

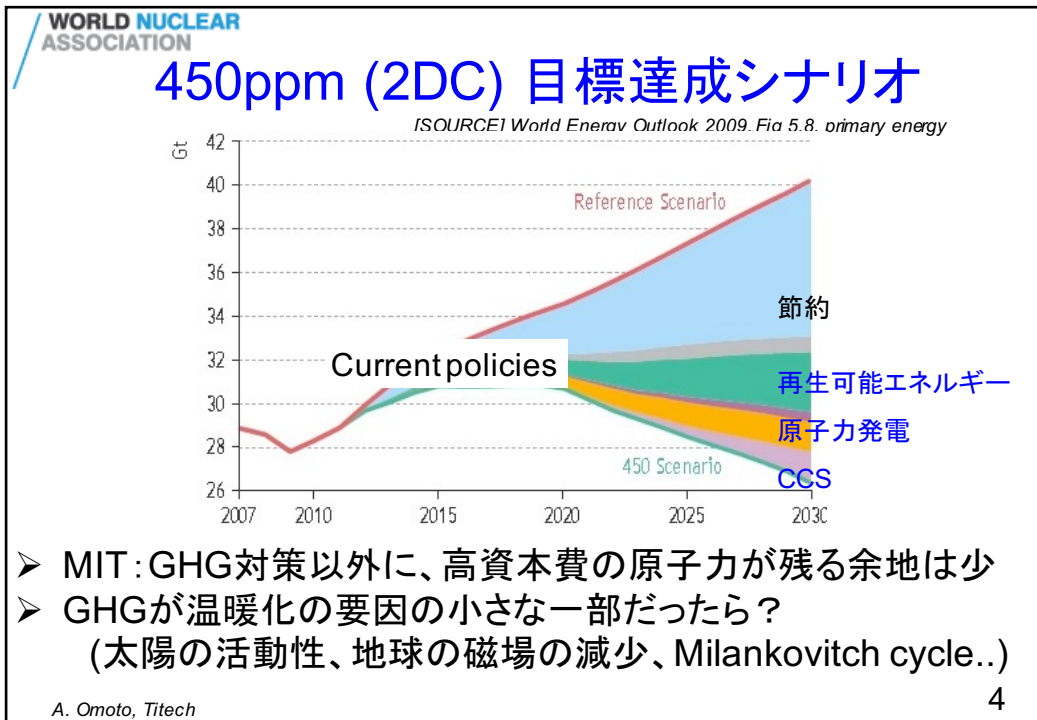
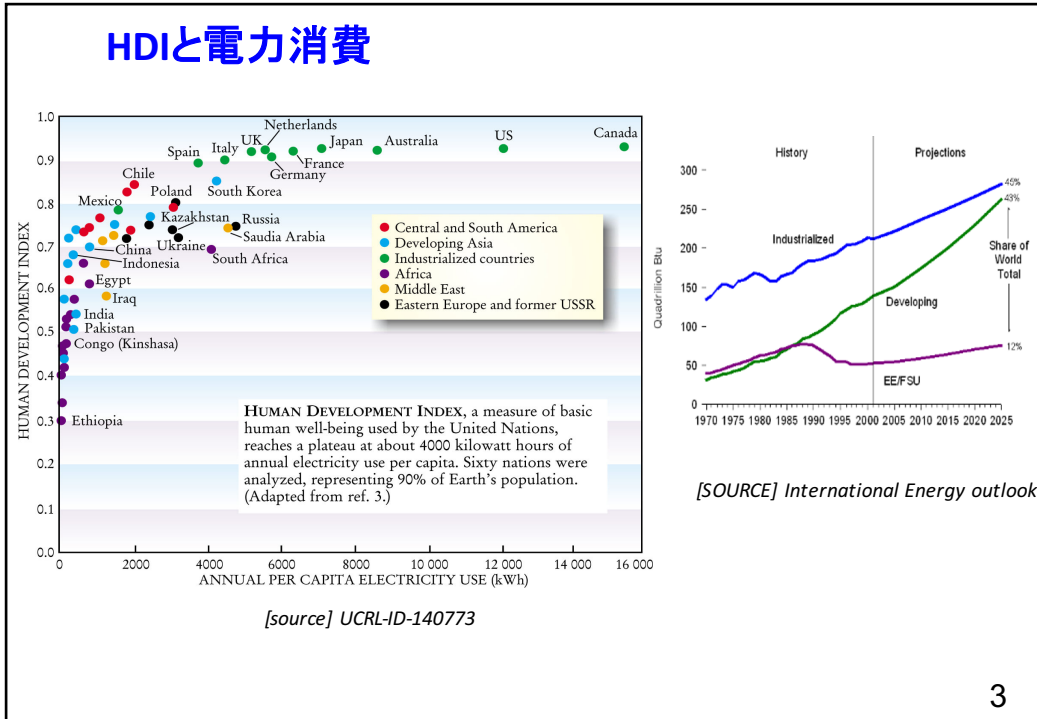
低炭素電力網の中の再生可能エネルギーと原子力



東工大 尾本 彰

構成

1. はじめに
2. 原子力・電力を巡るパラダイムシフト
3. 将来の低炭素電力網のなかの原子力



1. はじめに

2. 原子力・電力を巡るパラダイムシフト

3. 将来の低炭素電力網のなかの原子力

5

原子力・電力を巡るパラダイムシフト 1

国有或は強い規制を受けてきたインフラ部門の規制緩和

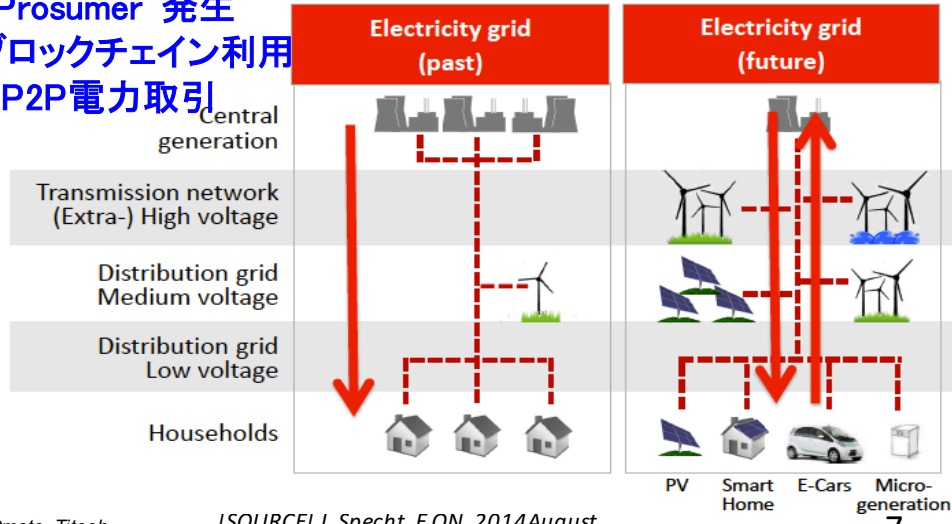
- 鉄道・郵便・通信・エネルギー等
- 先進国では70年代後半から市場原理の導入による価格設定と資源配分へと推移
 - 政府は政策の枠組を設定し環境保護の役割へ
- 電力では、最終的にunbundlingへ
 - 発電と配電部門での競争による電気代を低減と期待
 - 実際の価格決定要因は競争よりも概ね以下の要因大：
 - a) ガス価格などの外的なもの
 - b) FIT(Feed-In-Tariff)・RPS(Renewable Portfolio Standard) といった環境政策の招いたもの
 - c) 風力・太陽光発電のシェア拡大に伴う価格破壊、PTC (Production Tax Credit)・ITC (Investment Tax Credit)による負の価格形成
- 米国では自由化州での新規原子炉建設は無し

A. Omoto, Titech

6

原子力・電力を巡るパラダイムシフト 2

- 再生可能エネルギーの浸透 → 給電司令に馴染まない電力が増加しSupply-contingent utilization Systemへ
- “Prosumer”発生
- ブロックチェーン利用 P2P電力取引



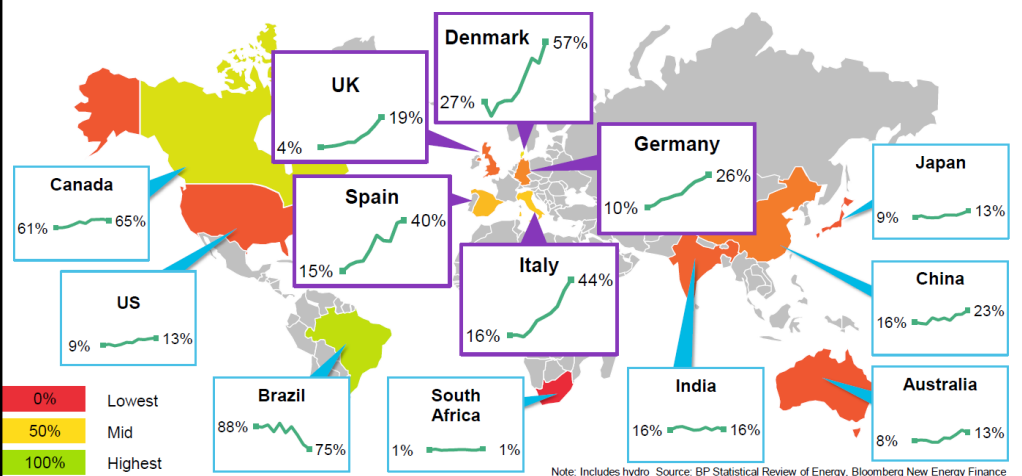
A. Omoto, Titech

[SOURCE] J. Specht, E.ON, 2014August

7

再生可能エネルギーのシェア変化(2004-2014)

Dispatchable renewables (水力, バイオガス, 地熱) + intermittent renewables (太陽光, 風力) の合計



[SOURCE] Liebreich, BNEF, 2016

A. Omoto, Titech

8

- FITによらずとも低い卸電力価格を実現
 - 太陽光: メキシコで\$ 2.69 c/kWh、UAE で\$2.99c/kWh
 - 風力: デンマークで\$5.3c/kWh、ドイツで \$4.9c/kWh、モロッコで \$3.0c/kWh
 - 米国でも\$50/MWhのPVが主流となりつつある

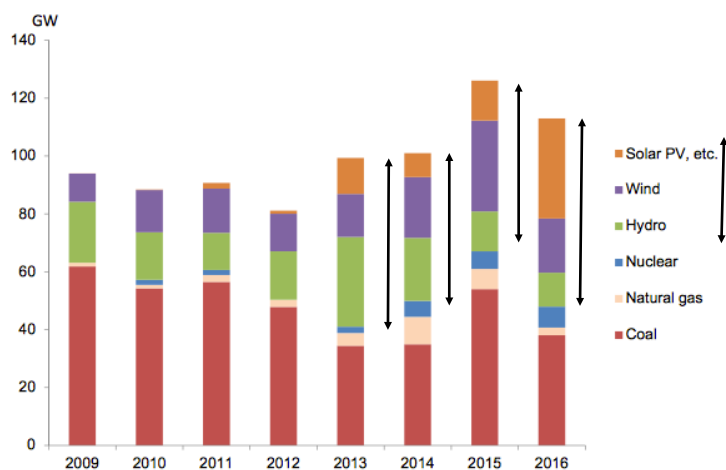
- “Solar becomes the cheapest source of electricity generation in many places including China and India” (F. Birol, executive Director, NEA, 2017 WEO)

A. Omoto, Titech

9

中国

- 年間設置容量: 風力・太陽光 >> 原子力
- 風力・太陽光 へのFIT



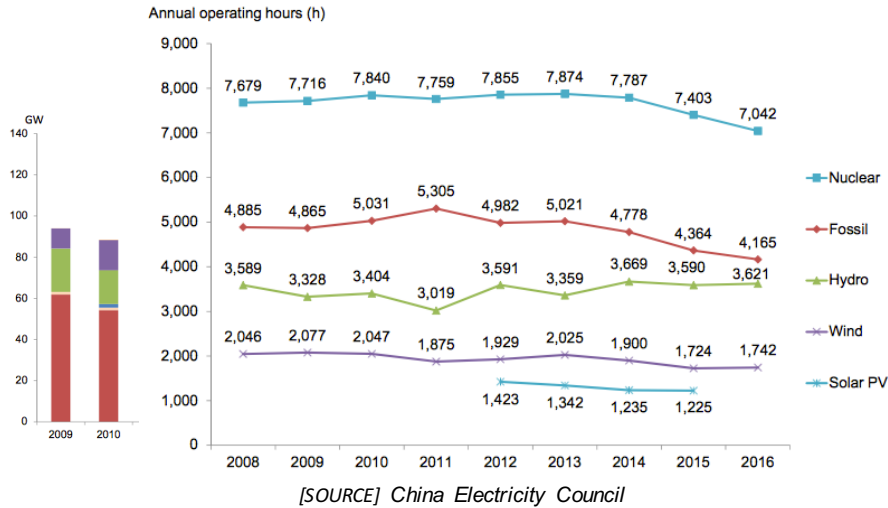
[SOURCE] Lu Zheng, Energy Data and Modelling Center, China

A. Omoto, Titech

10

中国

- 風力・太陽光のシェア拡大と工業生産部門における電力消費の伸び率の低下による原子力・火力の稼働率低下
- 太陽光の出力抑制



A. Omoto, Titech

スウェーデン

2040年に全電力を再生可能エネルギーで賄うことに政府と政党間で合意形成 (Framework agreement, June 201)



Lise Nordin (Swedish Green Party), Minister Ibrahim Baylan (Swedish Social Democratic Party), Lars Hjalmered (Moderate Party), Rickard Nordin (Centre Party) and Penilla Gunther (Christian Democrats) took part in the press conference.
 Photo: Jens Persson/Government Offices
 [Source] <http://www.government.se/articles/2016/06/agreement-on-swedish-energy-policy/>

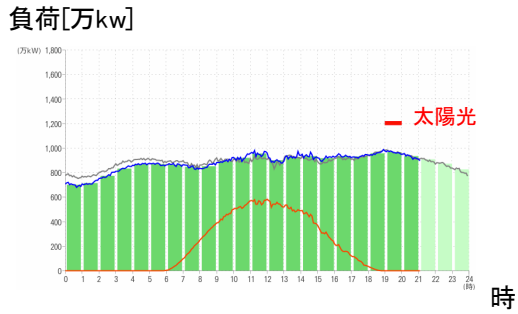
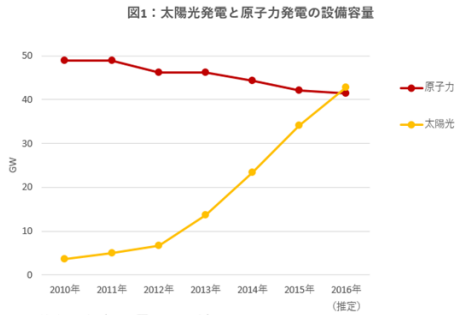
- 10基を限度に既存サイトに新規建設を許容することで原子力を利用する期間は延長
- 揚水発電への転換を含めた既存水力の能力拡大
- 批判的な指摘も
 - 1) 近隣国と相互に強く連携している北欧グリッドで100%とは何を意味するのか
 - 2) 揚水発電への転換の実現性
 - 3) 系統安定性: Hydro (North), PV & Wind (South)

A. Omoto, Titech

日本でも

福島事故後の原子炉数減少と補助金助成の結果、設置容量では2016.12で
 太陽光>原子力
 認可済み太陽光80GWe

九州電力の負荷曲線と太陽光のシェア(赤)
 [source] 九州電力電気予報2017.4.24



GW: キロワット (=100万キロワット)
 日本原子力産業協会と国際エネルギー機関のデータをもとに作成

[SOURCE] 自然エネルギー財団

九州電力の対応策

- 揚水発電の活用
- 大容量蓄電池(容量:30万kWh)の設置
- 太陽光発電の出力制御システムの構築等

[source] 九州電力H28経営計画

A. Omoto, Titech

13

廃止されたゴルフコースの太陽光発電への転換(鹿児島県)



A. Omoto, Titech

[SOURCE] BusinessInsider.com

14

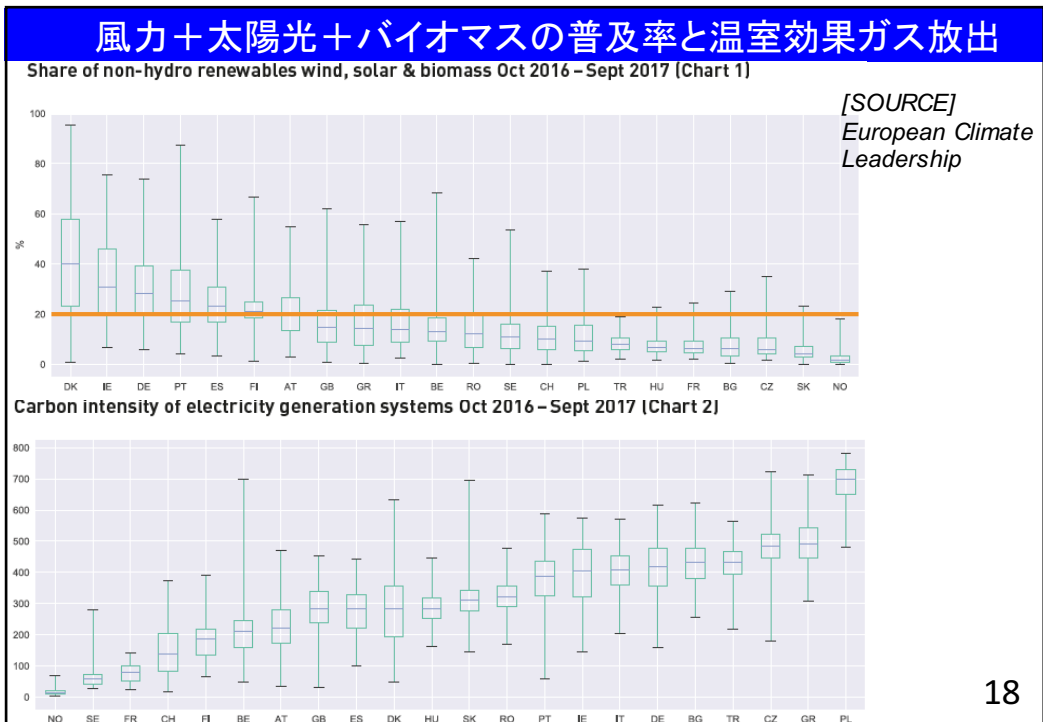
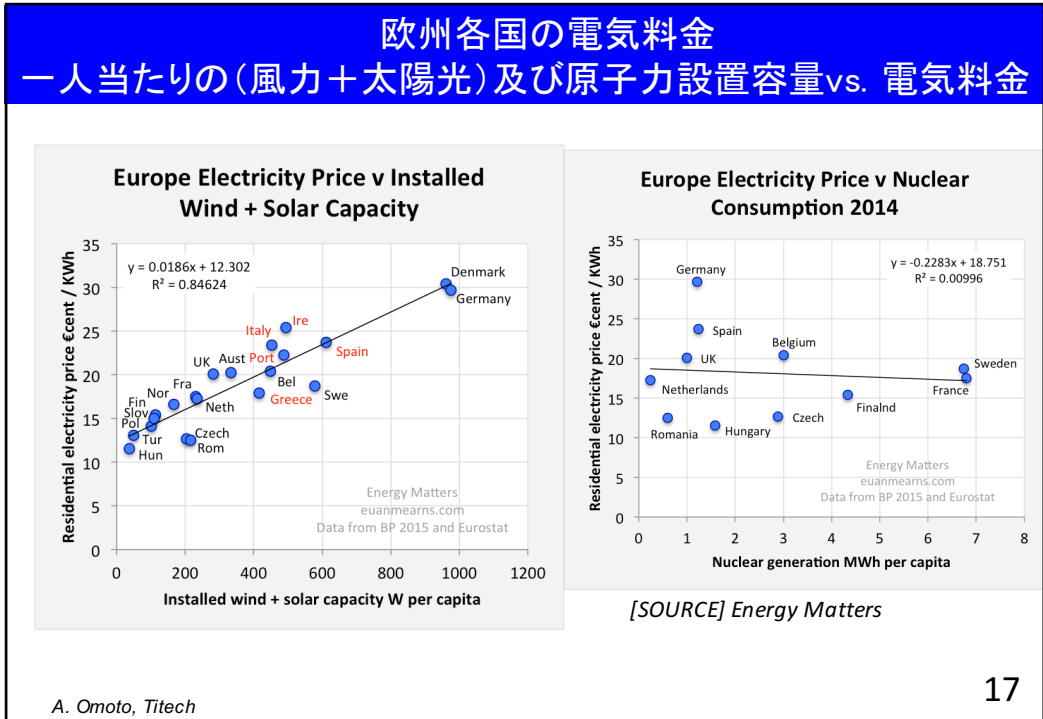


背景に、特定電源(太陽光・風力IR)増加への政策的支援

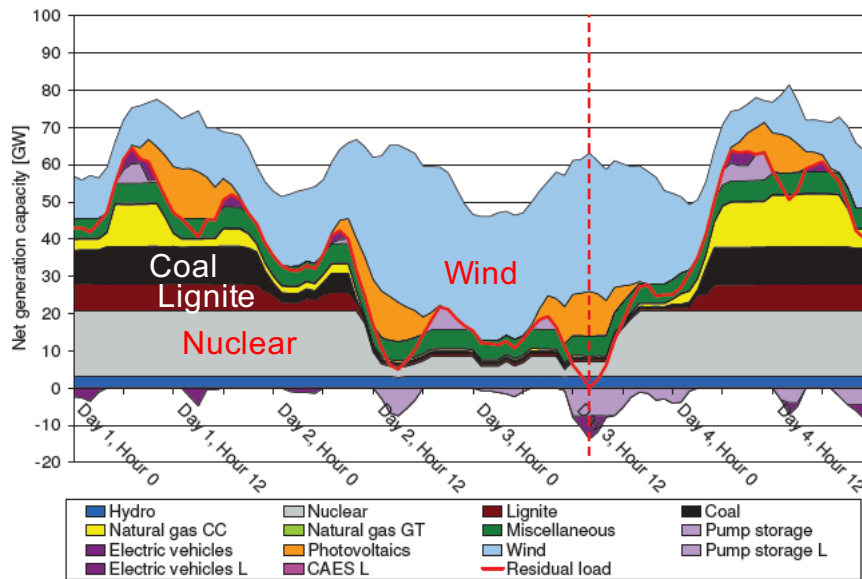
- FIT (Feed-in-Tariff), PTC (Production Tax Credit), RPS (Renewable Portfolio Standard)などの支援方策
 - FIT: 市場小売価格に上乗せした売電価格を設定することで特定技術の利用を促進する政策手段
- このような支援策には以下の批判も声も
 1. 特定電源への肩入れ
 2. 電気料金の高騰
 3. IR事業者はグリッドへの負担(周波数安定化、蓄電池)を負担していない←一方、低電圧事業はネットワーク費用分担で高圧分を持つ必要なく見直し必要論
 4. 「富の移転」: 電気料金あるいは税を通じて多くの人が負担して資金のあるIR事業者に富の移転
 5. これら手段は市場を歪める(MIT Utilities of the Future, UK Upper house report)

A. Omoto, Titech

16



ベースロード領域への風力・太陽光の浸透



(ドイツ) 原子力運転期間延長のケースの仮想的評価

A. Omoto, Titech

安いシェールガスの供給とPTC等による負の電気料金で全米の2/3の原子力発電所は利益を産まない状態に(MIT研究, March 2017)

MIT CEEP
MIT Center for Energy and Environmental Policy Research
Working Paper Series

Early Nuclear Retirements in Deregulated U.S. Markets: Causes, Implications and Policy Options

GEOFFREY HARATYK

MARCH 2017 CEEP WP 2017-009

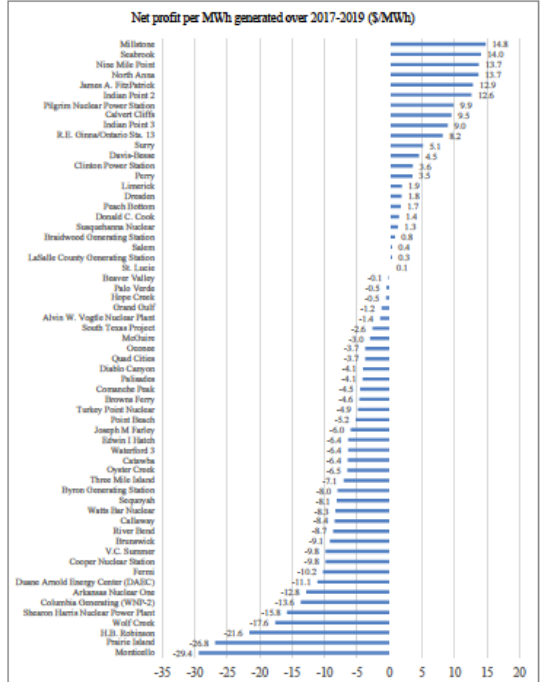
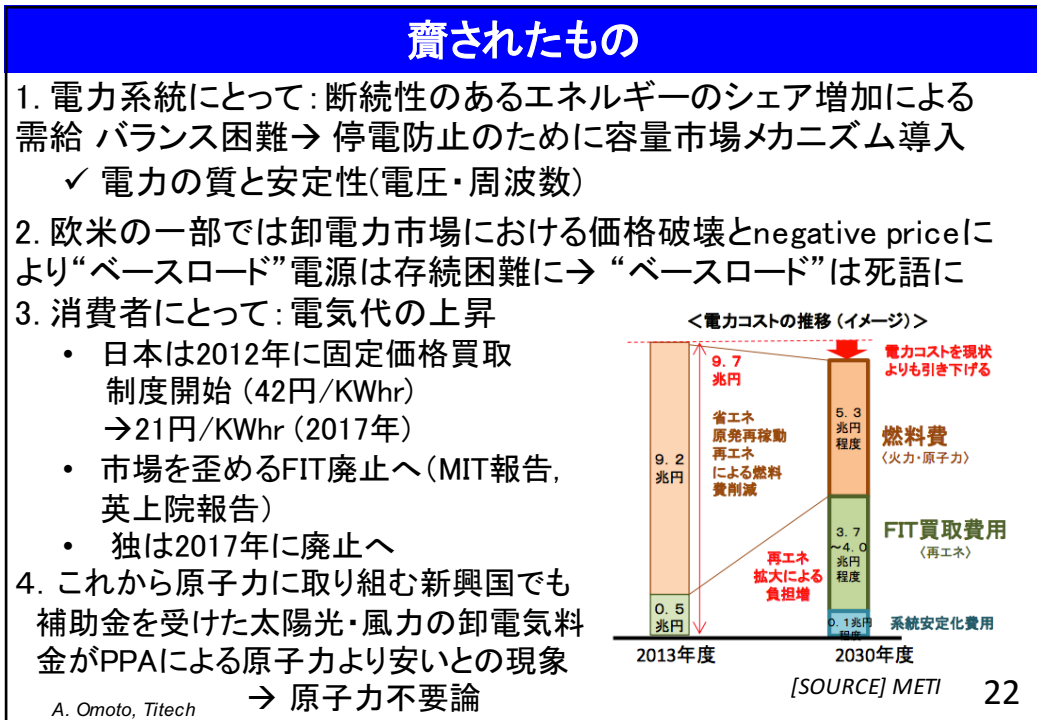
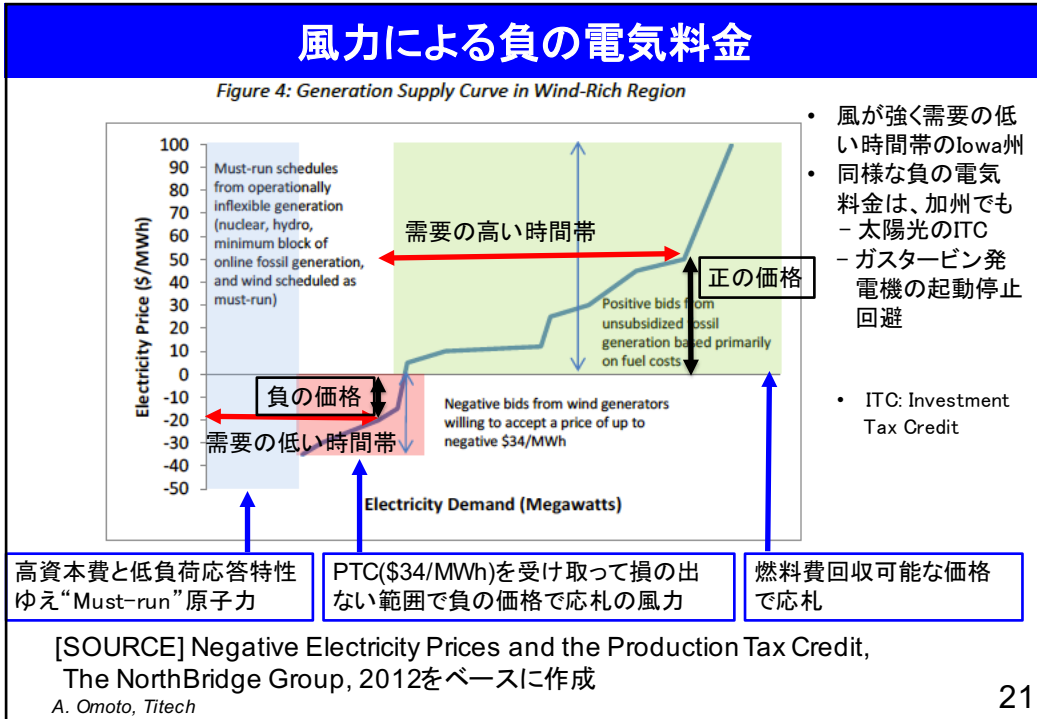


Figure 2. The profitability of the 61 U.S. nuclear plants studied ranges from -\$29 to +\$15/MWh over the 2017-2019 time period.

A. Omoto, Titech



原子力・電力を巡るパラダイムシフト 3

シェールガス(米国)

ペンシルヴァニア州のMarcellus シェールガス田は今やカナダ・イランを超えるガス生産をしており、エネルギーセキュリティは米国にとって今日課題ではない(MIT)

原子力・電力を巡るパラダイムシフト 4

輸送セクターの脱炭素化: 電気/battery/energy carrierの役割増

原子力・電力を巡るパラダイムシフト 5

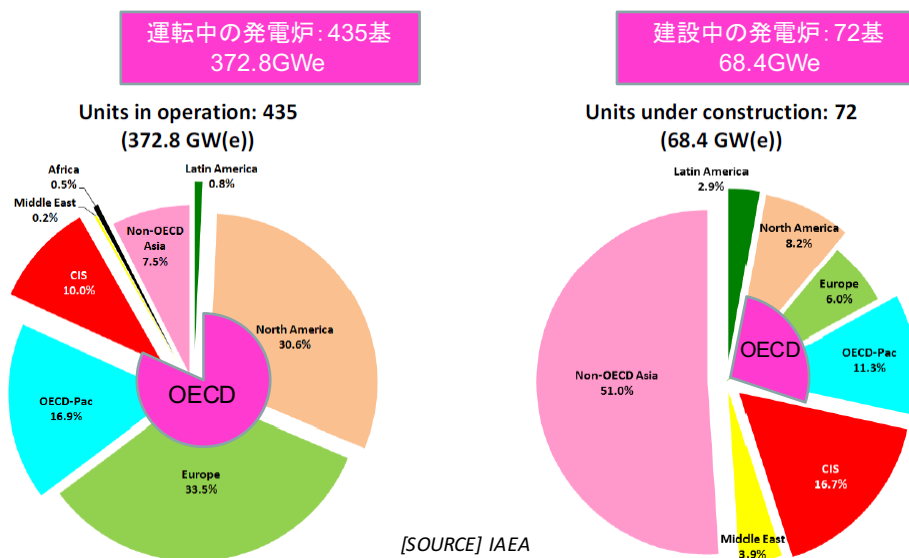
Prosumerの役割: peer-to-peer電力売買、分散しているデマンドサイド資源を纏めて市場へ、低電圧電気におけるネットワーク費用の見直し等... 電圧の点で違うがビットコイン/フィンテックと銀行?

A. Omoto, Titech

23

原子力・電力を巡るパラダイムシフト 6

➤ OECD諸国からnon-OECD 諸国へ あるいは西から東(アジア)へ



[SOURCE] IAEA

A. Omoto, Titech

24

原子力・電力を巡るパラダイムシフト 7

リスク回避姿勢の強い日本(Hofstede)で原子力に関する様々なリスクの認識拡大

- 高い資本費:ファイナンスに伴うリスク
- 許認可における不確かさ(先が見通せない)
- 原子炉事故のリスク
- 政治社会
 - 政権によっては脱原子力政策に転換
 - 訴訟

A. Omoto, Titech

25

人のリスクへの姿勢は何を基準にしているか?

- ✓ 怖れ(Dread)
- ✓ 制御可能性(Control)
- ✓ 自然界のものか否か(Is it a natural risk or a man-made one?)
- ✓ 選択への関与(Choice)
- ✓ 子孫への影響(Effects on children and on future generations)
- ✓ 新たなリスク(New risk)
- ✓ 知識(Awareness)
- ✓ 個人への影響の可能性(Possibility of personal impact)
- ✓ 費用対便益(Cost-benefit ratio)
- ✓ (リスクを生み出すものへの)信頼(Trust)
- ✓ 過去の記憶(Memory of risk)
- ✓ 時間空間的な広がり(Spread over time and space)
- ✓ 個人の安全と資産への影響(Effects on personal safety and personal properties)
- ✓ 公正さ(Fairness)
- ✓ (意思決定の)プロセスProcess

[SOURCE] http://www.bvsde.paho.org/tutorial6/i/pdf/topic_04.pdf

BVSDE: Virtual Library of Sustainable Development and Environmental Health

A. Omoto, Titech

26

1. はじめに

2. 原子力・電力を巡るパラダイムシフト

3. 将来の低炭素電力網のなかの原子力

A. Omoto, Titech

27

原子力発電の将来を決める要素

1. 低炭素社会への移行

概ね2050-2060年までを見て

✓ 電力・輸送セクターの脱炭素化の中で原子力・再生可能エネルギーはどのような役割を果たせるか?

A)脱炭素化の社会的コストを最小限にしつつ

B)太陽光・風力の間欠性による需給ミスマッチに火力によるbackupを最小限にして対応しつつ

C)様々なEnergy Carrierの可能性(水素、アンモニア、メタノール)も考えて

D)必要に応じNegative Carbon Economyも可能なように 等々

→ 原子力の将来は「**原子力・再生可能エネルギー・エネルギーキャリア・需給マネジメントの様々な脱炭素化技術・政策オプションを時系列的にどう配置するべきか**」という課題の一部として考える必要

2. 安全と廃棄物に関する実績と公衆の認識

3. コストと技術開発

A. Omoto, Titech

28

将来の原子炉の満たすべき条件

伝統的に

1. ベースロード電源としての信頼性・経済性
2. 持続可能性(資源リサイクル)
3. 安全性

今日の環境と将来を考えると追加・修正必要

3. a) 外因事象に対する強い耐性
3. b) 炉心熔融を起こしても、環境への放射性物質放出が長期にわたる避難(移住)を必要としないこと

4. 低炭素社会への適合性

- ✓ 低炭素社会への転換のなかで、更にIntermittent Renewables[IRs]との両立(貯蔵ないしハイブリッド運転)が可能な給電指令可能電源という条件の追加

A. Omoto, Titech

29

[参考]長期に亘る移住に繋る大規模放出回避 は福島第一事故後、事実上国際安全基準に

1. CNS(原子力安全条約)

✓1986年のチェルノブイル事故の反省を踏まえ1)国際協力により原子力の安全の世界的な達成・維持、2)原子力施設による放射線被ばく量とその影響の低減、3)放射線事故の防止とその影響の緩和を目的とした条約締結

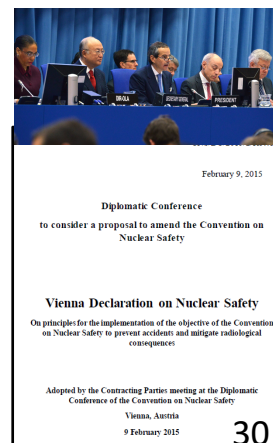
✓2度と重大な事故を起こさないとの決意にも拘らず
福島第一事故発生→2015年外交会議でウイーン宣言
•新たな炉では、長期に亘る移住に繋がる早期
大規模の放射性物質放出抑制

2. IAEA Specific Safety Requirement-2/1, Rev.1

早期大規模放射性物質放出をpractically eliminate

3. EC Directive 2014/87/EURATOM

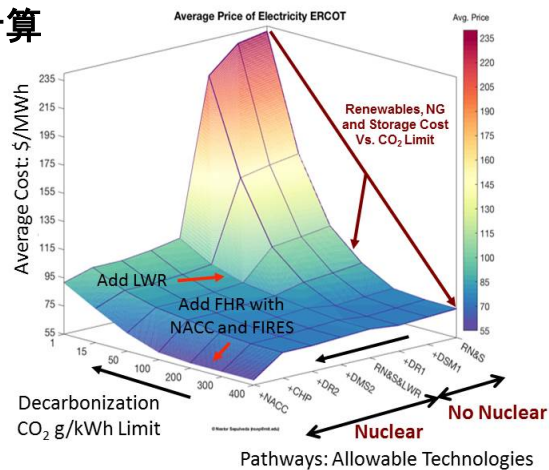
A. Omoto, Titech



A. 国民の経済的負担を最小限にしつつ低炭素グリッド [LCG]を実現するには？

例1: MIT GenX モデル計算

- 原子力抜きでは負担の少ない脱炭素化は困難
- 資本費の高い原子力・太陽光・風力は設備利用率を高める必要



A. Omoto, Titech

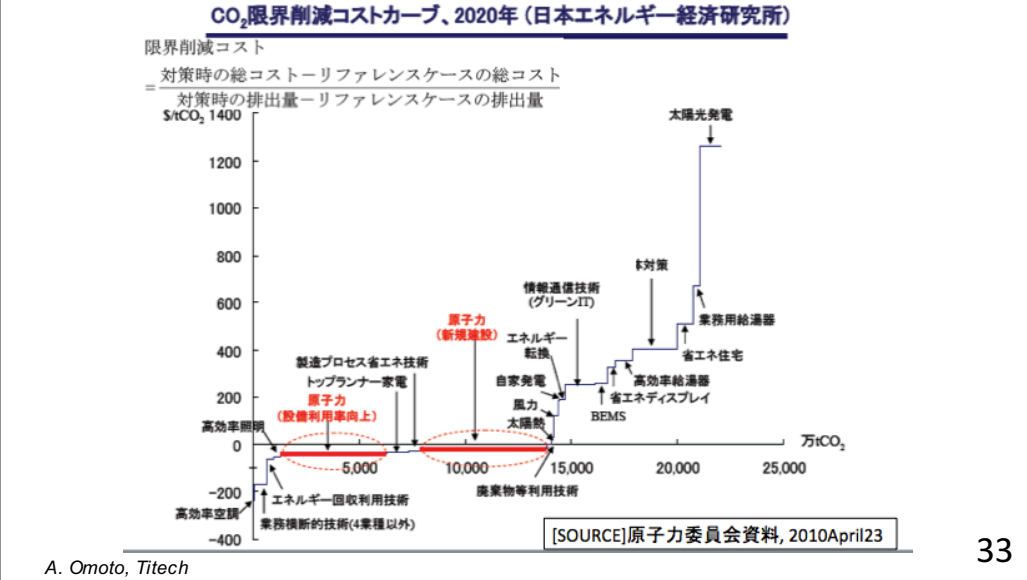
31

- ただ、Gen-X モデルで脱炭素費用が高いのは、太陽光・風力の間歇性による需給ミスマッチを蓄電池で補償のため
- しかし
 - ✓ 熱貯蔵の方が蓄電池より安い
DoEによる開発目標: 熱15\$/KWh、蓄電池 150\$/KWh
 - ✓ 再生可能エネルギー側での需給ミスマッチを埋める活動を見逃す(flexible renewables, energy resources aggregator)
 - ✓ 原子炉によるハイブリッド生産は、太陽光・風力の間歇性による需給ミスマッチ問題を緩和可能だがモデルではオプションに入っていない
- 原子炉による熱の貯蔵とハイブリッド生産は、原子力・太陽光・風力の設置された設備の稼働率および太陽光・風力のシェアの向上に貢献

A. Omoto, Titech

32

例2: MAC (Marginal Abatement Cost 限界削減費用)カーブを用いた優先対策選定



B. intermittencyによる需給ミスマッチを火力発電によるバックアップなしでどう調整するか？

(既存)電力貯蔵 : 揚水システム、バッテリーなど

- 経済的な熱貯蔵
- ハイブリッド生産: 資本費の高い原子力/太陽熱発電設備で系統動向に応じて電力/水素を生産切り替え (高温炉が必要)
- 原子力トッピングサイクル
 - (1) 電力低負荷時: 原子炉定格出力
 - (2) ピーク電力時: 天然ガス(短期的)、蓄熱、バイオ燃料、水素を用いた追加的な高効率でのピーク電力生産
- 一方、再生可能エネルギー側でも、flexible renewables (バイオガス)、Energy Resource Aggregatorによるprosumerの資源活用(ネガワット、家庭・工場の蓄電池、EV等)の「仮想発電所」

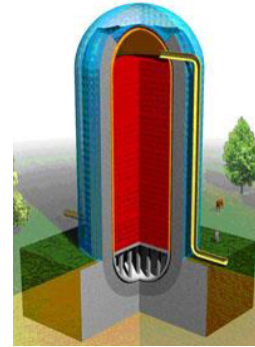
熱貯蔵



液化空気の貯蔵実証プラント(Manchester, UK)

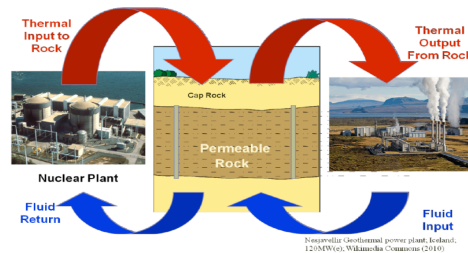


太陽熱による熱水貯蔵プラント(Nevada, USA)



Firebrick

岩体貯蔵

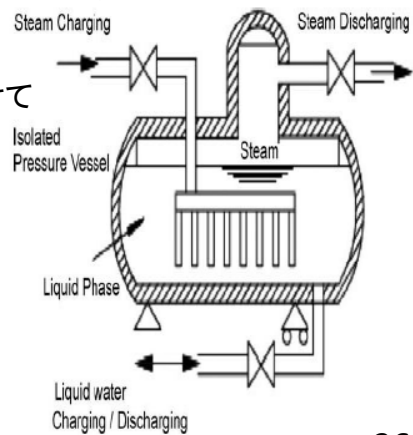


A. Omoto, Titech

35

軽水炉熱貯蔵

- ✓ 風力・太陽光が供給力の多くを占め卸電力価格の安い時には定格熱出力運転の原子炉蒸気の一部をSteam accumulator(実際は熱水貯蔵)に貯蔵し、風力・太陽光の供給力が小さい時に放出し発電
- ✓ 既存の軽水炉のタービン建屋とタービン発電機を改造(20%増出力)
- ✓ MIT-Exelon workshop (2017 夏)
- ✓ ExelonはPWR/BWR各1基での実施に向けて
詳細設計実施中。アリゾナ電力が後続
- ✓ WH方式(コンクリートへの油貯蔵)が
効率が良い(MIT)



A. Omoto, Titech

36

Steam accumulatorは実績ある技術

**Charlottenberg Power Station
Steam Accumulator, Berlin**

- Built 1929, >600 t steam
- 50 MWe from separate turbine



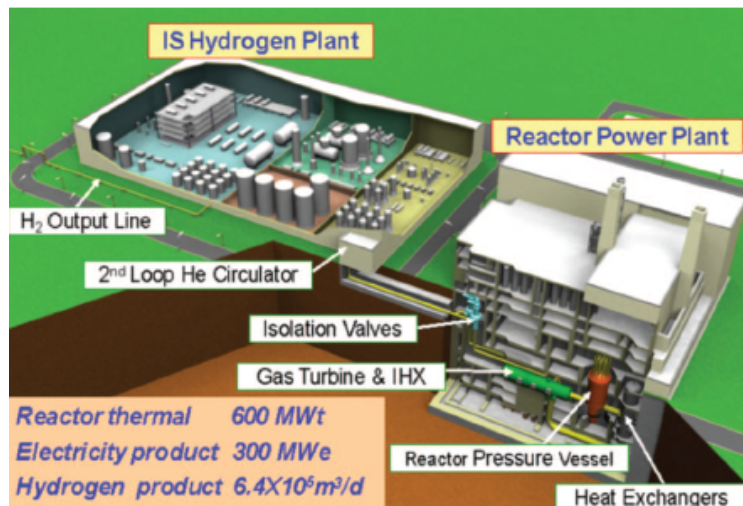
A. Omoto, Titech

**Khi Solar I Steam
Accumulators (2017)**



37

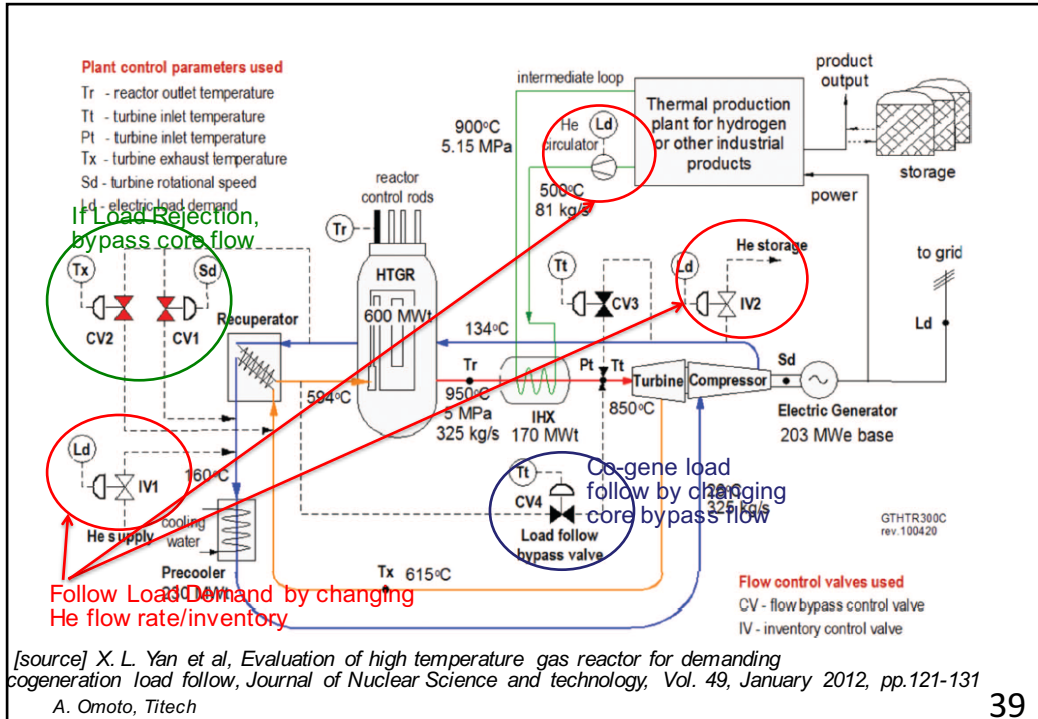
ガス炉(GTHTR300C)による電気・水素のハイブリッド生産



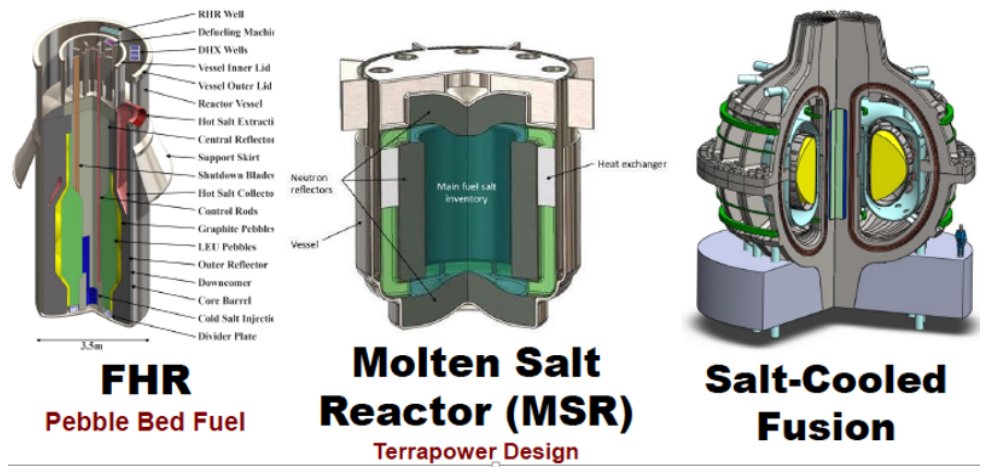
[source] (Gas Turbine High Temperature Reactor of 300 MWe for Cogeneration, X. L. Yan et al, JAEA)

A. Omoto, Titech

38

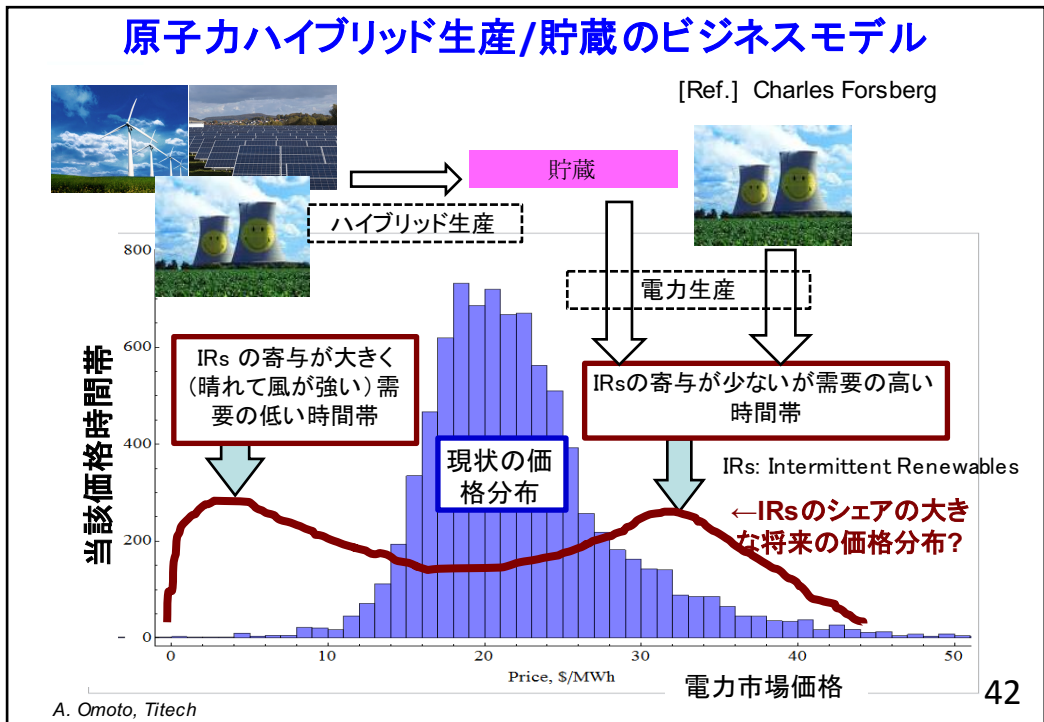
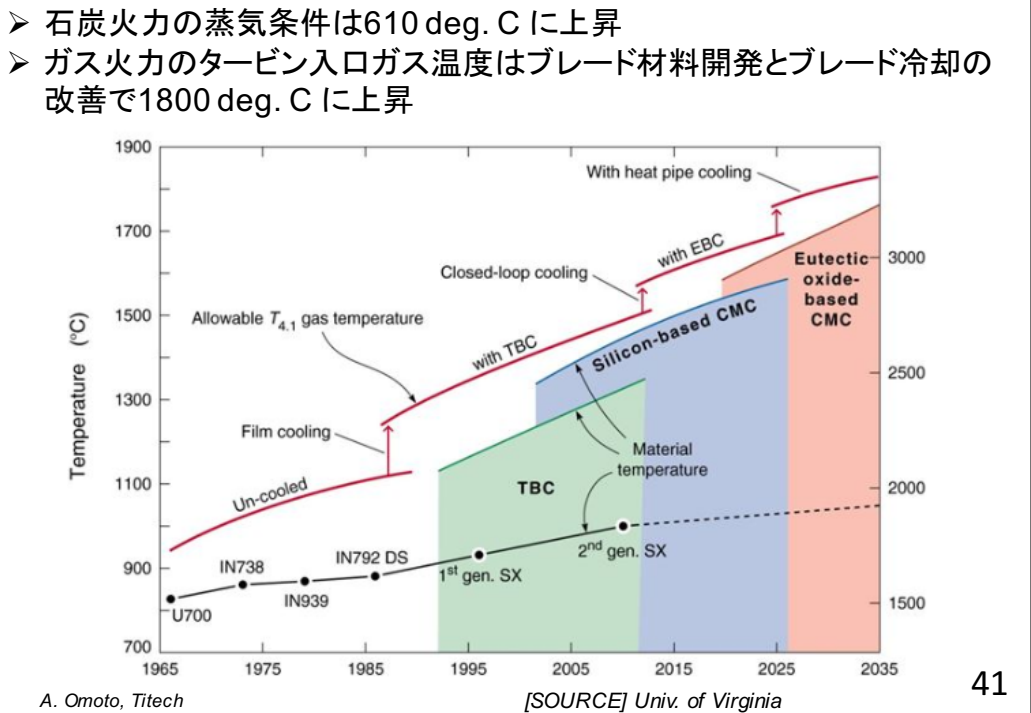


ハイブリッド生産あるいはトッピングサイクルによる
 ピーク電力生産の候補



Fluoride Salt-Cooled High Temperature Reactor

[source] C. Forsberg, MIT



再生可能エネルギー側での需要と供給のミスマッチ対応

- ✓ flexible renewables(バイオマス) 発電
- ✓ 再生可能エネルギーの貯蔵: 家庭Power Wall(Tesla), EV
- ✓ 余剰電力のpower to gas (H₂)
- ✓ resource aggregation business(下記 [source] ERABF)

- アグリゲーターが需要家側のエネルギーリソース（P V、蓄電池、E V、エネファーム、ネガワット等）を最適遠隔制御する。さらに、IoTを活用して需要家群を統合することで、あたかも一つの発電所（仮想発電所:Virtual Power Plant）のように機能させ、系統の調整力としても活用。
- 系統負担を軽減した形での再エネ導入拡大による環境への適合及び安定供給の確保、石油火力等の燃料費が高い既存調整力の代替による経済性向上により、3 Eの達成に貢献。

43 ※ 経済産業省資料を元に作成

太陽光＋蓄電池への補助金制度

加州[Self-Generation Incentive Program SGIP]

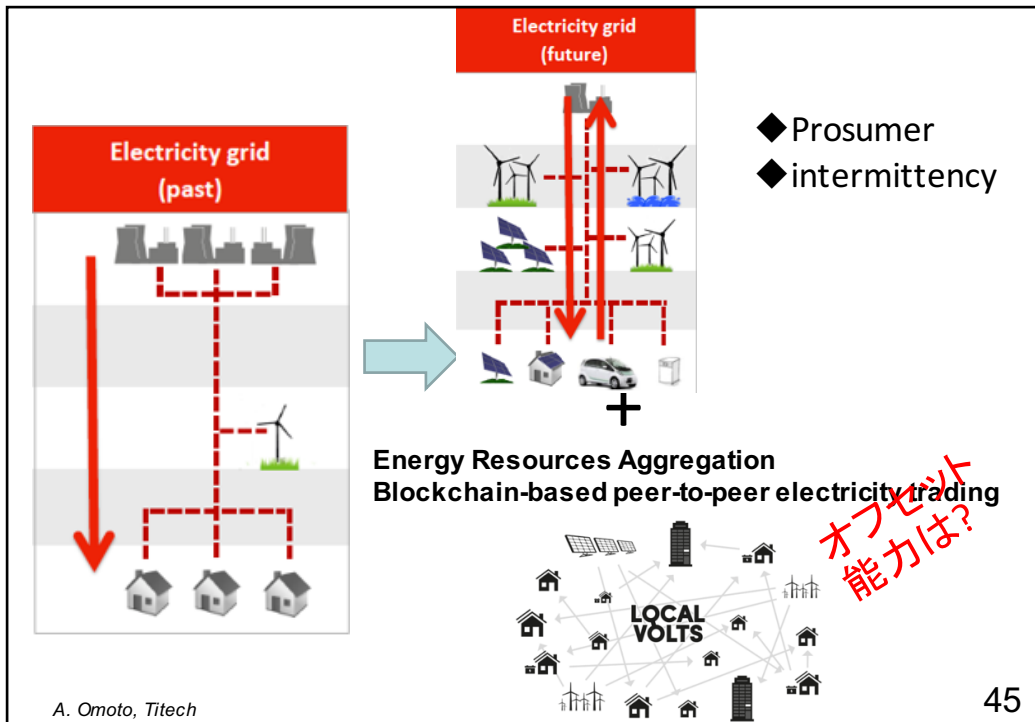
Powerwall (Tesla)

日本での太陽光＋蓄電池に補助金制度

Eliiy Power

44

A. Omoto, Titech



Energy Resource Aggregation business (ERAB) と Peer-to-Peer の電力売買

Energy Resource: FIT時期終了後の余剰太陽光電力・デマンドサイドマネジメント・EV・蓄電池

EMS: Energy Management System

Energy Resource Aggregator

市場

売電業者 PPS

Peer to Peer 電力売買

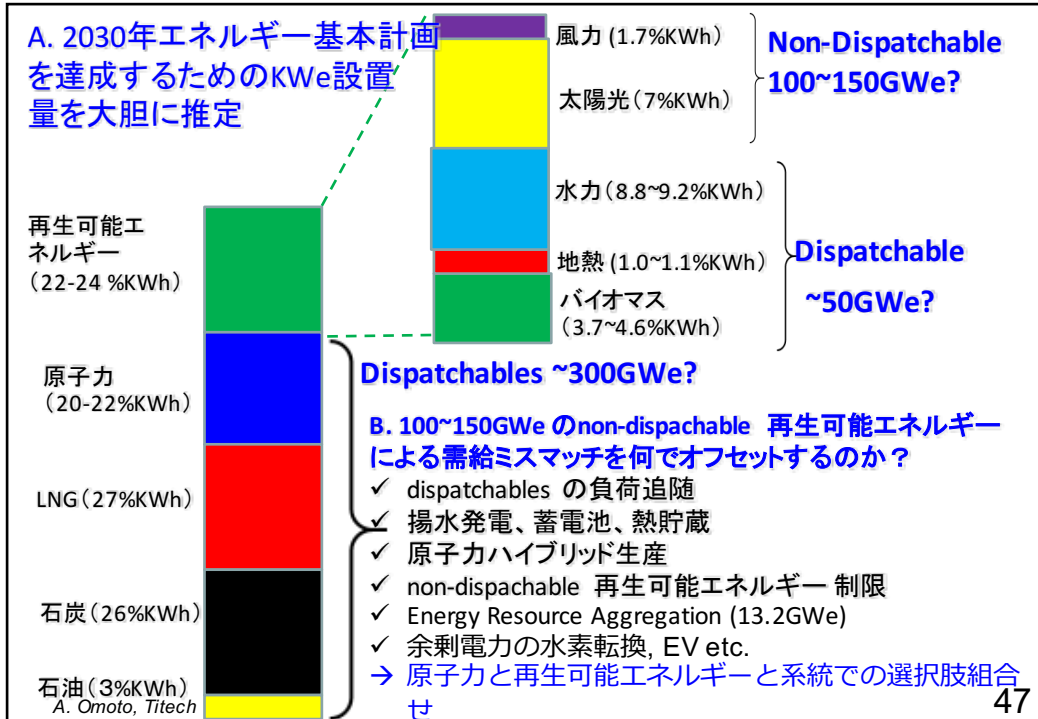
	予測 (Gwe)		
	2020	2030	→ x 0.1=ERAB
HEMS	21	47	4.7
BEMS	16	31	3.1
FEMS	5.3	10	1
EV/PHV	4.5	44	4.5

SUM=13.2GWe
(2030年時点の設置容量300GWe?の4%?)

[source]http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy_environment/energy_resource/pdf/001_04_00.pdf

A. Omoto, Titech

46



制度の変更

(既存) 変動する再生エネルギーのシェア制限

- 限界低減費用の活用(MAC-Marginal Abatement Cost Curve-の活用)
- 電源市場の修正
- technology-neutralな補助金制度による貯蔵インフラ整備
- "level playing field"
 (現在の市場価格に反映されていないが、将来の世代が負わなければならない環境負荷等の市場外部性を評価して、選択に反映)
 (例) GHGによる将来負荷やエネルギー供給セキュリティ

A. Omoto, Titech 48

制度の変更の具体例

- ✓ 炭素税
- ✓ ポートフォリオ基準(国内供給基準、low/zero carbon 基準、clean energy基準-CES)
- ✓ 炭素を放出しない全ての電源へのFIT
 - (例)NY州のCESは2030年までに州内のGHG放出を40%低下を目標に
 - 1) 新再生可能エネルギー源設置
 - に4.5¢/kWh 補助
 - 2) 低炭素電源である原子力の停止防止に1.7¢/kWh の補助金
 - 原子力を含むCESはIllinois州でも
- ✓ 容量市場における選定に低炭素を考慮
- ✓ 資本費の高い電源からの長期に亘る買電契約



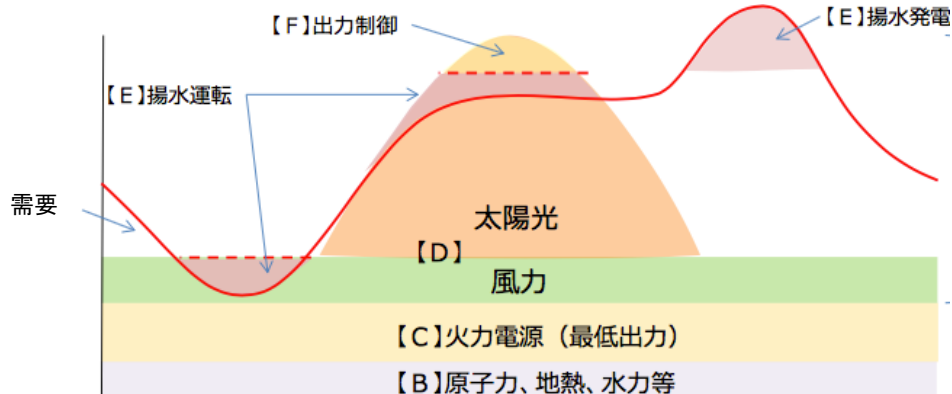
A. Omoto, Titech

Intermittent Renewables(IRs)の接続可能量

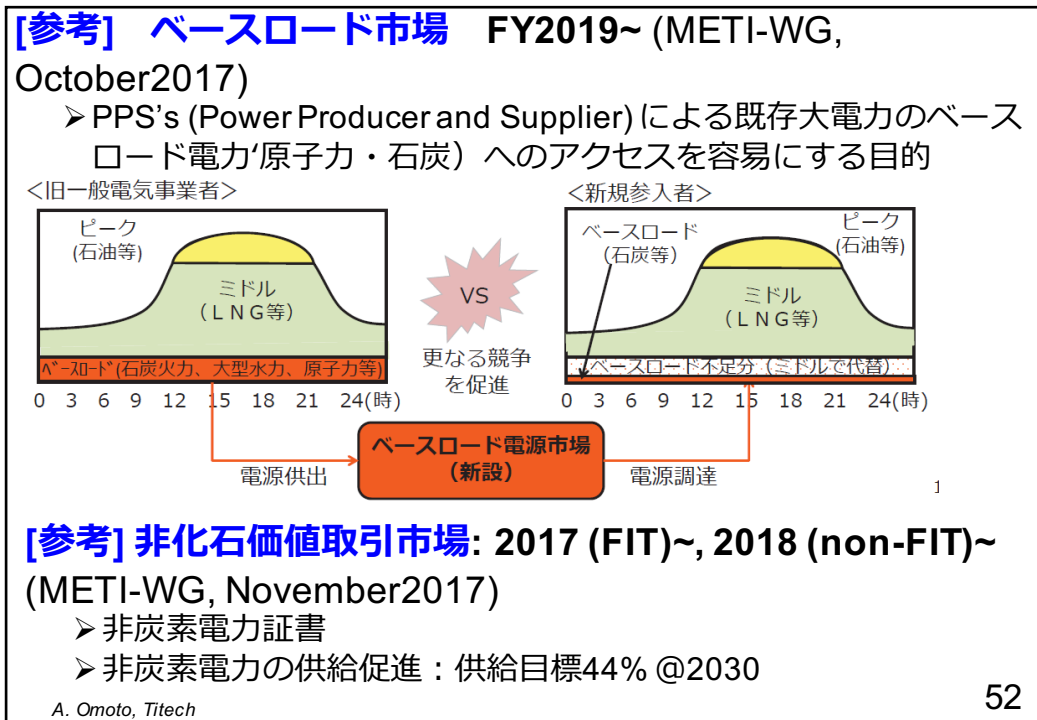
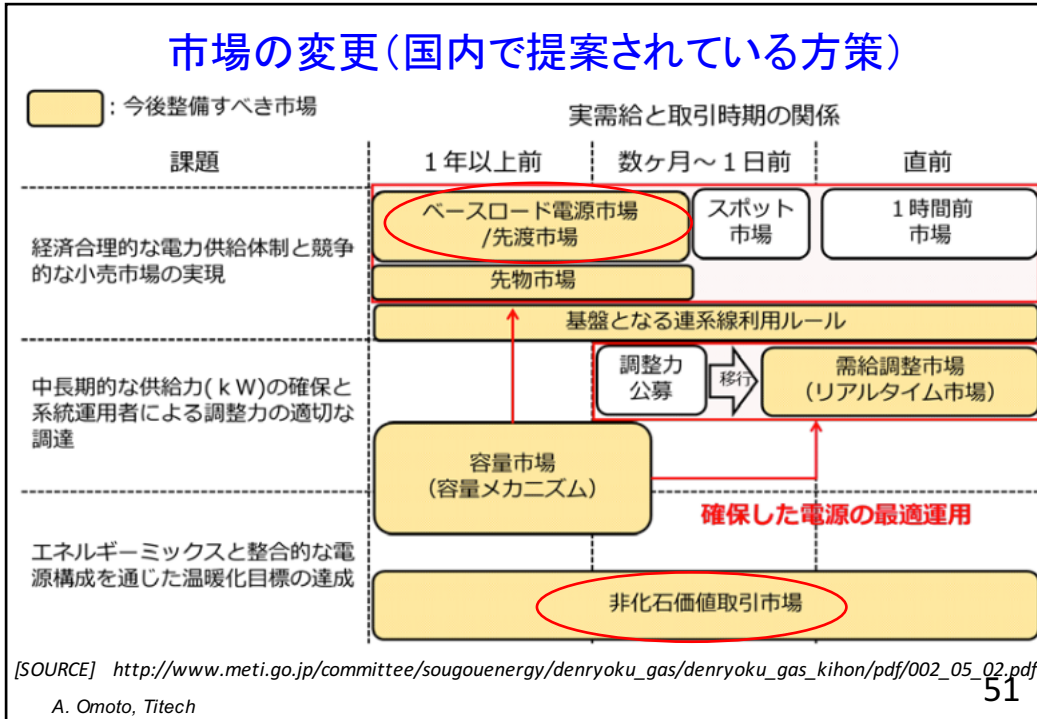
FITのもとで一部の電力で接続可能なIRsが低負荷時の電力需要を超過するため、接続申し込みへの回答を保留。2014年の特別措置法で、接続可能量を以下の考えで毎年電力ごとに決定。

1. 火力発電は最低レベルまで運転を抑える
2. 揚水で余剰電力を吸収
3. それでも余剰がある場合には、地域電力は500KW を越えるIRs事業者に年間30日間は出力抑制を無償で要求可能 (*太陽光: 360hours/year. 風力: 720hours/year)
4. 上記の条件をもとに、接続可能量を電力ごとに毎年決定

(例)九州電力2017年: 7.3GWe 太陽光接続可能量 8.2GWe 最低負荷



A. Omoto, Titech



世界規模では：原子力発電容量の目標と達成方策の例

WORLD NUCLEAR ASSOCIATION

WNA Harmony goalとは

- 原子力発電設備で安価かつクリーンな電気の供給
- 供給シェア25%
- 目標達成の為の三方策(右図)

A. Omoto, Titech

53

WORLD NUCLEAR ASSOCIATION

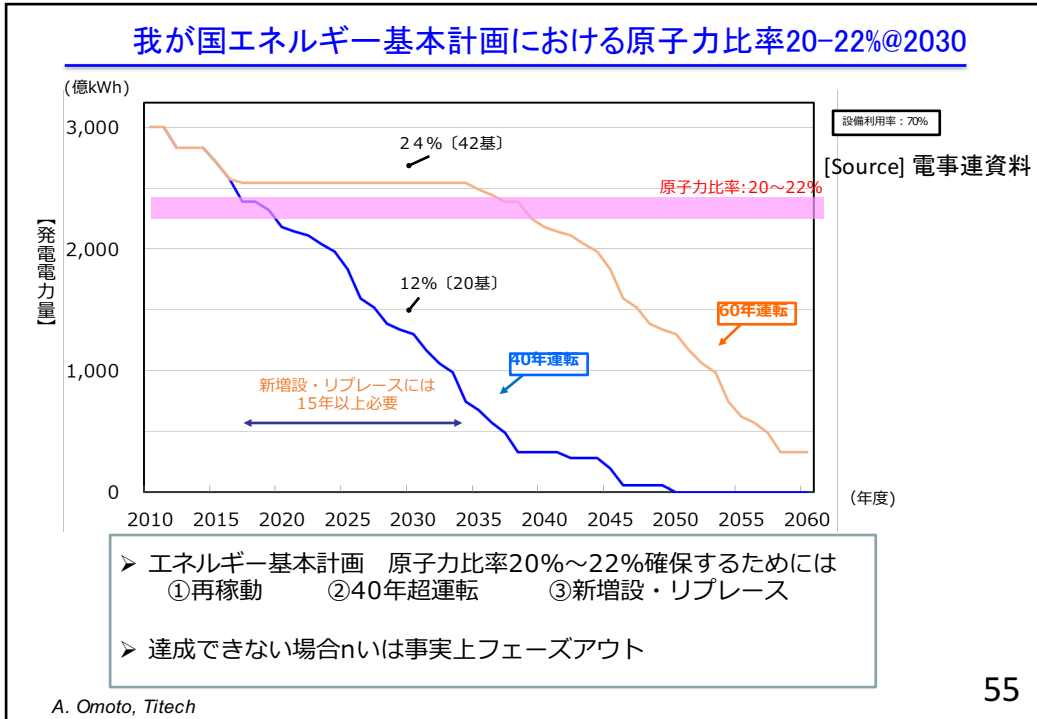
2050年迄に1000 GW 新規建設の目標

Year	Capacity (GW)	Generation (TWh)	Share of Generation (%)
2014	396	2411	11%
2050	1250	10000	25%

Source: World Nuclear Association. Growth required for nuclear energy to supply 25% of electricity in 2050 under demand forecast of two-degree scenario (see IEA, 2015, Energy Technology Perspectives 2015). Assumption: 91% capacity factor

A. Omoto, Titech

54



1. 再生可能エネルギーとの関係構築
 - 目標(恐らくラクイアサミット合意のGHG80%削減@2050)に向けたClean Energy技術・政策オプションの共同ロードマップ作成と実行
 - 原子力: 脱炭素化gridにおける要件の要求を考えたhybrid production炉の開発とINLにおける新型炉フルスケール 実証への参画
 2. 電力市場制度の変更(Clean Energy Equality)
 - 特定FIT廃止、貯蔵インフラ支援、市場外部性の考慮
 - 補助金は目標(例えば環境とセキュリティ)を達成する技術に対し中立
 - Prosumerの役割に配慮
 3. 強い産業界組織による競争力確保
 - 理性的/合理的思考・合理的意思決定システムの社会インフラ構築
 - 意思決定にリスク情報活用とValue-Impact解析の活用
 - ・ 福島後の改造: 40M\$(US)- 200~300M\$(Europe) - 1000~1300M\$(J)/unit
 4. あるいは、市場での役割を特化
 - 良質な原子力機器を供給するサプライチェーン
- A. Omoto, Titech

まとめ

1. 原子力・電力を巡る7つのパラダイムシフト
一方、これへの対処方策策定と技術の用意に遅れ
2. 将来の原子力をどうするかは、「原子力・再生可能エネルギー・エネルギーキャリア・需給マネジメントの様々な脱炭素化技術・政策オプションを時系列的にどう配置するべきか」という課題との関連でも考えるべき

A. Omoto, Titech

57



....thank you for your attention

58