

---

第52回原産年次大会2019、東京国際フォーラム、東京、2019年4月9日(火)

# エネルギーシステムの低炭素化と原子力

東京大学 小宮山 涼一



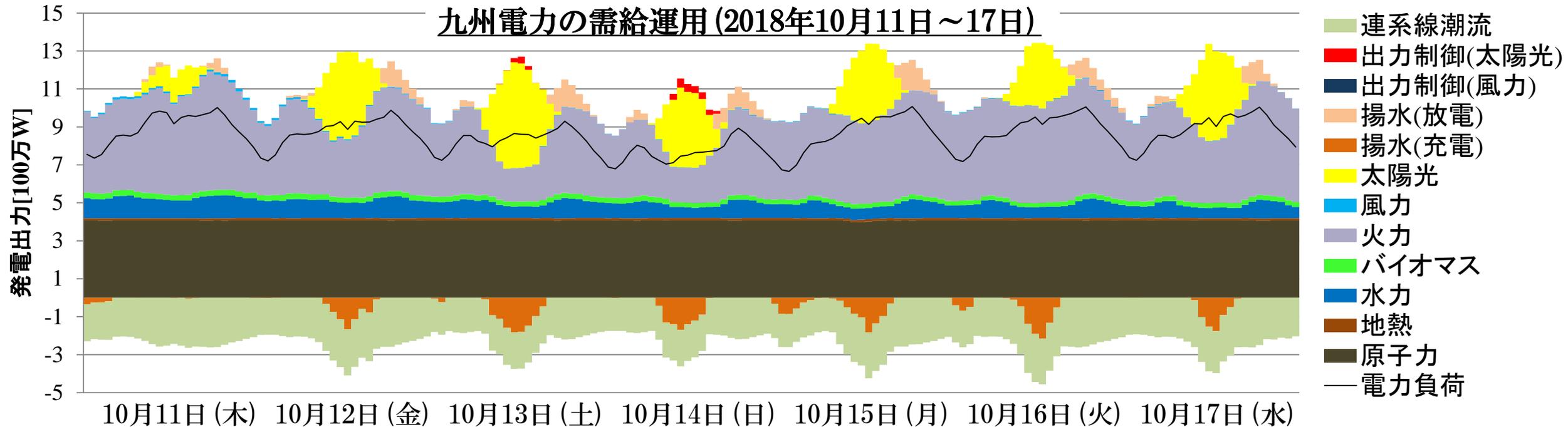
THE UNIVERSITY OF TOKYO

# 原子力を取巻くエネルギー・環境問題

- ◆ 地球環境問題への対応
- ◆ 再生可能エネルギーの大量導入
- ◆ エネルギーセキュリティ
- ◆ 電力市場の自由化

# 電力需給運用(九州、日本)

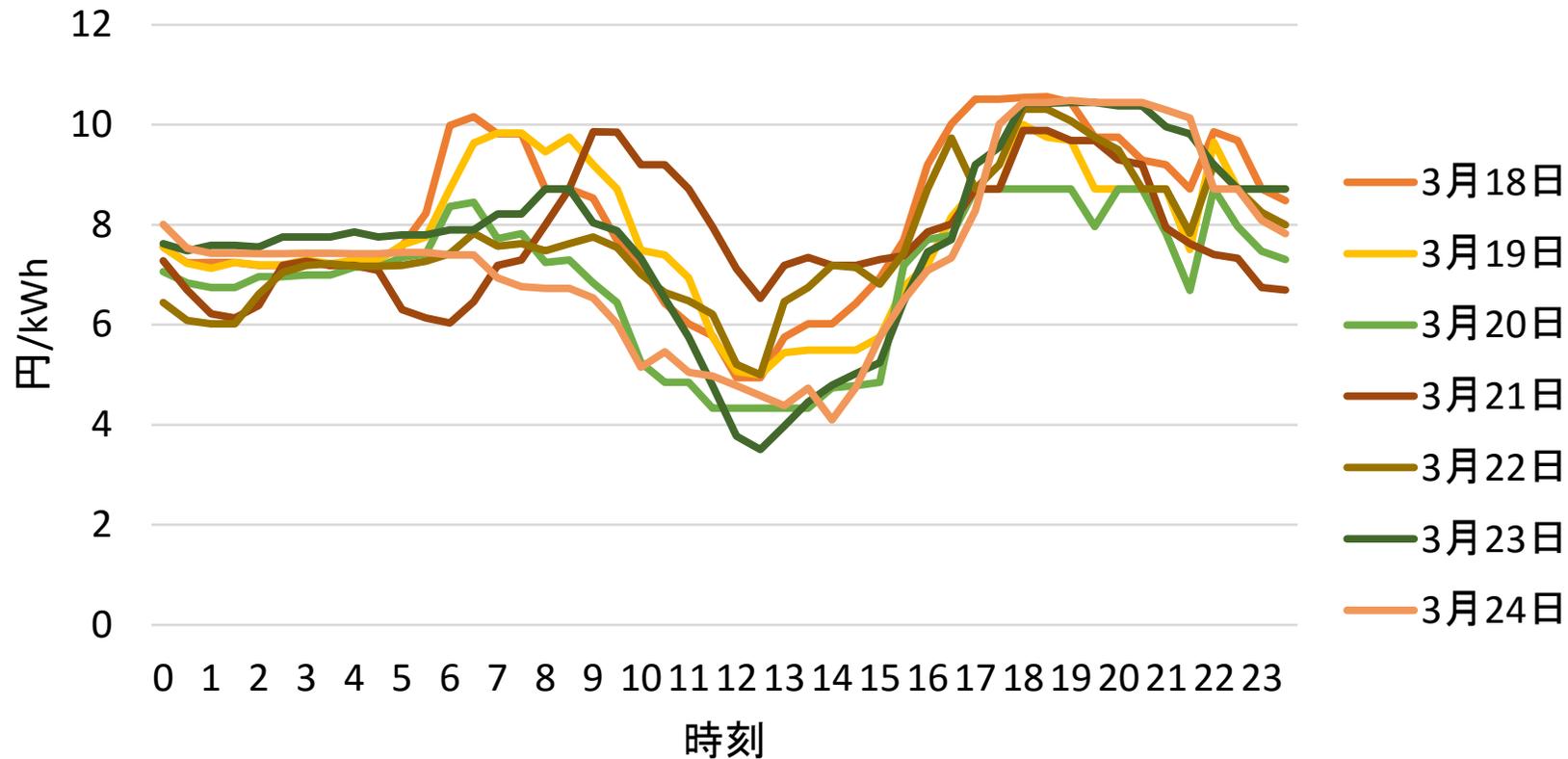
- 再エネのコスト低下により、太陽光発電が急速に拡大。日本のPV導入量(2018年): 45百万kW
- 九州電力は2018年10/13(土)、14(日)に太陽光出力制御を本土で初めて実施(10/13→約40万kWの出力抑制)
- 再エネ賦課金(2018年度): 2.4兆円 (PV未稼働分の稼働等でさらに1.3~1.6兆円増加の可能性)



(出所) 九州電力需給情報を基に作成

# 卸電力価格の動向 (3/18~3/24, 2019)

- 太陽光発電等の影響により昼間の価格は夜間より安くなっている



(出所) 日本卸電力取引所 (JEPX)



ADVANCED NUCLEAR POWER PROGRAM

## MIT-Japan Study

### *Future of Nuclear Power in a Low-Carbon World: The Need for Dispatchable Energy*

Charles Forsberg, Richard Lester, Nestor Sepulveda, and Geoffrey Haratyk  
Massachusetts Institute of Technology, Department of Nuclear Science and Engineering; 77 Massachusetts Ave., Cambridge, MA 02139

Akira Omoto and Tomihiro Taniguchi,  
Tokyo Institute of Technology, 2-12-1, Ookayama, Meguro-ku, Tokyo, Japan

Ryoichi Komiyama and Yasumasa Fujii  
The University of Tokyo, Department of Nuclear Engineering and Management, Graduate School of Engineering, 7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, Japan

Kazuaki Matsui  
Institute of Applied Energy, Shimbashi SY-Building, 1-14-2, Nishi-Shimbashi, Minato-ku, Tokyo, Japan

Xing, L. Yan  
Japan Atomic Energy Agency, 4002, Narita-cho, Ooarai, Higashi-Ibaraki-gun, Ibaraki-ken, Japan

Tomofumi Shibata and Tomoko Murakami  
Institute of Energy Economics Japan, Inui-Building, 1-13-1, Kachidoki, Cyuou-ku, Tokyo, Japan

MIT-ANP-TR-171  
September 2017  
For Public Distribution



CENTER FOR  
ADVANCED NUCLEAR  
ENERGY SYSTEMS

(617) 452-2660  
canes@mit.edu  
mit.edu/canes

Massachusetts Institute of Technology  
77 Massachusetts Avenue, 24-215  
Cambridge, MA 02139-4307



# MIT-日本共同研究レポート†

“MIT-Japan Study Future of Nuclear Power in a Low-Carbon World: The Need for Dispatchable Energy”(2017年9月)

\*MIT、東工大、東京大、JAEA、エネ経研、エネ総工研が参加

## ➤ 原子力・変動型再エネ(PV、風力)の共存戦略

- 原子力・再エネの柔軟性を高める技術開発(新型炉、熱など多様なキャリアの貯蔵・利用技術)
- 原子力、再エネのベストミックス分析

## ➤ 政策支援、制度設計

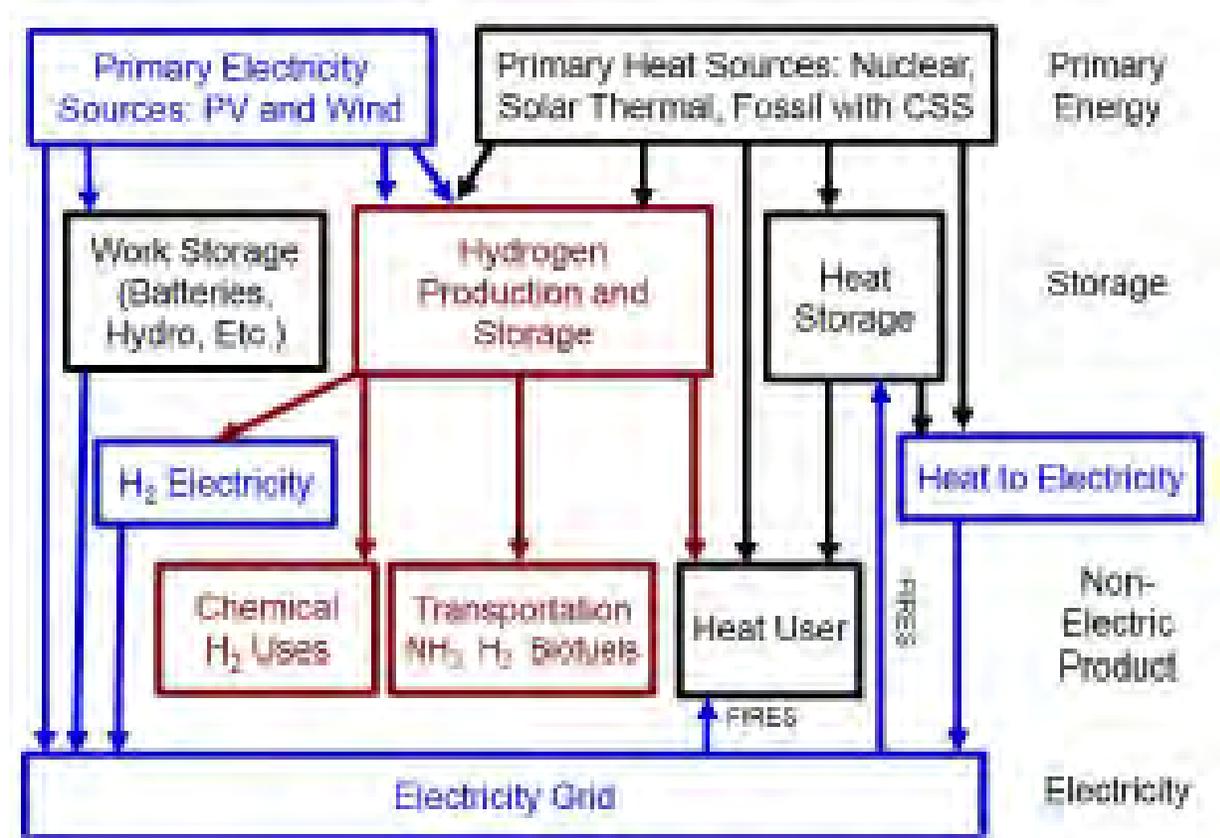
- エネルギー貯蔵技術(電力、熱)への適切な政策支援
- 再エネ技術等への過剰な補助金の是正
- 電力市場の適切な制度設計(容量メカニズム)

† MITのホームページよりダウンロード可能：  
<http://energy.mit.edu/publication/future-nuclear-power-low-carbon-world-need-dispatchable-energy/>

# 原子力・再エネの共存戦略

## ゼロエミッション型エネルギーシステム Integrated Energy Network

- ◆ 原子力発電→ベースロード電源
- ◆ 再エネ拡大、卸電力価格の低下・変動  
→ベースロード運転だけでは原子力の価値の最大限の発揮は困難
- ◆ 原子力・再エネを電力系統で共存させる技術開発が重要に
- ◆ 原子力・再エネによる多様なエネルギーキャリアの生産と部門横断的利用
  - 多様なエネルギーキャリアの生産、転換、流通、貯蔵、利用技術 (熱, 水素, メタノール, アンモニア等)
  - 電化の低い産業部門、貨物輸送部門等での利用

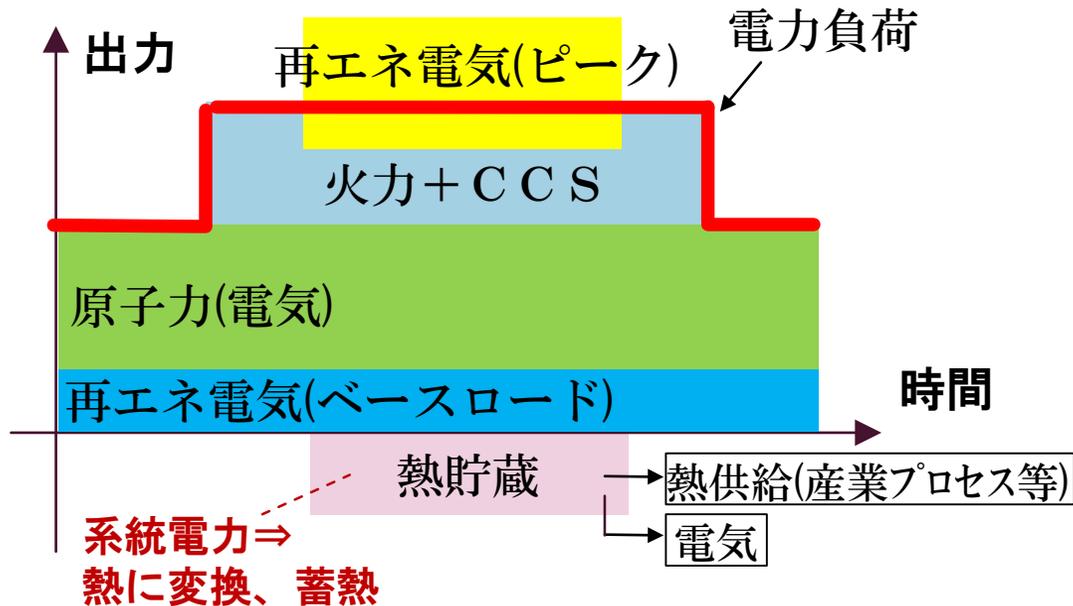


(出所)“MIT-Japan Study Future of Nuclear Power in a Low-Carbon World: The Need for Dispatchable Energy” (2017)

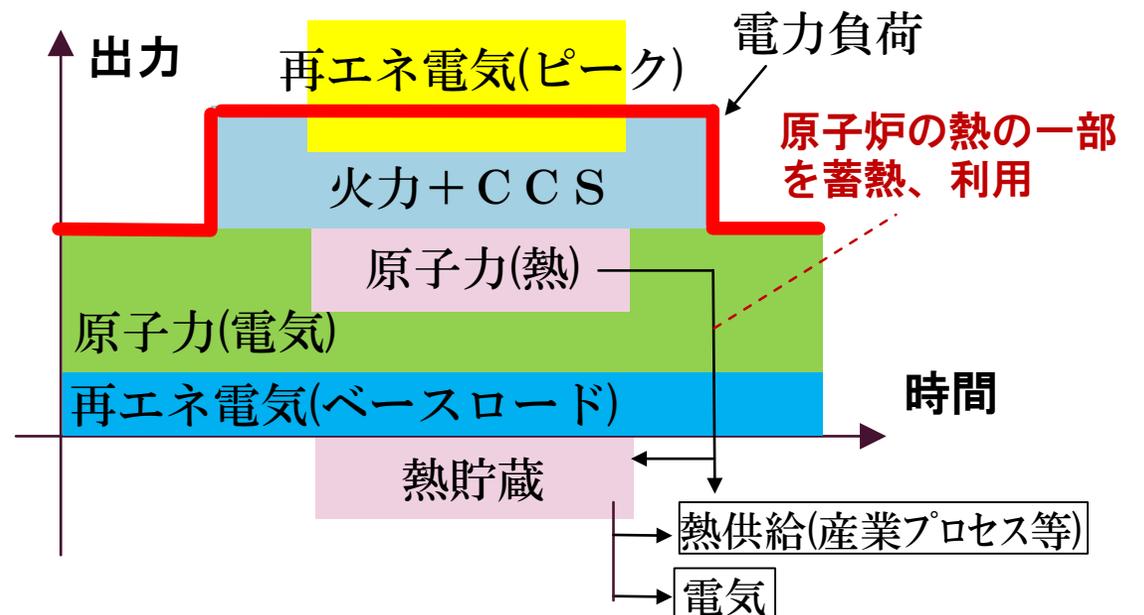
# 原子力・再エネの共存戦略(熱利用)

- ▶ 電力技術のみでの再エネ導入策(バッテリー、系統増強)→電力コスト増大の可能性
- ▶ 熱貯蔵、利用技術の活用→電力を熱で安価に貯蔵
- ▶ 原子炉：ベースロード運転継続+熱による電気出力調整、再エネ：出力抑制無し
  - 貯蔵した高温熱→化学産業・製造業での多目的利用→ボイラ等の化石燃料、CO<sub>2</sub>削減に貢献
  - 卸電力価格の低下→蓄熱・熱利用、卸電力価格の上昇→放熱・電気変換  
⇒ 電力市場での原子力の経済性向上

## 原子炉の熱出力、電気出力一定



## 原子炉の熱出力一定のまま、電気出力調整



# 原子力・再エネの共存戦略(負荷追従)

## 原子力の潜在的な負荷追従機能(FPO機能\*)の活用

\*FPO(Flexible Power Operations)

- 原子力は運転費に占める燃料費の割合が低い→ベースロード運転で運用
- 再エネ大量導入下→出力調整運転(負荷追従運転)へのニーズ上昇
- 火力機並みの負荷変化に対応できる潜在的な制御性能  
例：米国(URD)、欧州(EUR)
- 負荷遮断時の運転継続能力(所内単独運転)→系統復旧のレジリエンス

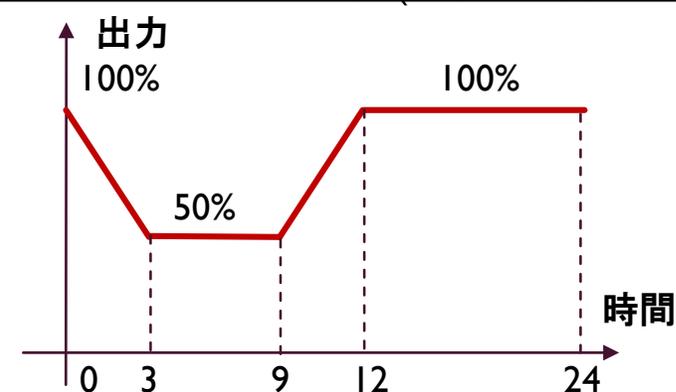
## 日間負荷追従運転

- 昼夜などの送電系統の負荷変化に応じて、運転
- タービンへの蒸気流量を直接的、間接的に制御→出力抑制(50%抑制)

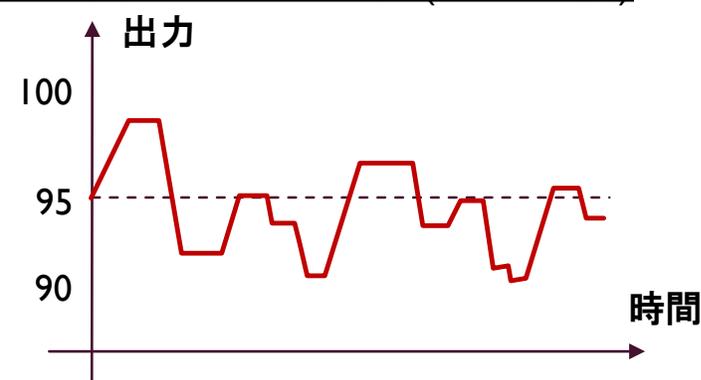
## AFC運転(Automatic Frequency Control)、GF運転(Governor Free Control)

- 中央給電指令所からの出力調整指令(短周期：数分～10数分)で運転
- 分オーダーでの自動周波数調整運転(AFC)、より短周期のガバナーフリー運転(GF)も技術的に可能
- 過去には国内でも実証試験が行われ、基本的な性能確認

出力調整パターン例(日間負荷追従運転)



出力調整パターン例(AFC運転)



# エネルギーシステムの非化石化(Defossilization)

- 原子力・再エネによる多様なエネルギーキャリアの生産、その部門横断的利用により、エネルギーシステム全体の非化石化実現も一つのオプション

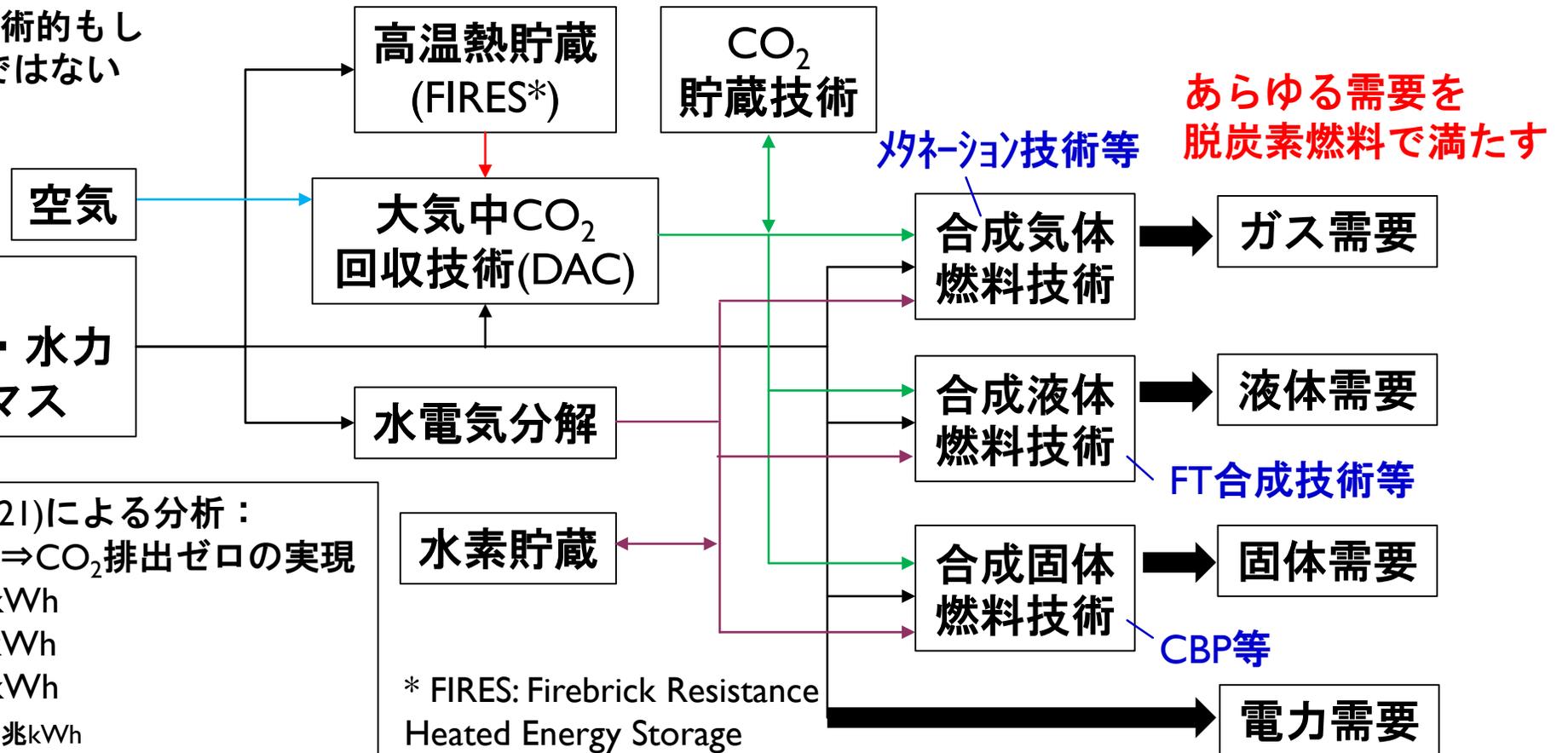
## 仮想的な原子力・再エネ共存エネルギーシステム

注) 一部の技術はまだ技術的もしくは商業的に利用可能ではない

エネルギー供給  
→原子力・再エネのみ

- 原子力
- 風力・太陽光・水力
- 水力・バイオマス

世界エネルギーモデル(DNE21)による分析：  
 • 原子力、再エネのみ利用⇒CO<sub>2</sub>排出ゼロの実現  
 世界の総発電量 180兆kWh  
 原子力 130兆kWh  
 再エネ 50兆kWh  
 \*世界の総発電量(2017年) 25兆kWh



# 小型炉 (Small Module Reactor: SMR)

## ➤ 建設コスト

- 投資リスクの低減(数百億円/基) ⇔ 大型炉：建設コストの高騰

## ➤ 建設工程

- 建設期間や投資回収期間の短期化 ⇔ 大型炉：建設期間の長期化リスク(米国、欧州等)

## ➤ 安全性

- パッシブ系による安全性向上 ⇔ 大型炉：安全対策コスト上昇

## ➤ 事故リスクへの対応

- 事故時の避難対策エリアが限定的、需要地近接立地 ⇔ 大型炉：避難対策エリアが広大

## ➤ 例：高温ガス炉

- 優れた安全性、原子力の多目的利用(電力,熱,水素等)、Pu利用、再エネ親和性(負荷変動を吸収)

## ➤ SMRの意義と課題

- 技術の継承、原子力産業発展への期待、電力システム分散化(Decentralization)
- 規模の経済性(量産効果を期待できるか?)、CO<sub>2</sub>削減(効果は限定的?)

# エネルギーセキュリティと原子力の役割

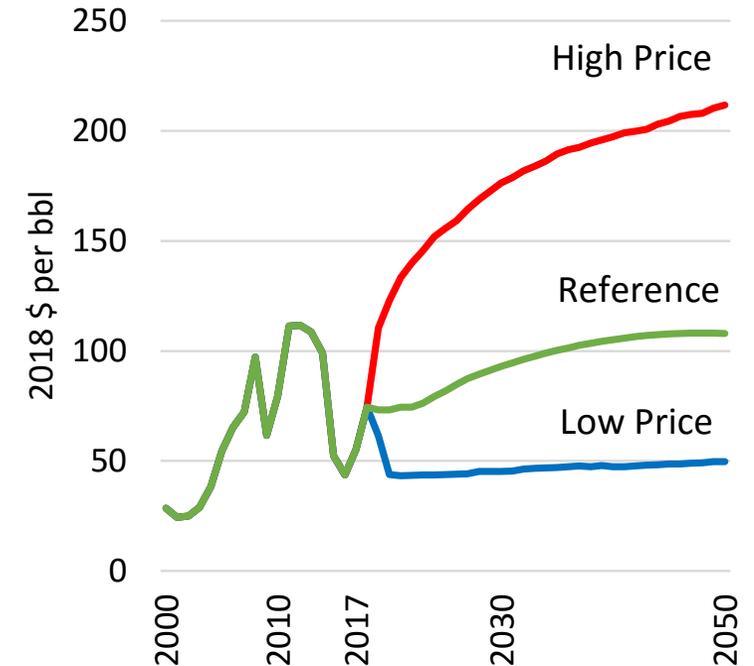
## ■ 原油価格の不確実性

- 石油需要の低迷、米シェール急増、原油価格の伸び悩み
  - 石油の上流開発投資の抑制→将来の石油危機発生的火種に
  - 中東等産油国の石油収入減少、中東情勢流動化のリスク
- 原油価格(2050年) → 最大200ドル/バレル超えの可能性

## ■ 原子力のエネルギーセキュリティへの貢献

- エネルギー価格高騰の抑制
- 短期・長期での燃料備蓄効果、燃料供給途絶時への対応
- 核燃料サイクルによる資源の有効利用
- 化石燃料の安定調達への対応
  - 2018年、中国が日本を抜いてアジア最大の天然ガス輸入国に→天然ガス安定調達が重要な課題に
  - 2040年の世界の天然ガス需要\*⇒現状比5割増加 (LNG換算27億t(2017)⇒39億t(2040))

原油価格見通し(ブレント原油)



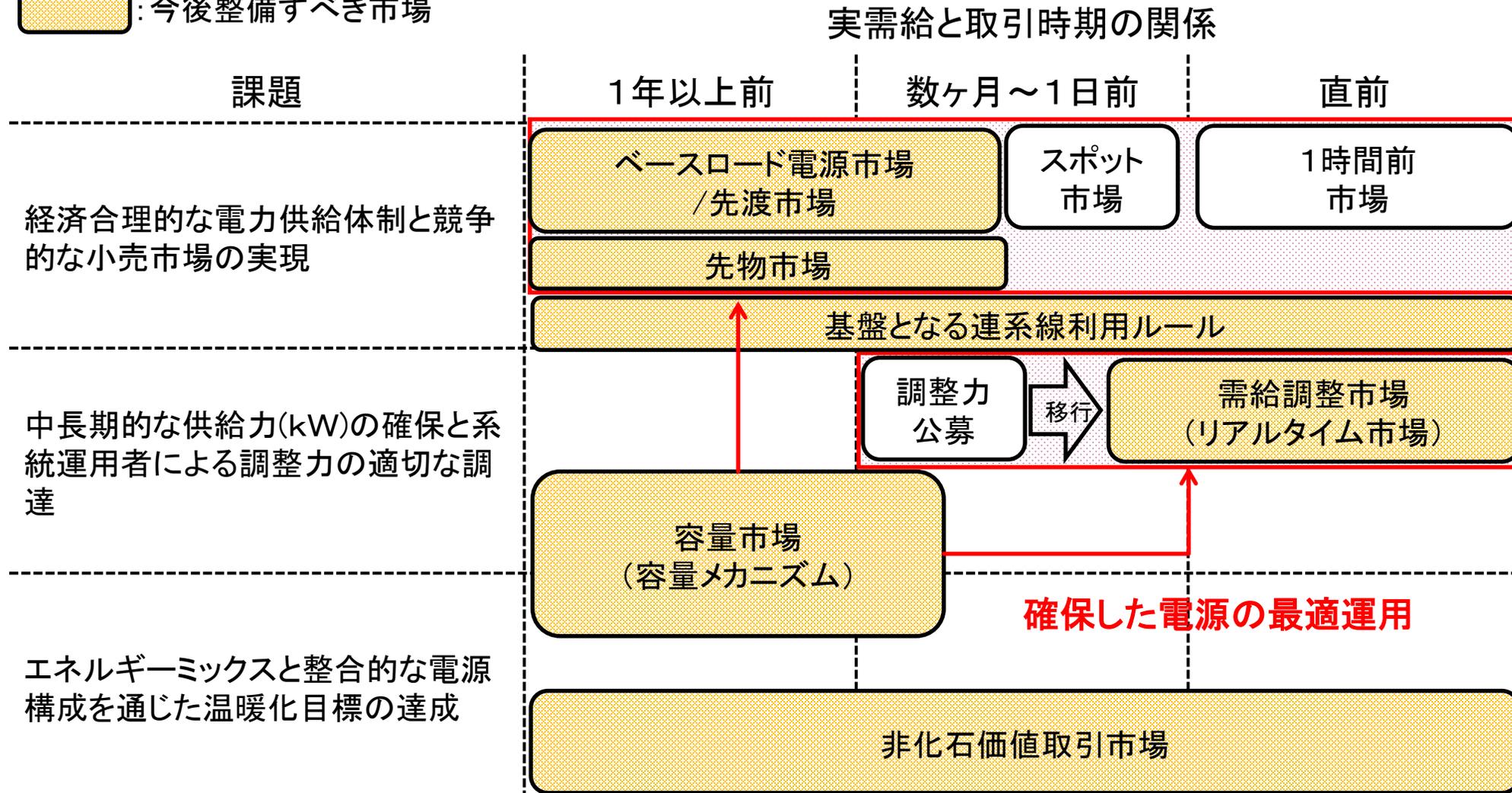
(出所) EIA/DOE, Annual Energy Outlook 2018より作成

\*BP Energy Outlook 2019 <<https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2019.pdf>>

# 電力システム改革

市場環境の変化は、原子力にどのような影響を及ぼしうるか？

: 今後整備すべき市場



※新市場における取引の時期については、今後の検討によって変動しうる。

(出所) 経済産業省 資源エネルギー庁

# 再エネ大量導入下での原子力の競争力の数値シミュレーション

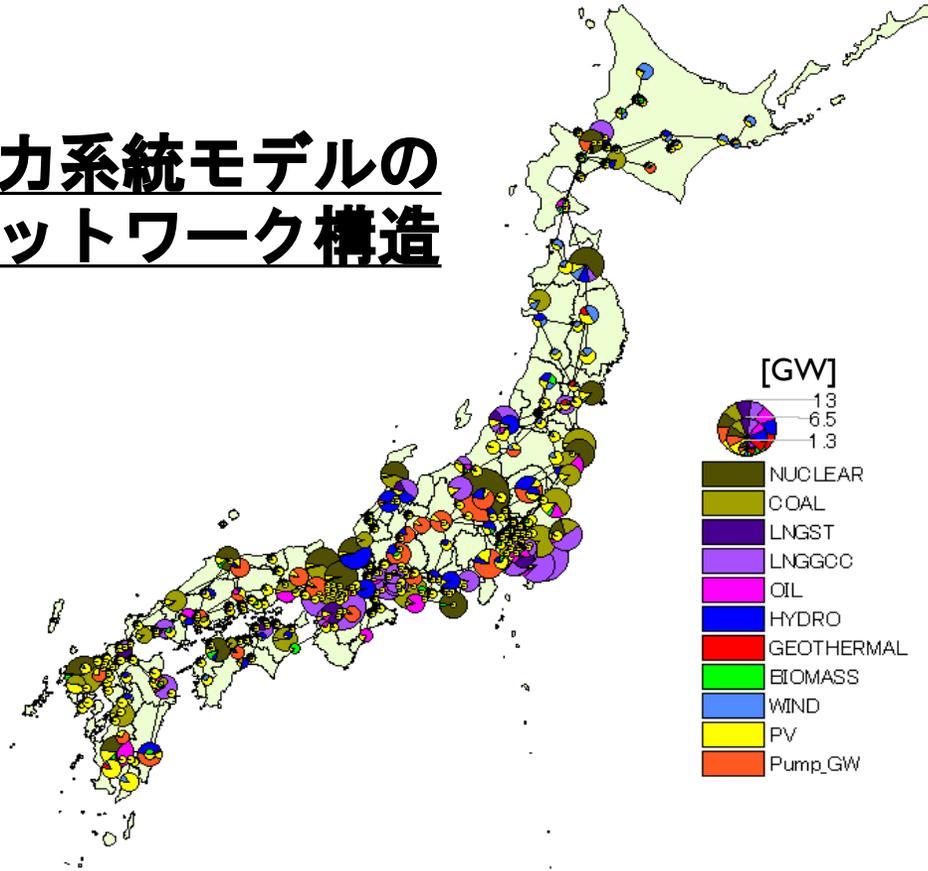
## ➤ 最適化型電力システムモデル\*による分析

- コスト最小化, 352母線 & 基幹送電線441本, 8,760時間@1時間値

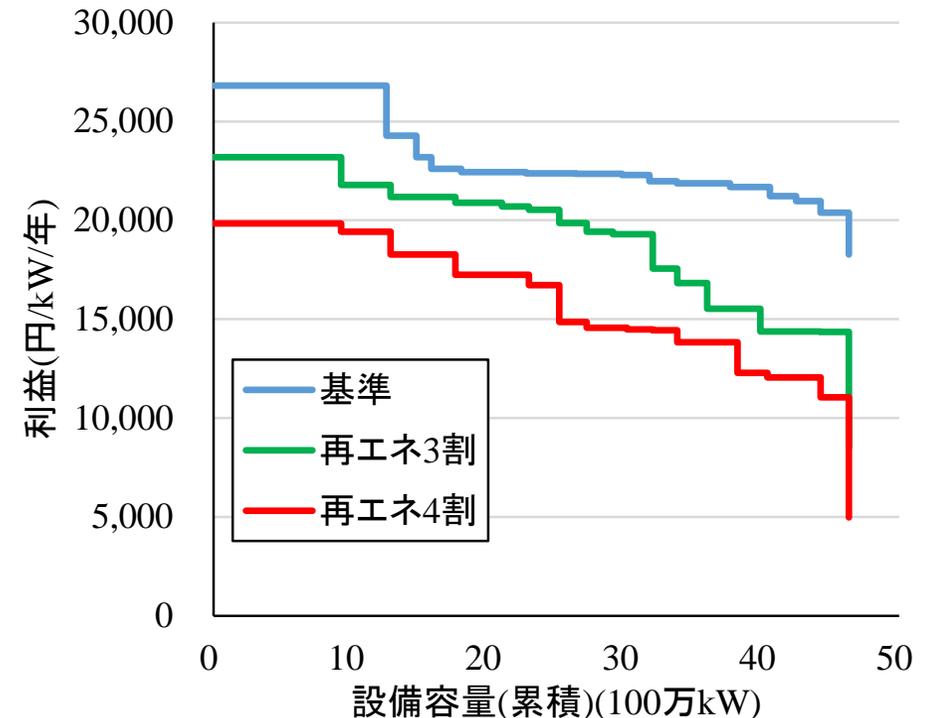
\* Komiyama, R., Fujii, Y., *Renewable Energy*, Vol.139, August 2019, pp.1012-1028, 2019.

## ➤ 再エネ大量導入→卸電力市場での原子力の収益は低下

### 電力システムモデルのネットワーク構造



### 再エネ比率と卸市場での原子力の収益

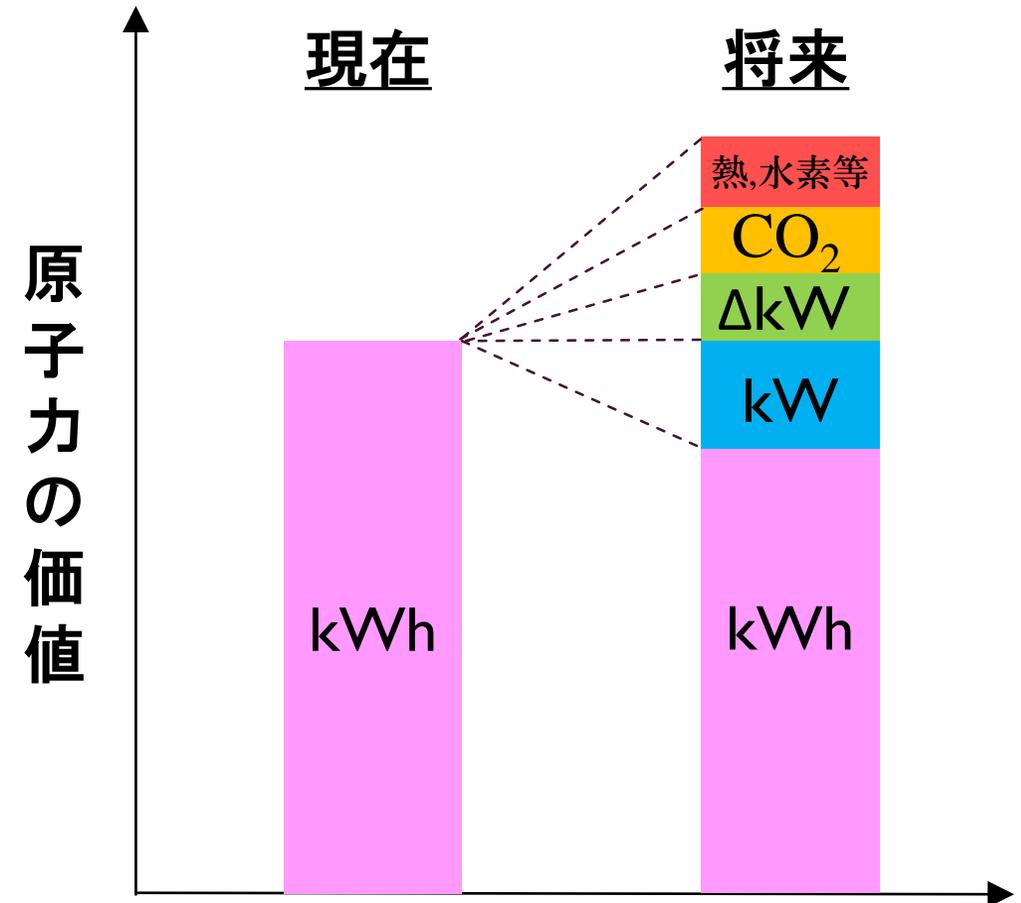


# 原子力の新たなエネルギー市場戦略

➤ 原子力はベースロード電源としての価値 (kWh価値)以外にも多様な価値を保有

- 供給信頼度 (kW価値)
- 出力調整能力 ( $\Delta$ kW価値)
- 非化石価値 (ゼロエミ価値)
- 原子力多目的利用 (熱・水素製造等)

➤ 原子力の多様な潜在的機能の活用  
→ 市場競争力の向上へ



# 結語

原子力・再エネは脱炭素化推進の両輪、原子力・再エネの共存が重要  
→再エネ大量導入時代に適合した新たな原子力の「ベースロード力」  
 (“Baseloadability”)の開発

- 原子力・再エネによる多様なエネルギーキャリア生産、クロスインダストリ利用(部門横断的利用)
- 原子炉の負荷追従機能(FPO)の活用 → 固有の柔軟性(Flexibility)の活用
- 新型炉開発
  - 福島事故・軽水炉の教訓、安全性/経済性/持続可能性/核拡散抵抗性を踏まえた新型炉開発
  - 安全性の実現、社会受容性の獲得
- 原子炉の新增設
  - 技術基盤と人材の維持・継承、経験蓄積による技術の高度化

ご清聴ありがとうございました。

(謝辞)

本発表の一部はJSPS科研費 JP17H03531, JP15H01785, (独)環境再生保全機構の環境研究総合推進費 (2-1704) の助成を受けたものです。