

# 最新世界情勢とエネルギー安全保障

## 将来の原子力の役割を考える

2014年3月10日 資源エネルギーサロン

国際エネルギー機関 前事務局長

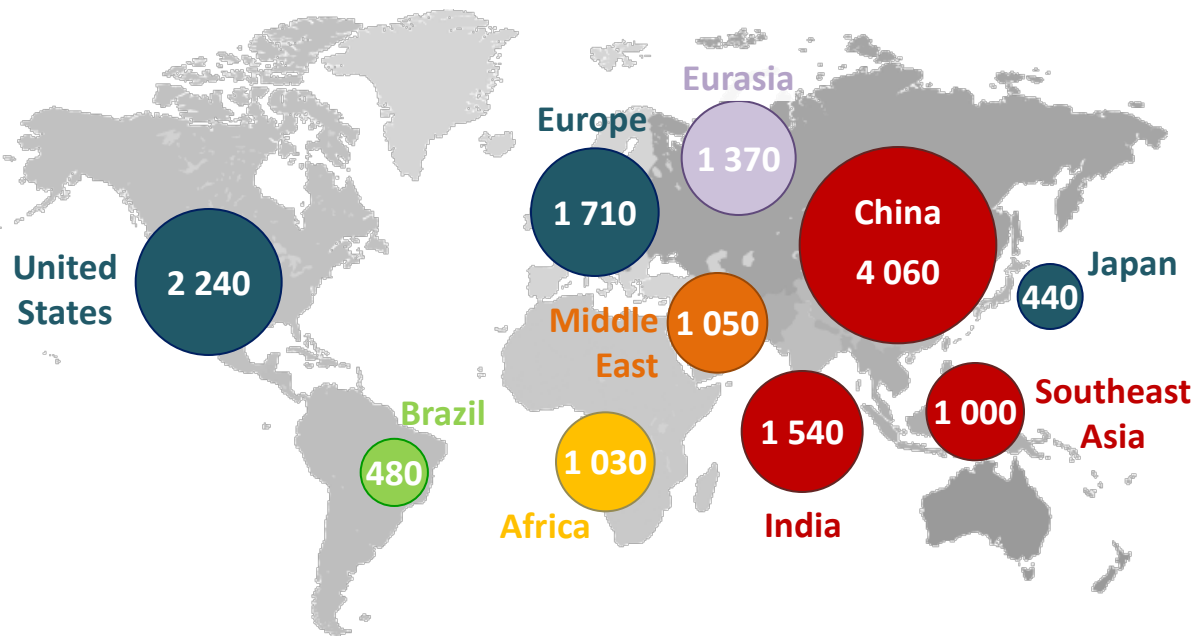
東京大学 教授

日本エネルギー経済研究所 特別顧問 田中伸男

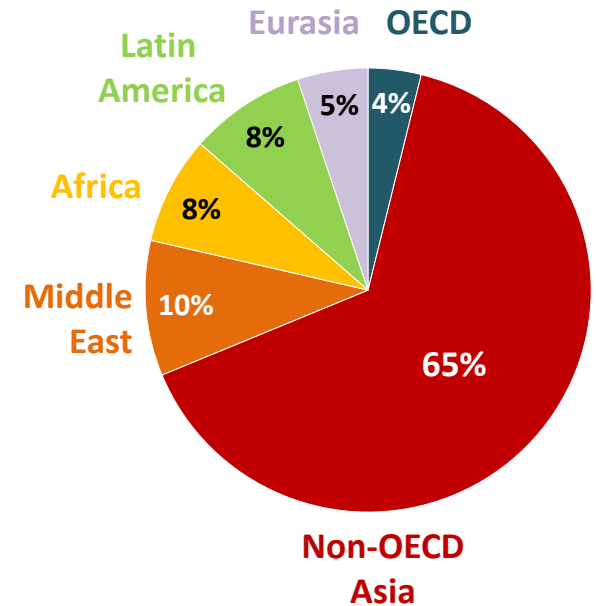
# エネルギー需要増加はアジアへ移る

WEO 2013

Primary energy demand, 2035 (Mtoe)



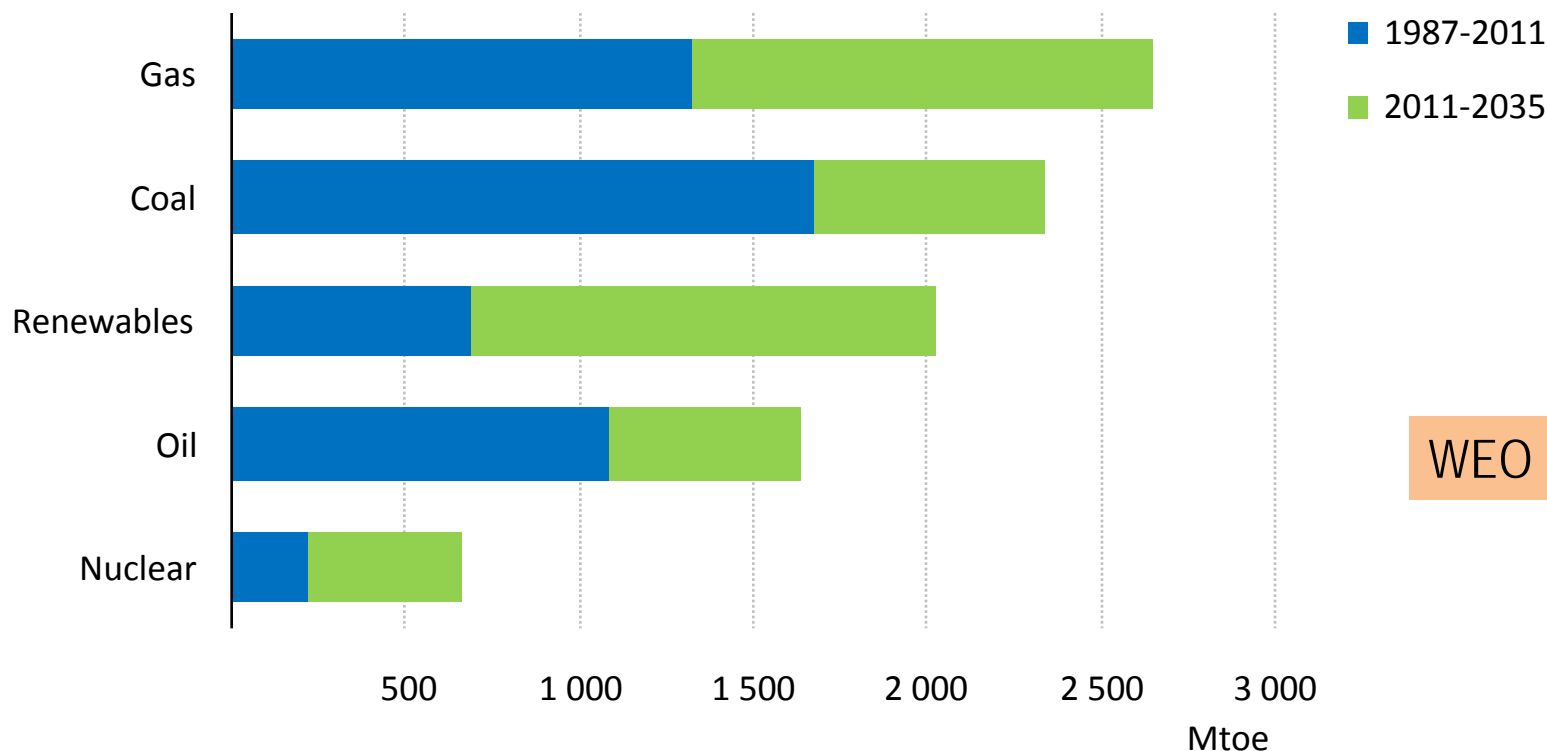
Share of global growth 2012-2035



***China is the main driver of increasing energy demand in the current decade, but India takes over in the 2020s as the principal source of growth***

# 相変わらず化石燃料依存は続く

Growth in total primary energy demand



WEO 2013

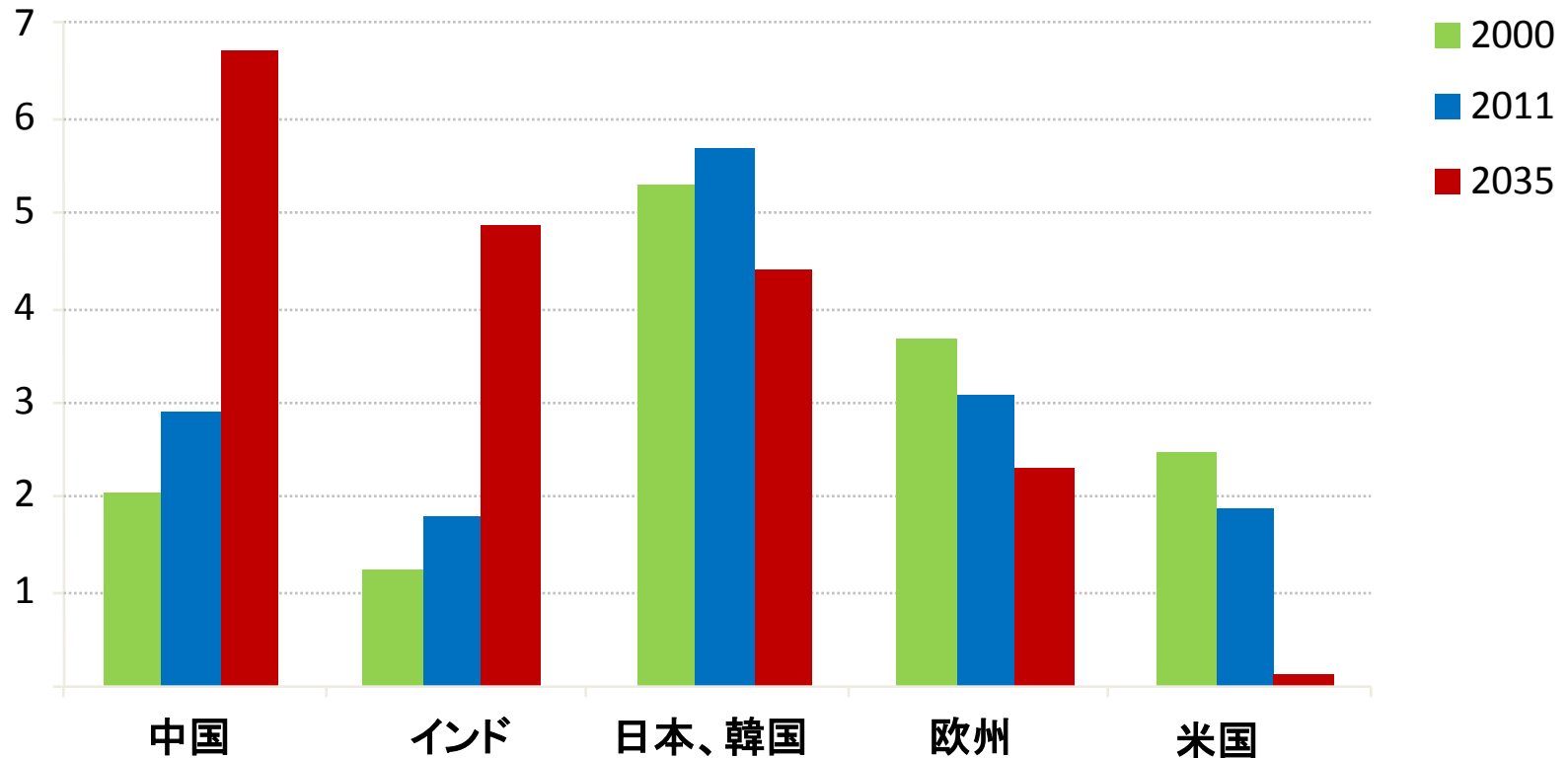
**化石燃料依存度は過去25年間約82%。再生可能エネルギーと原子力が大幅に伸びても化石燃料依存度は2035年に75%にしか下がらない。**

# 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

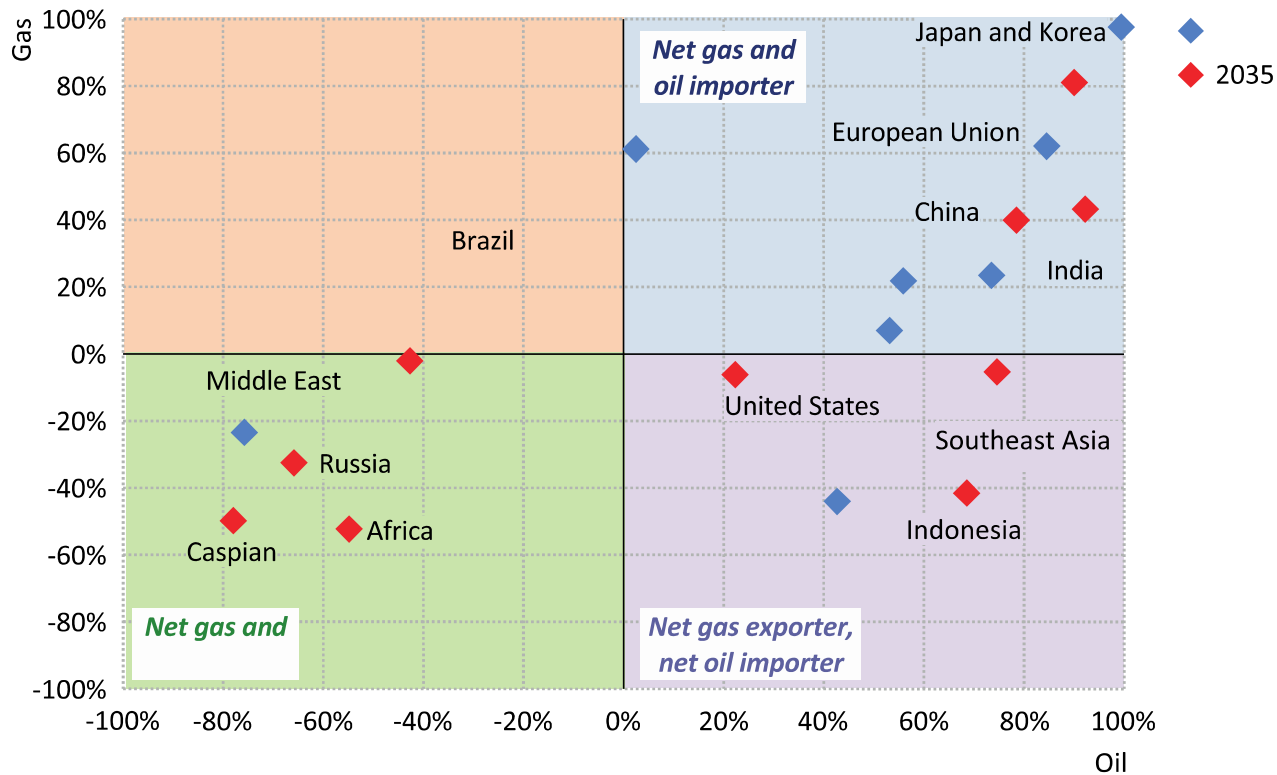


**2035年までに、中東産石油の90%近くがアジアへ輸出される。  
北米の純輸出地域としての台頭がこの東方シフトを加速**



# シェール革命の結果、米国とブラジルの一人勝ち？

**Figure 2.12** ▶ Net oil and gas import/export shares in selected regions in the New Policies Scenario



WEO2013

# イラン制裁とホルムズ海峡

り

イラン、イラク、バーレーン、サウジ、クウェート、  
カタール、UAEからの輸入分を「ホルムズ通過」  
と仮定

# 複合危機－原油高騰と国債崩落－ は千年に一度より頻繁に起こる？

- **イラン危機の勃発（ホルムズ海峡封鎖）**
  - － 原油価格の高騰、2倍（1バレル160ドル）になる可能性あり
  - － 日本の経常収支が赤字化
    - 2011年の経常収支黒字 9兆円
    - 2011年の原油輸入額 1850億ドル（約15兆円）
    - 原油価格が倍になれば、**経常収支は6兆円の赤字に（？）**
    - 原発の稼働がほとんどなければ、さらに悪化し**赤字は12兆円**。
- **日本財政への信認崩壊**
  - － 経常収支黒字が投資家（海外、国内）の信認の基礎
  - － 経常赤字（または赤字化の予想）は資本逃避を引き起こす
  - － 電力危機が、製造業の海外脱出を加速
    - ⇒ 財政への信認をさらに悪化させる

# 中国の石油・ガス輸入ルート

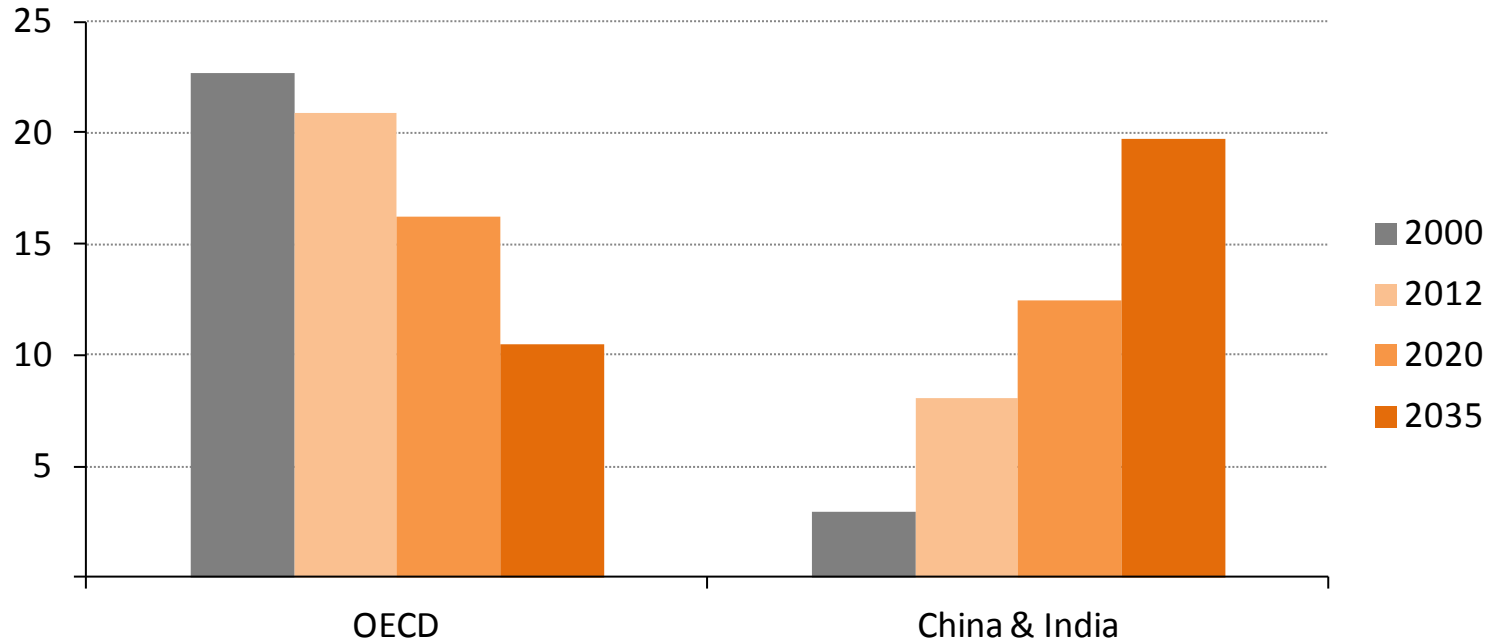


米国防省  
China Report  
2013

Boundary representation is not necessarily authoritative.

# Should China and India join the IEA?

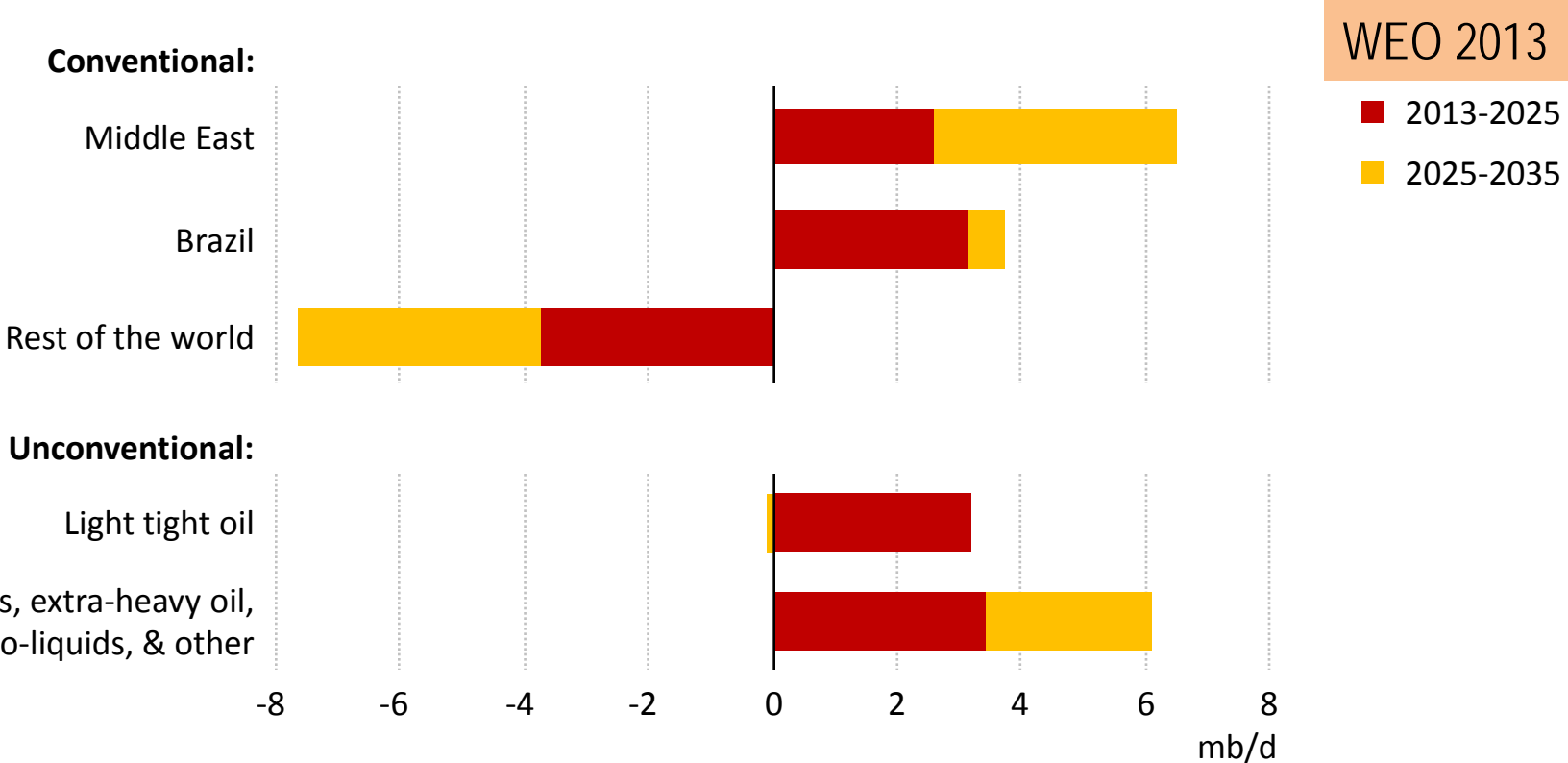
## Net oil imports of selected countries in the New Policies Scenario 2013 (mb/d)



***Asia becomes the unrivalled centre of the global oil trade as the region draws in a rising share of the available crude***

# シェール革命後は中東依存が復活？

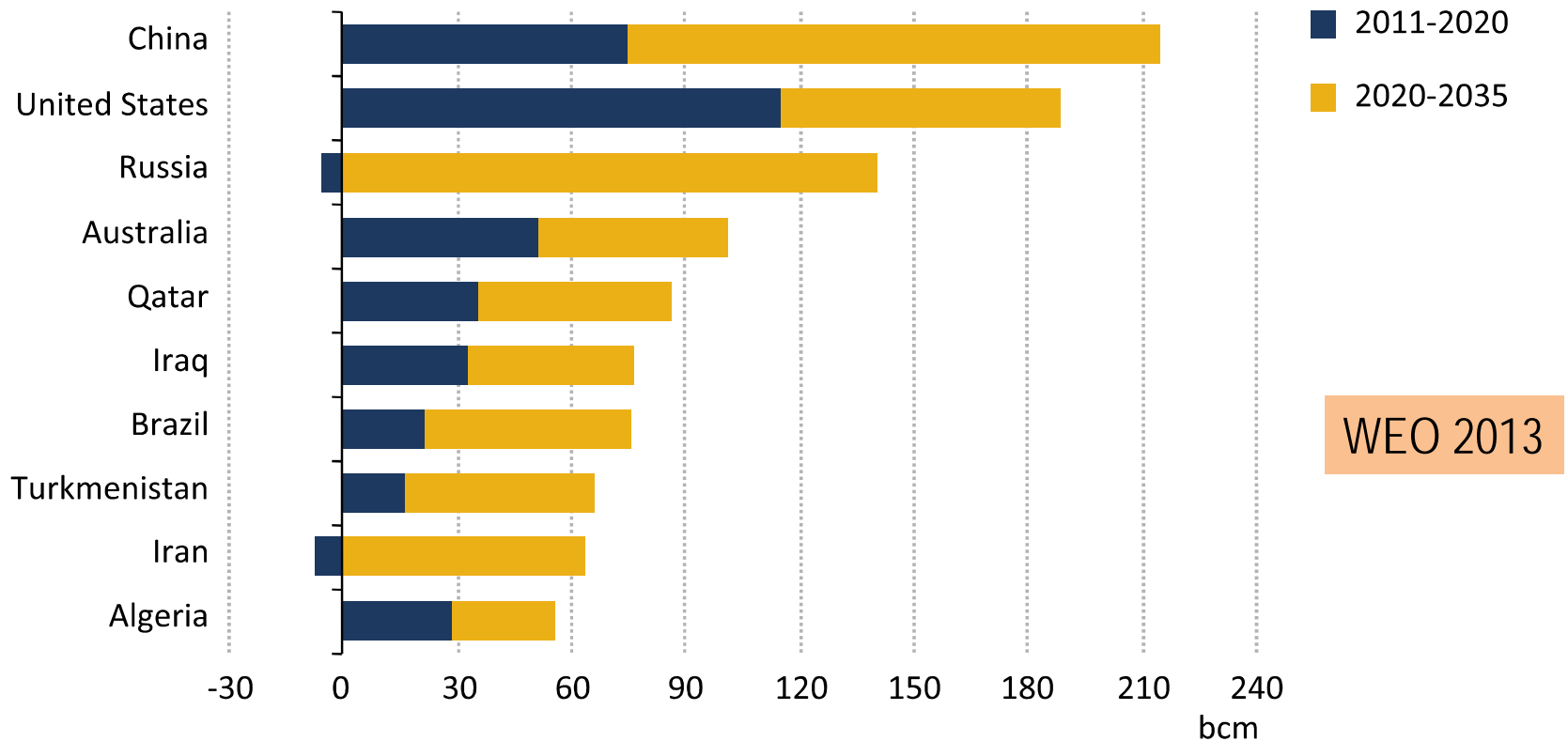
## Contributions to global oil production growth



***The United States (light tight oil) & Brazil (deepwater) step up until the mid-2020s, but the Middle East is critical to the longer-term oil outlook***

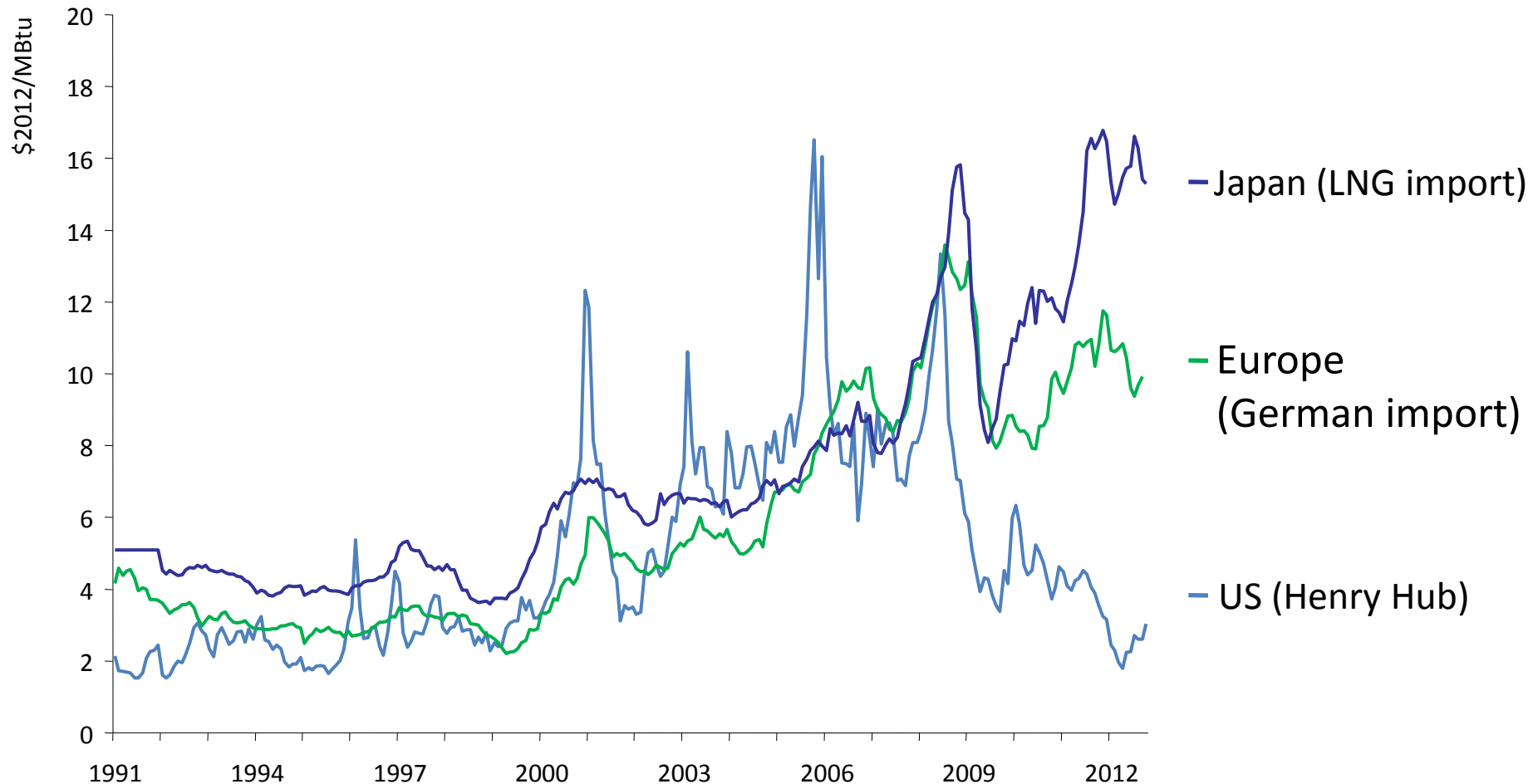
# 天然ガス市場；中国でシェール革命が起こるのか？

**Figure 3.4** ▶ Change in annual natural gas production in selected countries in the New Policies Scenario



# 国際的なガス価格比較

## 日本の輸入価格はどうしたら下がるのか



1. ガスのソース、ルート、モード(パイプライン、水素)の多様化、北米からの輸入
2. ガス消費国連合 (フォーミュラ改訂、仕向地自由化)
3. 原子力発電の活用
4. 国内電力ガス市場改革による競争強化

Developing a Natural Gas Hub in  
Asia

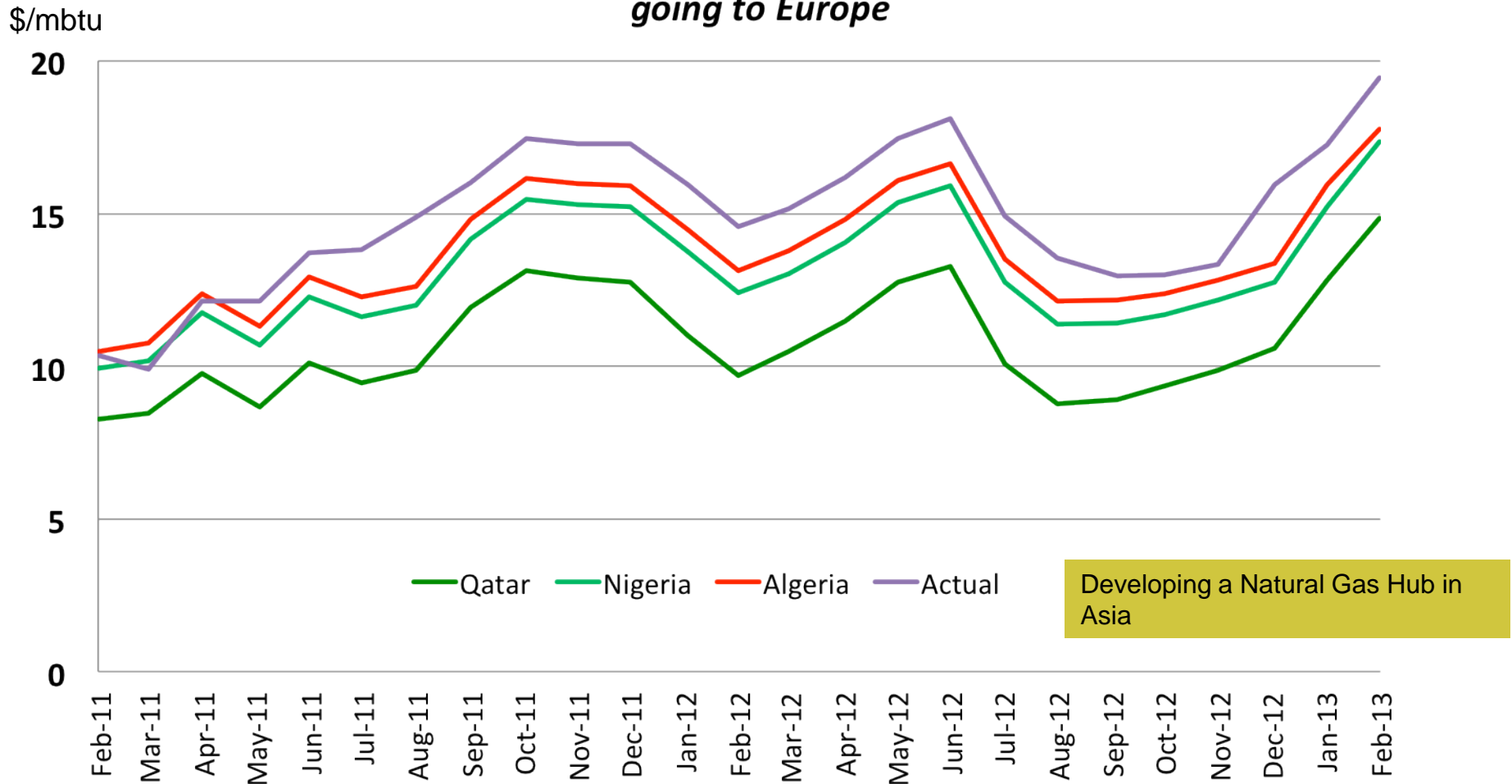


コンデンセートなどの液状部分が多く、また石油価格が高いほどブレークイーブン価格は下がる。

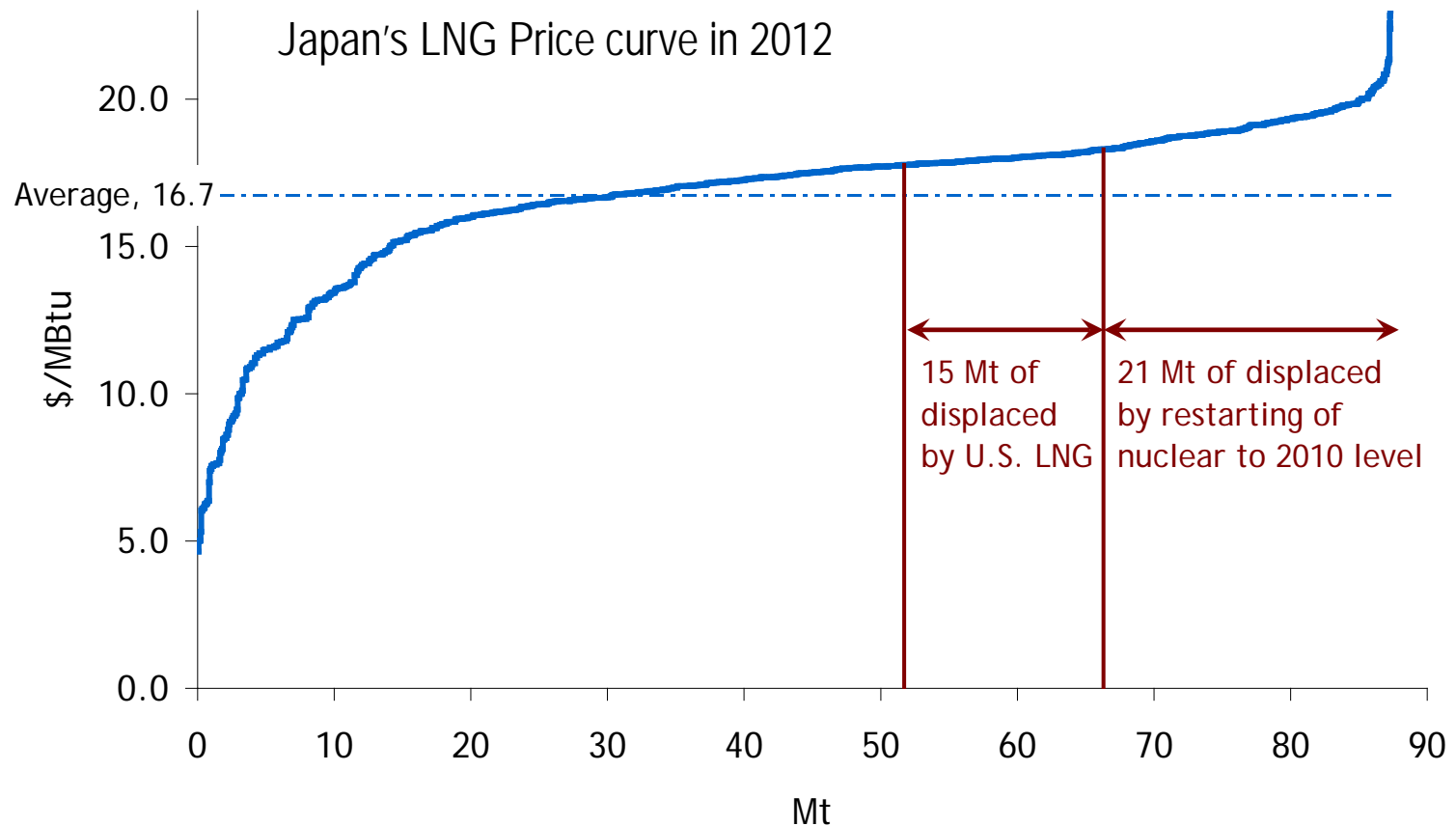
IEA WEO2012

# 仕向け地制限条項など市場不備が日本に年100億ドルの超過負担を課している。

*Japanese price level that would support redirections of different sources going to Europe*



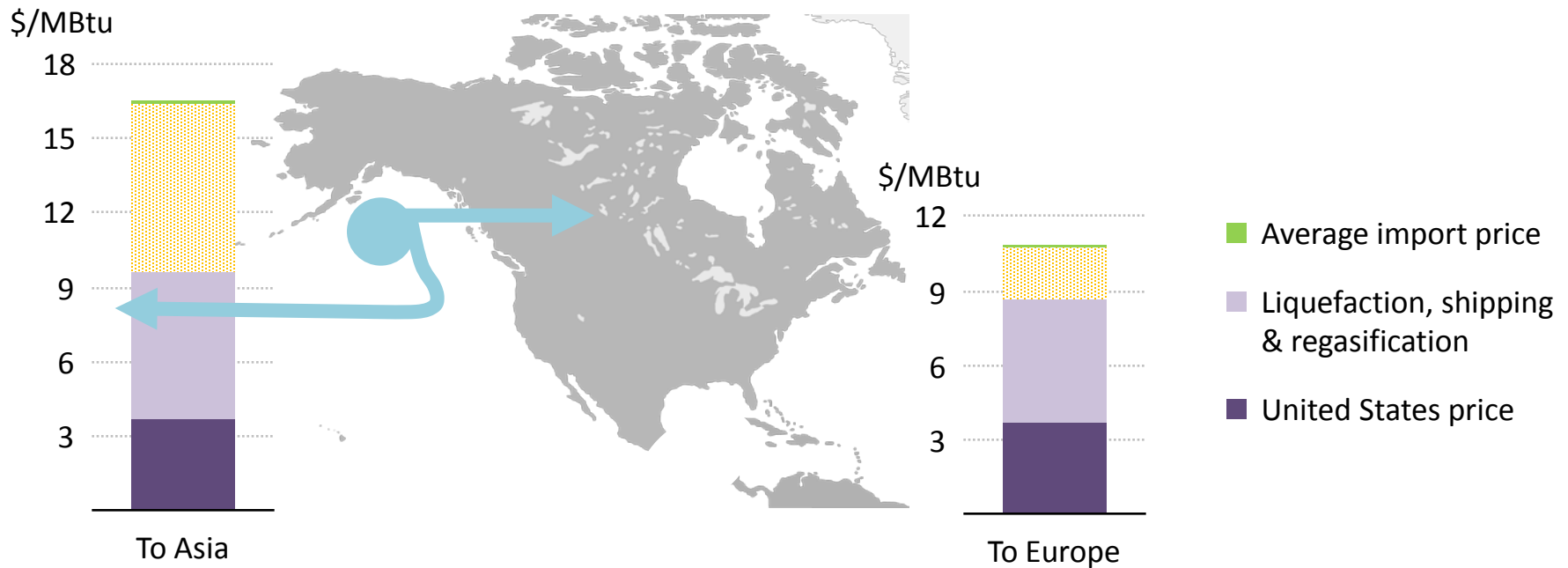
# 原発再稼働と米国産LNGが日本のガス価格に与える影響



# 米国発のLNGが世界のマーケットを変える

WEO 2013

## Indicative economics of LNG export from the US Gulf Coast (at current prices)



***New LNG supplies accelerate movement towards a more interconnected global market, but high costs of transport between regions mean no single global gas price***

# ガスの供給セキュリティ： Russian Gas Pipelines

## Russian Gas Infrastructure

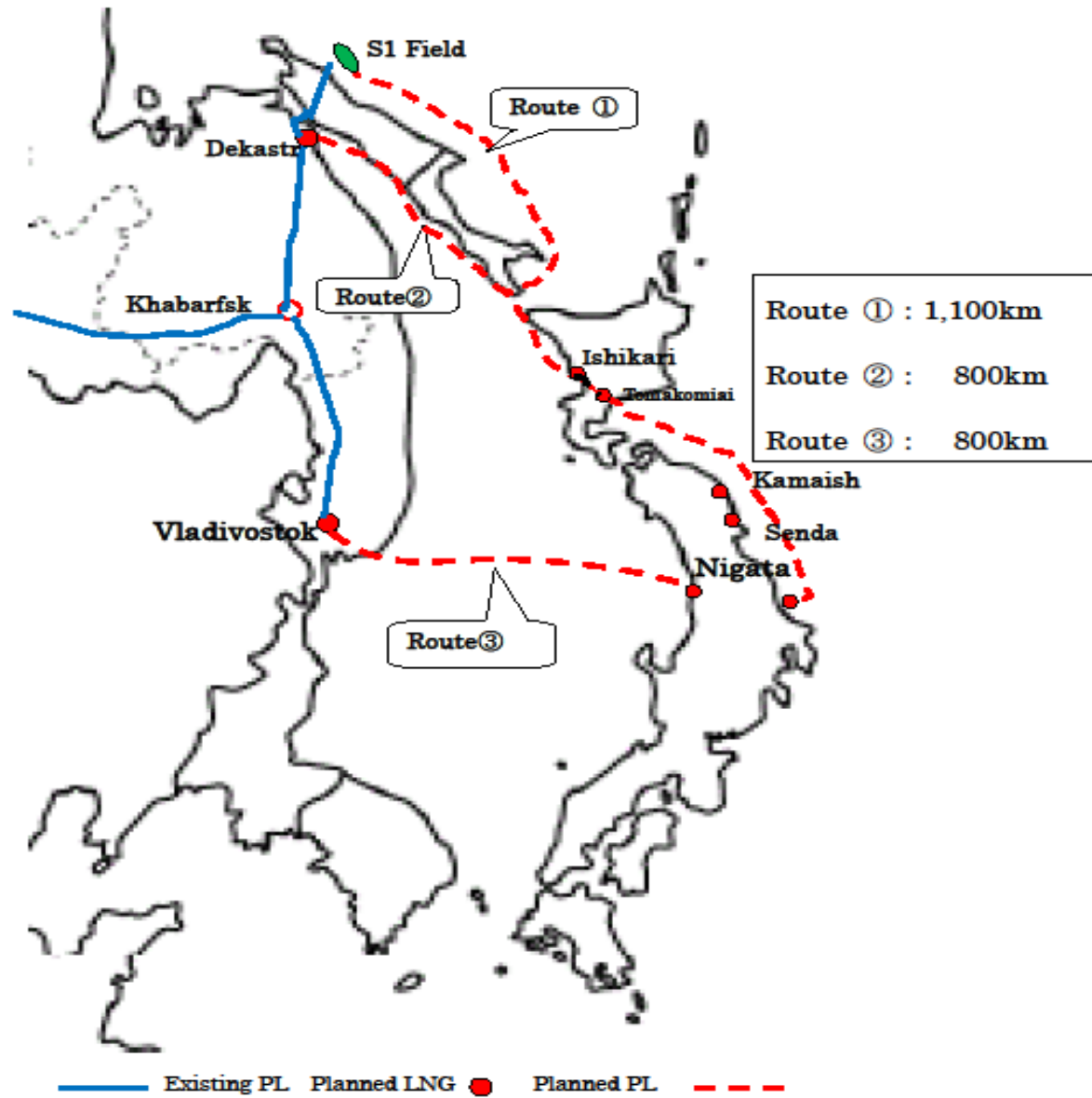


The boundaries and names shown and the designations used on maps included in this publication do not imply official endorsement or acceptance by the IEA.

Source: IEA

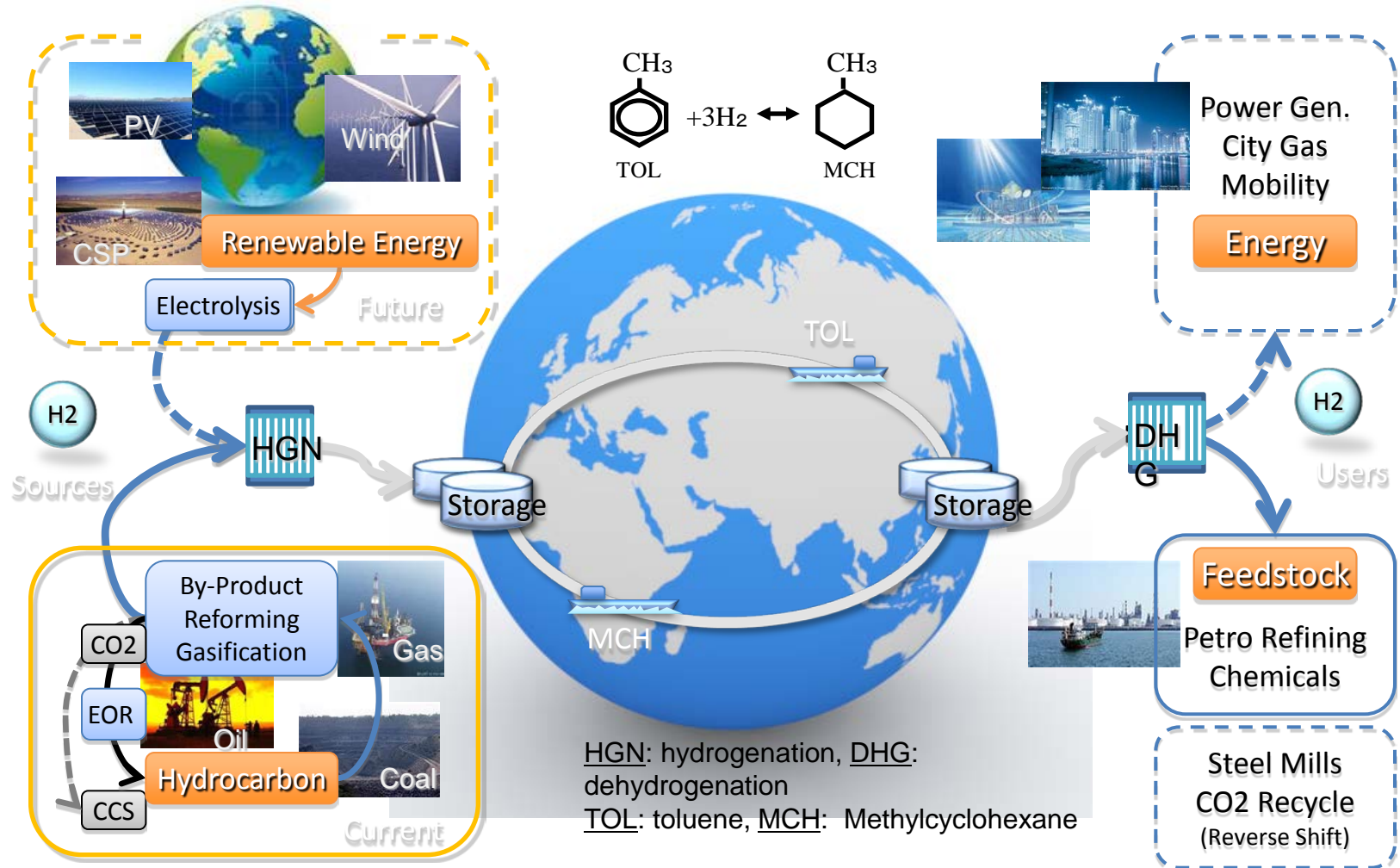
Mid-Term Oil & Gas Market 2010, IEA

# Natural Gas Pipeline from Russia to Japan



# Introduction - Chiyoda's Hydrogen Supply Chain Outlook

- Chiyoda established a complete system which enables economic H<sub>2</sub> storage and transportation.
- MCH, an H<sub>2</sub> carrier, stays in a **liquid state** under ambient conditions anywhere.



- H<sub>2</sub> Supply of a 0.1-0.2mmtpa LNG equivalent scale (M.E. to Japan) could be feasible.



# メタンハイドレートは次の非在来型ガス？

## An Energy Coup for Japan: 'Flammable Ice'



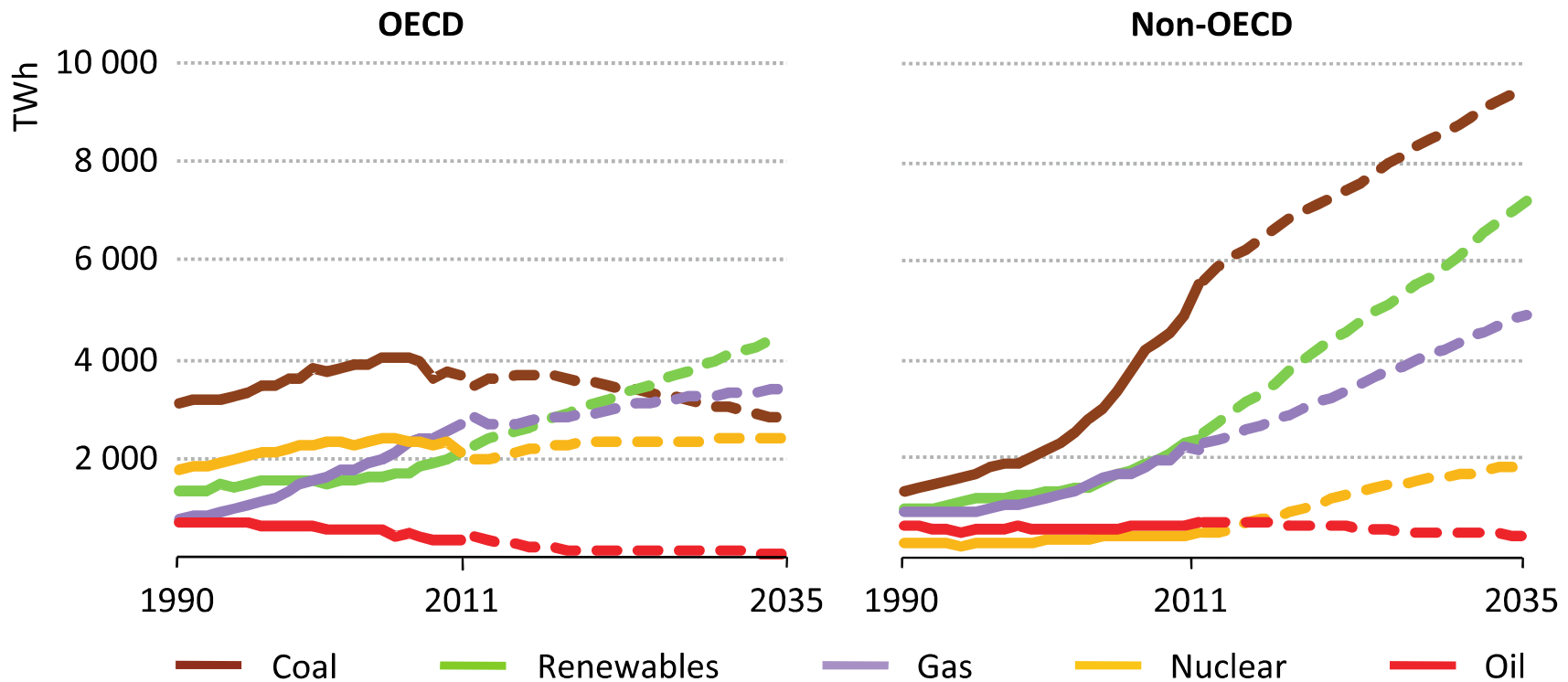
Photo by JOGMEC

Resource estimates vary by several orders of magnitudes, with many falling between 1000 and 5000 tcm, or between 300 and 1500 years of production at current rates. The USGS estimates that gas hydrates worldwide are more than 10 to 100 times as plentiful as US shale gas reserves. The Japanese government aims to achieve commercial production in ten to fifteen years, *i.e.* by the mid- to late-2020s. (IEA WEO2013)



世界の電力需要は70%伸びる。 OECDでは再生可能エネルギーが、途上国では石炭が牽引。

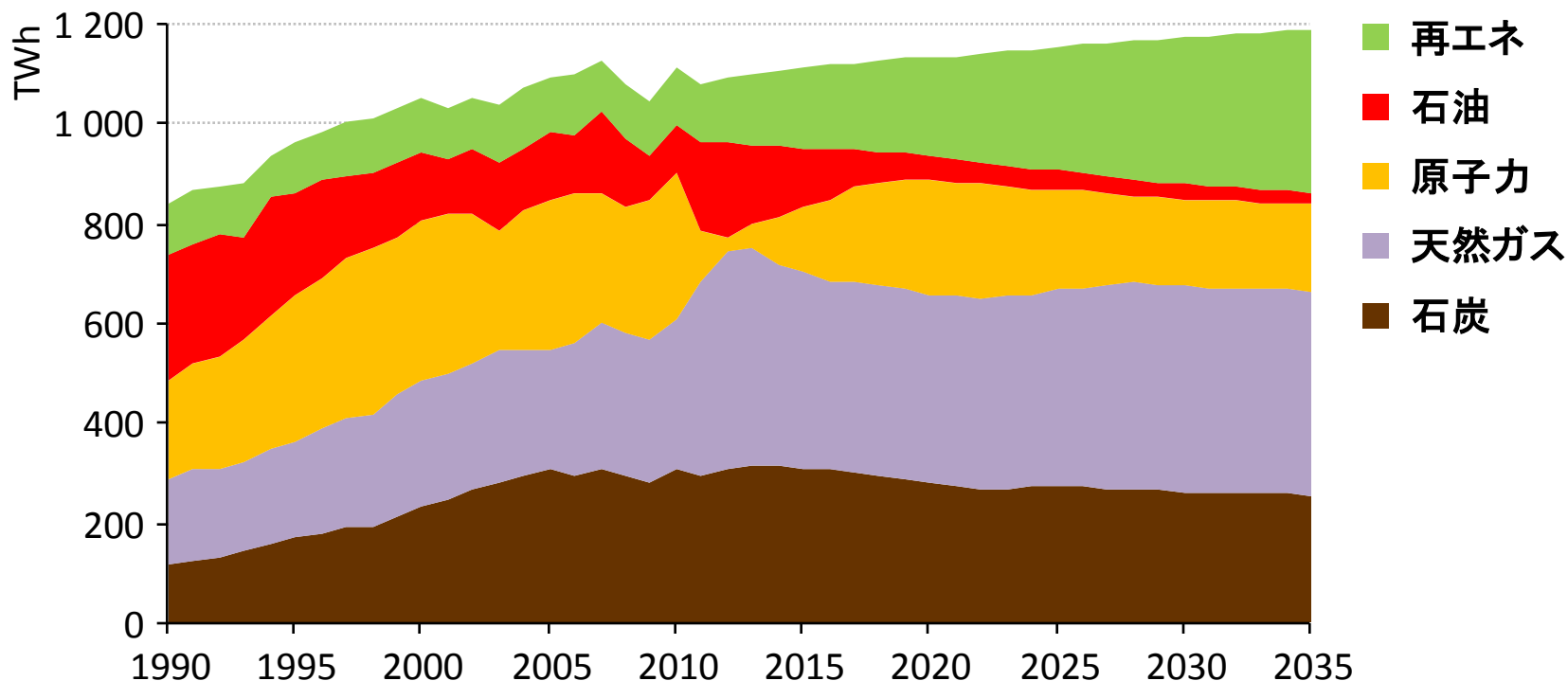
**Figure 5.3** ▷ Electricity generation by source in the New Policies Scenario



# 日本の電源構成: 再生可能エネルギーとエネルギー効率化が主導

## 日本の電源構成

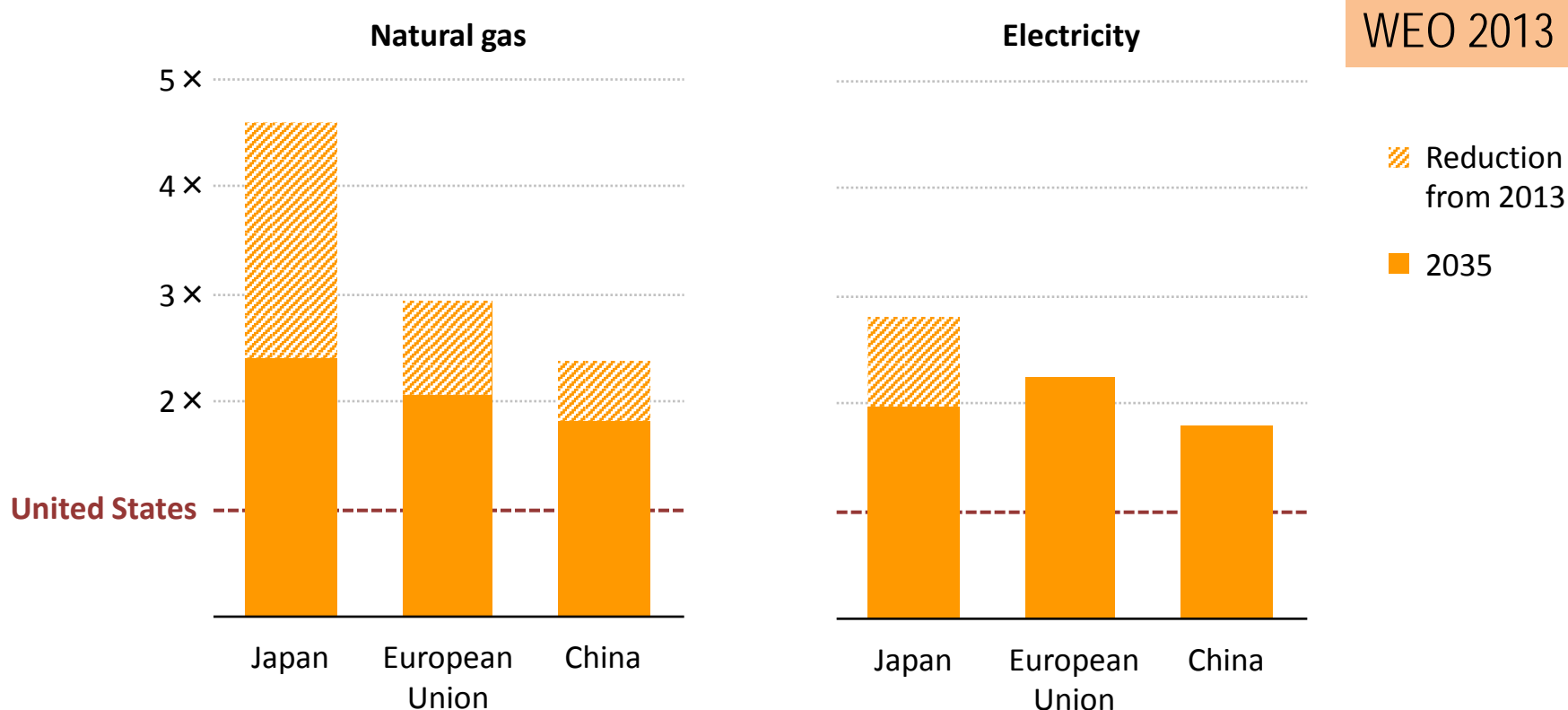
IEA WEO 2012



原子力は2020年までに20%に回復するが、その後2035年に15%まで減少。  
その穴を埋めるのは、再生可能エネルギー（水力含む）の  
3倍増、LNGの引き続き高い輸入依存、そしてエネルギー効率化

# 競争力に差をつけるエネルギーコスト

## Ratio of industrial energy prices relative to the United States

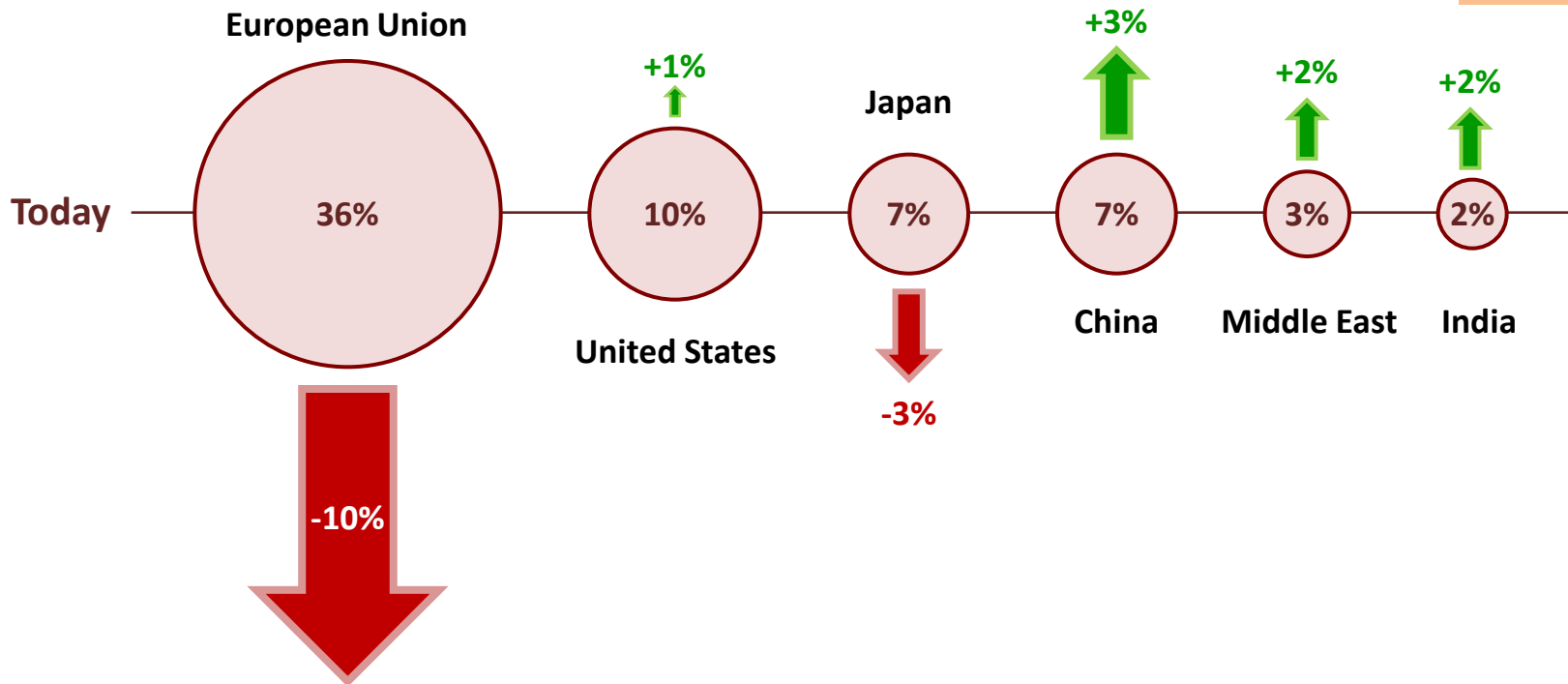


天然ガス価格の大きな価格差は多少修正されるが、  
米国が一人、ガスと電力コストで優位に立ち続ける。

# エネルギーコストと輸出競争力

## エネルギー多消費型製造業製品の輸出マーケットシェア

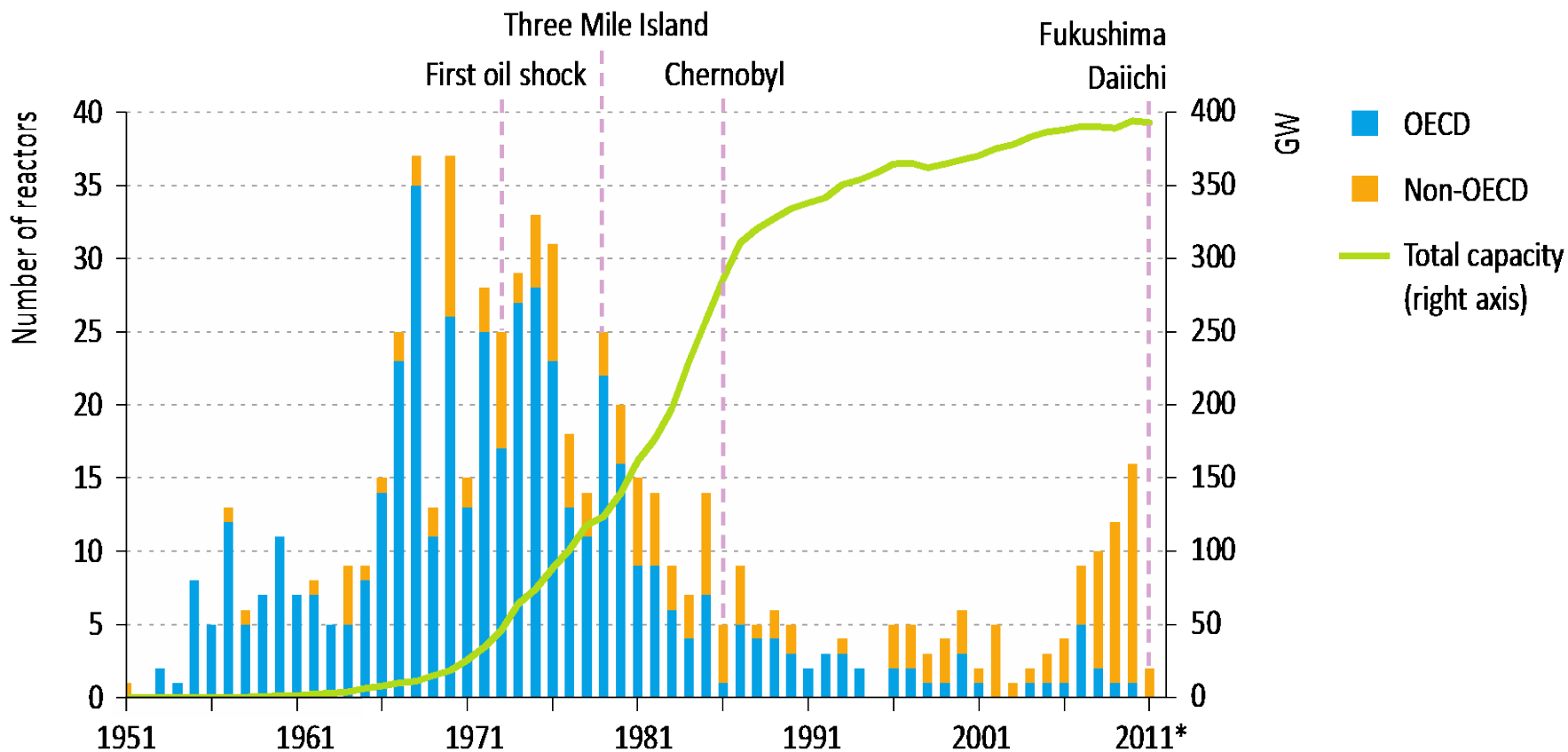
WEO 2013



**米国と新興国が輸出製品市場を拡大。  
日本と欧州はエネルギー多消費型製造業の輸出市場を大幅に失う。**

# 原子炉建設の歴史


Figure 12.1 • Nuclear reactor construction starts, 1951-2011



\*Data as of 31 Aug 2011.


# Generations of Nuclear Energy

**Generation I**  
Early Prototypes



- Shippingport
- Dresden
- Magnox

**Generation II**  
Commercial Power




- PWRs
- BWRs
- CANDU

**Generation III**  
Advanced LWRs



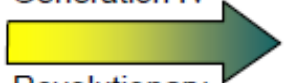
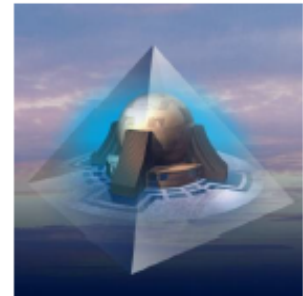
- CANDU 6
- System 80+
- AP600

**Generation III+**  
Evolutionary Designs

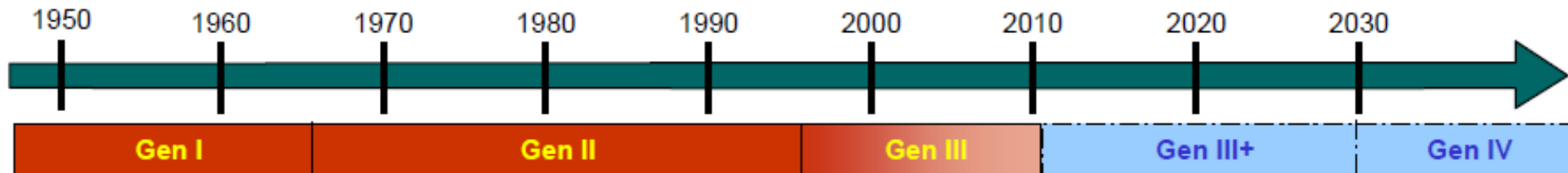


- ABWR
- ACR1000
- AP1000
- APWR
- EPR
- ESBWR

**Generation IV**  
Revolutionary Designs

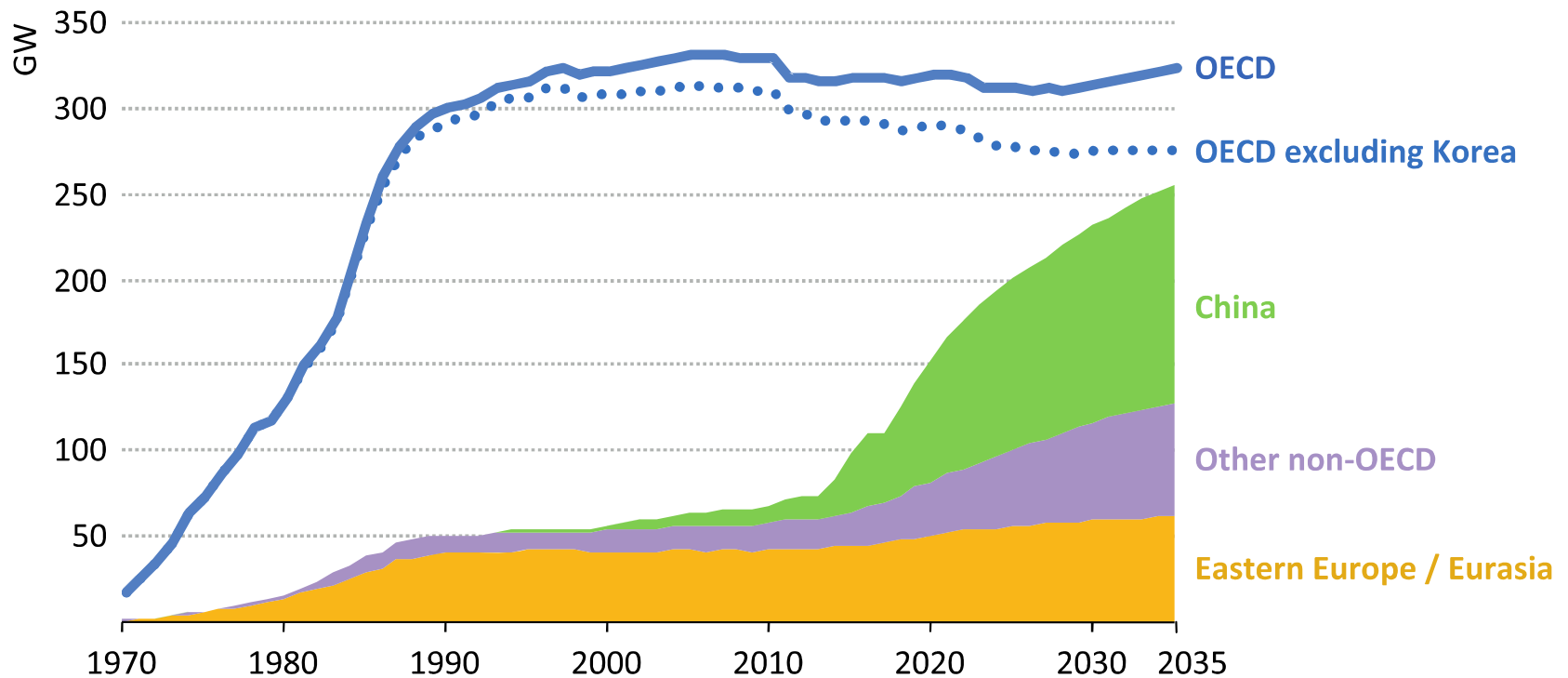



- Safe
- Sustainable
- Economical
- Proliferation Resistant and Physically Secure



# 原子力の未来

**Figure 5.12** ▷ Nuclear power installed capacity by region in the New Policies Scenario



# 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。 想定外のものを想定する。（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（common cause failure）、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、女川、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明らかにすべし。その条件を満たす原子炉を再稼動。
- 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。（安心対策）
  - 安全の科学的判断のためのNRC型独立規制委員会の必要性。（安全対策）
  - 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、国際関係
- それでも災害が起こってしまったからの回復措置
  - 米国で同じことが起こったらどうだったのか？ FEMA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。





"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.

PANDORA'S PROMISE is a Sundance Film Festival production. ©2012 Sundance Channel. All rights reserved. PANDORA'S PROMISE is a trademark of Sundance Channel. PANDORA'S PROMISE is a trademark of Sundance Channel. PANDORA'S PROMISE is a trademark of Sundance Channel. PANDORA'S PROMISE is a trademark of Sundance Channel.



[www.pandoraspromise.com](http://www.pandoraspromise.com)



# パンドラの約束



はこの技術  
への無知からくる発言だ。パ  
ンドラの箱には希望をもたら  
す技術が残っている。

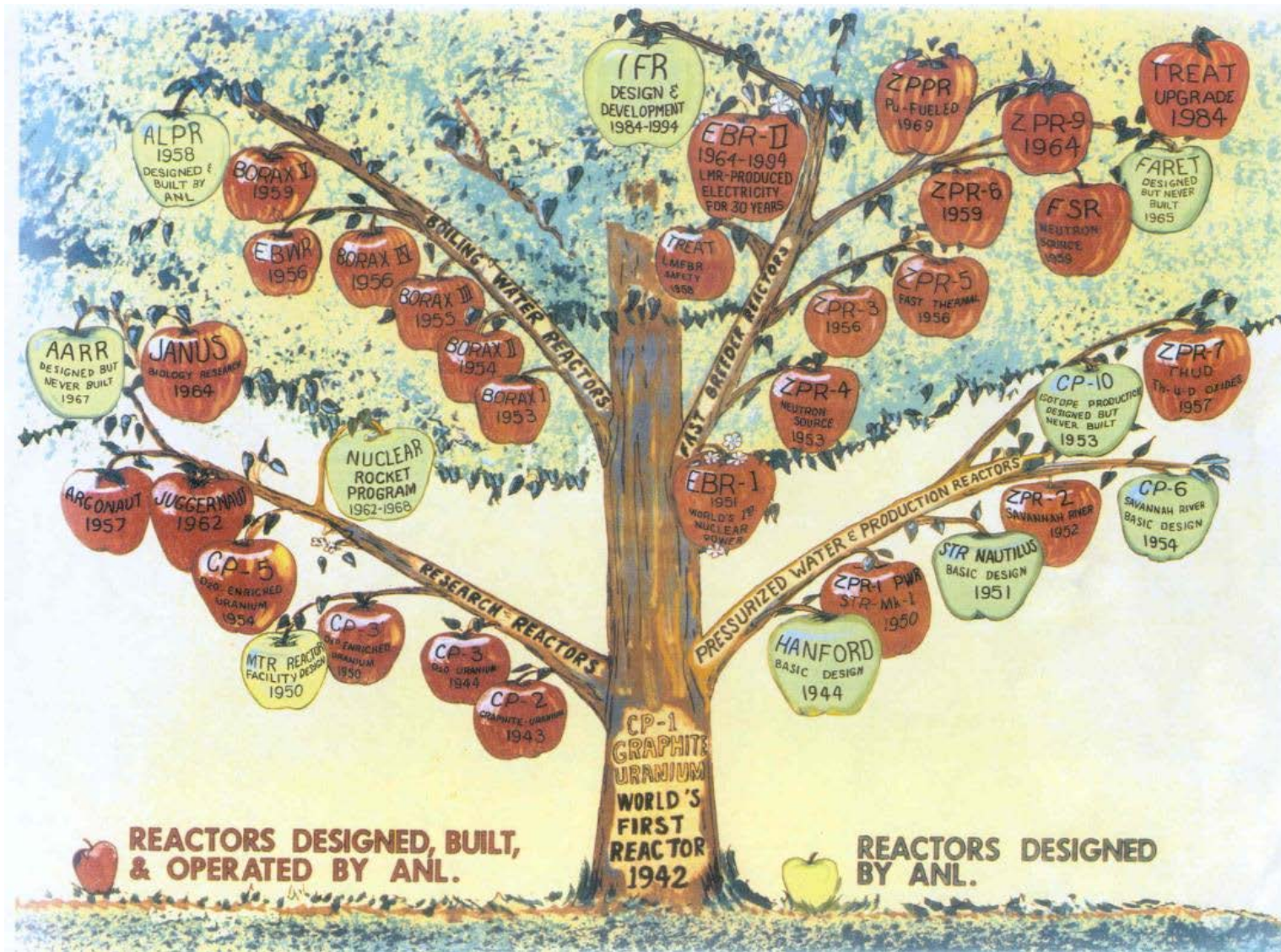


Figure 1-8. Reactors developed by Argonne



田中 伸男

前国際エネルギー機関事務局長



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

2014. 11

## リッコーバー提督の伝説

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す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。

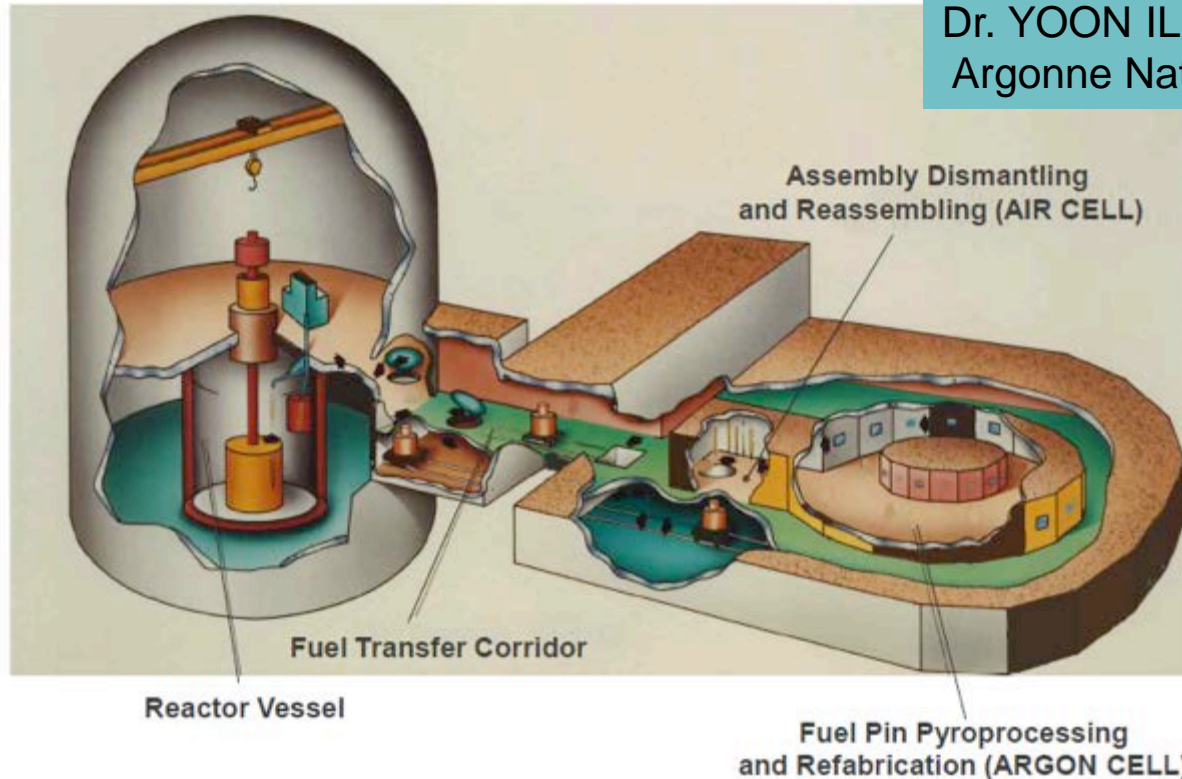
©Pandora's Promise, LLC  
映像提供：フィルムヴォイス



# 統合型高速炉 (Integral Fast Reactor) と 電解型乾式再処理 (Pyroprocessing)

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

Dr. YOON IL CHANG  
Argonne National Laboratory



IFR has features as Inexhaustible Energy Supply ,Inherent Passive Safety ,Long-term Waste Management Solution , Proliferation-Resistance , Economic Fuel Cycle Closure.



**18.73 tons U**

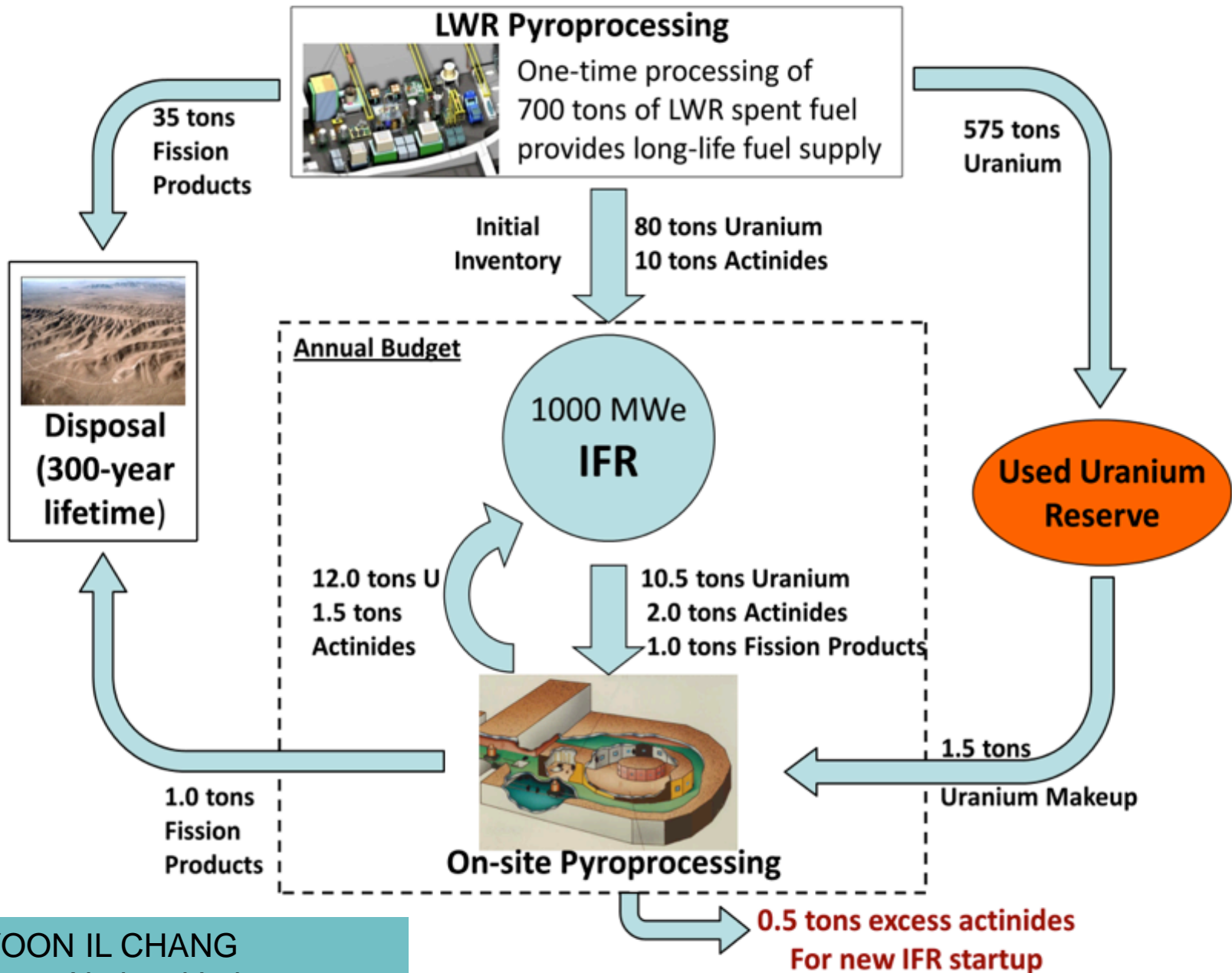
**e**

---

**Dr. YOON IL CHANG**  
Argonne National Laboratory



# 高レベル廃棄物の放射能レベルは300年で天然ウラン並みに減少



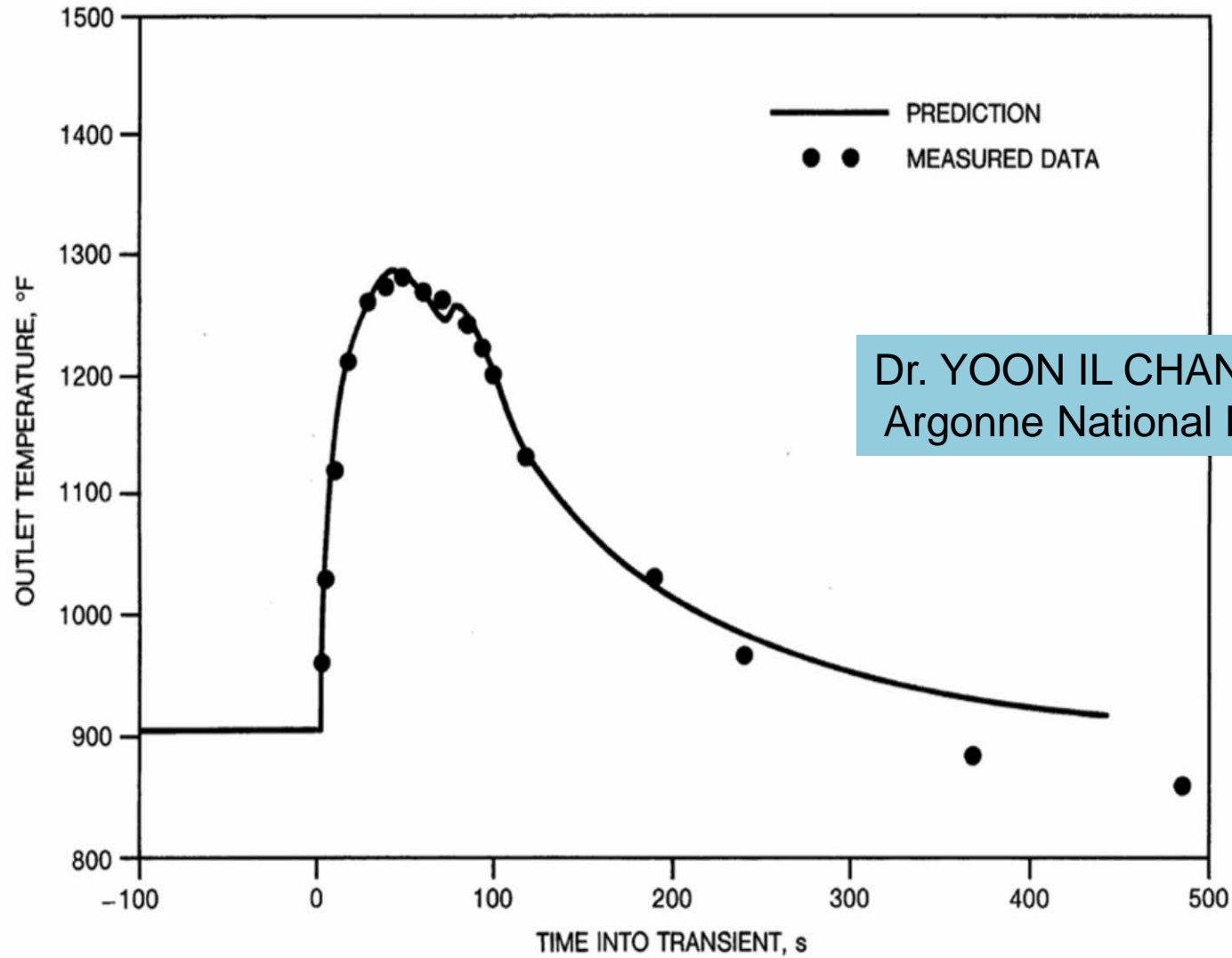
Dr. YOON IL CHANG  
 Argonne National Laboratory



# Technical Rationale for the IFR

- ✓ Revolutionary improvements as a next generation nuclear concept:
  - Inexhaustible Energy Supply
  - Inherent Passive Safety
  - Long-term Waste Management Solution
  - Proliferation-Resistance
  - Economic Fuel Cycle Closure
- ✓ Metal fuel and pyroprocessing are key to achieving these revolutionary improvements.
- ✓ Implications on LWR spent fuel management

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



Dr. YOON IL CHANG  
Argonne National Laboratory

# Joint Program on Pyroprocessing with Japan

- ✓ Central Research Institute of Electric Power industry (CRIEPI): \$20 million cost sharing signed in July 1989.
- ✓ CRIEPI and Japan Atomic Power Company jointly representing Federation of Electric Power Companies (FEPC): Additional \$20 million added in October 1992.
- ✓ Tokyo, Kansai, and Chubu Electric Power Companies: \$6 million for LWR feasibility study signed in July 1992.
- ✓ Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation (PNC): \$60 million cost sharing program agreed to in February 1994, but canceled by DOE.
- ✓ These joint programs ended when the IFR Program was terminated in October 1994.

# Importance of LWR Pyroprocessing Demonstration

- ✓ The public views adequate nuclear waste management as a critical linchpin in further development of nuclear energy.
- ✓ The backend of the nuclear fuel cycle cannot be addressed independent of the next-generation reactor options. A systems approach is required.
- ✓ Basically, three options exist:
  - LWR once-through only and direct disposal of spent fuel
  - PUREX reprocessing and MOX recycle in LWRs in interim
  - LWR once-through, followed by pyroprocessing and full recycle in fast reactors
- ✓ A key missing link for decision making is a pilot-scale demonstration of pyroprocessing for LWR spent fuel.

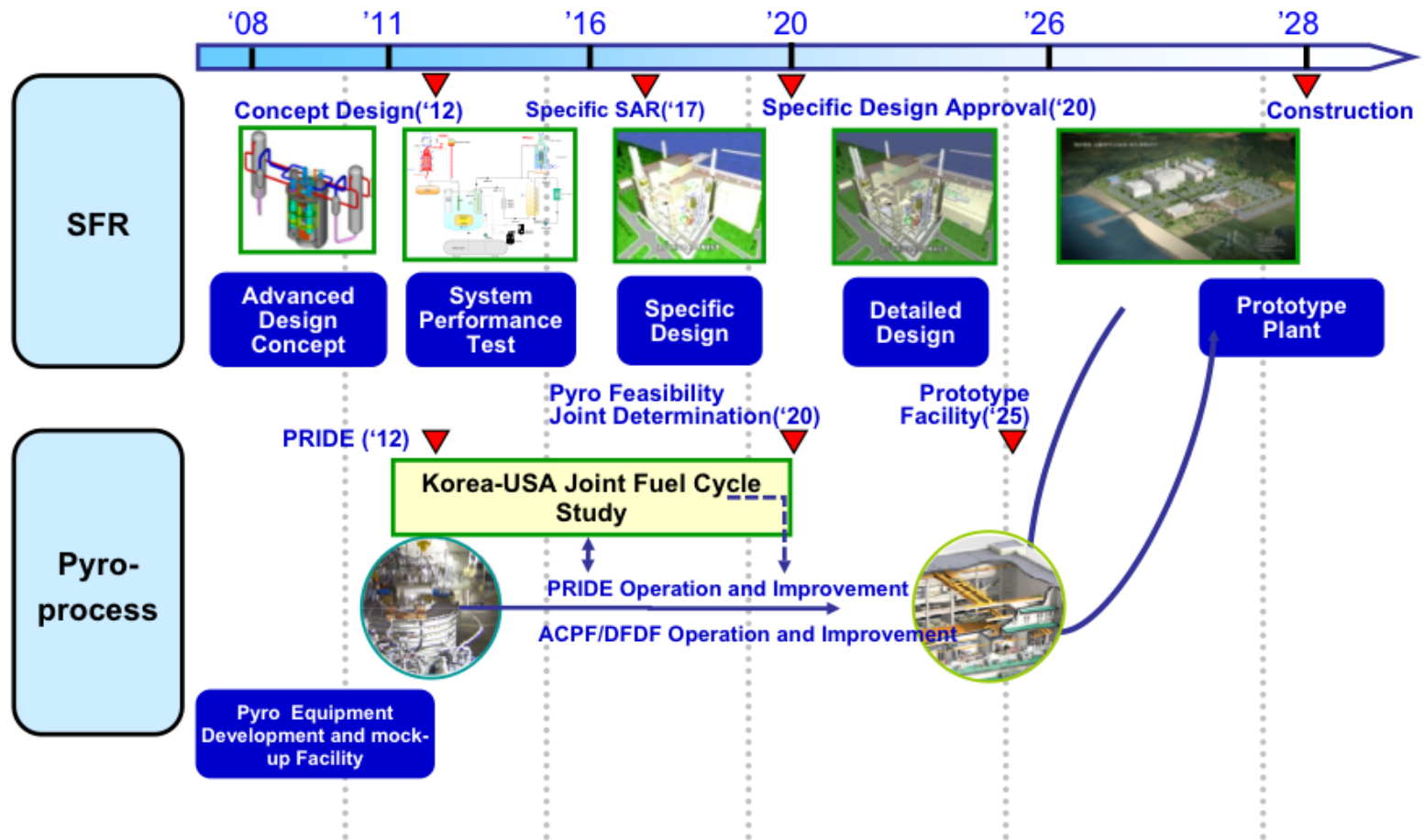
Dr. YOON IL CHANG  
Argonne National Laboratory

# A Plausible Path forward Option

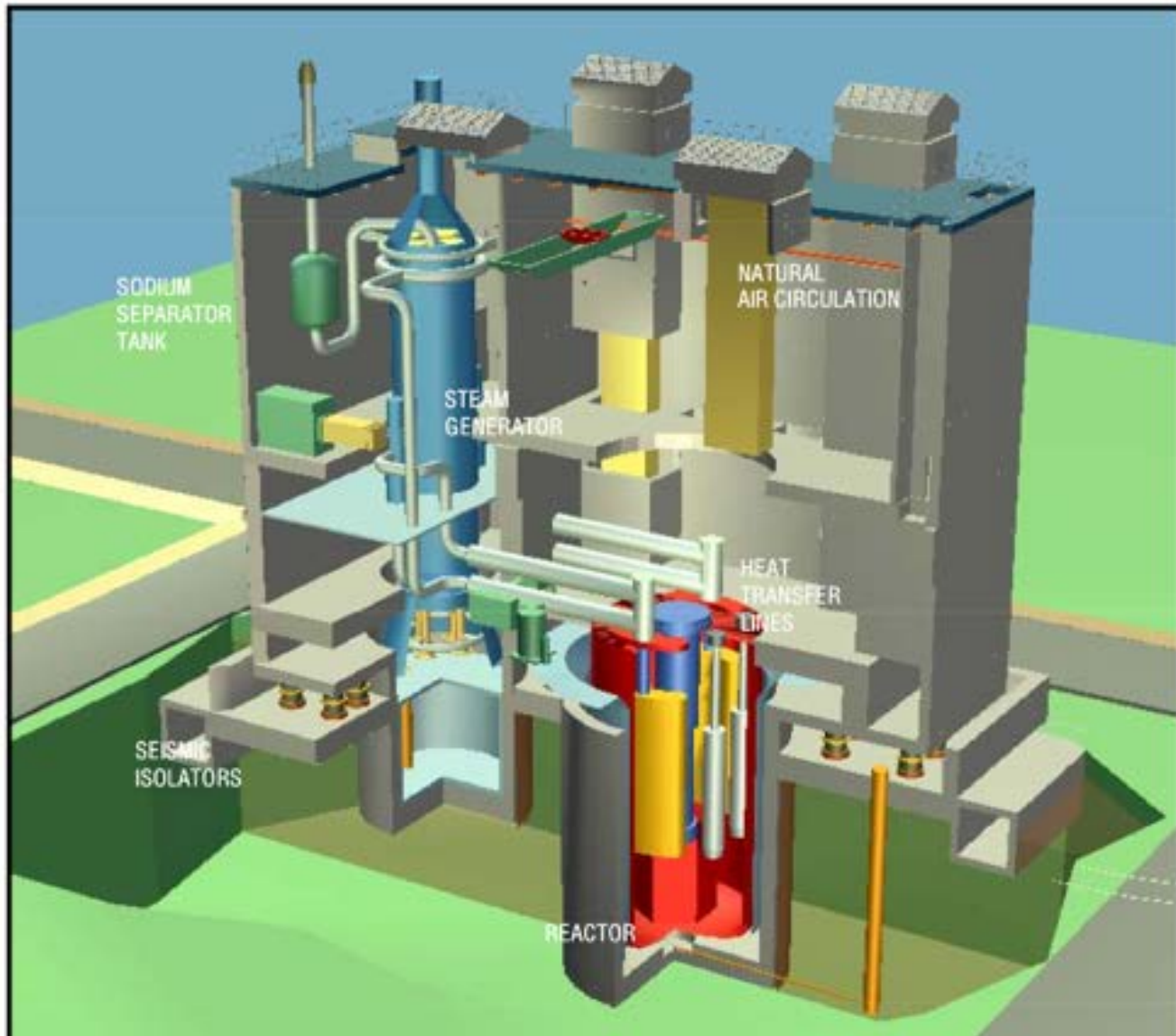
- ✓ As an immediate step, develop a detailed conceptual design and cost/schedule estimates for a pilot-scale (100 ton/yr) pyroprocessing facility to treat LWR spent fuel.
  - This will provide data for industry to evaluate viability.
- ✓ Follow with a construction project for 100 ton/yr LWR pyroprocessing facility to validate economics and commercial viability.
- ✓ In parallel, initiate an IFR demonstration project based on GEH's PRISM Mod-B (311 MWe).
  - Licensing preparations
  - Negotiations with the U.S. industry and international partners
- ✓ A modest sized prototype demonstration project on a DOE site can be done at a fraction of the cost.
  - A vital project to preserve the technology base and develop next-generation engineers for the future.

# IFRに熱心な国は韓国

## Long-term Plan for SFR and Pyroprocess

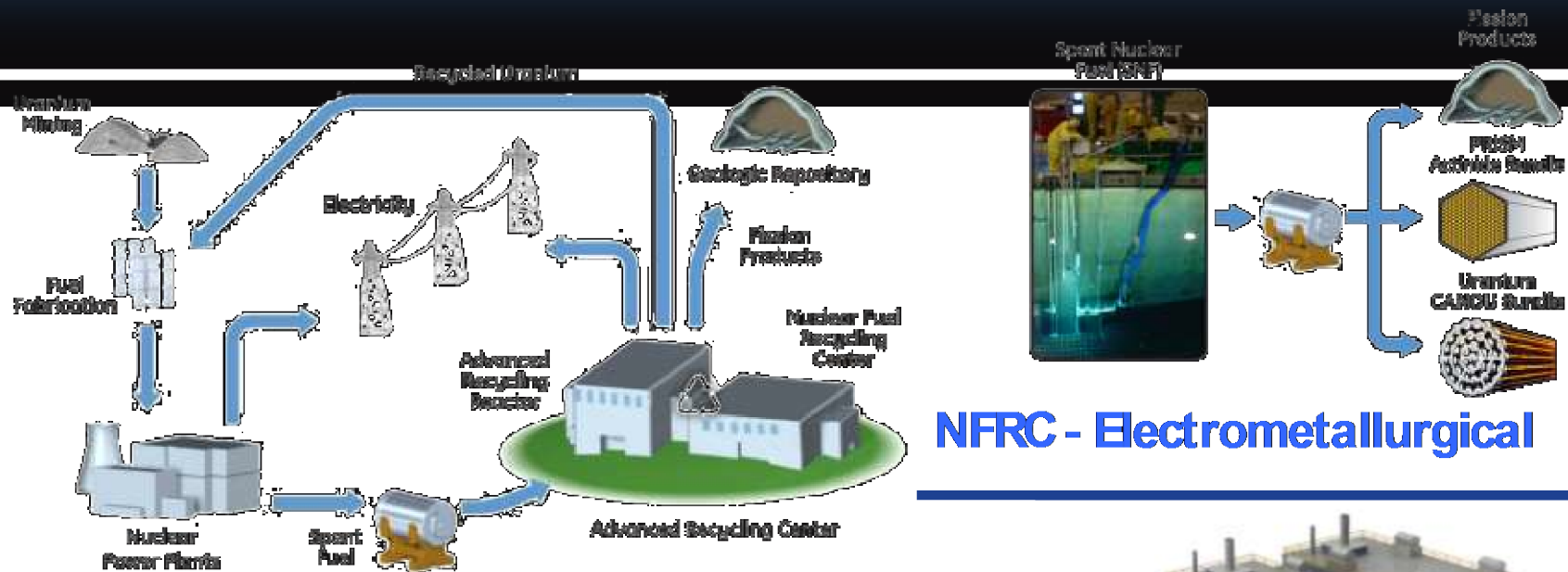


# *S-PRISM Nuclear Steam Supply System*





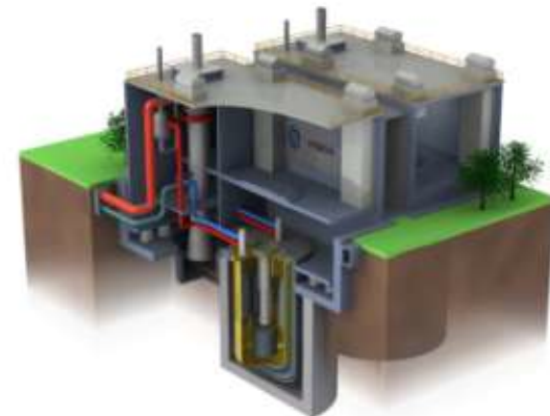
# Extending PRISM...recycling used LWR fuel closes the nuclear fuel cycle with two technologies . . .



## NFRC - Electrometallurgical

### Benefits include:

- Waste half-life ... 300–500 years
- Uranium energy ... extracts 90%
- Non-proliferation ... no plutonium separation
- Environmentally responsible ... dry process



## Advanced Recycle Reactor - PRISM

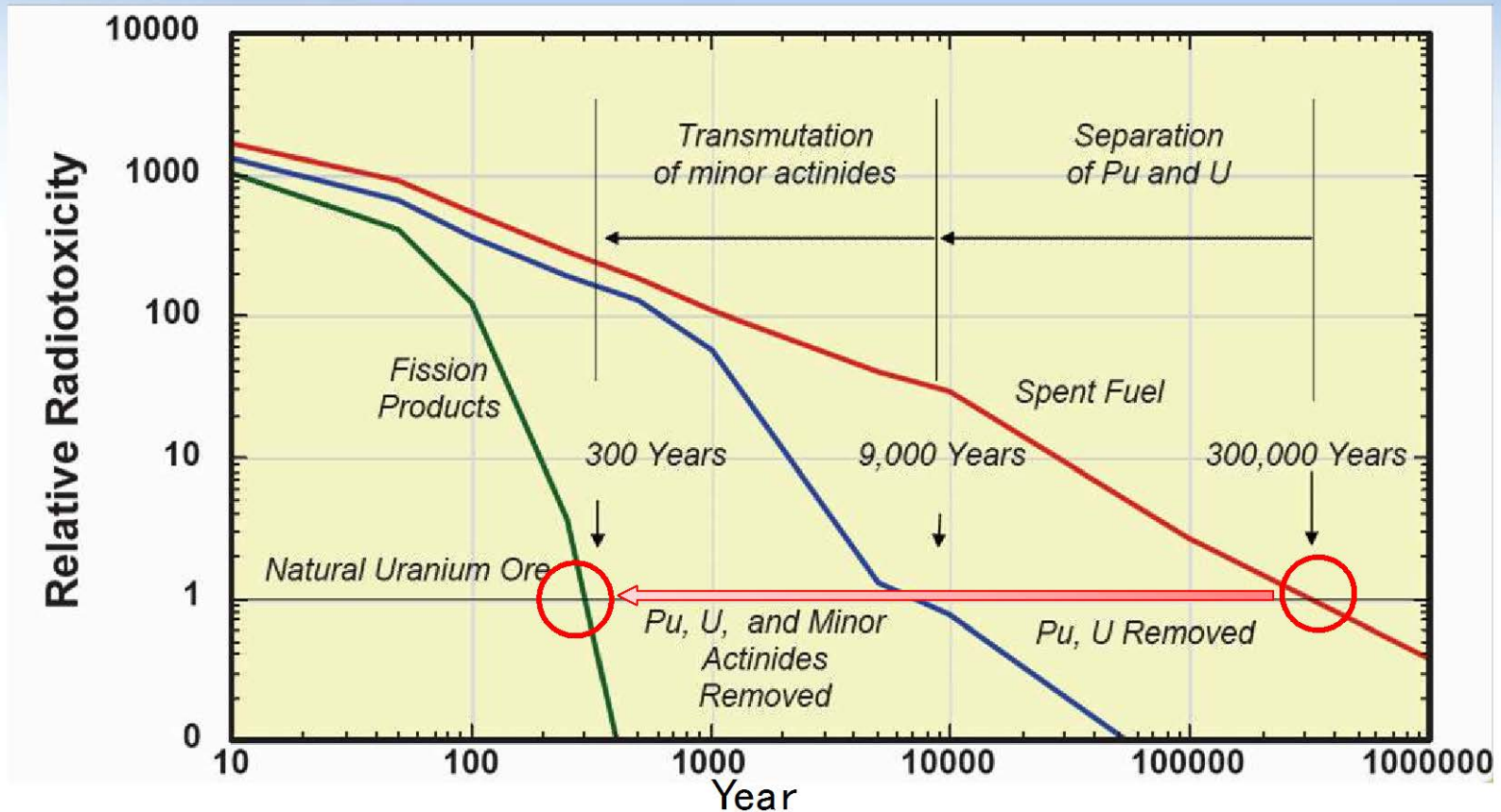


**HITACHI**



# Transuranic disposal issues

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

# CSISナイ・アーミティジ報告 から抜粋 (2012/8/10)

両国は、より強力で対等な同盟にするためには、第一流国家(tier-one nations)の見方から臨むことが必要。第一流国家とは、重要な経済的な重み、能力ある軍事力、世界的なビジョン、国際的な関心事項への民主的な指導性を持たなければならない。米国は間違いなく一流国家だが、日本の場合は、決断すべき事がある。つまり、**日本は、なお一流国家であり続けたいのか、あるいは二流国に漂流しても構わないのか？**

## 1、エネルギー・セキュリティ (原子力)

福島事故が原子力そのものに大きな負の影響をもたらした。我々は、安全審査と地元の同意を前提として、原発を慎重に再開する事が正しく、また、責任あるやり方だと考える。日本はエネルギー利用効率では巨大な進歩を遂げており、エネルギーでの研究開発では世界のリーダー。短期的に、原子力なしでは、CO2排出量削減目標達成や基盤発電量の確保日本に深刻な反作用が生ずる。国家エネルギー政策の策定が延びると、日本にとって重要でエネルギー消費型の産業が国外に去り、国家の生産性を危うくする。中国が、世界的な民生原子力発電国家となってロシア、韓国、さらにはフランスの仲間に入るつもりなので、日本にはその動きに遅れる余裕など無いはずだ。福島からの教訓を立て、安全な炉設計やキチンとした規制実践で世界をリードしなければならない。

# 福島のエンドゲーム



前国際エネルギー機関事務局長

田中 伸男

経済  
観測

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キ離れた「Jヴィレッジ」で毎時0・2ギガワットだった放射線量は、3号機の側で900ギガワットを超えた。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

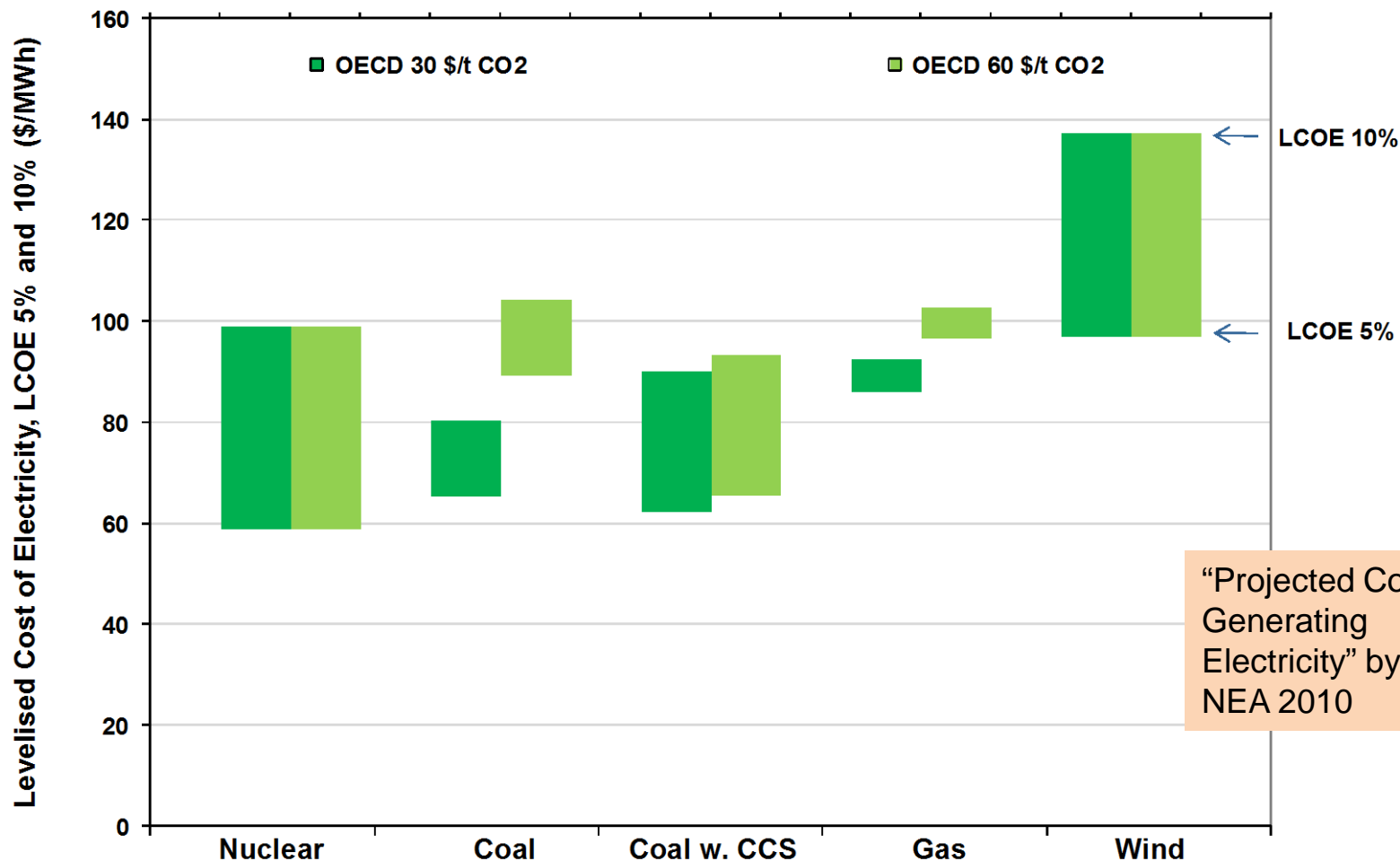
2013. 10. 10

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ミリシーベルト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、助言を求めるべきだ」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)

# Costs of Electricity Generation by Sources : Sensitivity to CO2 Prices and Discount Rates

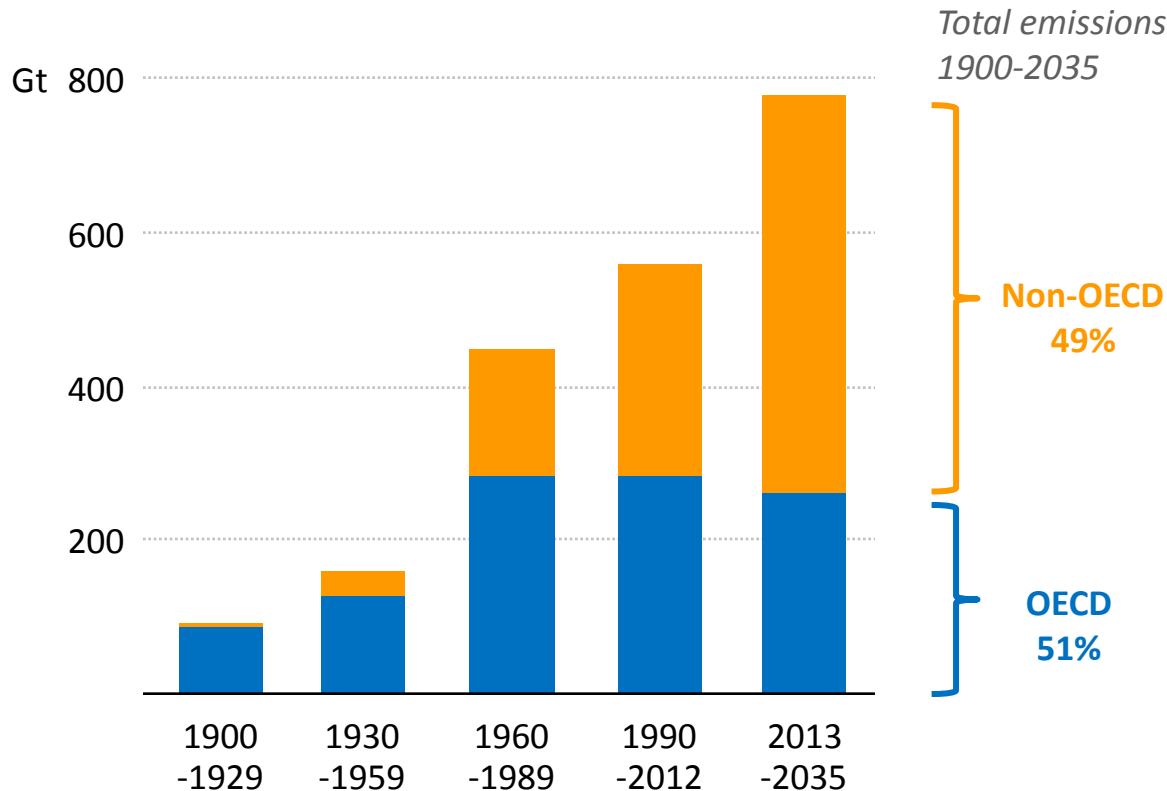


“Projected Costs of Generating Electricity” by IEA & NEA 2010

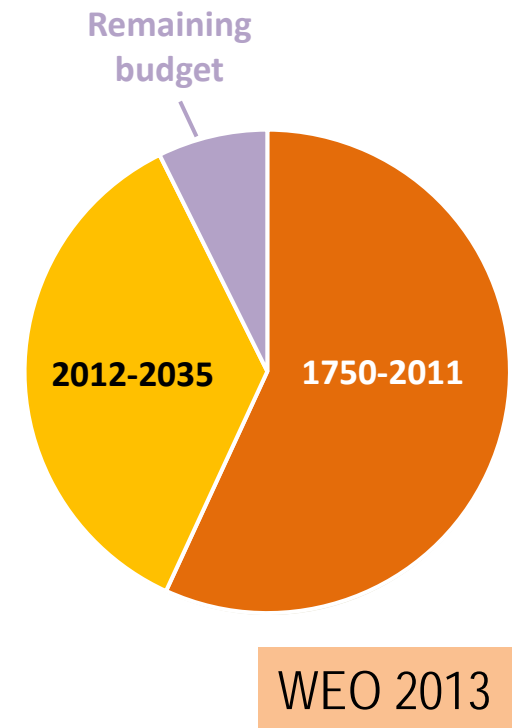
***To bolster competitiveness of low-carbon technologies such as nuclear, renewables and CCS, we need strong government action to lower the cost of financing and a significant CO2 price signal to be internalised in power markets.***

# 二酸化炭素排出削減はいよいよ目標到達困難に

## Cumulative energy-related CO<sub>2</sub> emissions



## 'Carbon budget' for 2 ° C



**Non-OECD countries account for a rising share of emissions, although 2035 per capita levels are only half of OECD; the 2 ° C 'carbon budget' is being spent much too quickly**

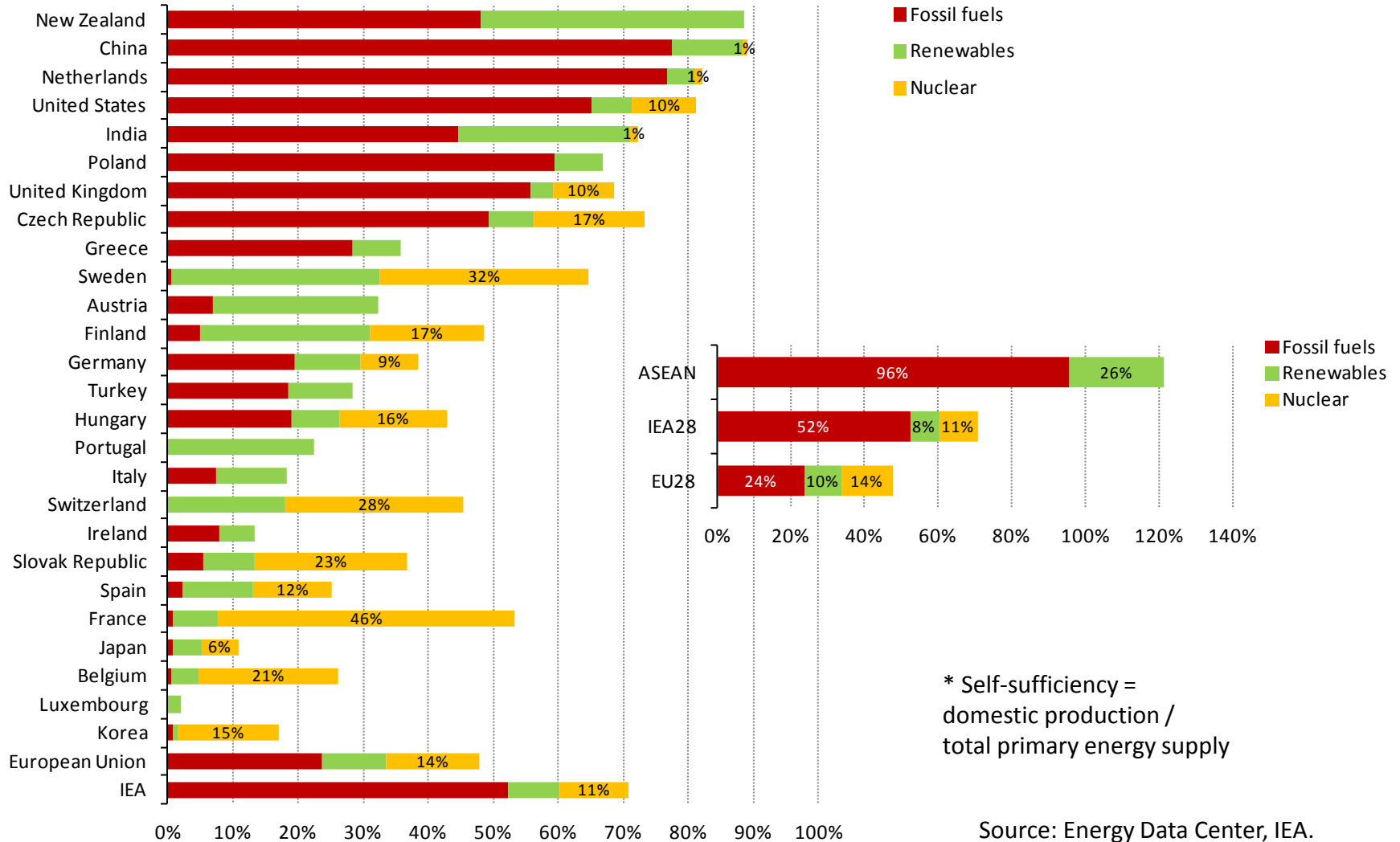


IEA WEO2012

Can we build 16 GW of nuclear power plants a year?  
+ Can we build 60 GW of wind power plants a year? (2010 = 198 GW)  
+ Can we build 50 GW of Solar PV capacities a year? (2010 = 38GW)  
And CO2 price will be more than \$120 per ton.

# エネルギー安全保障＝多様性＋連係＋原子力

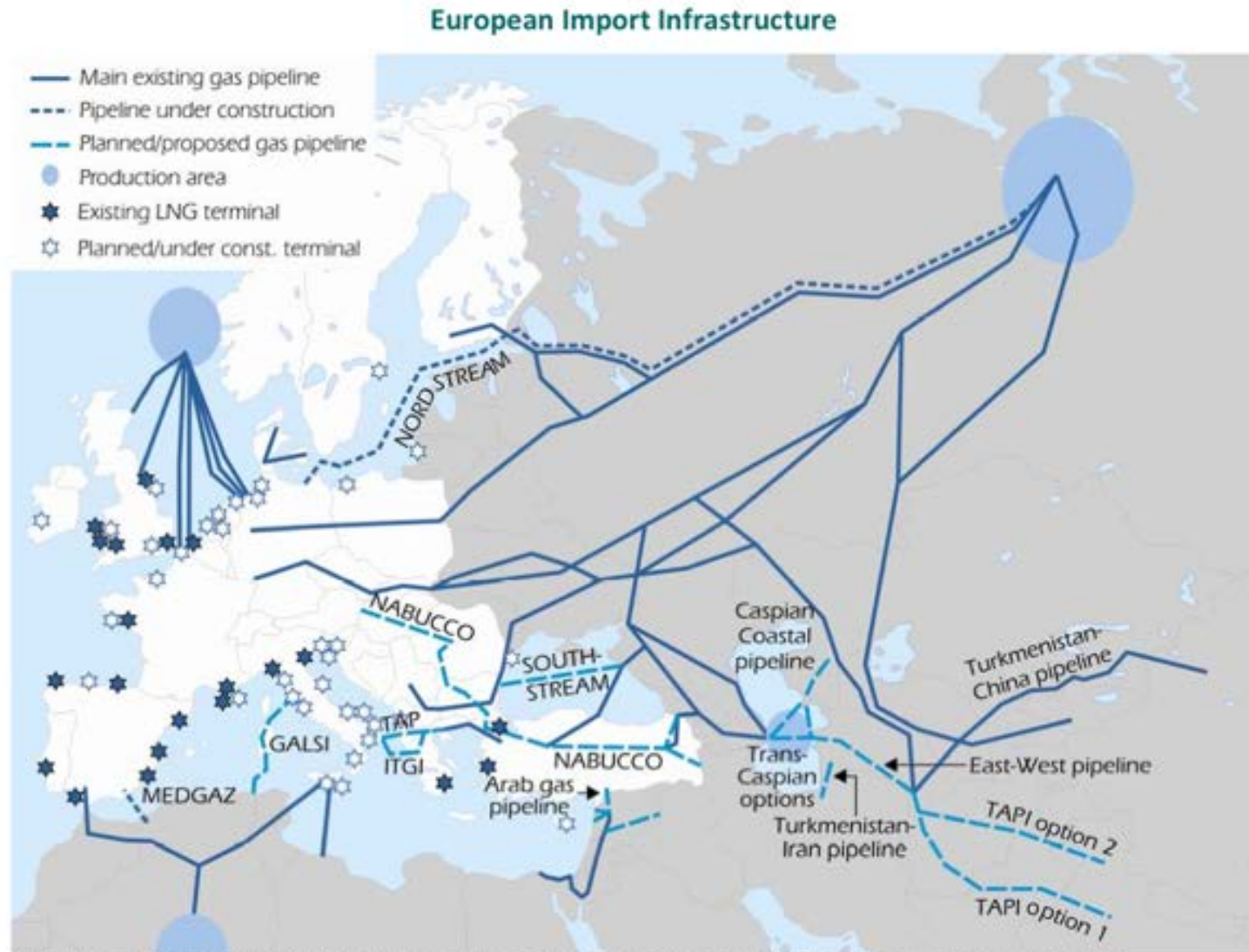
## 2011年自給率とエネルギーミックス



Source: Energy Data Center, IEA.

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

# Natural Gas Import Infrastructure in Europe



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.

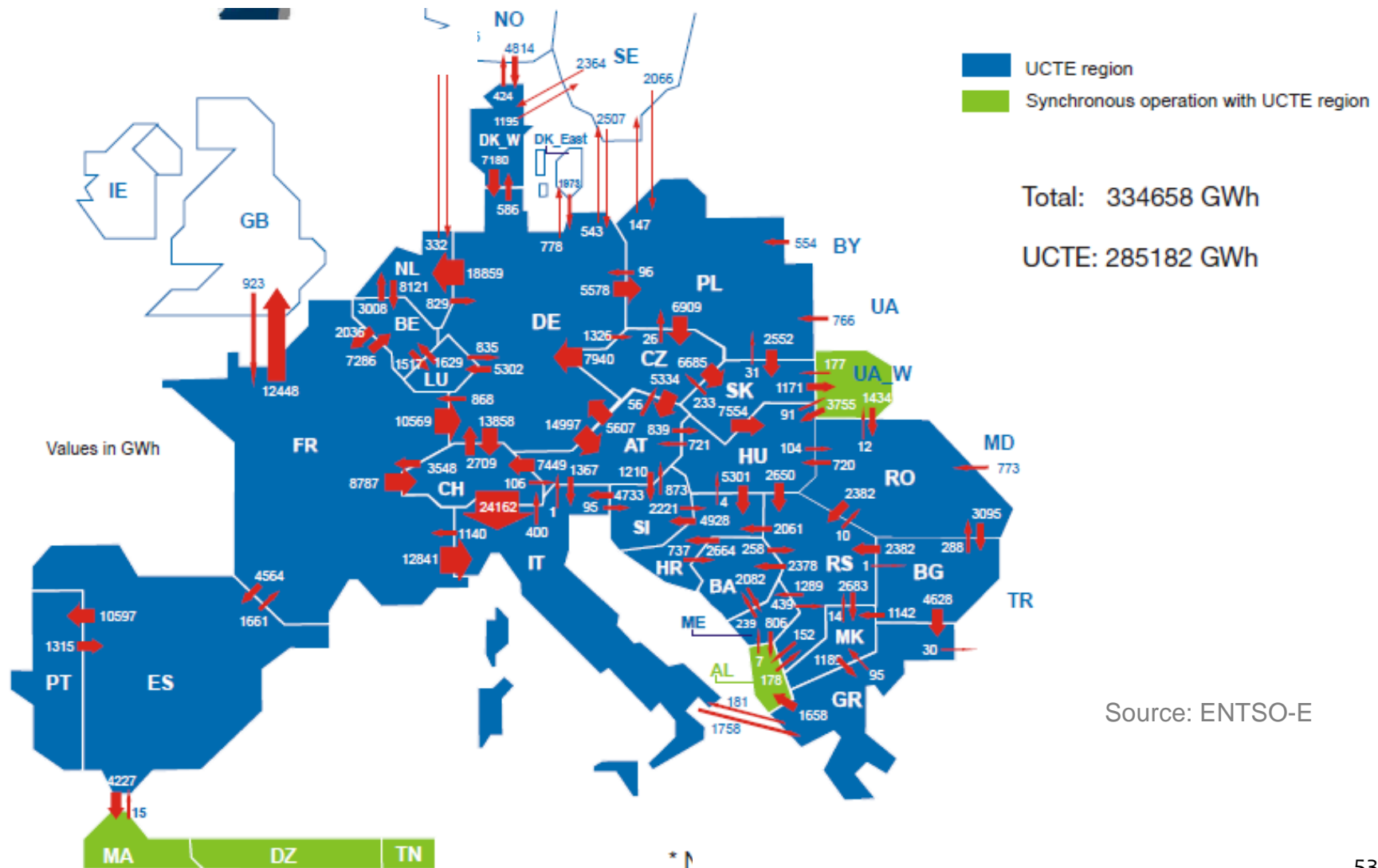
Source: IEA.

IEA Medium Term Oil and Gas Markets 2010



# Power Grid Connection in Europe

Physical energy flows between European countries, 2008 (GWh)

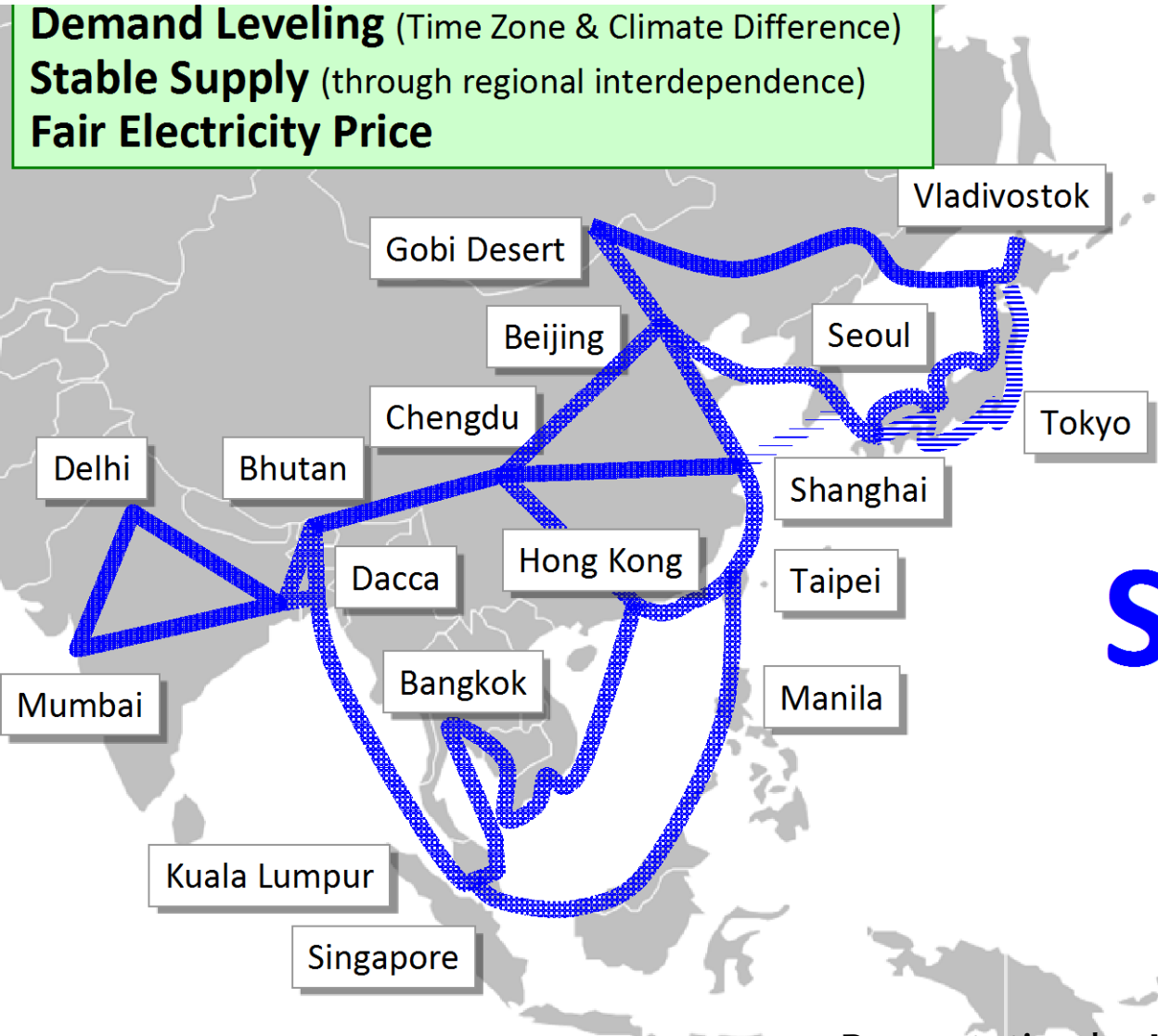


中東北アフリカと欧州のグリッド接続。 デザートテック計画は“Energy for Peace”と呼ばれ、21世紀のエネルギー安全保障のビジョンとなりうる。



# “Energy for Peace in Asia” New Vision?

**Demand Leveling** (Time Zone & Climate Difference)  
**Stable Supply** (through regional interdependence)  
**Fair Electricity Price**



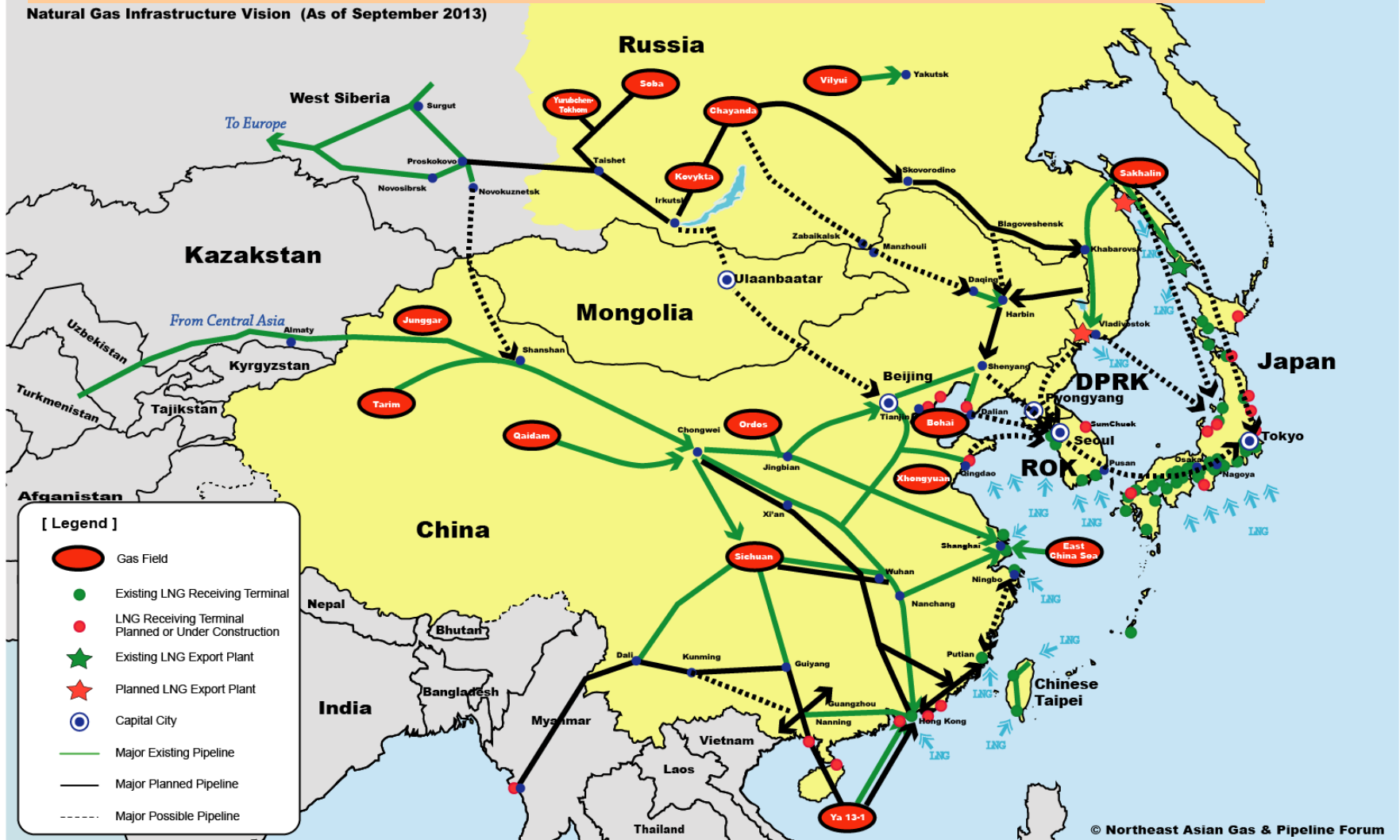
## Phase 3 **Asia Super Grid**

**Total 36,000km**

Presentation by Mr. Masayoshi SON

# 「北東アジアガスパイプライン構想」: 中国は平田教授のビジョンを着実に実現した。

Natural Gas Infrastructure Vision (As of September 2013)



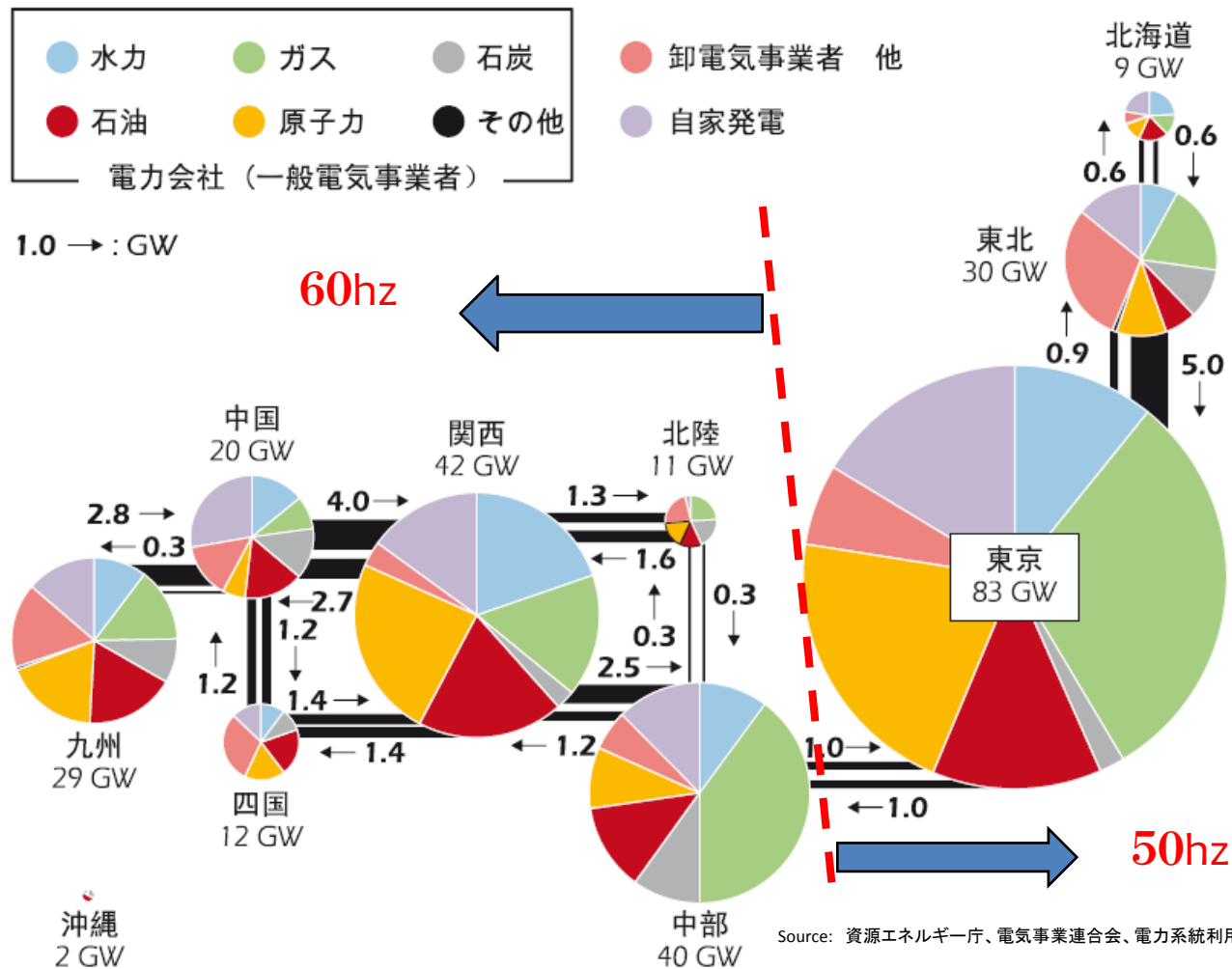
Proposed by the 13<sup>th</sup> NAGPF Conference in Chengdu, China

# 日本のガスパイプライン網

Source: Country submission (compiled by ANRE from data provided by relevant companies). do not imply official endorsement or acceptance by the IEA.

「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。



## 21世紀のエネルギー安全保障は短期的危機対応とともに持続可能な電力供給のための多様な電源の確保。

- イラン危機対策としての原子炉再稼働を急げ。緊急時シナリオの準備。
- 中長期的に世界でも安全確保を前提に原子力は重要なオプションであり続ける。福島の実験の教訓（例えばB.5.b.）を世界と共有すべし。廃炉除染に加えIFRなど新型原子炉、サイクルオプションの国際協力開発（福島）
- 再生可能エネルギーは分散型システム。固定価格買取制度とともに電力系統網の強化、周波数の統一及びロシア韓国との系統接続、発送電分離など電力市場改革が必要。
- 中期的にはガスの黄金時代。米国（アラスカ、GOM）、カナダ、豪州からのLNG輸入多様化。ロシアとのガスパイプライン接続も。災害対策のためにも国内パイプライン網の整備。日欧は米国との競争力差改善が課題。
- 技術によるセキュリティ向上を追求すべき。高効率太陽光、スマートグリッド、次世代自動車、蓄電、超電導送電、水素関連、メタンハイドレート、次世代CCSなど。
- 中国、ASEAN、インドなどと経済連携が進む中で新しいエネルギー安全保障枠組みなど多層的エネルギー安全保障外交の推進。北東アジアエネルギー安全保障フォーラム構想。IEAは地域間調整機能

ありがとうございました。



エネルギーフォーラム社