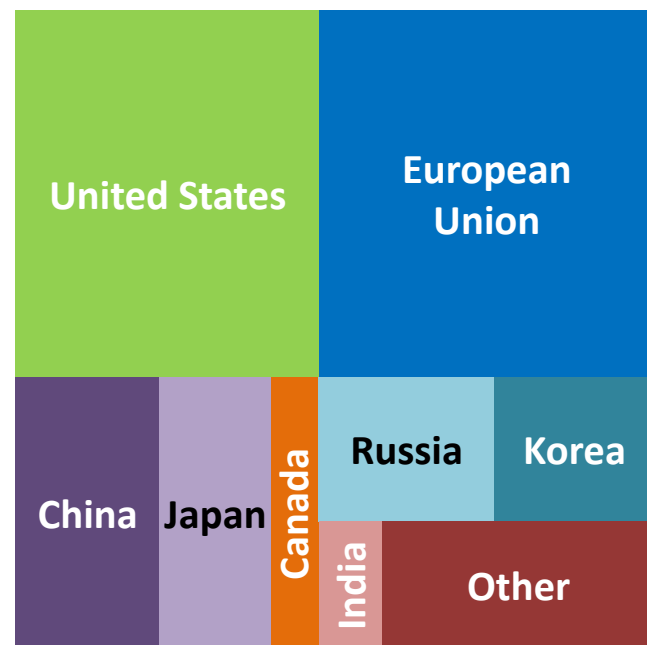


原子力発電に関する国民の関心事項に答える必要がある。安全、廃炉、核不拡散、使用済み燃料問題など。

原子力炉の廃炉 1990-2040



使用済み燃料  
1971-2040: 70万5千トン



WEO2014

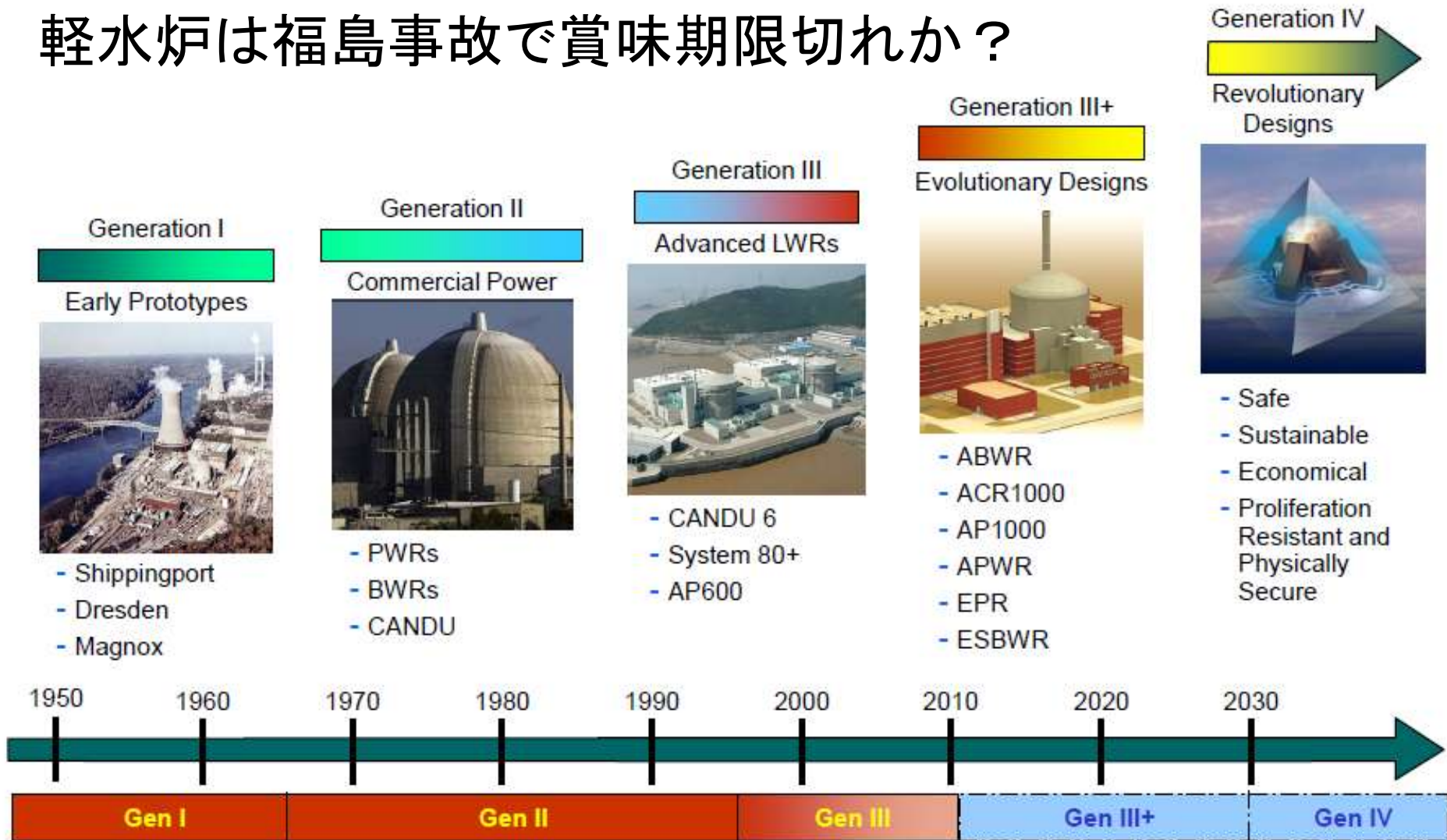
国民の関心はプラントの安全、廃炉、廃棄物処理、核不拡散など。

2040年までに軽水炉200基が廃炉に、

使用済み燃料は倍増。

# 原子炉の技術的進化の歴史

## 軽水炉は福島事故で賞味期限切れか？





"WHEN WAS THE LAST TIME YOU SAW A DOCUMENTARY  
THAT FUNDAMENTALLY CHANGED THE WAY YOU THINK?"  
OWEN GLEIBERMAN, ENTERTAINMENT WEEKLY



(ACTUAL SIZE)

WHAT IF THIS CUBE COULD  
POWER YOUR ENTIRE LIFE?

FROM ACADEMY AWARD-NOMINATED DIRECTOR ROBERT STONE

# PANDORA'S PROMISE

AT THE BOTTOM OF THE BOX SHE FOUND HOPE.

PRODUCED BY JAMES HAMILTON AND ROBERT STONE. WRITTEN BY ROBERT STONE. DIRECTED BY ROBERT STONE. CASTING BY JAMES HAMILTON. COSTUME DESIGNER: JAMES HAMILTON. HAIR AND MAKEUP: JAMES HAMILTON. PRODUCTION DESIGNER: JAMES HAMILTON. EXECUTIVE PRODUCERS: JAMES HAMILTON AND ROBERT STONE. PRODUCED BY JAMES HAMILTON AND ROBERT STONE. WRITTEN BY ROBERT STONE. DIRECTED BY ROBERT STONE. CASTING BY JAMES HAMILTON. COSTUME DESIGNER: JAMES HAMILTON. HAIR AND MAKEUP: JAMES HAMILTON. PRODUCTION DESIGNER: JAMES HAMILTON. EXECUTIVE PRODUCERS: JAMES HAMILTON AND ROBERT STONE.

© 2012 Sundance Channel. All rights reserved. www.pandoraspromise.com



www.pandoraspromise.com

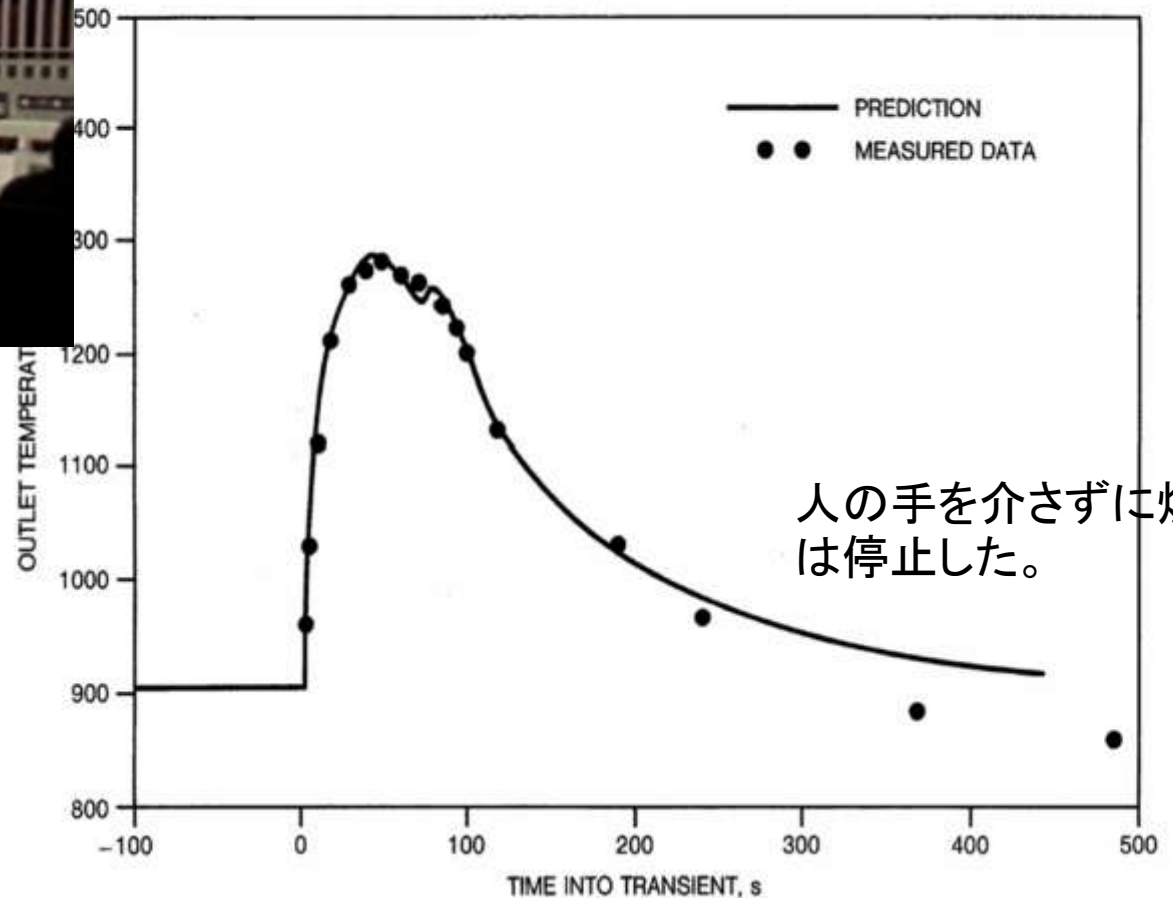


ロバートストーン監督の映画「パンドラの約束」は環境派の中で原子力が切り札と考える人たちの物語。映画の中で受動的安全性を持つ高速炉が紹介された。



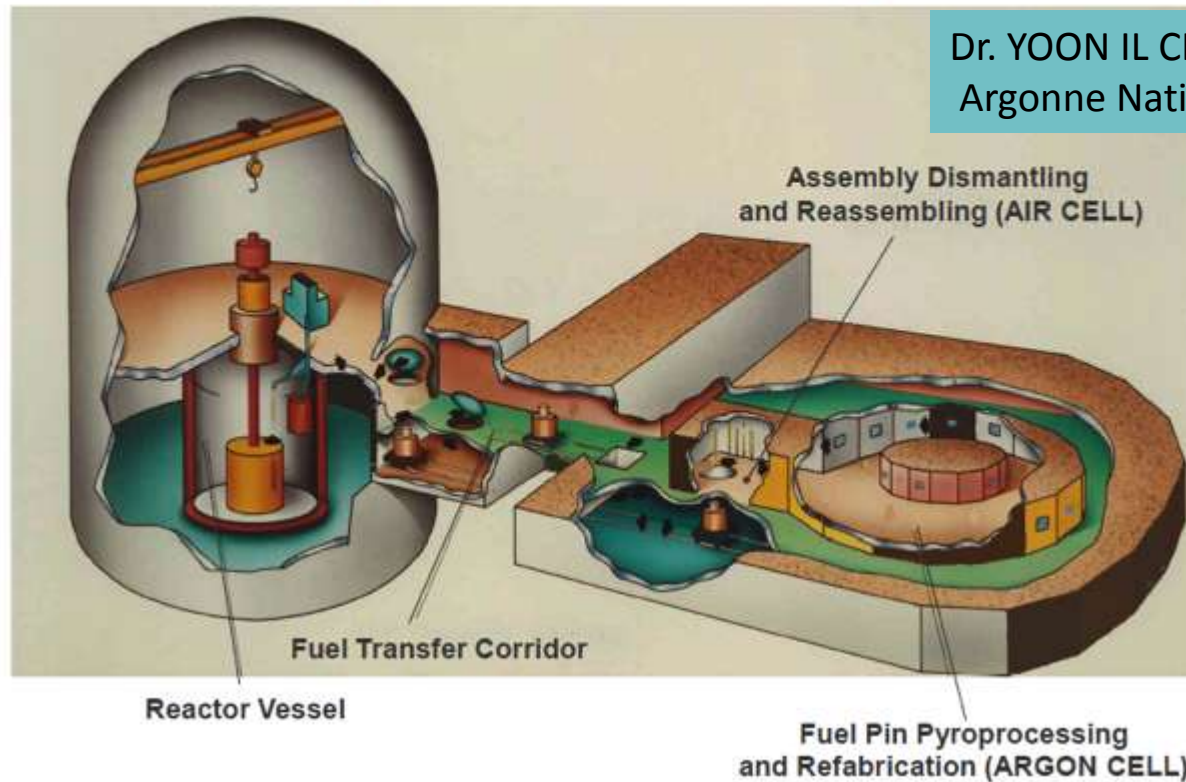
# 映画に登場する1986年に行なわれた福島事故に酷似する全電源喪失実験。 炉内温度の推移。

## Loss-of-Flow without Scram Test in EBR-II



# 「パンドラの約束」に登場する安全性に優れた統合型高速炉 (Integral Fast Reactor) と電解型乾式再処理施設 (Pyroprocessing)

Pyroprocessing was used to demonstrate the EBR-II fuel cycle closure during 1964-69



統合型高速炉と電解型乾式再処理はウラン資源の効率的利用、受動的安全性、放射性廃棄物処理の容易性、核不拡散性において軽水炉システムより優れている。

# 統合型高速炉の技術特性

## ✓ 次世代炉として革命的進化:

- ほぼ無限なエネルギー源
- 固有安全性
- 長期廃棄物処理技術
- 核不拡散性
- 閉じられた核燃料サイクル

## ✓ 金属燃料と乾式電解再処理法

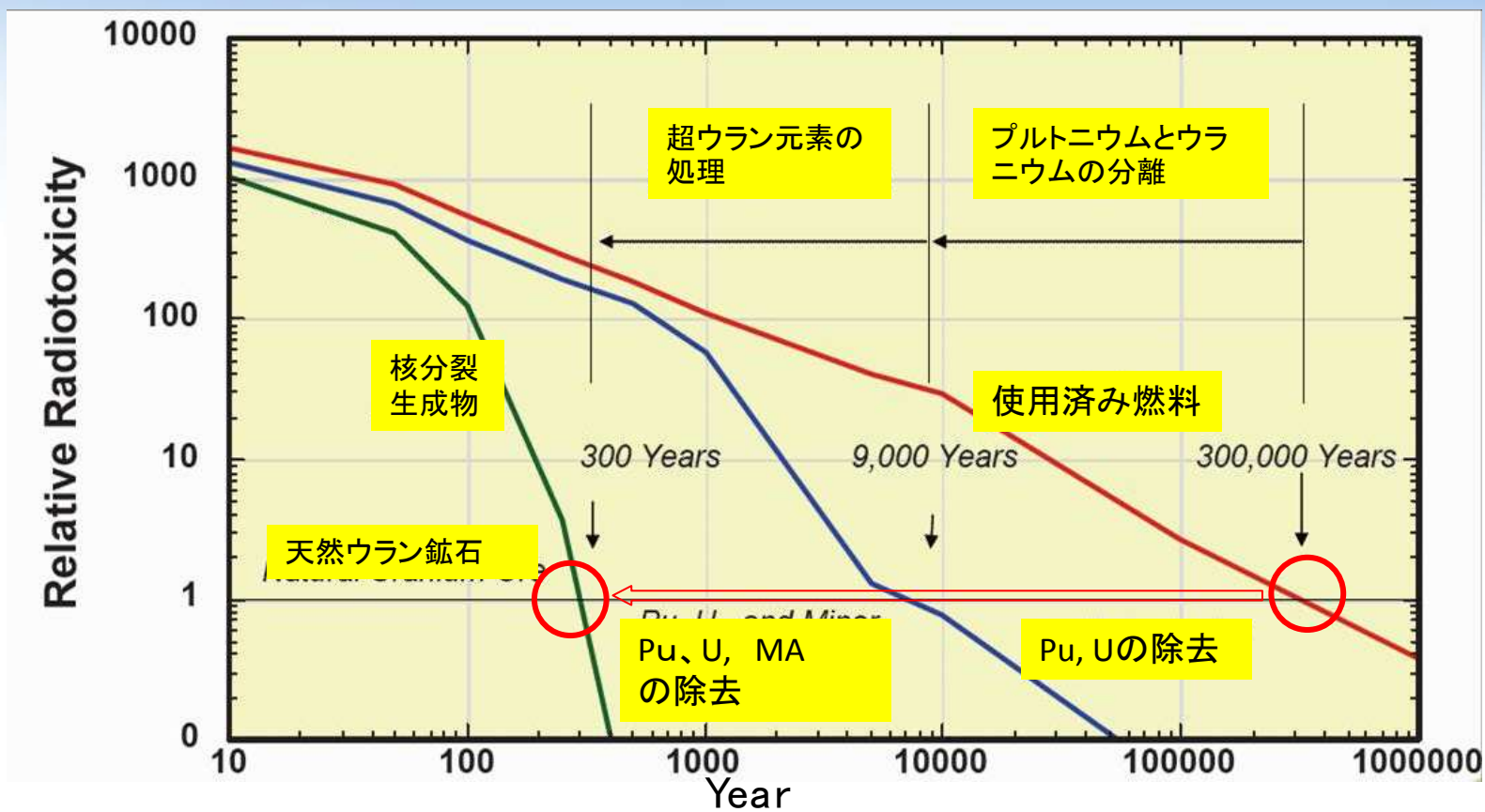
福島第一燃料デブリ処理に有効な技術

## ✓ 軽水炉の使用済み燃料処理を補完

**日本も電力中央研究所が乾式再処理開発に参加したが、クリントン政権が1994年に研究を中止したため停止。**

# 高放射性超ウラン元素の廃棄問題

The 1% transuranic (TRU) content of nuclear fuel is responsible for 99.9% of the disposal time requirement and policy issues

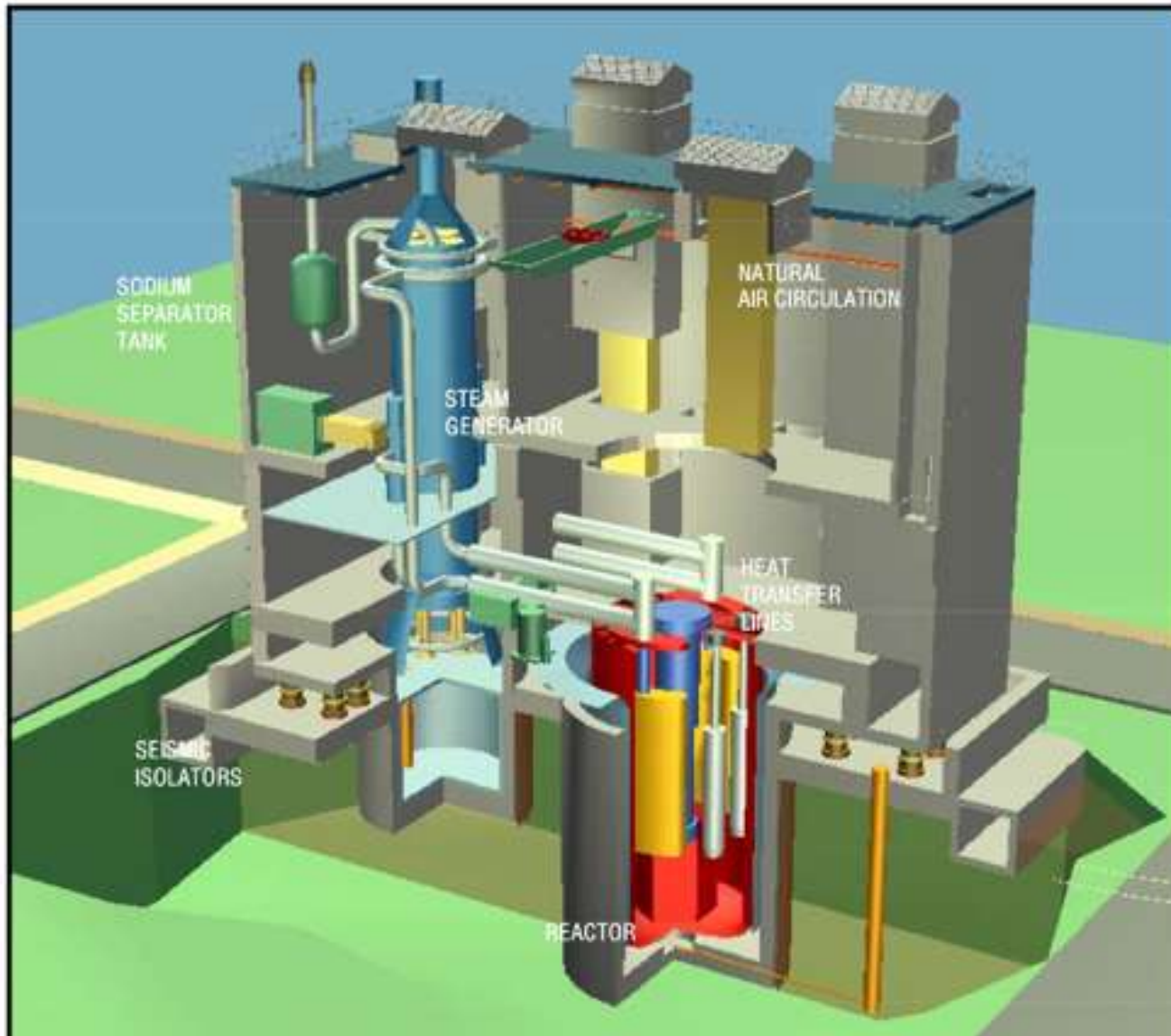


HITACHI

Removal of uranium, plutonium, and transuranics makes a 300,000 year problem a 300 year problem



# *S-PRISM Nuclear Steam Supply System*



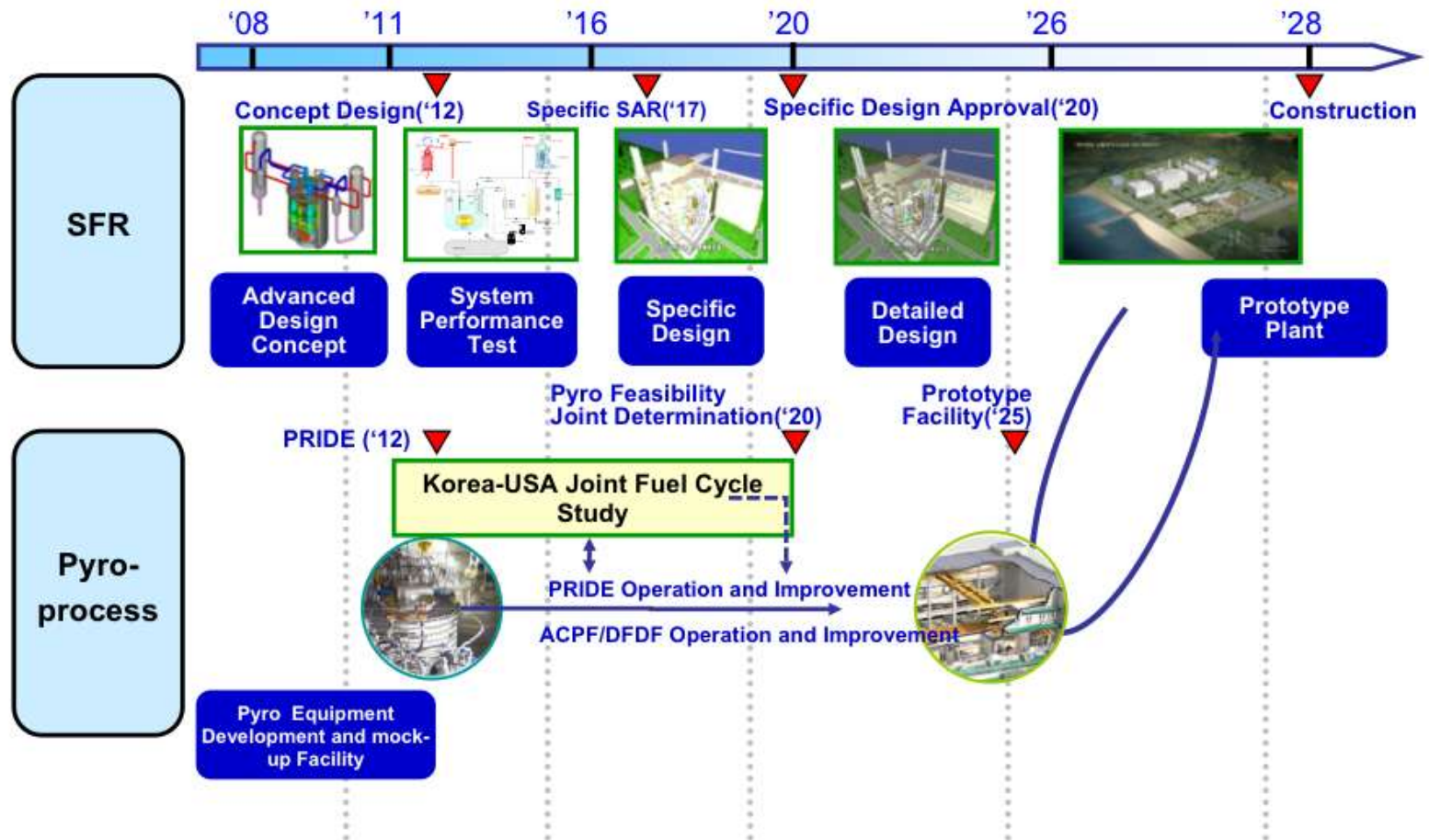
GEがデザインした商業型  
小型モジュラー高速炉  
S-PRISM

GE Hitachi



# IFRに熱心な国は韓国

## Long-term Plan for SFR and Pyroprocess



提案: **福島第二原子力発電所**を活用し福島第一の  
デブリ処理、使用済み燃料、高レベル廃棄物処理シ  
ステムの実証実験を。(笹川平和財団でFS実施中)

- 福島第一原発の炉心デブリは県外に持ち出すことは難しい。
- 福島第二原発は廃炉でない別の活用の道がある。
- 電解型乾式再処理システムはデブリ処理に有効。(再利用できるPu, U, MAと高レベル廃棄物(300年型)の分離)
- 福島第一、第二の使用済み燃料、さらにMOX使用済み燃料を乾式再処理し高速炉の金属燃料に加工する実験。
- 統合型高速炉(GEのSPRISM炉)での燃焼実証。
- 高レベル廃棄物(300年型)の貯蔵管理廃棄実験。
- 従来の各燃料サイクルを補完するモデル開発と人材育成。
- 米国、韓国等との国際協カプロジェクト。日韓関係改善の切り札。
- 2018年に来る日米原子力協定延長交渉の環境整備。

田中 伸男

前国際エネルギー機関事務局長



東京電力福島第2原発は、事故を起こした第1原発から南に10キロのところにある。地震と津波に襲われながらも何とか持ちこたえた。建屋の中に非常用電源を設置していたことが大きい。1000年に1度の津波に耐え、事故中も第1の所員が一時避難するなど、安全な原発であることを実証したとも言える。

しかし地元では東電への信頼が失われ、第2原発も再稼働せず廃炉にすべしとの意見が多数と聞く。私は再稼働以外にももう少し違った利用法があると思う。

それは第1原発の溶けた炉心燃料（デブリ）や使用済み核燃料を処理して廃棄物の量や毒性を減らして管理しやすくする「包括的ゴミ処理技術」

の実証実験だ。

この技術は米アルゴン国立研究所で開発された。ゴミを再

## デブリ処理を福島第2原発で

2015. 1. 15

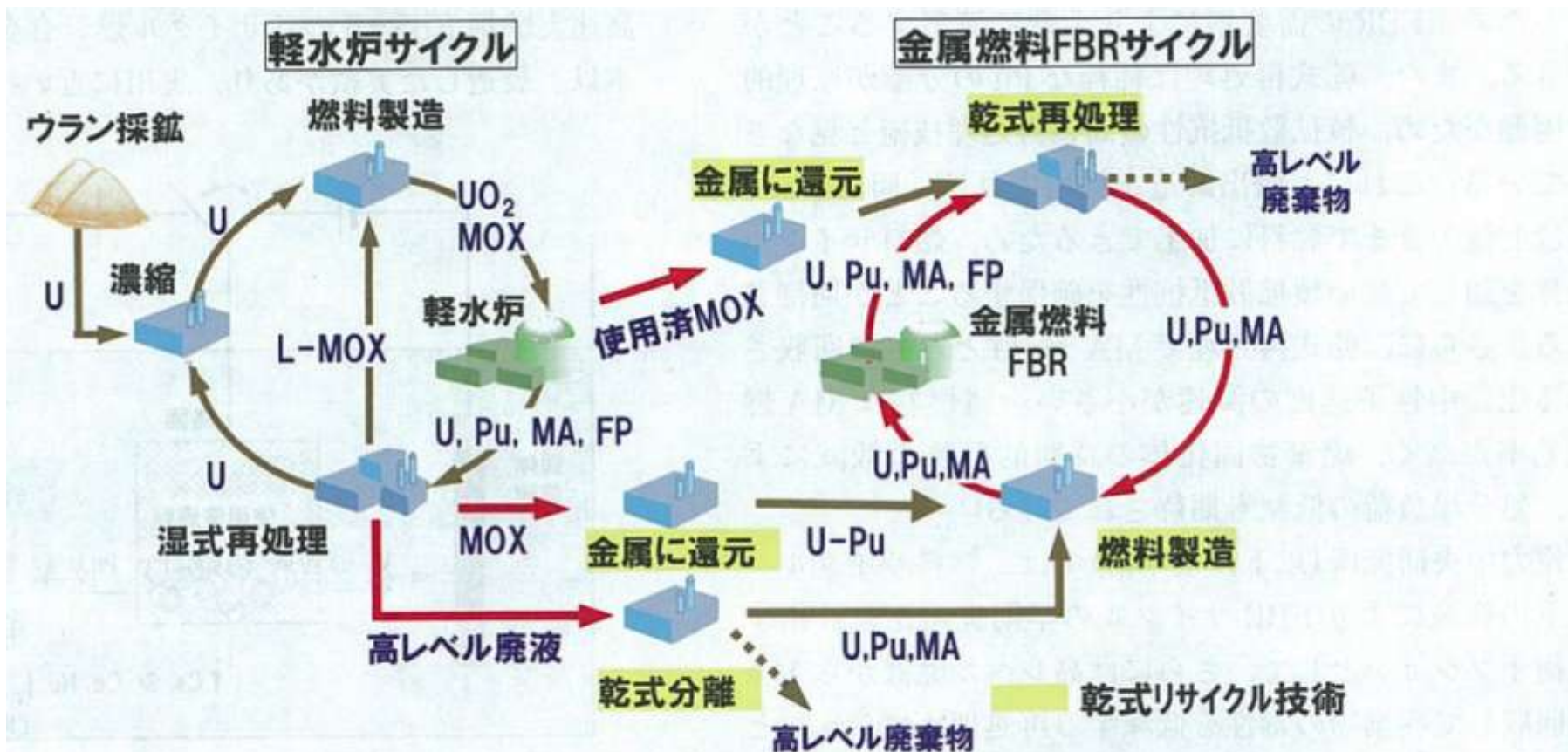
利用して発電する統合型高速炉の安全性は研究所による全電源喪失実験で証明されている。使用済み核燃料を再処理のために外に持ち出す必要がないので、核不拡散性でも軽水炉より優れている。放射性廃棄物の毒性は、軽水炉のように10万年ではなく300年で落ちるので、地層処分よりも貯蔵管理をしやすくなる。

デブリや廃棄物、廃炉に伴う汚染機材を県外に持ち出すことへの理解を得るのは難しい。それなら第1原発の近くで安全に処理する方法を考えるべきだ。フィンランドのオルキルオト原発と隣接するオンカロ処理場のように、原発サイトごとの現地処理も検討すべし。福島第2はそのモデルになりうる。韓国もこの技術に着目し、米ゼネラル・エレクトリック（GE）が商業化を目指している。

日米韓の国際プロジェクトを福島で行えば、世界の最先端の研究者が集まり、復興を後押しするはずだ。原発事故の教訓を世界で共有することにもつながるだろう。



# 日本の既存核燃料サイクルへのIFRサイクルの応用

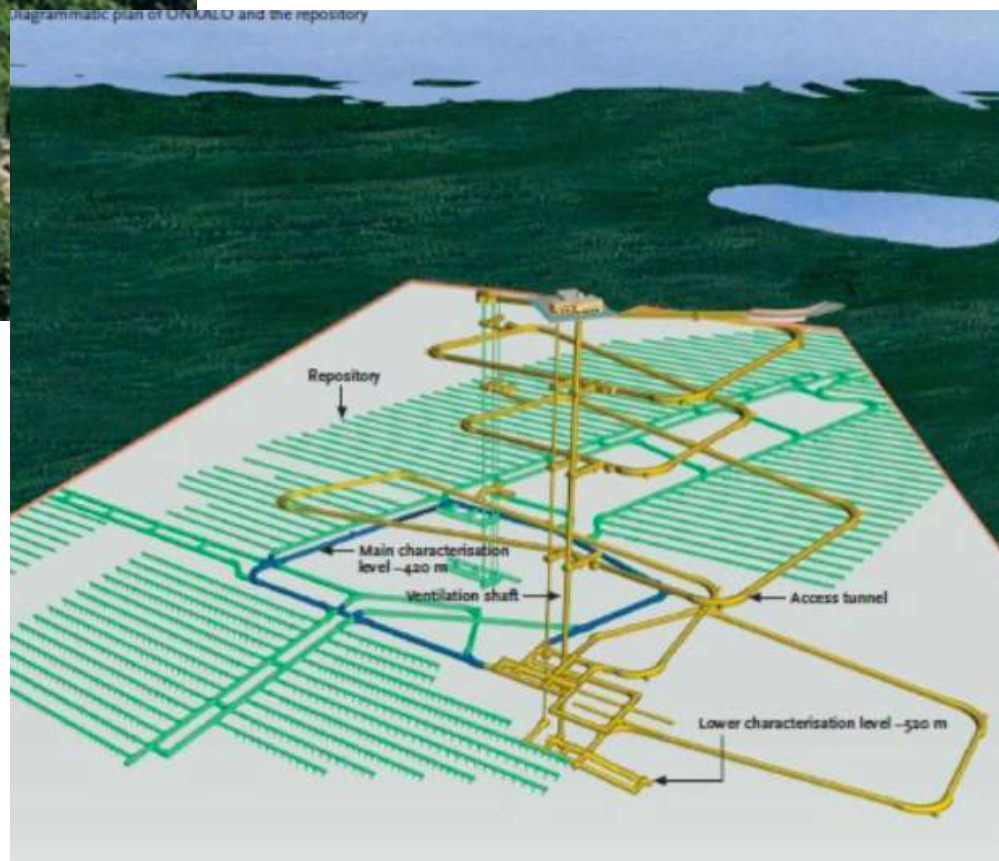


第6図 乾式リサイクル技術による燃料サイクル概念



## フィンランド モデル オルキルト原発と 使用済み燃料長期地下貯 蔵設備(オンカロ)

オルキルト原発を所有する  
Teollisuuden Voima Oyj (フィン  
ランド産業電力) 本社は原  
発施設内に立地する。





# 廃炉と高レベル廃棄物処理は同じ場所で。

経済  
観測

田中 伸男

前国際エネルギー機関事務局長



米マンスフィールド財団が主催する日米原子力ワーキンググループのメンバーと一緒に、東京電力福島第1原発を訪問した。20<sup>キ</sup>離れた「Jヴィレッジ」で毎時0・2<sup>ギ</sup><sup>ギ</sup>側で900<sup>ギ</sup>を超えた。現場には津波でへこんだタンク、流された車両、倒れた送電塔が今でも見られる。多くの職員が汚染水の処理や漏えい防止、地下水遮蔽（しゃへい）など水にからむ難題と向き合っているが、最後に残るトリチウムを含む水の海への放出については方針が未定のまま、タンクを建てる場所がなくなりつつある。

4号機の使用済み核燃料を運び出す巨大な建屋ができ、別の保管場所に移す準備が進む。放射能と闘いながら作業をしておられる方々の苦労には頭が下がる。安倍

## 福島のエンドゲーム

2013. 10. 10

晋三首相は政府の関与を世界に公約したが、この発電所全体を最後にどういう状態にするのかは明確ではない。メンバーの米国の専門家からは「まさか、更地にして公園にしようということではないでしょうね」と言われた。そのためコストと時間は計り知れない。米国の廃炉は、燃料を取り出した後、原子炉をコンクリートで固めて管理するという。地元の理解を得るための説明も徹底して行う。

周辺の高汚染の帰還困難区域全てを年間1<sup>ギ</sup>のレベルに下げるコストは何兆円にもなるだろう。被災者が希望するなら早く土地を買い上げて生活再生を手助けする一方で、長い期間かけて放射能を下げて行くのが合理的解決策ではないか。現場を見たグループのメンバーから「外国の専門家を長期にわたって招き、助言を求めべきだ」と言われた。政府が最前線に立ち日本人皆が総力を挙げて取り組まない限り、この未曾有の危機は乗り越えられないと知った。

(毎日新聞経済観測2013-10-10)



# リッコーバー提督の伝説

©Pandora's Promise, LLC  
映像提供：フィルムヴォイス



# 軽水炉の成功が高速炉をクラウドディングアウトした。福島事故を経験した日本は軽水炉体系を補完する新しいパラダイム作りをリードすべきである。



前国際エネルギー機関事務局長

田中 伸男



ロバート・ストーン監督のドキュメンタリー映画「パンドラの約束」に興味深い場面が出てくる。海軍士官が初の原子力潜水艦ノーチラス号の模型を前に原子力の素晴らしさを説明しているところだ。若い頃のハイマン・リッコーバー提督である。米海軍の原潜乗りで彼の名前を知らないものはいない。

加圧水型軽水炉（PWR）は、酸素を必要としない動力源として潜水艦用に開発された。蒸気発生器も乗組員を被ばくから守るための技術だ。提督は乗組員に原子炉知識の共有と安全管理を徹底した。小さくてもミスを犯したものは原潜から放逐されたという。1人の間違いが全乗組員の死に直結するからだ。これが海軍でリッコーバー提督の伝説となり、今もその安全ルールが徹底されている

## リッコーバー提督の伝説

20 2014.2.20

ると聞く。退役した乗組員が米原子力規制委員会の委員やスタッフになり、原子力発電所にも派遣されて原子炉の安全を守っている。水を冷却材とする軽水炉は、原潜に載せるのに都合の良い技術だ。万が一の事態が起こっても海中に投棄すれば原子炉は停止するからだ。それを陸に上げれば冷却水が途絶えるリスクがあることは福島で明らかになった。軍事技術の転用として商業用軽水炉の普及が急速に進んだのはリッコーバー提督の功績である。しかし軽水炉と同時に開発されていた高速炉は、原子力利用の本命と言われながら過渡的な技術のほずの軽水炉との実用化競争に敗れいまだに研究段階にある。問題は軽水炉実用化を急ぎすぎ、炉の安全性や使用済み核燃料処理などバックエンド技術が未完のまま走り始めたことだ。福島事故後の日本こそ、安全で核不拡散型かつ廃棄物処理の楽な「統合型高速炉」を平和利用の伝説にする責任があるのではないか。

（毎日新聞 経済観測2014-2-20）

# うつくしま、福島

昨日はとても勉強になりましたし、何よりも明るい気持ちになりました。福島は日本の科学技術のために使っていただいた場所なのですから。思いがけない傷を負ってしまった福島ですが、これからも技術者たちの挑戦を見届け、世界の技術発展と人類の未来のために使っていただく地になること、それこそが福島の前向きな選択であると感じました。

5年間悲観的な感情論を山ほど聞いて、どちらに向けて顔を上げていったらいいのか、福島の間はずっと模索してきたのだと思います。

昨夜、田中様のお話を聞いて、私は原発が街に初めてやってきた子供の頃のことを思い出しました。田中様のお話は、私にその時と同じ気持ちを思い出させるものでした。そのようなお話を聞いたのはの初めてです。ありがとうございます。

事故の前まで、福島県のキャッチコピーは、美しい島という意味で、「うつくしま、福島」だったのです。事故後に、そのポスターも言葉も消えました。私は科学技術に尽くすという意味で、「つくすしま、福島」でいいのではないかと、これは決して後ろ向きの決意ではなく、福島の誇りだと思っています。是非とも実現に向けて頑張っていたきたいし、ご協力できることがあればやらせていただければ嬉しく思います。私は身体障害者ですが、自由な時間はたくさんありますので、社会のお役に立てることがあるなら、身体が動く限り何でもやってみたいと思っています。

# 永井隆

長崎医科大学教授、「長崎の鐘」の著者

1945年(昭和20年)8月9日、長崎市に原子爆弾が投下され、爆心地から700メートルの距離にある長崎医大の診察室にて被爆。右側頭動脈切断という重傷を負うも、布を頭に巻くのみで救護活動にあたった。救護活動の合間に「原子爆弾救護報告書」(第11医療隊)を執筆し、長崎医大に提出した。その結語で彼はこう述べている。

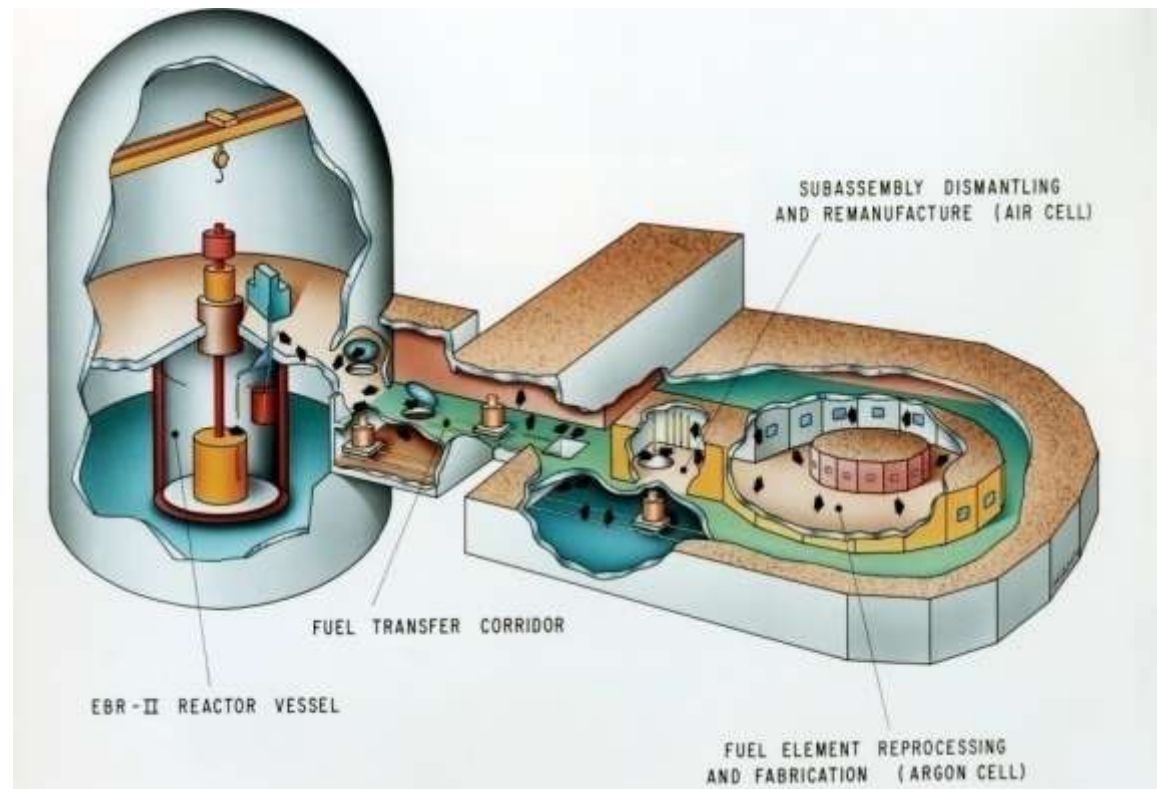


「すべては終わった。祖国は敗れた。吾大学は消滅し吾教室は烏有に帰した。余等亦夫々傷き倒れた。住むべき家は焼け、着る物も失われ、家族は死傷した。今更何を云わんやである。唯願う処はかかる悲劇を再び人類が演じたくない。原子爆弾の原理を利用し、これを動力源として、文化に貢献出来る如く更に一層の研究を進めたい。転禍為福。世界の文明形態は原子エネルギーの利用により一変するにきまっている。そうして新しい幸福な世界が作られるならば、多数犠牲者の霊も亦慰められるであろう。」



# 東京電力(株)福島第一原子力発電所事故で発生した 燃料デブリの処理に関する一方策

- ✓ 燃料デブリ中に存在するウラン等重金属 : 約250トン  
内超ウラン元素: 約1.9トン
- ✓ デブリを処理し、超ウラン元素量を低減するために、統合型高速炉(IFR)概念を適用
- ✓ 構想
  - 固有安全性の高い小型高速炉での超ウラン元素燃焼  
(炉の出力19万kWt)
  - 燃料は金属燃料
  - デブリ処理に乾式法を適用



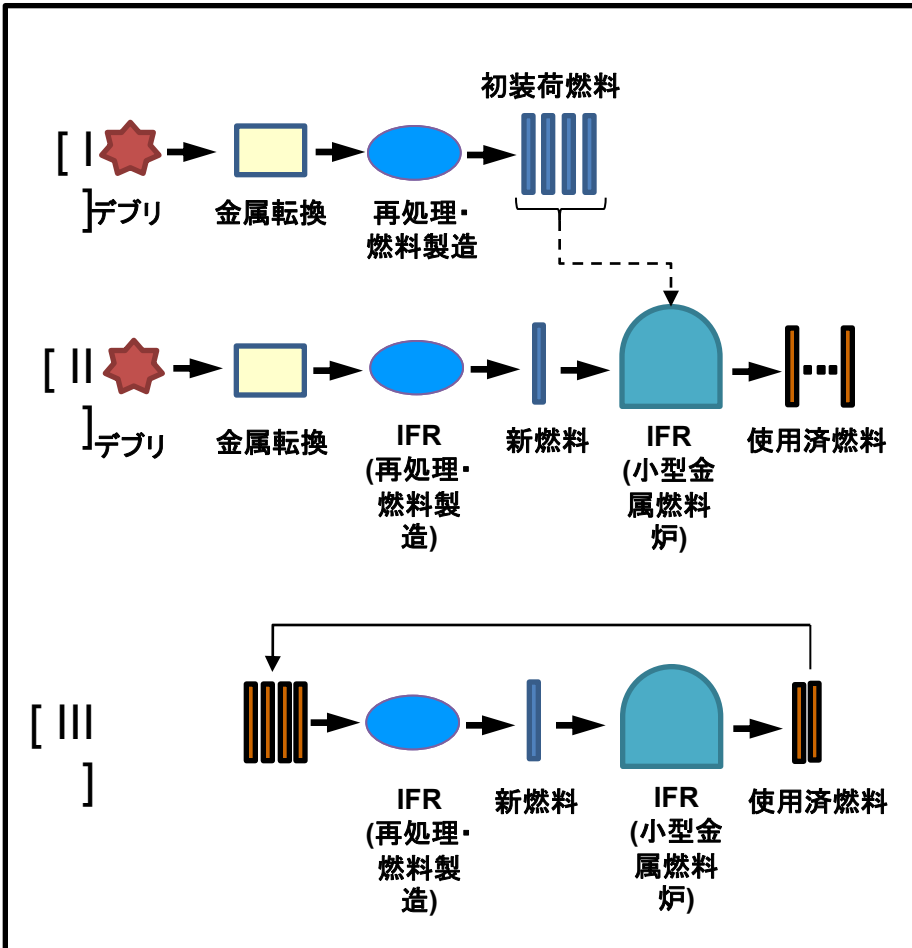
高速炉と燃料サイクルの一体施設からなるIFR概念  
(EBR-IIと燃料サイクル施設(FCF)の例)

(出典: Y. I. Chang, "Integral fast reactor – a next-generation reactor concept," in Panel on future of nuclear Great Lakes symposium on smart grid and the new energy economy, Sept. 24-26, 2012.)

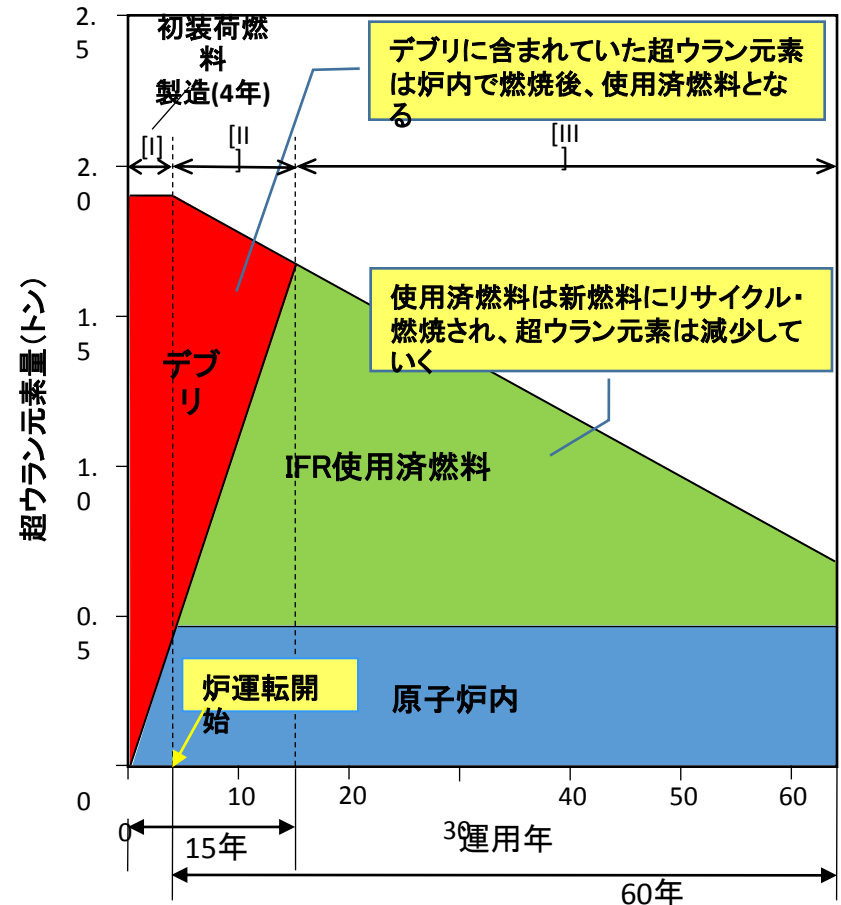


# デブリの処理スキームと超ウラン元素の減少

IFRの運用から60年後には、当初1.9トン存在したデブリ中の超ウラン元素は、使用済燃料中と炉内残留分を合わせて0.69トンまで減少可能



デブリ処理スキーム概念図



IFR運用と超ウラン元素の減少