

エネルギーと持続可能性に関する イノベーション

2018-2-28 総合科学技術・イノベーション会議

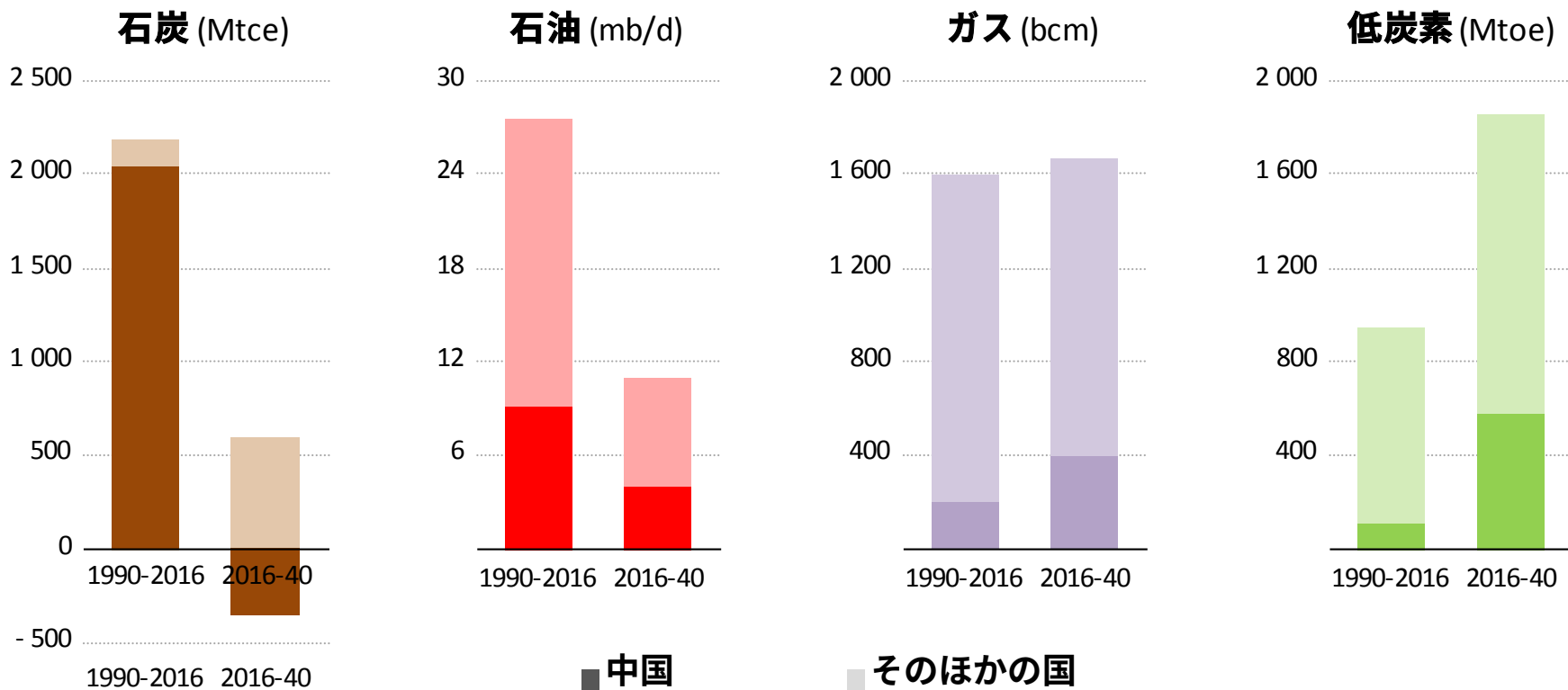
笹川平和財団会長
元国際エネルギー機関(IEA)事務局長
田中伸男

エネルギー世界の大転換 (WEO2017)

- n 新Outlookの背景にある、世界のエネルギーにおける 4大変化 (Upheavals) とは:
 - ø **米国のシェール革命**：米国は石油・ガスにおける世界のリーダーへ
 - ø **ソーラー革命**：太陽光発電 は多くの国で最も安価な電源になりつつある
 - ø **中国のクリーン革命**：習政権の新たな動きが中国の役割を変える
 - ø **電力化革命**：冷房や電気自動車、デジタル化により、未来は電化しつある
- n こうした変化により、価格が手頃で持続可能なエネルギーに向けた明るい展望が拓かれる一方、エネルギー安全保障に対するアプローチの再評価が必要となっている
- n エネルギーがたどる道筋は多いが、政府や産業が変化の兆しの読み取りを誤れば、思わぬ危険も存在する

エネルギーの世界は変わる。 再び中国が世界エネルギー市場を動かす

世界エネルギー需要の変化

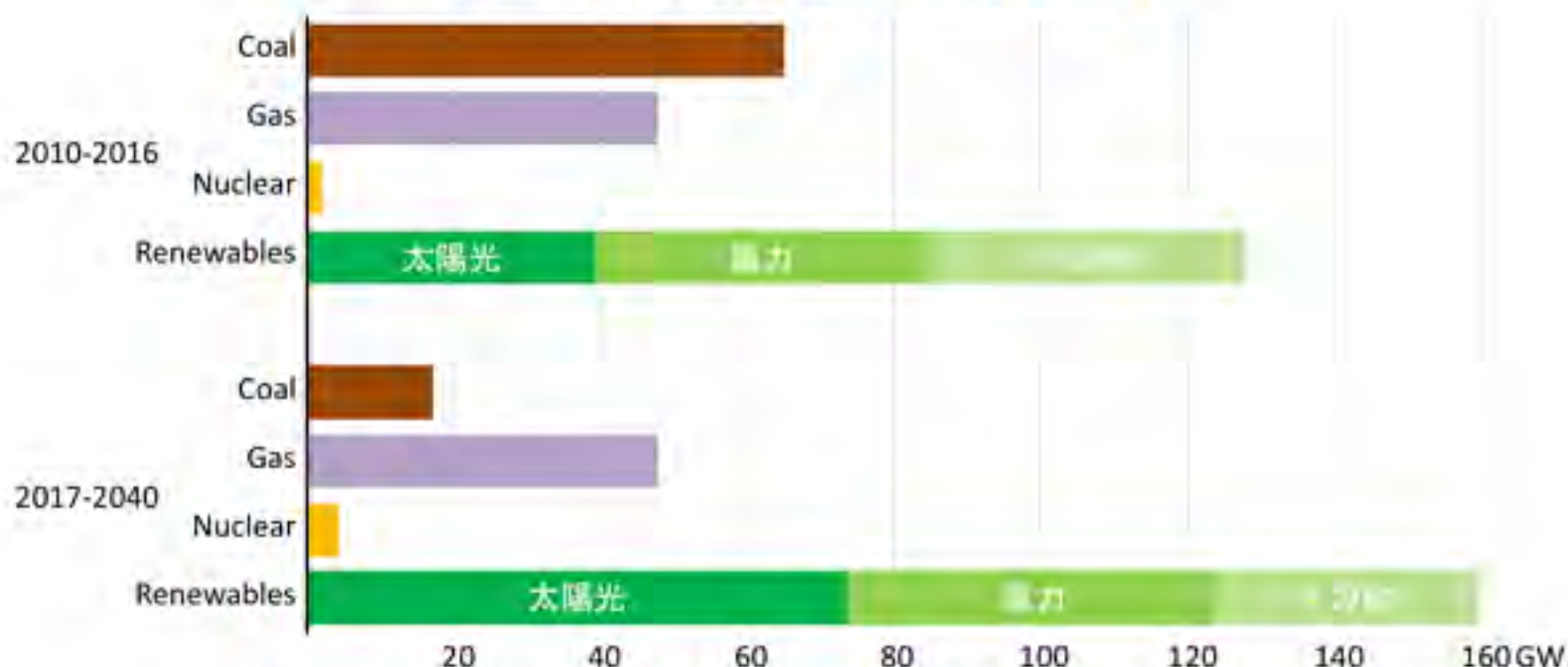


WEO2017

**省エネがなければ2040年までの世界のエネルギー需要は2倍に。
世界のトレンドは中国の天然ガスと低炭素エネルギーシフトで決まる。**

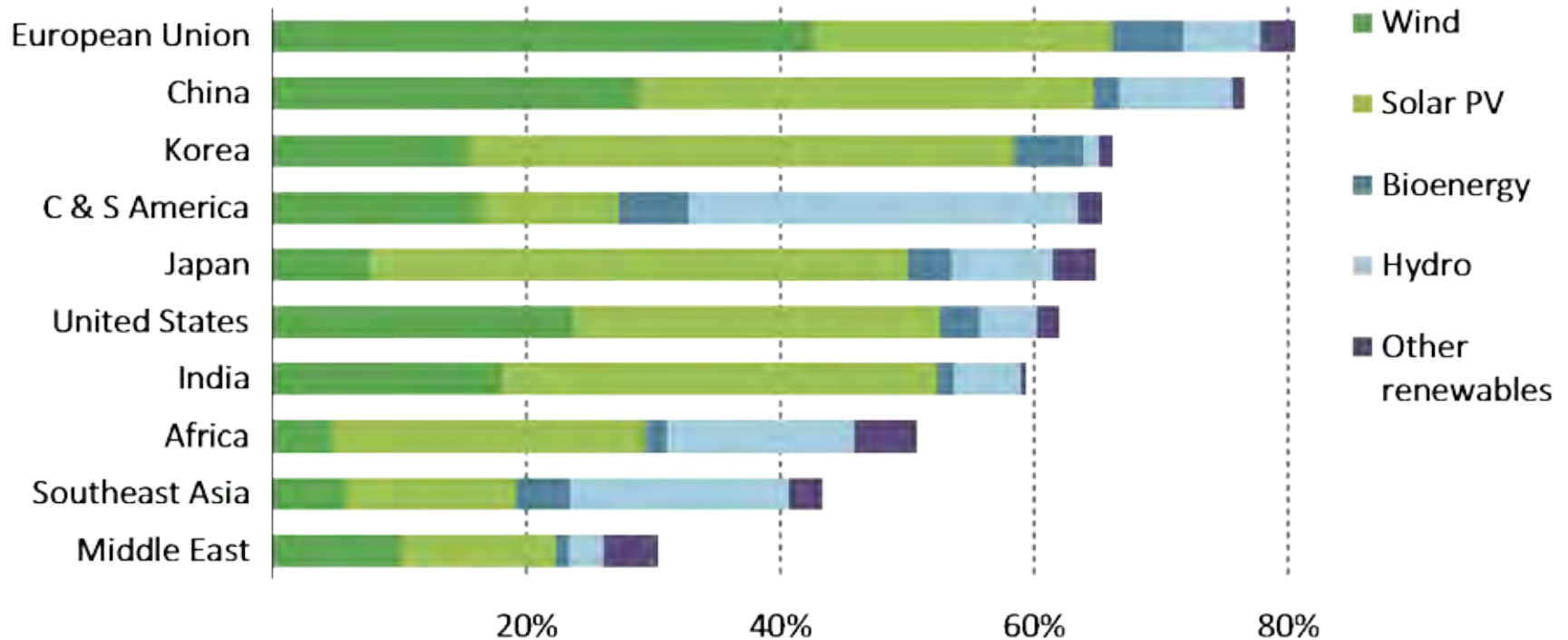
太陽光発電が世界の電力ミックスを決める。 ("Solar Revolution" by D.Yergin)

電源別世界の発電能力年間純増加量



中国、インド、米国が太陽光をリード、他方欧州が風力のトップランナー。
太陽光と風力のシェア増加は電力需給調整のための弾力性が必要に。

世界中で自然エネルギーが2040年までの電力供給増加の過半を占める



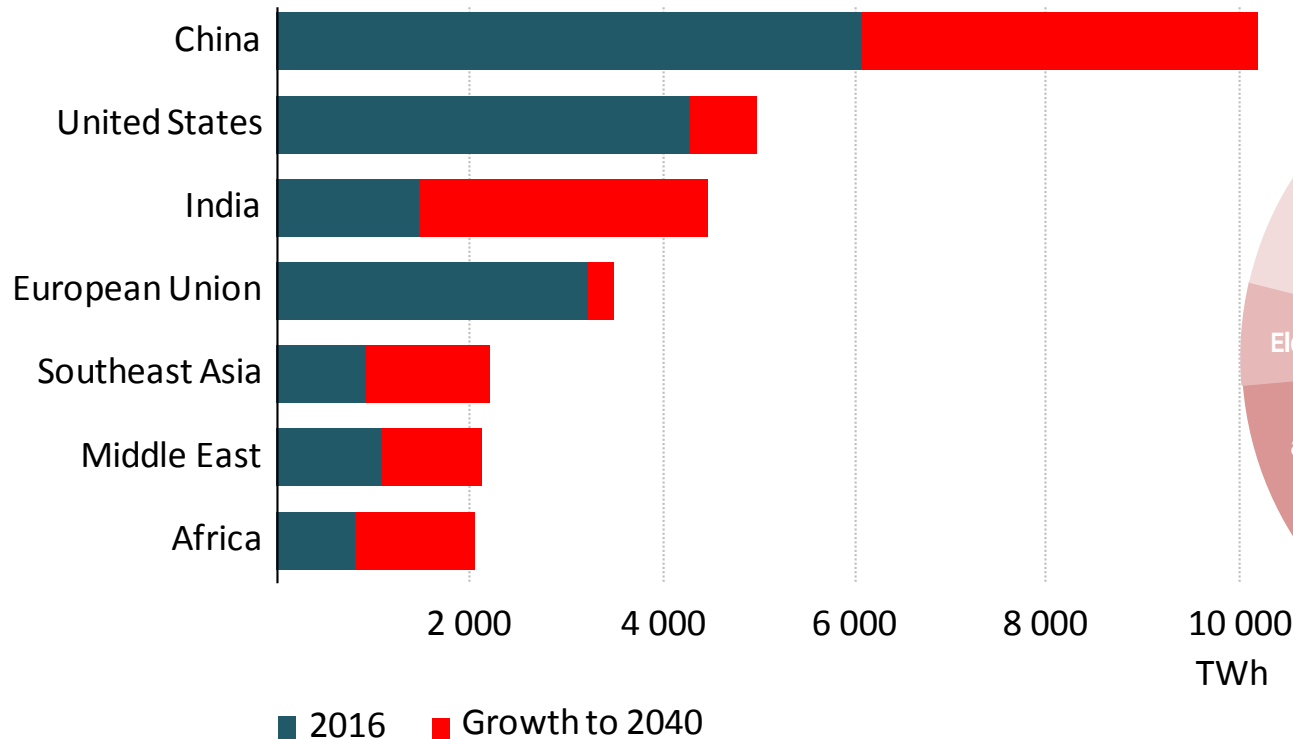
Renewables are a global phenomenon, representing the majority of capacity additions to 2040 in most regions of the world

Note: C & S America = Central and South America.

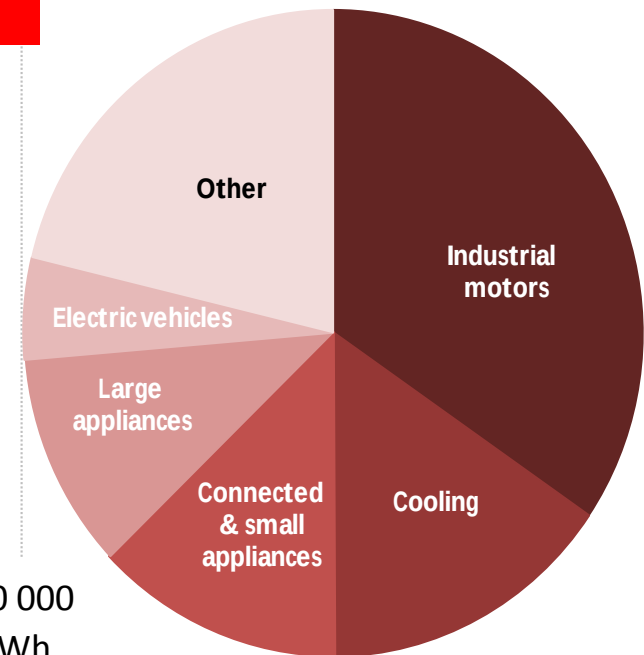
未来は電気が主役

電力需要は60%増加、その85%は新興国で起こる。

地域別発電量

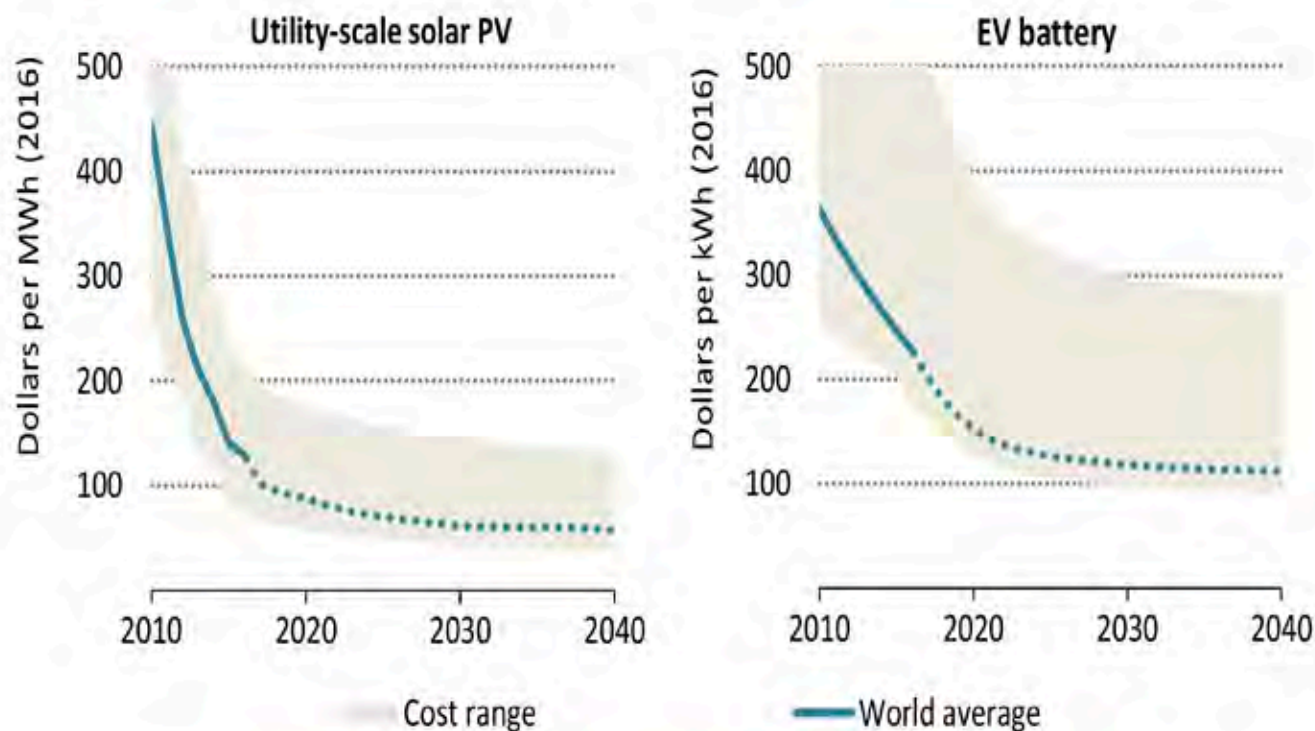


セクター別電力需要増シェア



インドは2040年までに現在の欧州と同じ発電量を追加し、
中国は現在の米国の発電量を追加する。

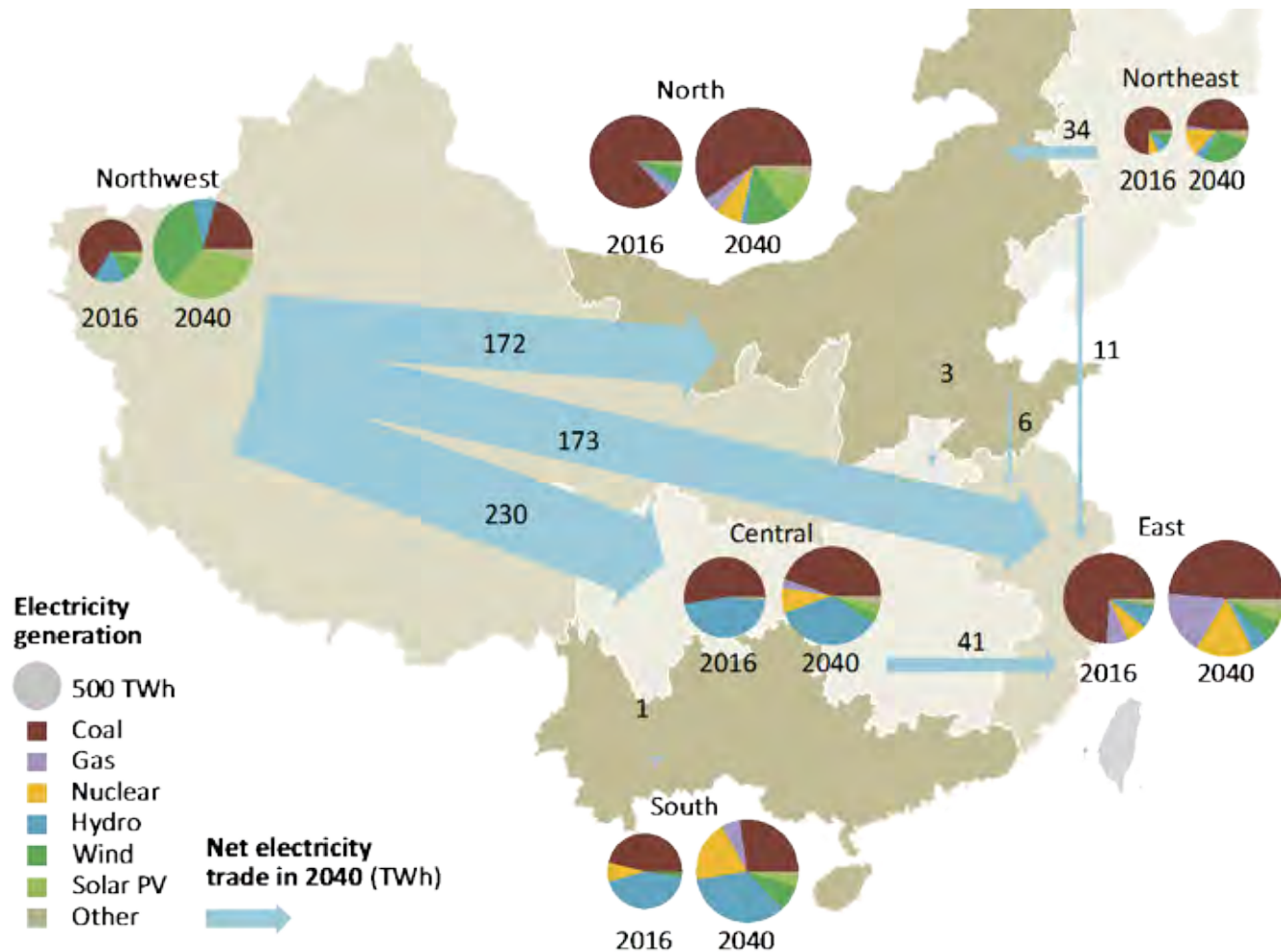
太陽光発電と電気自動車用蓄電池 のコストは大幅に低下



*Reductions in costs of key technologies continue to give
strong impetus to the energy transition*

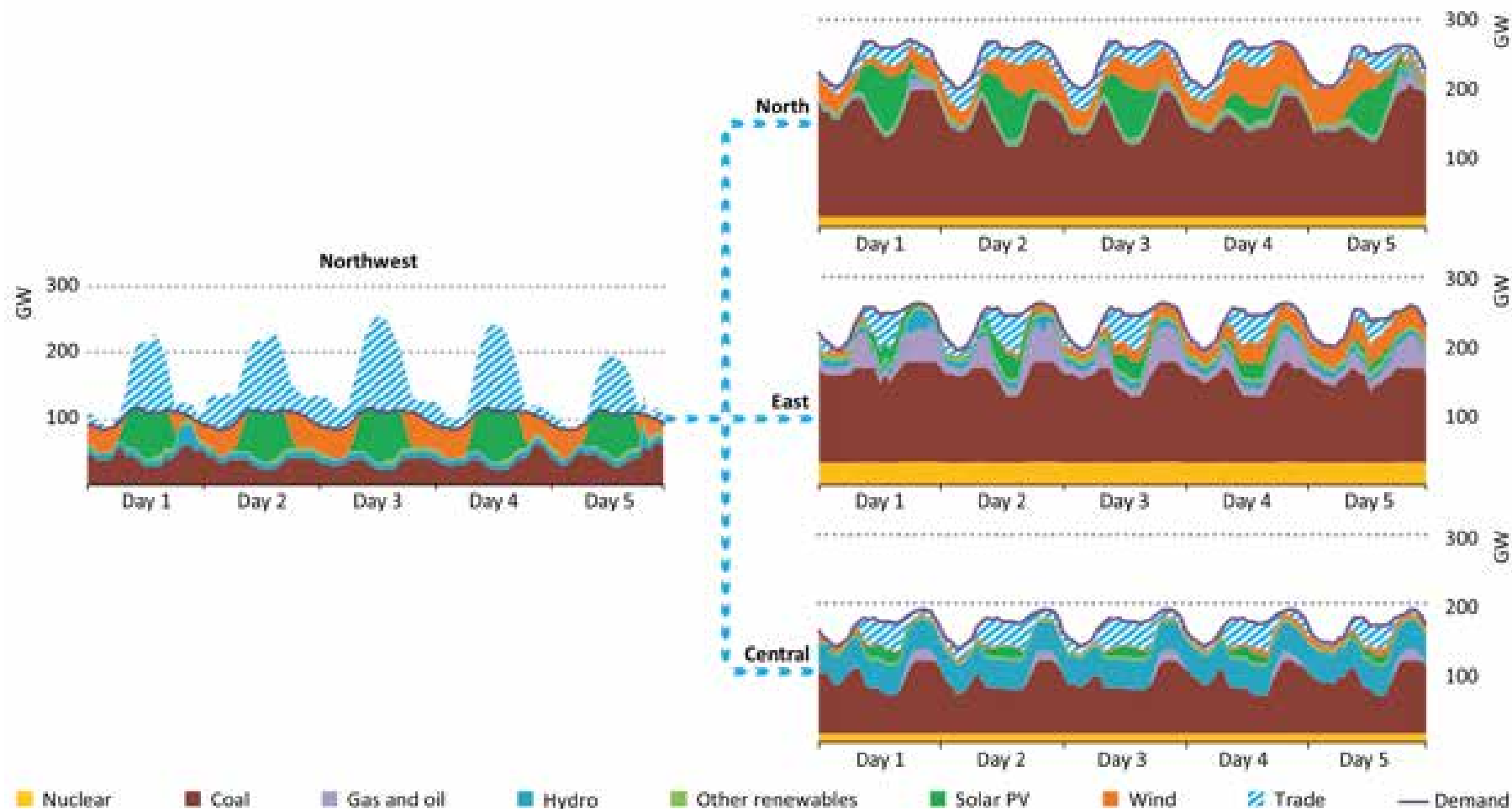
WEO2017

中国における電力トレードの試み



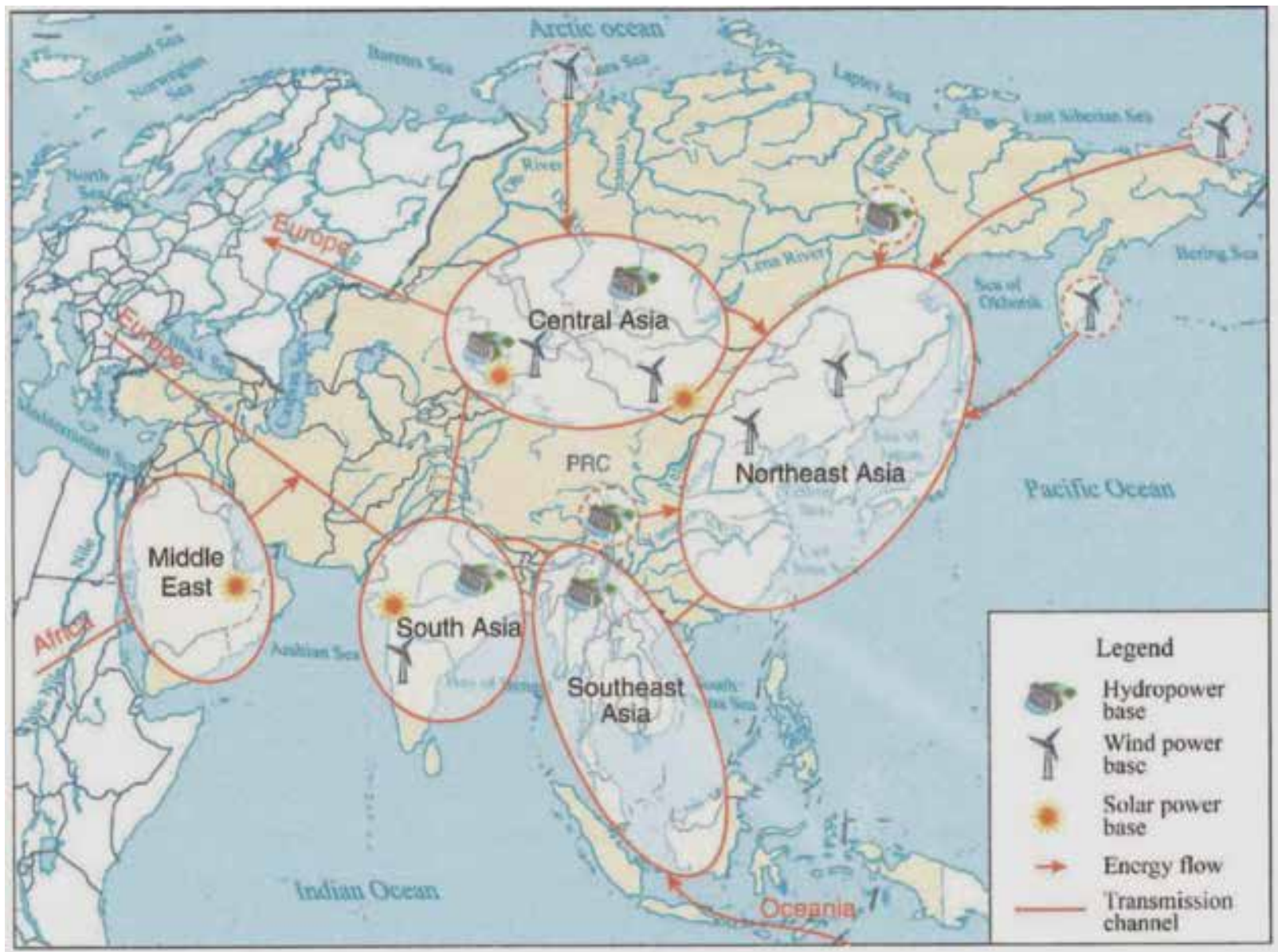
WEO2017

中国は電力トレードで北西部の太陽光・風力過剰を調整

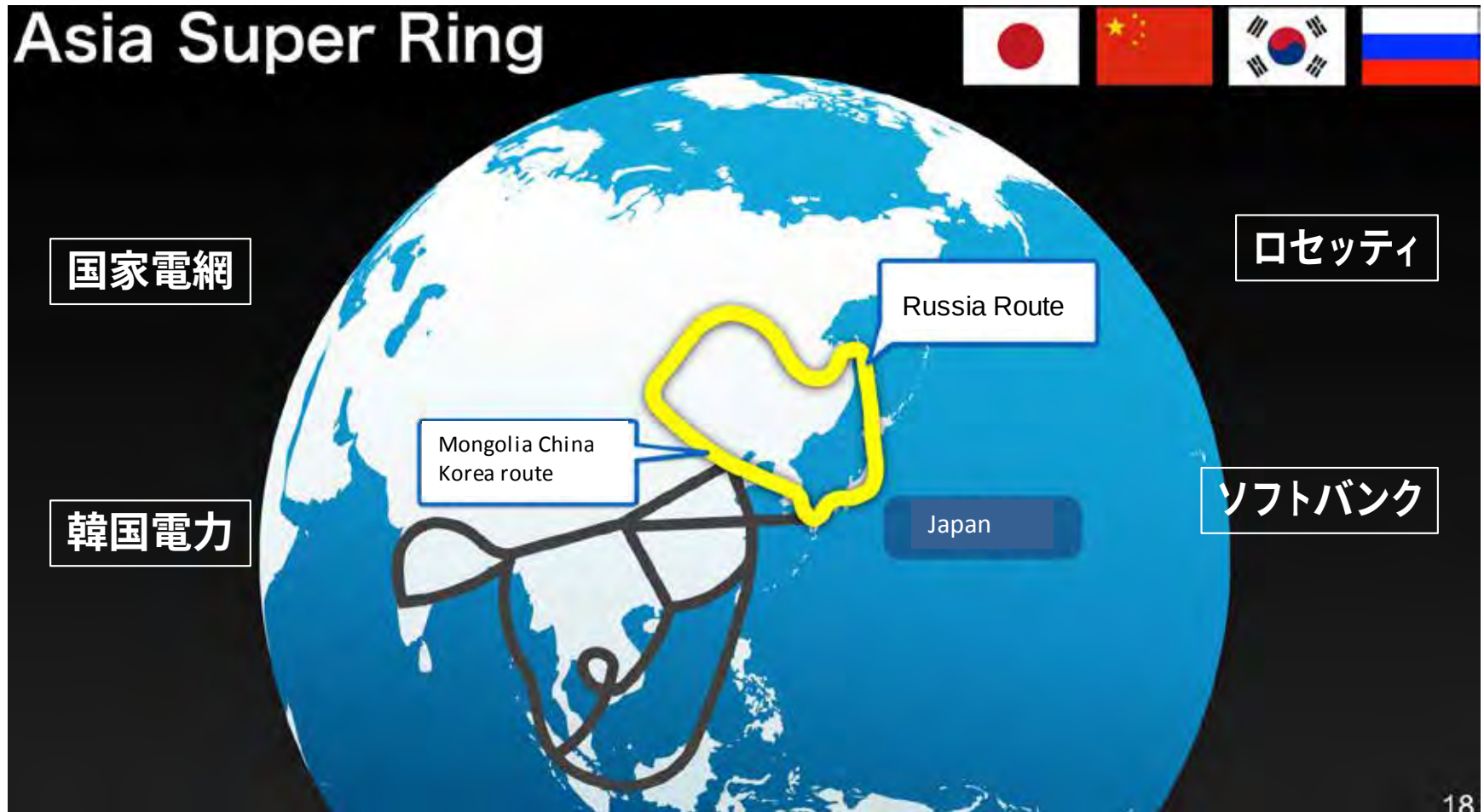


Expanded transmission capabilities provide for electricity supply and demand to be balanced across China

中国国家電網によるGlobal Energy Interconnection/ GEIDCO



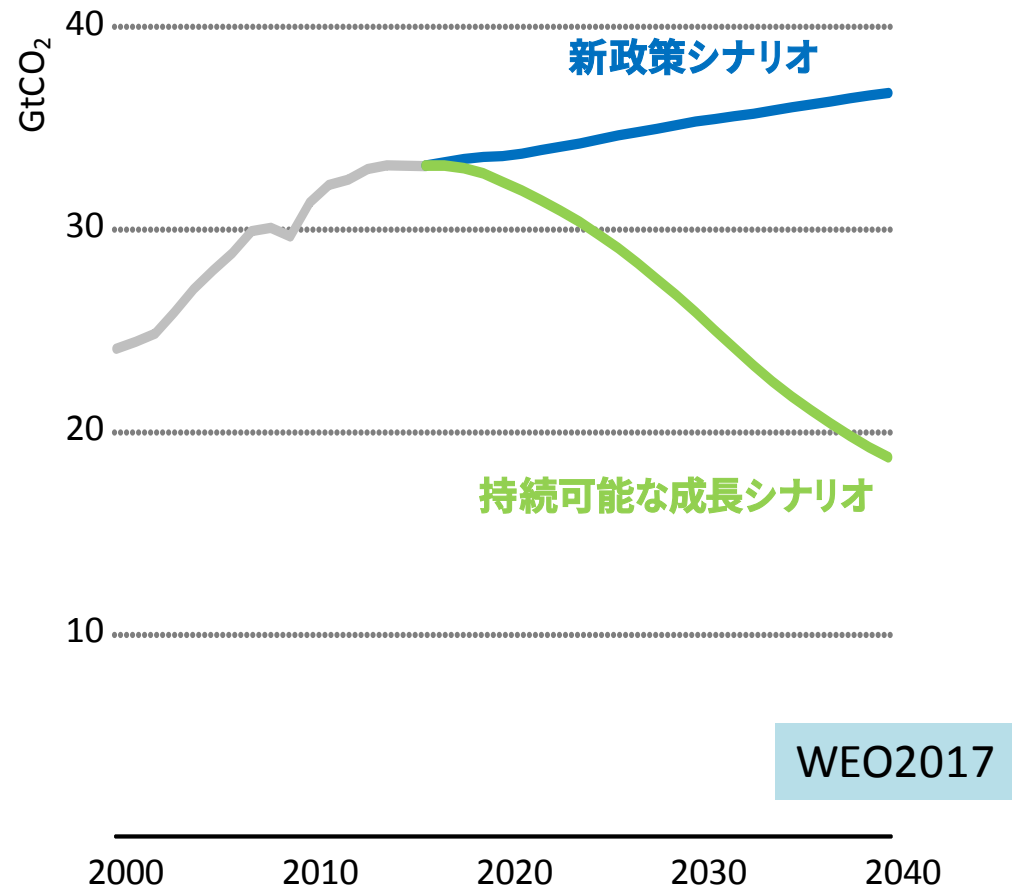
プーチン大統領はアジアスーパーリング構想への支持を表明。



持続可能な成長とエネルギー戦略



Global CO₂ emissions by scenario



持続可能な成長シナリオはパリ合意での二酸化炭素の排出削減とともに大気汚染を減らし、エネルギーへのユニバーサルアクセスを実現する。

より持続可能な世界に向けた強力な政策

持続可能な成長シナリオ (2040年)

WEO2017

875

百万台の
電気自動車

2倍

今日より効率的 (省エネ)

3 250 GW

世界の太陽光発電容量

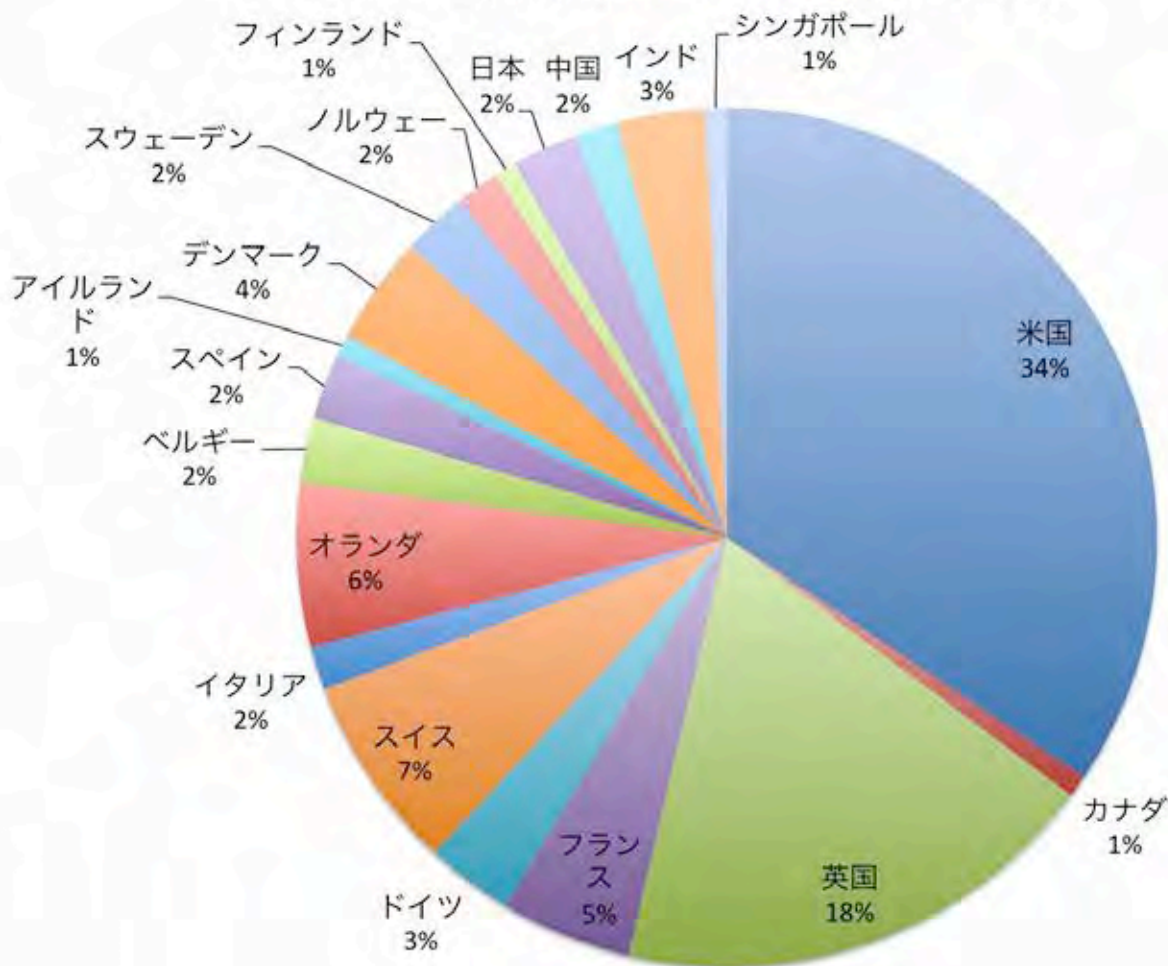
580 bcm

増加するガス需要

持続可能な成長シナリオの実現には、2040年までに必要となる投資を15%増やすだけでよく、エネルギー供給に必要な投資の3分の2が発電と送配電網に向けられる

RE100

RE100国別加盟企業数（2018.1.28時点）

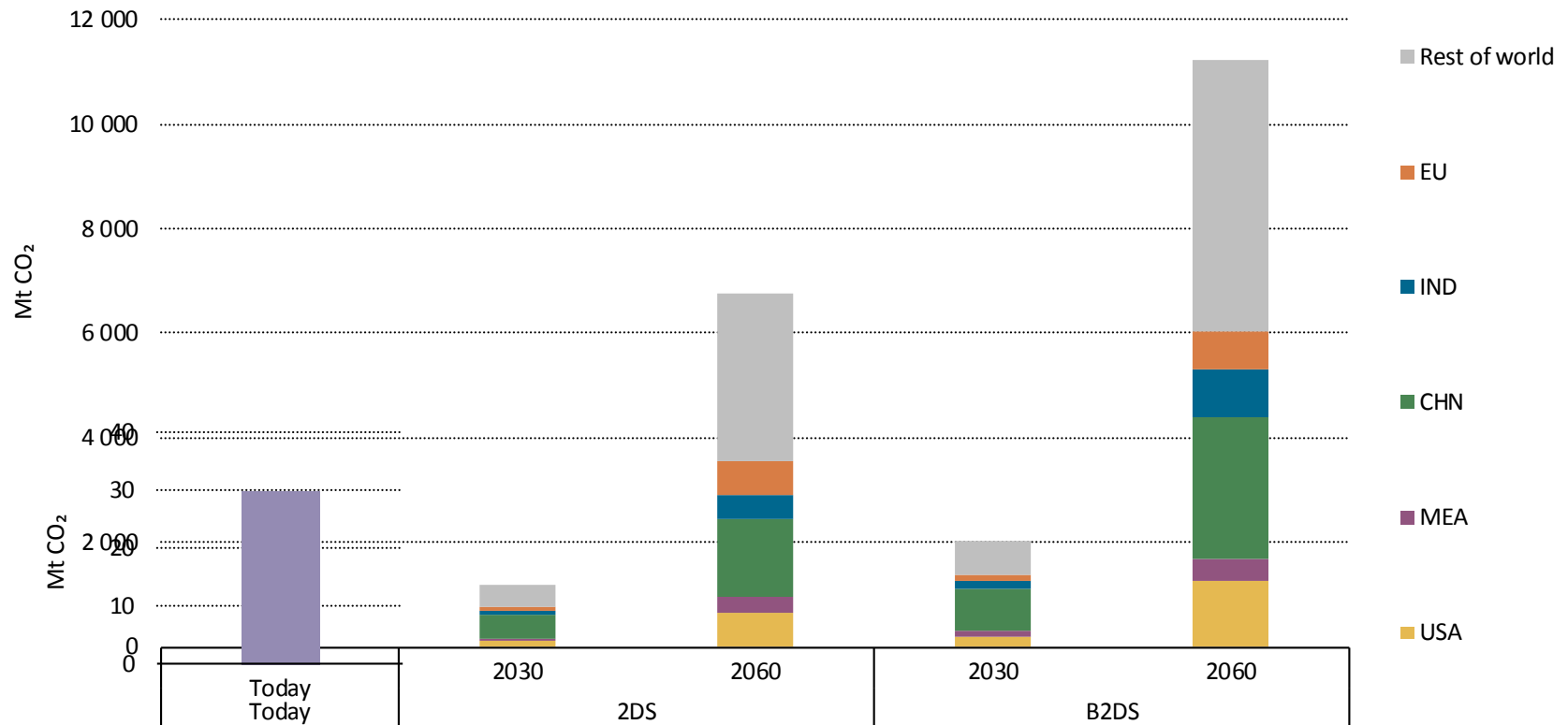


加盟122社のうち主要な会社

Apple Microsoft Facebook
Google Bloomberg SAP
Infosys GM BMW
Phillips DSM Akzonobel LEGO
Johnson & Johnson Astra-
Zeneca Biogen P&G Nestle
Danone Kelloggs Starbucks
AB-Inbev Nike H&M Walmart
Marks&Spencer IKEA G.Sachs
Morgan Stanley BOA Citi
JPMorgan HSBC UBS ING
BT Sky
Elion BROAD Group
リコー 積水ハウス
アスクル

二酸化炭素分離貯蔵 (CCS) はまだまだ努力不足。

Amount of CO₂ captured under various scenarios

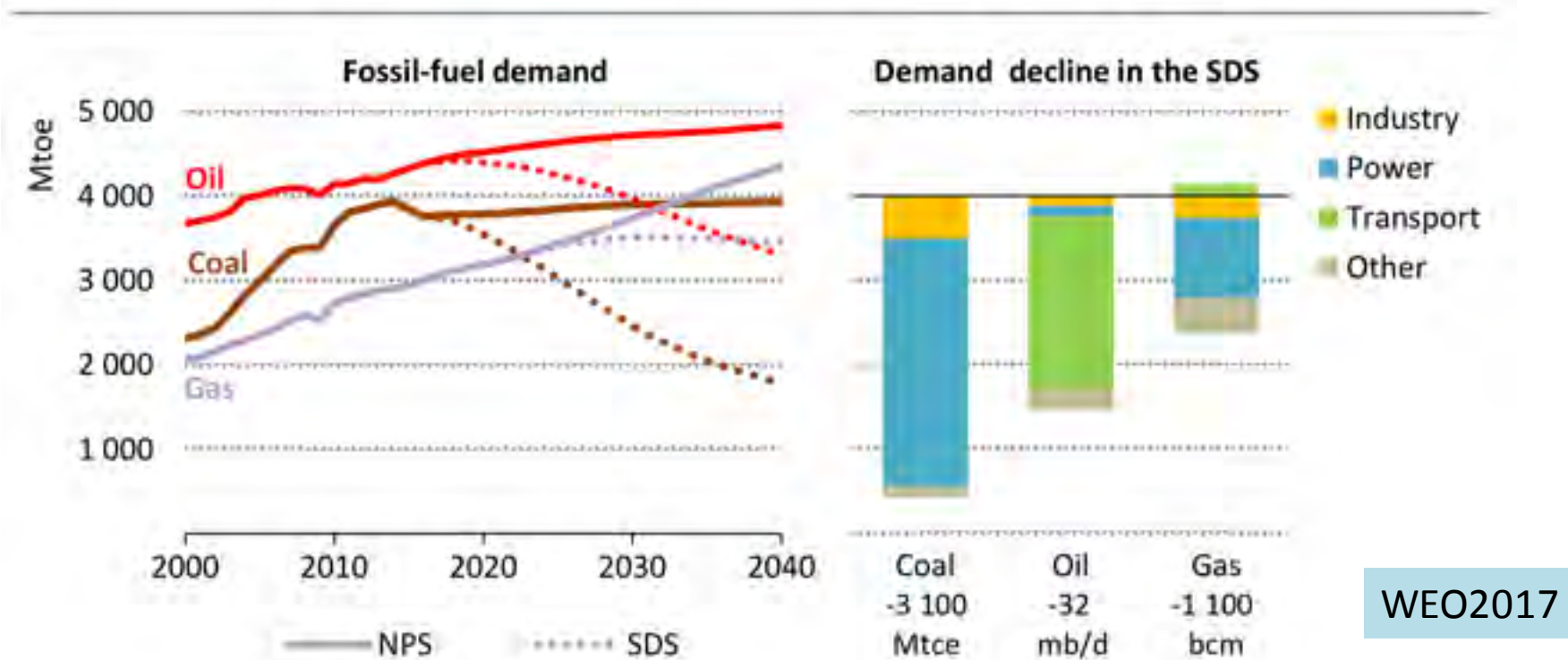


ETP2017

CCSは現在3千万トン規模。これを70億トンから110億トンにする必要がある。これは技術ではなく政策の問題。ノルウェーは\$60の炭素税でスレイプナーガス田でのCCSを実現。

サウジアラムコの株式公開の裏にEV 化など温暖化対策の脅威がある

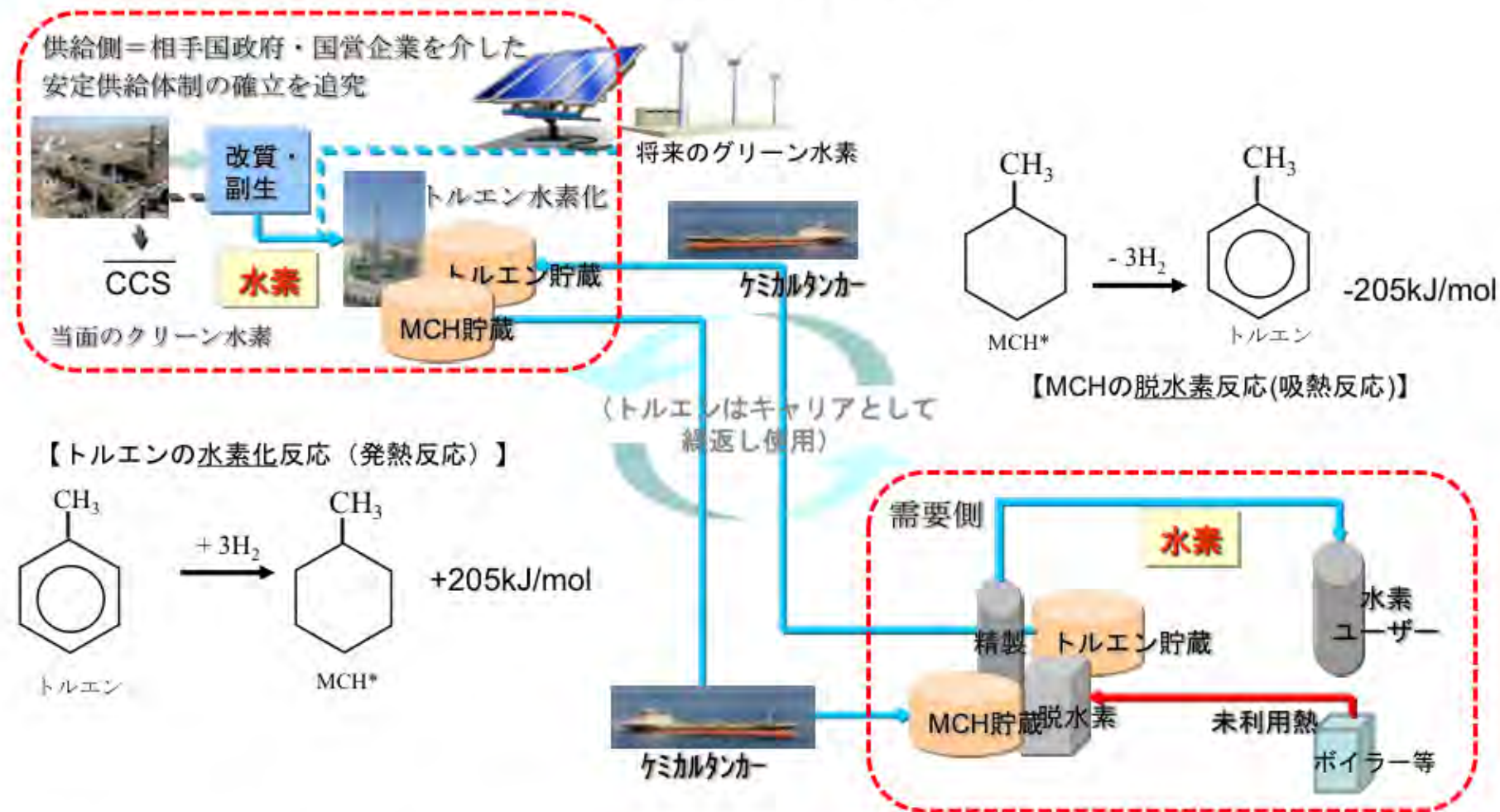
2040年までの化石燃料需要推移
持続可能な成長シナリオと新政策シナリオの比較



新政策シナリオでは石油需要のピークは来ないが、SD(旧450ppm)シナリオでは起こる。**石器時代は石がなくなったので終わったわけではない**

日サウジ協力で水素経済を：千代田化工建設の提案するスぺラ水素計画 CHIYODA

- 有機ケミカルハイドライド法は、常温・常圧での水素輸送・貯蔵を可能とする、世界初の実用技術。
- 既存インフラが活用できるため、経済性をもった水素の導入が可能となる。



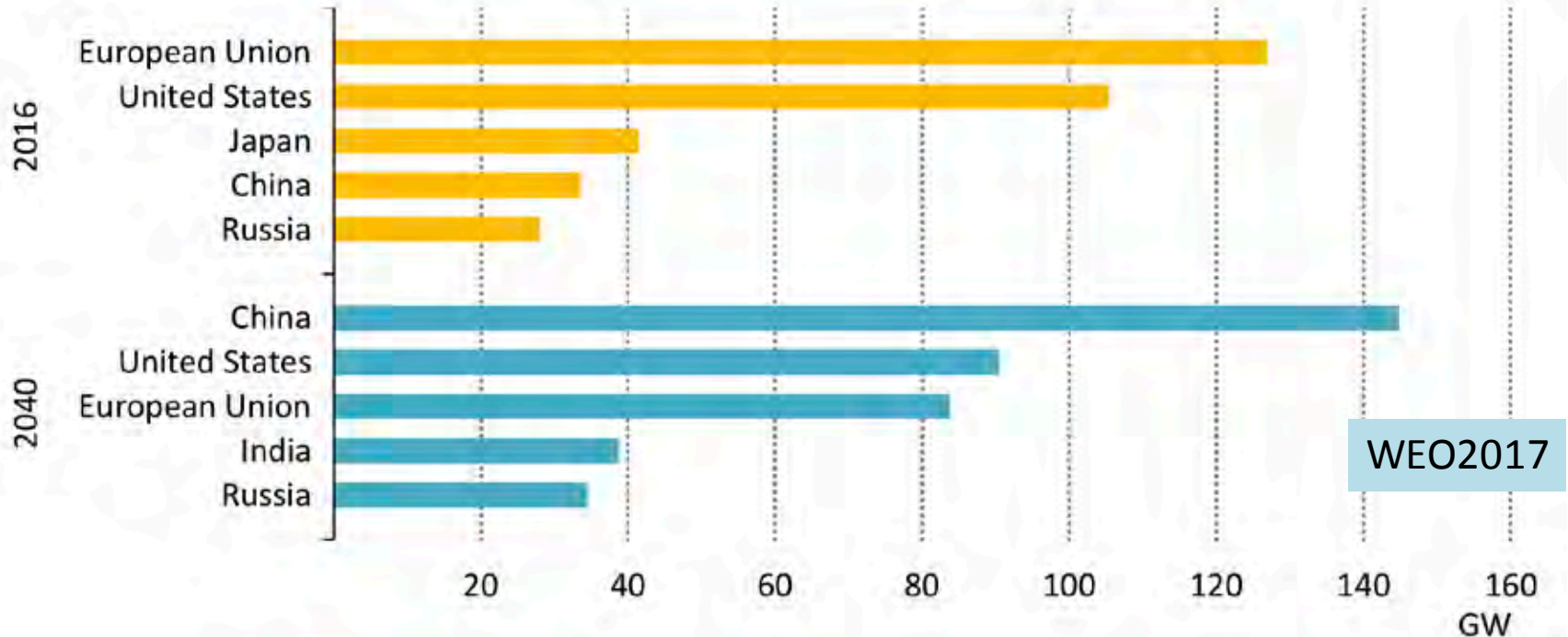
*用語註： MCH=メチルシクロヘキサン

コスト高でも原子力は必要か？

Yes, but **大型軽水炉パラダイムは曲がり角。**

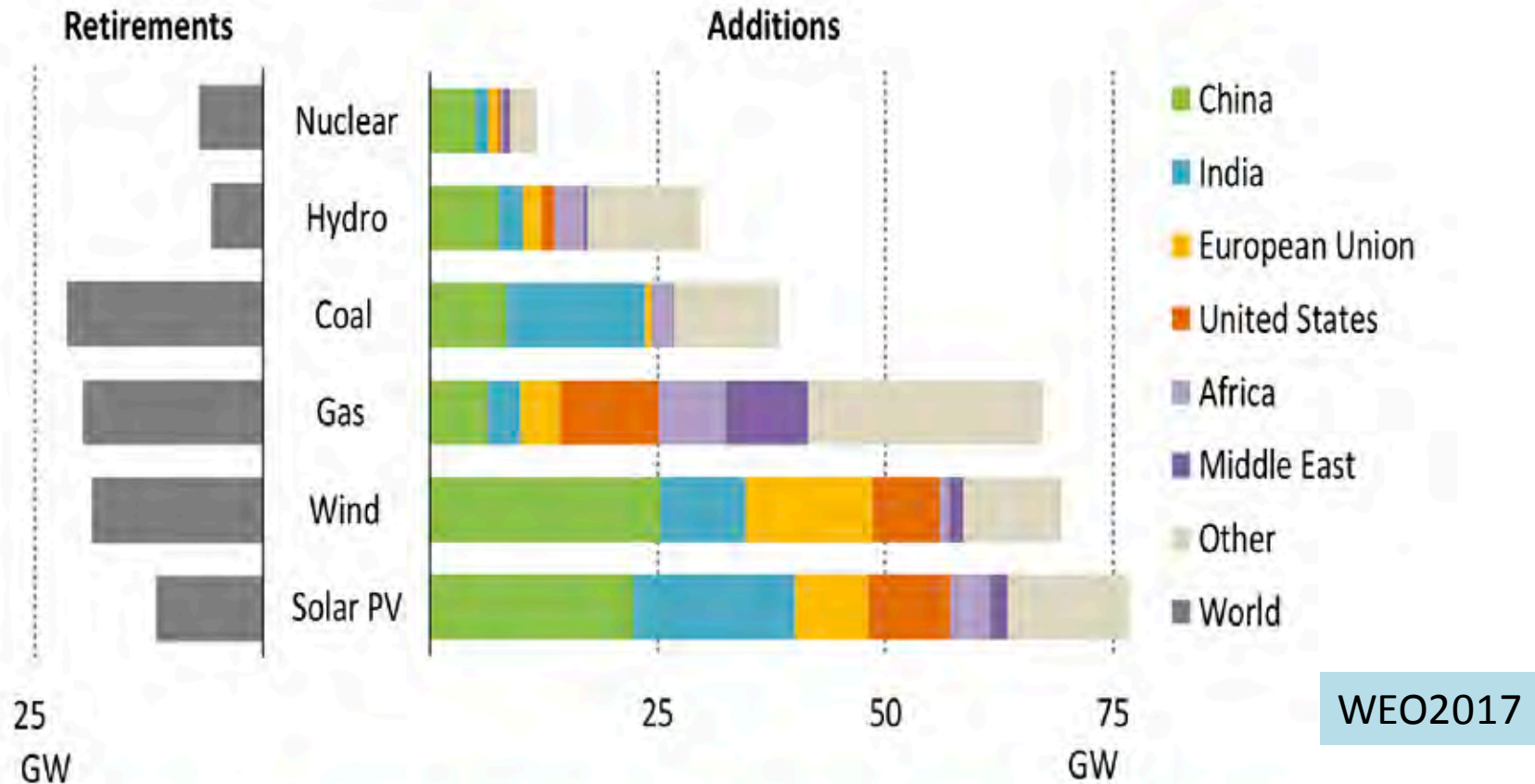
- もはや安全で、きれいで、安い電源とは言えない。
- 使用済み燃料処理、高レベル廃棄物や福島デブリの量及び毒性の減容に小型高速炉が必要。
- 安全保障や国防の観点から見直すべき。日米の戦略的協力の一環。原子力潜水艦？
- 分散型電源として再生エネルギーとの共存を図るべき。
- 東電問題、福島廃炉、再生エネルギー活用、電力市場改革、国際系統線連携と包括的に考えるべき。東電の**原発大政奉還**が第一歩に。

五大原発国の変化：原子力発電のリーダーは中国、インド、ロシアへ。



EUがトップの座を中国に譲る。米国も減少。日本は30GW（フクシマ以前の2/3へ）、6位に落ちる。

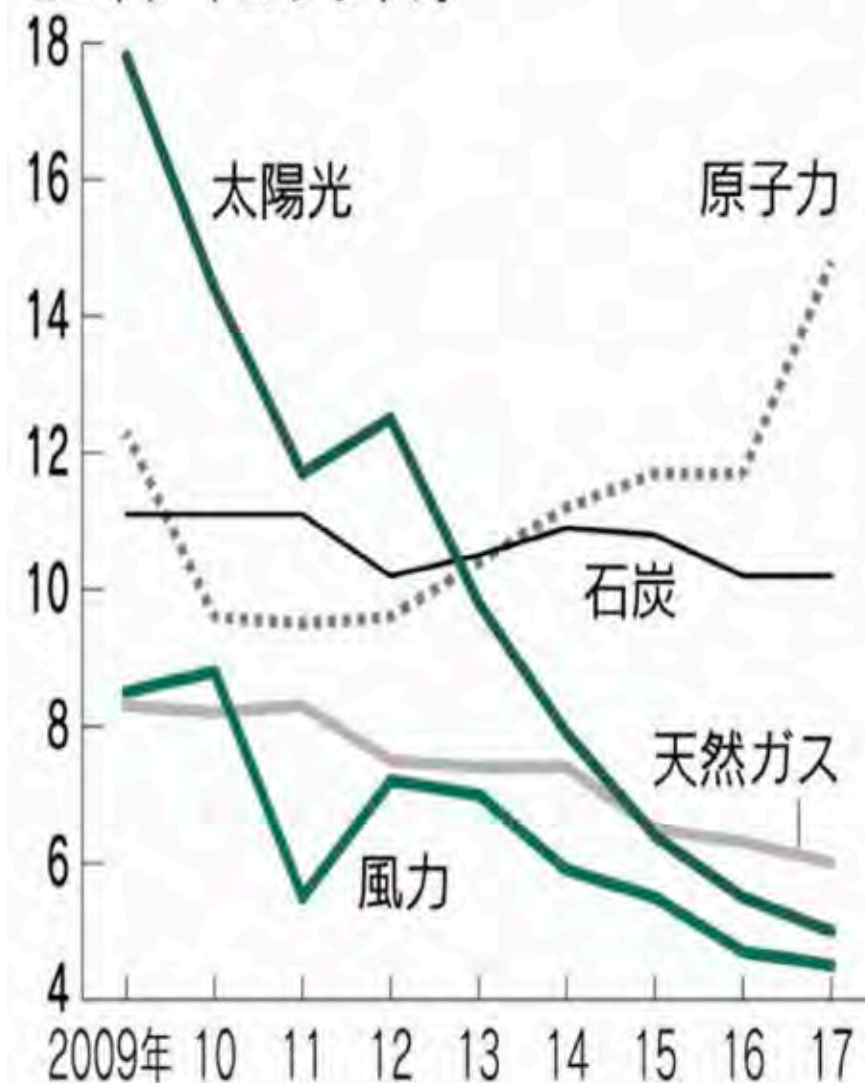
電源の年平均新規追加と退出量 (2017-2040) (新政策シナリオ)



自然エネルギーが能力増加分の60%を占める。原子力は小さく見えるがそれでも年10GWの新設が必要。

再生エネの発電コストが世界で急落

セント／キロワット時



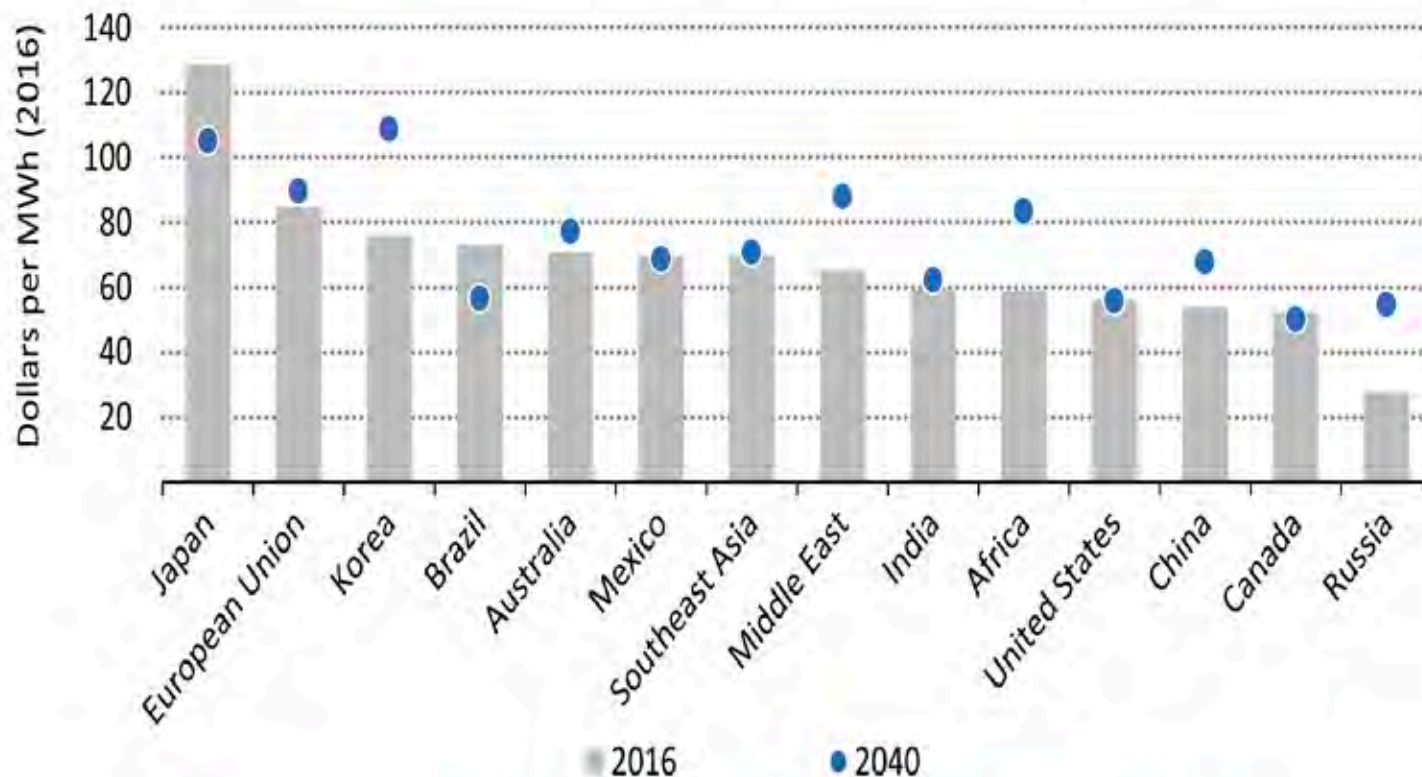
(注) 米投資銀行ラザードの資料から作成

日経新聞より

中国での電源の建設単価比較 (円/w)

	2013	2014	2015	2016
石炭 (USC)	53	55	61	52
水力	154	198	219	179
原子力	241	209	351	313
風力	123	128	147	126
太陽光	145	148	166	137

地域別総発電コスト比較 (新政策シナリオ)



WEO2017

デジタル化、電気自動車利用、サービス経済など電力化は世界中で進む。電力コストの最も高い日本の電源選択は持続可能な範囲で低コストの追求であるべき。安い自然エネルギーなら輸入することも考えるられる。

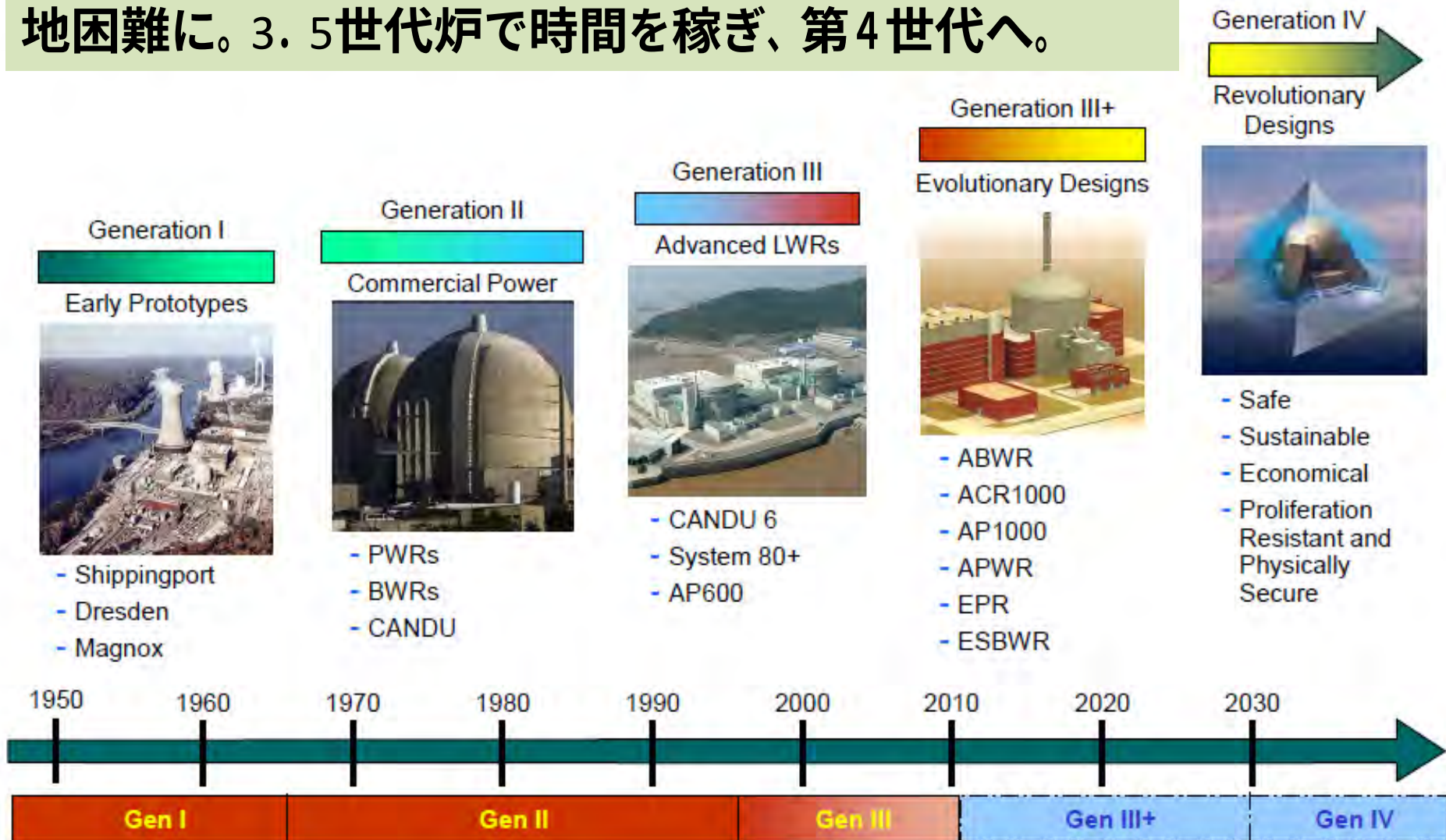
原子炉建設の推移：年20基以上建設した時代もあったが、2030年代には多くの軽水炉が廃炉へ。

IEAによれば2040年までに200基（現能力の40%）の軽水炉が廃炉になる。

WEO2014

原子炉の技術的進化の歴史

軽水炉は福島事故で建設遅延、西側諸国での新規立地困難に。3. 5世代炉で時間を稼ぎ、第4世代へ。



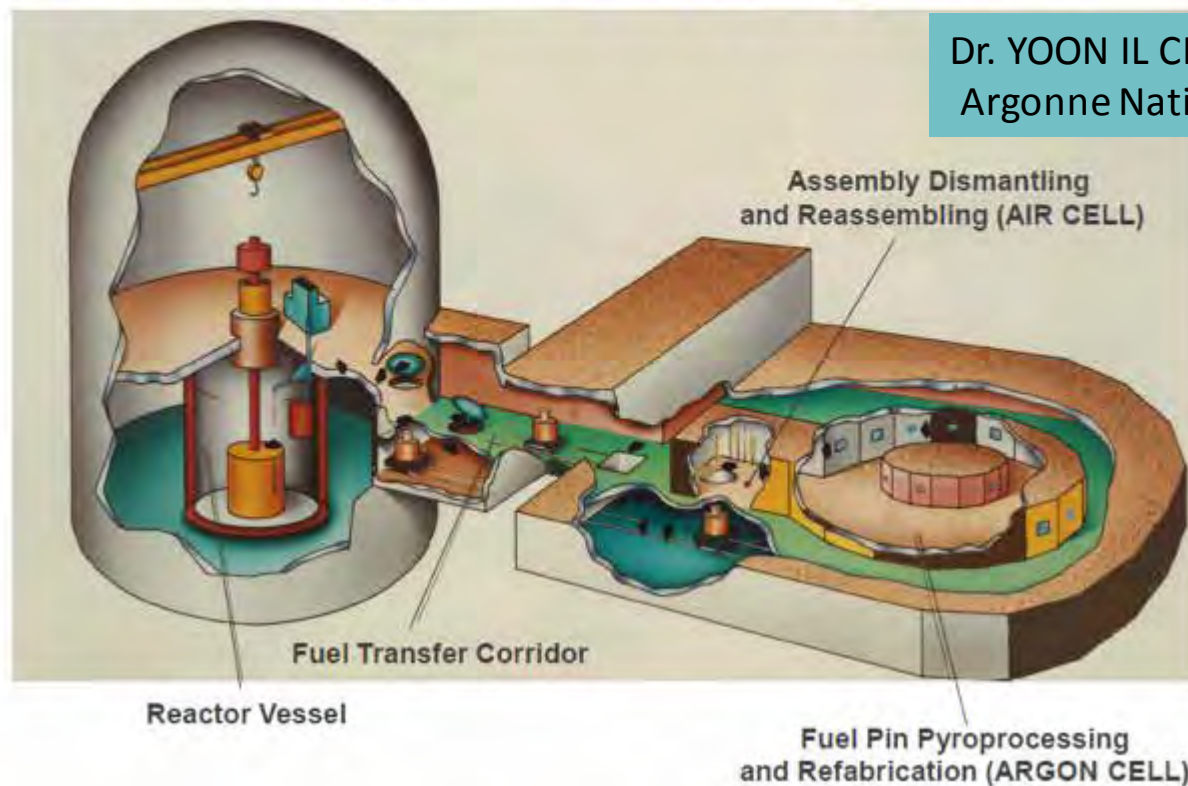
米国でも様々なベンチャーが第四世代炉を開発中である。

State of play among nuclear fission innovators



「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。

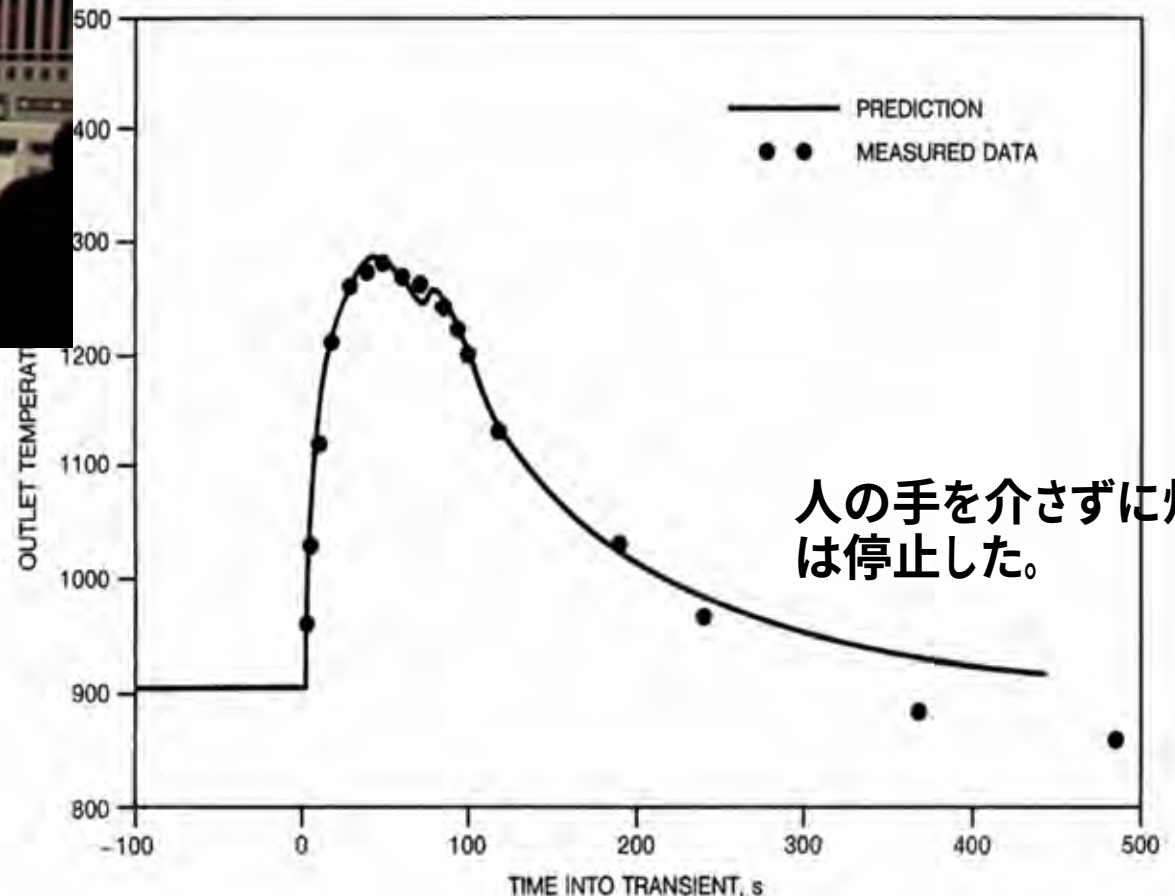
統合型高速炉の技術特性

- ü 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 (受動的) 安全性が実証された (1986年の実験)
 - 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
 - 湿式再処理と比べ施設がコンパクトでコストも安い
- ü 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
- ü 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。

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



人の手を介さずに炉は停止した。

Dr. YOON IL CHANG
Argonne National Laboratory

乾式再処理施設は湿式と比べ施設がコンパクトなので建設コストがかなり安いと考えられる。

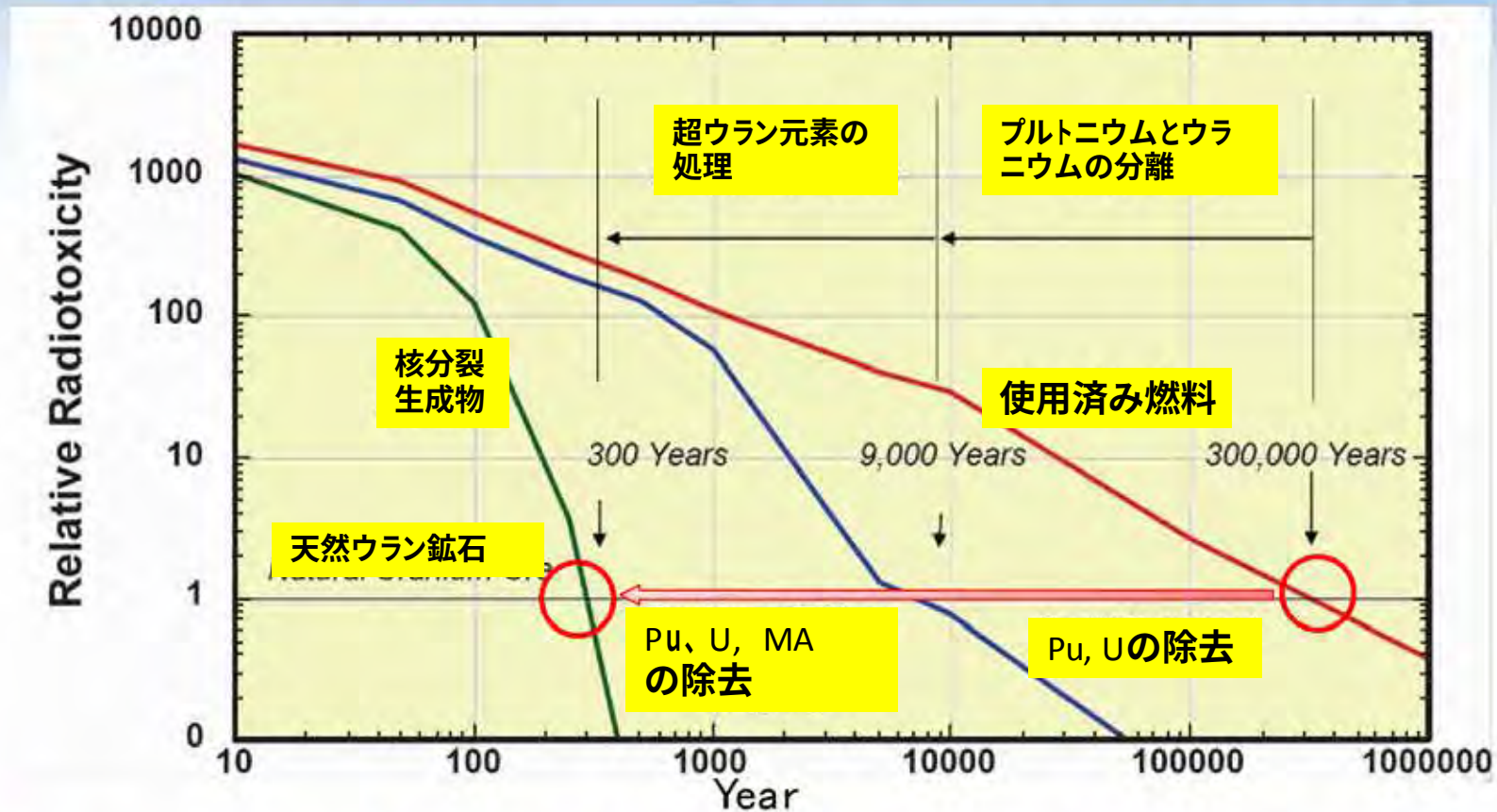
Capital Cost Comparison (\$million) Fuel Cycle Facility for 1400 MWe Fast Reactor

	Pyroprocessing	Aqueous Reprocessing
<u>Size and Commodities</u>		
Building Volume, ft ³	852,500	5,314,000
Volume of Process Cells, ft ³	41,260	424,300
High Density Concrete, cy	133	3,000
Normal Density Concrete, cy	7,970	35-40,000
<u>Capital Cost, \$million</u>		
Facility and Construction	65.2	186.0
Equipment Systems	31.0	311.0
Contingencies	<u>24.0</u>	<u>124.2</u>
Total	120.2	621.2

(五分の一という試算)

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

ウラン、プルトニウム、MA(超ウラン元素) の除去により30万年の問題を三百年の問題に変えることができる。

a

リッコーバー提督の伝説：軽水炉の成功が高速炉をクラウディングアウトした。

©Pandora's Promise, LLC
映像提供：フィルムヴォイス



両国は、より強力に対等な同盟にするためには、一流国家(tier-one nations)の見方から臨むことが必要。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。

提案：日米協力で福島第一原子力発電所の使用済み燃料とデブリ処理システムの実証実験を！

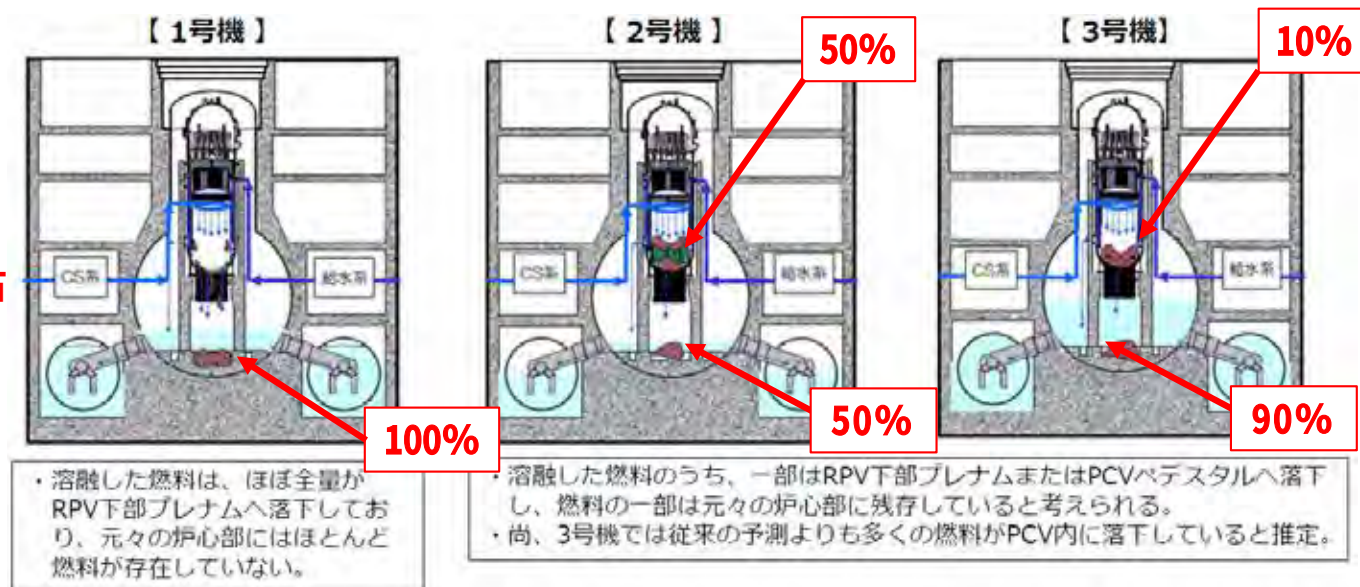
- 福島第一原発の汚染された使用済み燃料と炉心デブリは県外に持ち出すことは難しい。
- デブリの石棺方式は取らない。
- 福島第二原発は廃炉でない別の活用の道がある。
- 電解型乾式再処理システムはデブリ処理にも有効。(再利用できるPu, U, MAと高レベル廃棄物(300年型)の分離)
- 統合型高速炉(GEのSPRISM炉)での燃焼実証。
- 高レベル廃棄物(300年型)の貯蔵管理廃棄実験。
- 従来の各燃料サイクルを補完するモデル開発と人材育成。
- 米国、韓国などとの国際協力プロジェクト。 日韓関係改善の切り札。 原子力平和利用のモデルを提示。
- 米国は商業再処理を推進しない国策を取るが、この技術で福島復興には協力したいという立場。
- 2018年に来る現行日米原子力協定期限と延長問題への解決策

**将来の高速炉サイクルオプションとしての
小型金属燃料高速炉と乾式サイクル施設を統合した
統合型高速炉 (IFR) の技術的可能性調査**

ニュークリア・サロン(NSF)

検討例：福島第一原子力発電所の各号機の燃料デブリと核物質量（推定）

SAMPSONコードによる解析^{*2}等を参考にして、炉心デブリの移行率を右記の数字のように仮定



1～3号機の炉心・格納容器の状態の推定^{*1}

各号機の炉心燃料、制御棒、構造材の存在量^{*3}等を踏まえて、デブリ量と主要組成を以下のように推定

	【1号機】	【2号機】	【3号機】
炉心領域デブリ量（約120トン）：	0	約100トン	約20トン
MCCIデブリ量（740トン）：	約260トン	約170トン	約310トン
・炉心構造材(SUS、Zry)等と溶融混合した炉心領域デブリの主要組成：(U,Zr) O ₂ 、SUS-Zry合金			
・圧力容器外にてコンクリート等と溶融混合したMCCIデブリの主要組成：(Zr,U)SiO ₄ 、CaAl ₂ Si ₂ O ₈ 等			

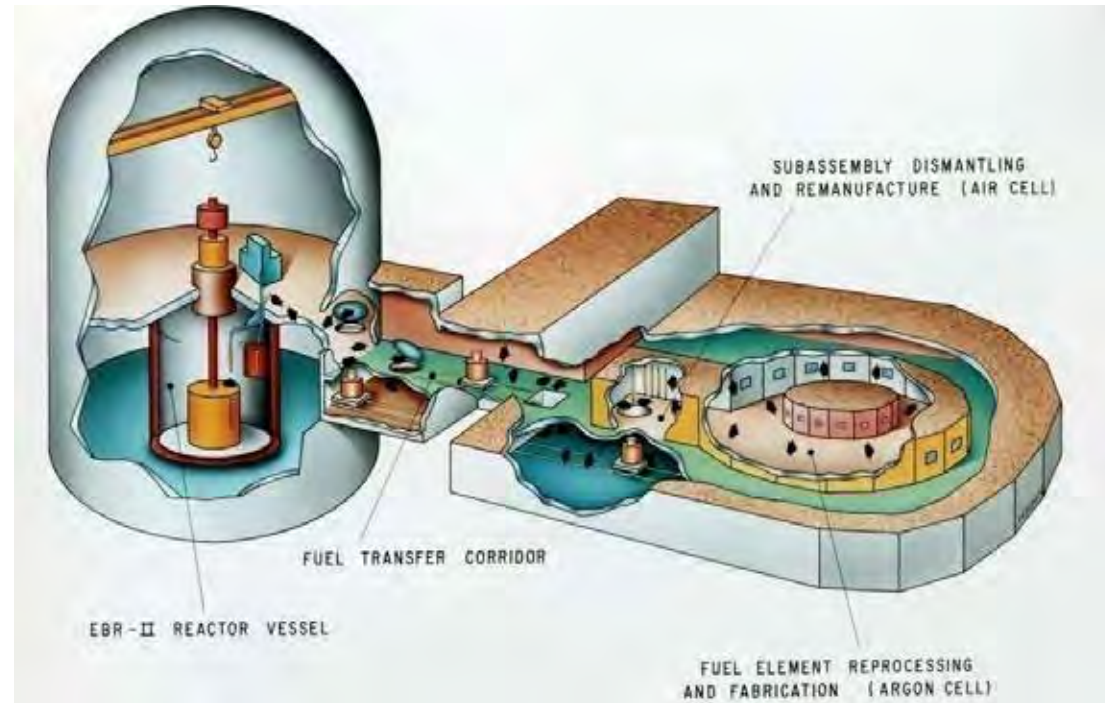
1～3号機のデブリ中の核物質の平均組成として、経過年数が最長（20年）で、マイナーアクチニド（MA）含有率が最大で、ボイド反応度が厳しくなる組成を使用

⇒超ウラン元素（TRU：Pu+MA）重量は1.94トン、重金属（HM）重量は251トン

*1：東京電力ホームページ（平成25年12月13日）「福島第一原子力発電所1～3号機の炉心・格納容器の状態の推定と未解明問題に関する検討第1回進捗報告」より抜粋
 *2：SAMPSONコードによる事故事象進展の解析、日本原子力学会、秋の大会、平成27年9月11日、内藤正則、一般財団法人エネルギー総合工学研究所
 *3：T. Washiya et al, Study of treatment scenarios for fuel debris removed from Fukushima Daiichi NPS, Proc. of ICONE-23, May 17-21, 2015, Chiba, Japan

金属燃料炉＋乾式再処理一体型概念 (IFR) の可能性

- ü 燃料デブリからTRU燃料を製造
小型高速炉でTRU燃料を燃焼、
使用済燃料を再処理してリサイ
クルする「高速炉と燃料サイク
ル施設を統合した統合型（一体
型）高速炉(IFR)概念」
- ü 燃料デブリ中に存在するウラン
等の重金属 (HM) 量:約250トン
その内超ウラン元素 (TRU) 量:
約1.9トン
- ü 構想
 - ・ 固有安全性に優れたナトリウム冷却小型金属燃料高速炉 (原子炉の熱出力19万kWt)
 - ・ デブリ処理が可能な金属燃料乾式法を適用

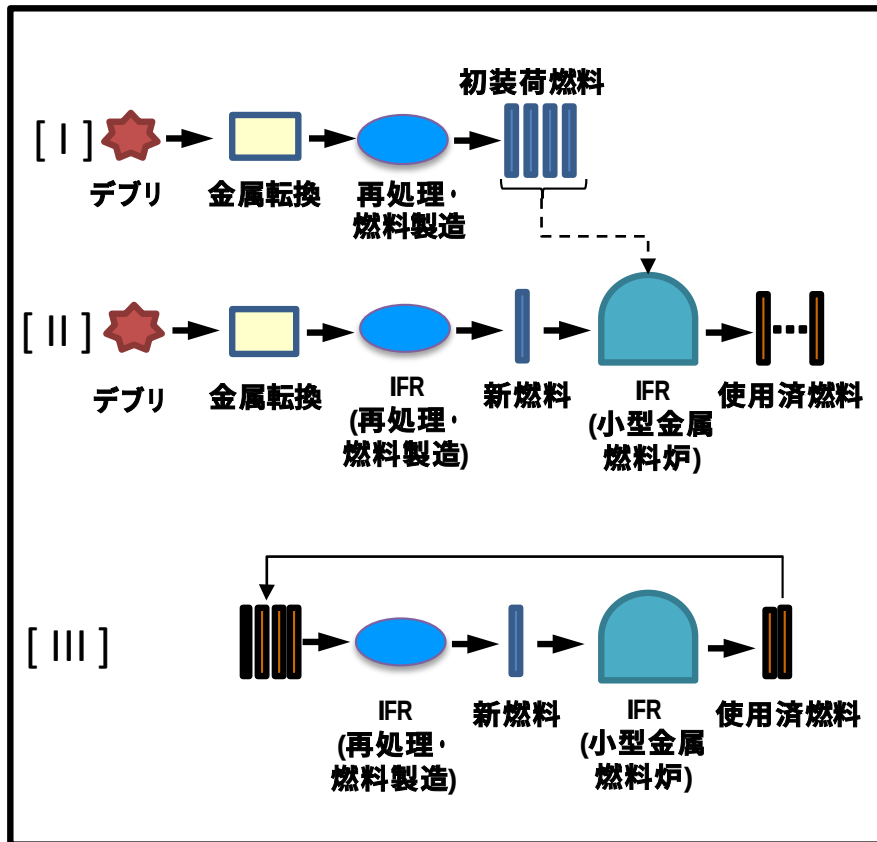


高速炉と燃料サイクル施設を統合したIFR概念図
(米国アルゴンヌ国立研究所の高速増殖実験炉EBR-IIと乾式
サイクル施設(FCF)の例)

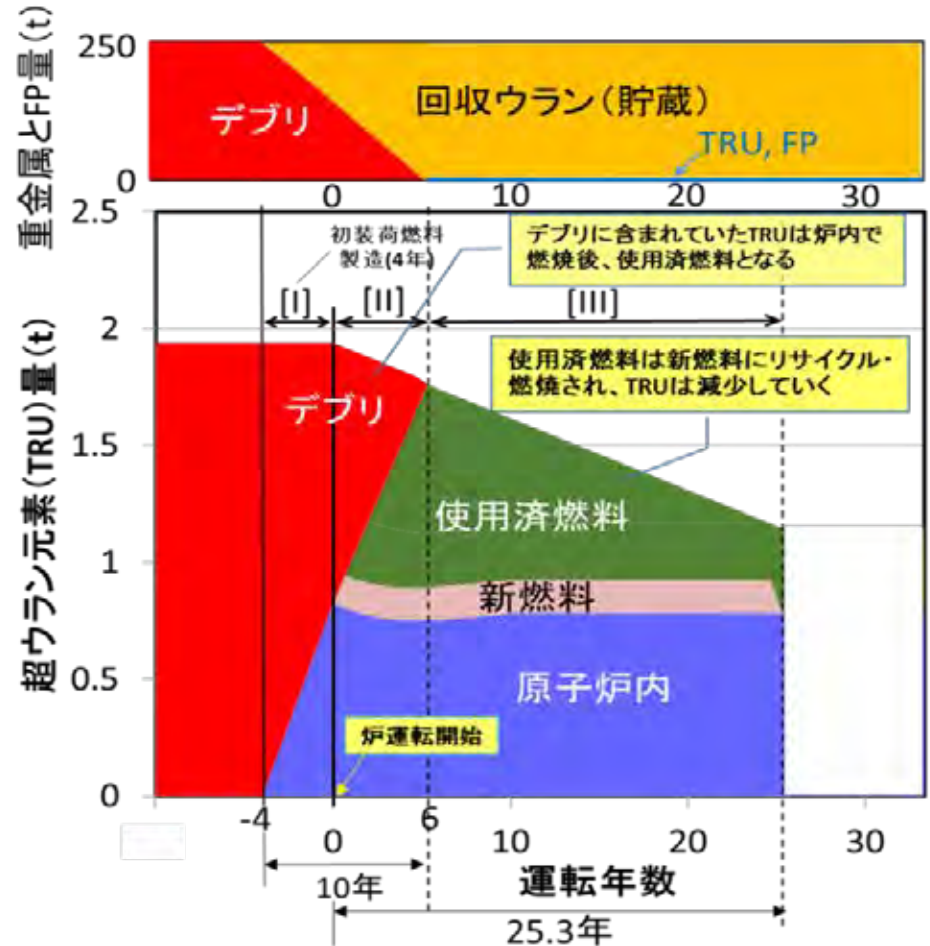
(出典: Y. I. Chang, "Integral fast reactor – a next-generation reactor concept," in Panel on future of nuclear Great Lakes symposium on smart grid and the new energy economy, Sept. 24-26, 2012.)

デブリの処理スキームと超ウラン元素の減少

- TRU燃焼特性を評価した結果、当初15年を想定したデブリの処理期間は10年となった。
- IFRの運用から25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 (TRU) は、使用済燃料中と炉内残留分を合わせて1.2トンまで減少。**
それ以降は、燃料製造に必要なTRU量が不足するため、運転継続のためには外部からTRUを調達する必要がある。



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

炉とサイクル施設のコスト評価

[原子炉施設]

- ｜ 熱出力19万kWt (電気出力7万kWe) の小型金属燃料高速炉の建設コストを、以下の手順で概略評価
 - ・ 主要仕様を設定し、概略主系統図、原子炉構造概念図、原子炉建屋概念図を作成
 - ・ 既往研究の物量データを参考に、物量を算出
 - ・ JAEAの経済性評価コードを用いて建設費を概略評価
- ｜ 評価結果： 建設費 約1,100億円 (建設単価 約160万円/kWe)
(但し、設計した結果ではなく大きな不確定性がある)

[サイクル施設]

- ｜ 年間再処理容量約30tHM、年間燃料製造容量0.72tHMの乾式リサイクル施設の建設コストを、以下の手順で概略評価
 - ・ 概略プロセスフロー、マスフローを設定し、主要機器の処理容量から主要機器数を概算
 - ・ リサイクルプラントセル容積及び建屋容積を既往の研究例を参考に概略評価
- ｜ 評価結果：建設費を数百億円程度にできる可能性はあるが、再処理設備の不確かさは大きく、設計検討も実施していないことから、処理量が同等な他の設計研究での評価値も参考にしておく必要がある。

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。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。そのような話を聞いたのは初めてです。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。」