

---

CIGS日中専門家ワークショップ:地球温暖化長期戦略と実現の道筋, 2019年9月5日(木)

## 日本の低炭素電力システムと原子力の役割

Low-carbon Power System & the Role of Nuclear in Japan

小宮山 涼一 (東京大学 大学院工学系研究科 原子力国際専攻)

Ryoichi Komiyama, Associate Professor, Department of Nuclear Engineering & Management,  
The University of Tokyo



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

温室効果ガス排出削減(2050年80%削減)に向けた対応強化

## ◆ 再生可能エネルギーの大量導入

電力需給の変動への対応(調整力の確保、電力貯蔵他)

## ◆ 電力市場の自由化

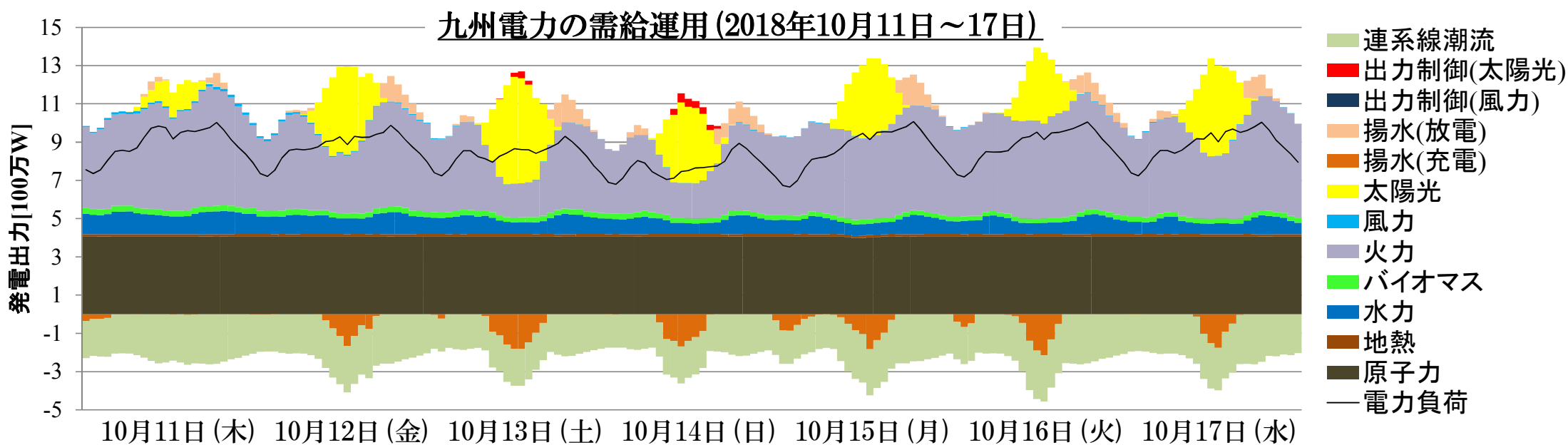
原子力の新增設、運転維持の不確実性の高まり

## ◆ エネルギーセキュリティ

不確実性を増す国際エネルギー情勢

# 電力需給運用(九州、日本)

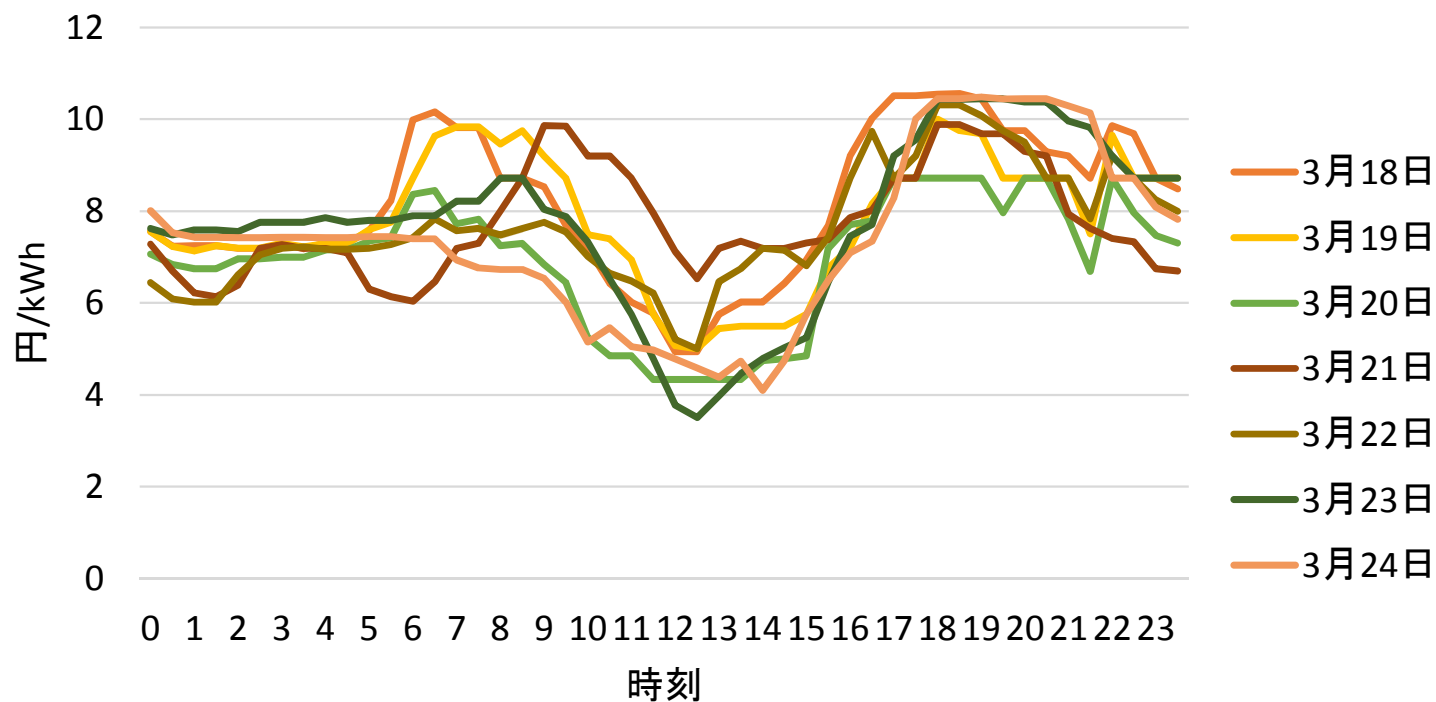
- 再エネのコスト低下により、太陽光発電が急速に拡大。日本のPV導入量(2018年): 45百万kW
- 九州電力は2018年10/13(土)、14(日)に太陽光出力制御を本土で初めて実施(10/13→約40万kWの出力抑制)
- 再エネ賦課金(2018年度): 2.4兆円 (PV未稼働分の稼働等でさらに1.3~1.6兆円増加の可能性)



(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)

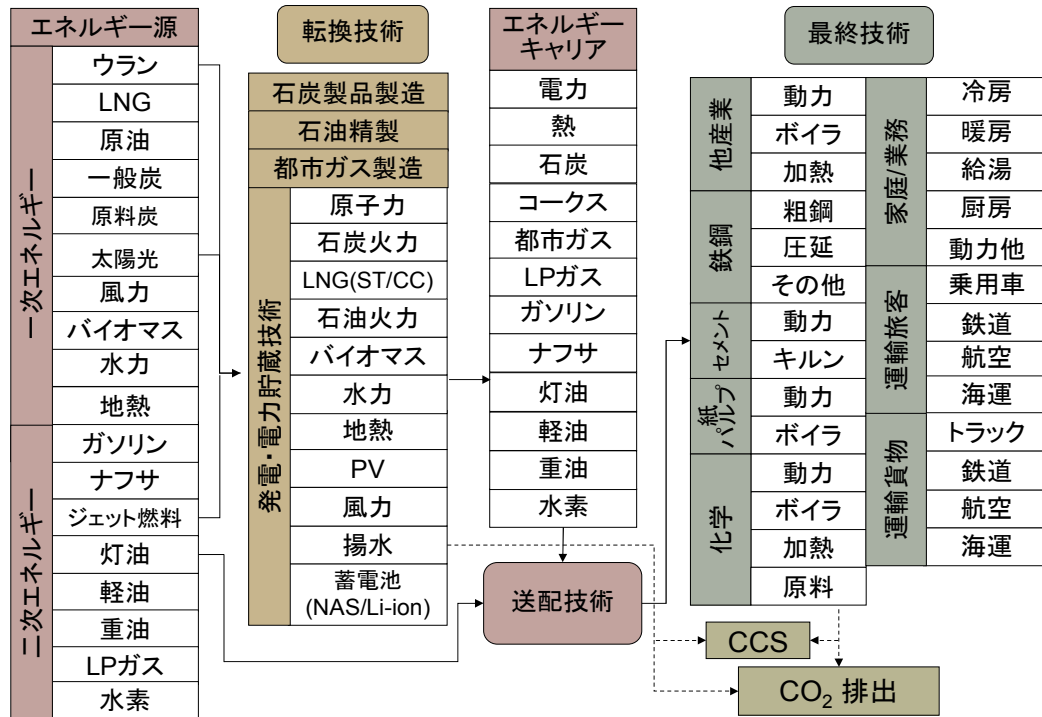
太陽光発電等の影響により昼間の価格が夜間より安くなることも  
→ ベースロード電源としての原子力の経済性への影響は？



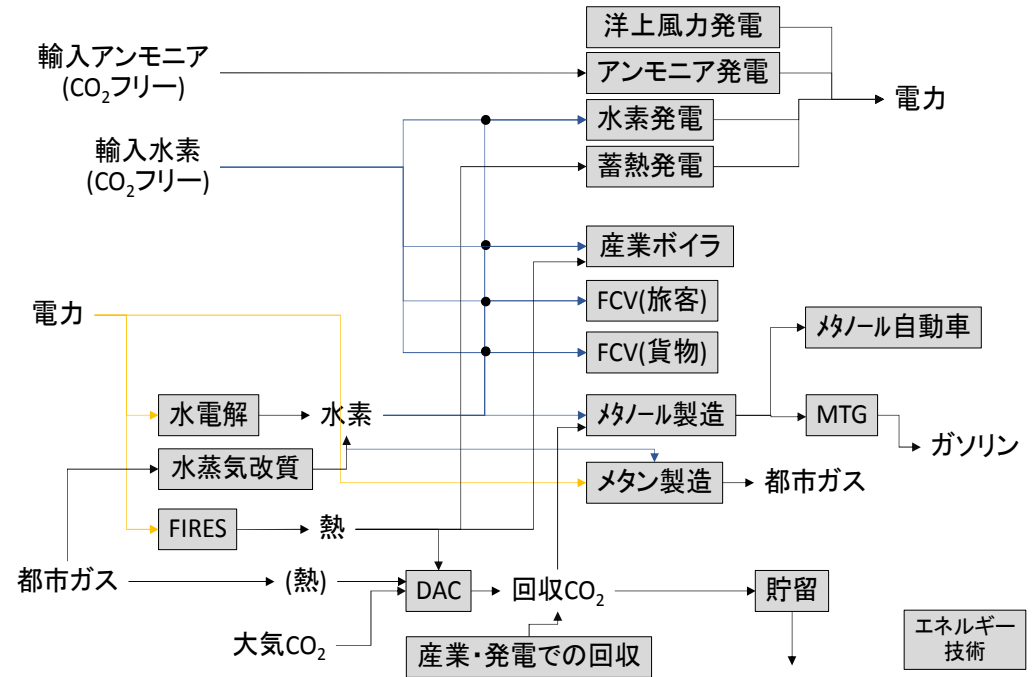
(出所) 日本卸電力取引所 (JEPX)

# 日本の2050年長期エネルギー需給見通し(日立・東大ラボ\*)

## エネルギー技術選択モデル\*\*



## 新技術のモデル化\*\* (水素、燃料電池自動車、蓄熱発電、大気中CO<sub>2</sub>直接回収、メタネーション、アンモニア等)



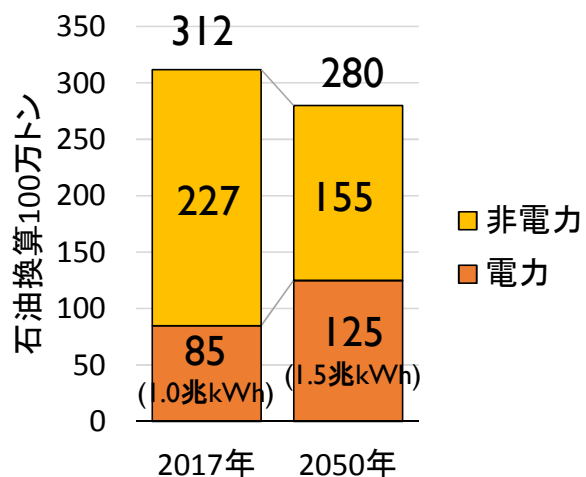
\*日立・東大ラボ「Society5.0を支える電力システムの実現に向けて」第2版, <http://www.ht-lab.ducr.u-tokyo.ac.jp/>

\*\* 川上,小宮山,藤井,エネルギー・資源学会論文誌, 39(4), 10-19 (2018), 川上,小宮山,藤井,電気学会論文誌B,138(5), 382-391 (2018)

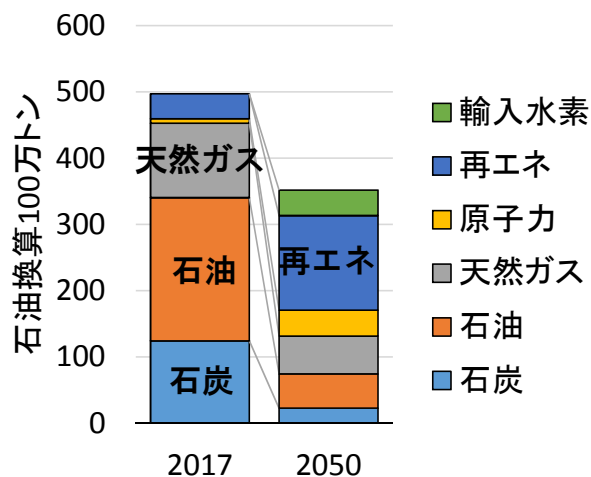
# 日本の2050年長期エネルギー需給見通し

- CO<sub>2</sub>80%削減シナリオ(2017年12.3億t→2050年2.4億t)：電化、脱炭素化、省エネが進展
- 原子力の想定：40年運転+20年運転延長、新增設無し(2017：43GW→2050：21GW)
- 電化率：27%(2017)→45%(2050)；電動自動車拡大、ヒートポンプ技術拡大
- 省エネ：10%省エネ進展；人口減少、エネルギー利用高効率化
- 再エネ電源比率：16%(2017)→77%(2050)；自然変動電源比率：6%→60%

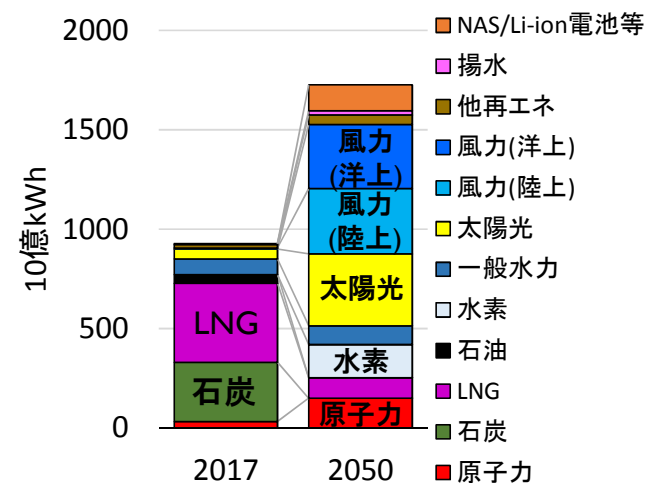
## 最終エネルギー消費



## 一次エネルギー供給



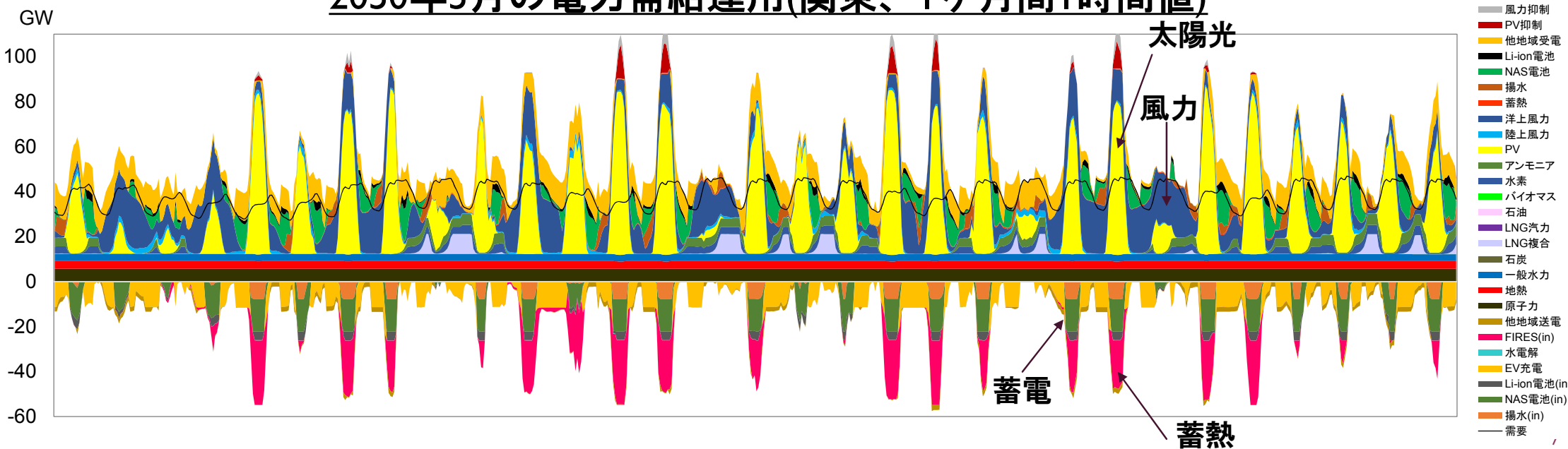
## 電源構成(発電量)



# 電力需給運用(2050年)

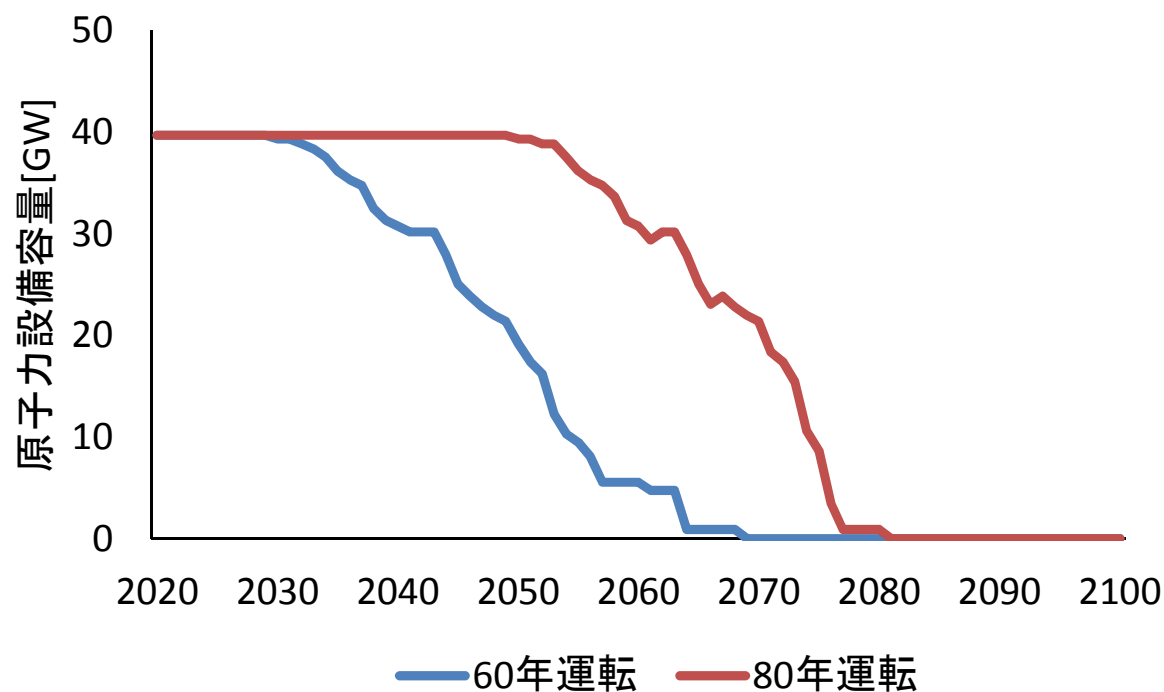
- 再エネ大量導入→電力需要・供給バランス維持の困難化→電力供給が需要を大きく上回る時間帯での技術的対応強化が必要
- 再エネ余剰電力を利活用した技術イノベーション、ビジネスモデル構築が重要(電力貯蔵、水素、合成燃料製造、メタネーション、DAC(Direct Air Capture)等)

2050年5月の電力需給運用(関東、1ヶ月間1時間値)



# 日本の原子力発電の展望

- 気候変動問題は2100年以降も見据えた長期的視点での対策が必要
- 2050年以降の21世紀後半における日本の原子力の位置づけに関する検討も重要




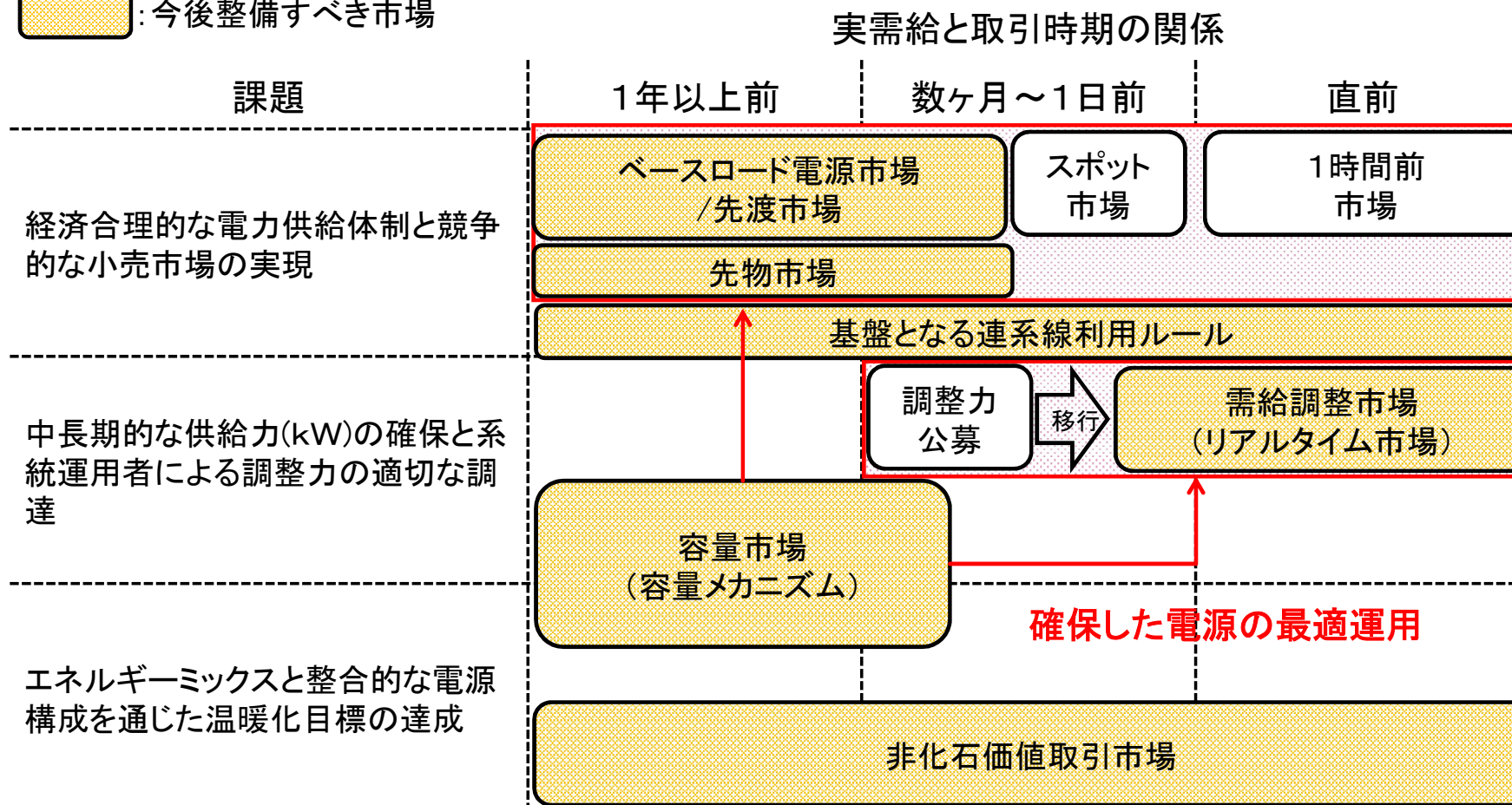
\*計画段階の原子炉は含めていない



# 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

# 電力基幹系統を考慮した最適電源構成モデル

## ■ 分析手法：線形計画法

- 目的関数：固定費(発電・電力流通設備)+燃料費(火力・原子力)+電力貯蔵設備運用費
- 制約条件：同時同量制約、発電出力制約(定検パターンを考慮)、供給予備力制約、負荷追従制約、最低出力制約(火力・原子力)、送電容量制約、電力貯蔵設備制約、設置可能容量制約、SNSP制約など
- 全量メリットオーダー取引、連系線間接オークションを想定

## ■ 地理的解像度：

- 352母線、441本の基幹送電線(沖縄除く)

## ■ 時間解像度：

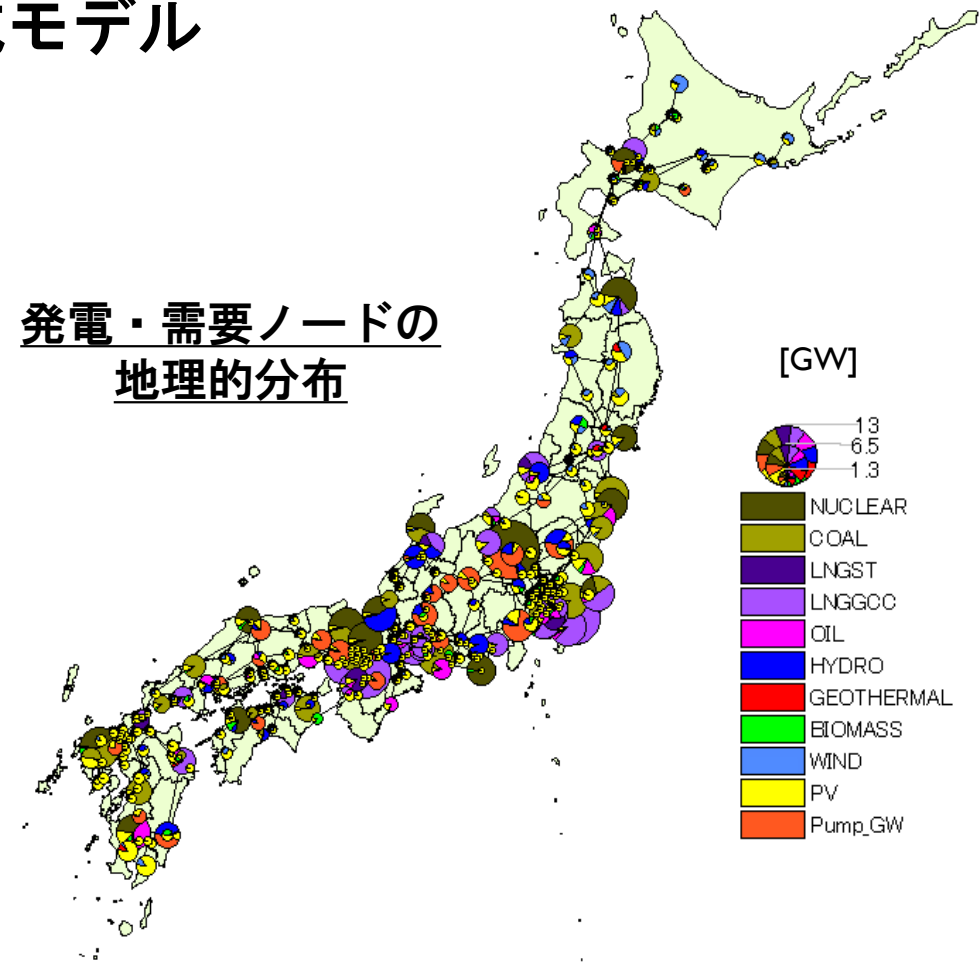
- 10分値以上で任意選択可能
- 6時点/時間×24時間/日×365日=52,560時点/年

## ■ 発電設備：石炭, ガス複合, ガス汽力, 石油, 原子力, 水力, 地熱, バイオマス, 海洋, 太陽光, 風力

## ■ 電力貯蔵設備：揚水, NAS電池(長周期変動用), Li-ion電池(短周期変動用)

\* 計算規模：10分値での分析の場合、制約条件数：3.7億本、内生変数2.6億個

## 発電・需要ノードの地理的分布



Reference:

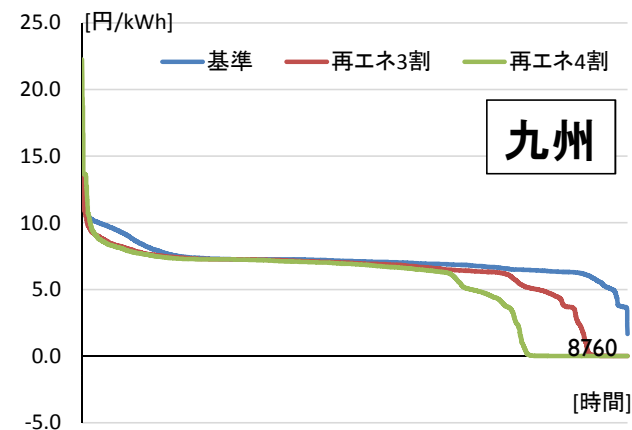
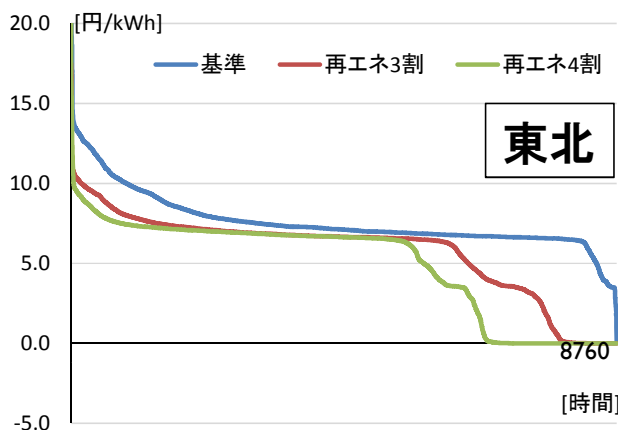
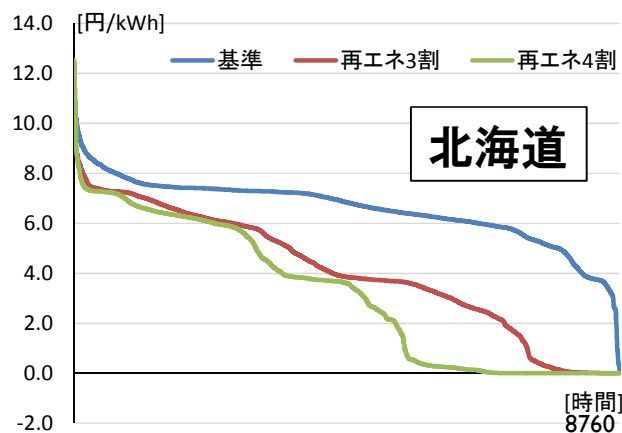
Komiyama, R., Fujii, Y., *Renewable Energy*, 139(8), 1012-1028 (2019)

Komiyama, R., Fujii, Y., *Energy Policy*, 101(2), 594-611 (2017)

# 電力価格(エリア価格)

再エネ電力比率のシナリオ： 再エネ2割(基準)、再エネ3割、再エネ4割

- 再エネ比率拡大につれ、北海道、東北等で電力価格が低下する時間帯が増加
  - ・ 再エネ4割ケース：北海道で年間3000時間、九州で年間1500時間で価格がゼロ
- 電力設備の新規投資・維持費用の回収が困難化することを示唆

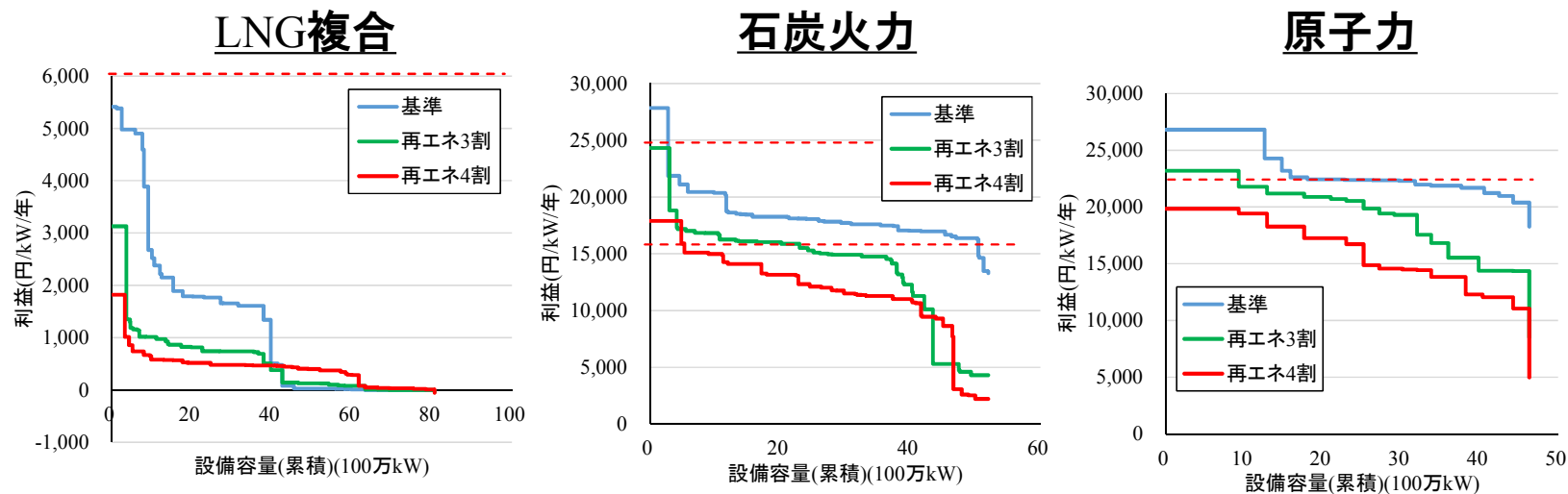


# 再エネ大量導入下での電源の収益性

- 再エネ大量導入→卸電力価格の低下・火力/原子力稼働率の低下→火力/原子力の収益低下、投資回収の困難化
- 容量市場、需給調整市場の役割が重要に

- 【LNG複合】 スポット市場のみでの投資回収は困難 (固定費:年間6千~1万2千円)
- 【石炭火力・原子力】 再エネ3割ケースで、大半の容量がスポット市場のみでの投資回収が困難化 (石炭固定費:年間1万5千~2万5千円、原子力固定費:年間2万2千~3万7千円)

## 【火力、原子力の電力市場からの収入】

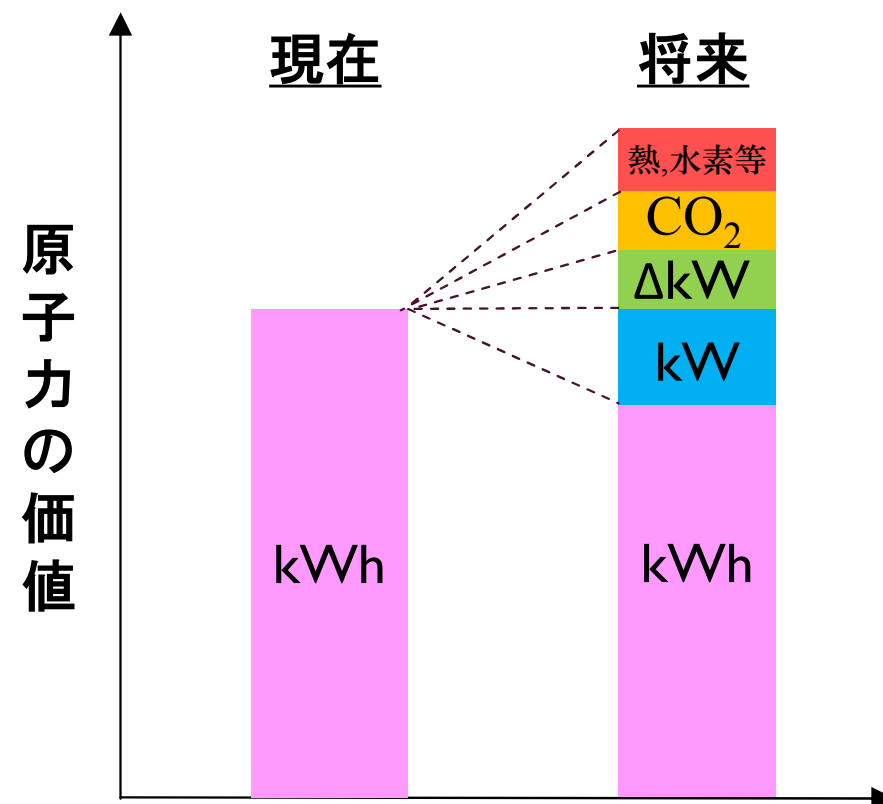


# 原子力の新たなエネルギー市場戦略

➤ 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  
→ 市場競争力の向上が必要



# 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/>



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

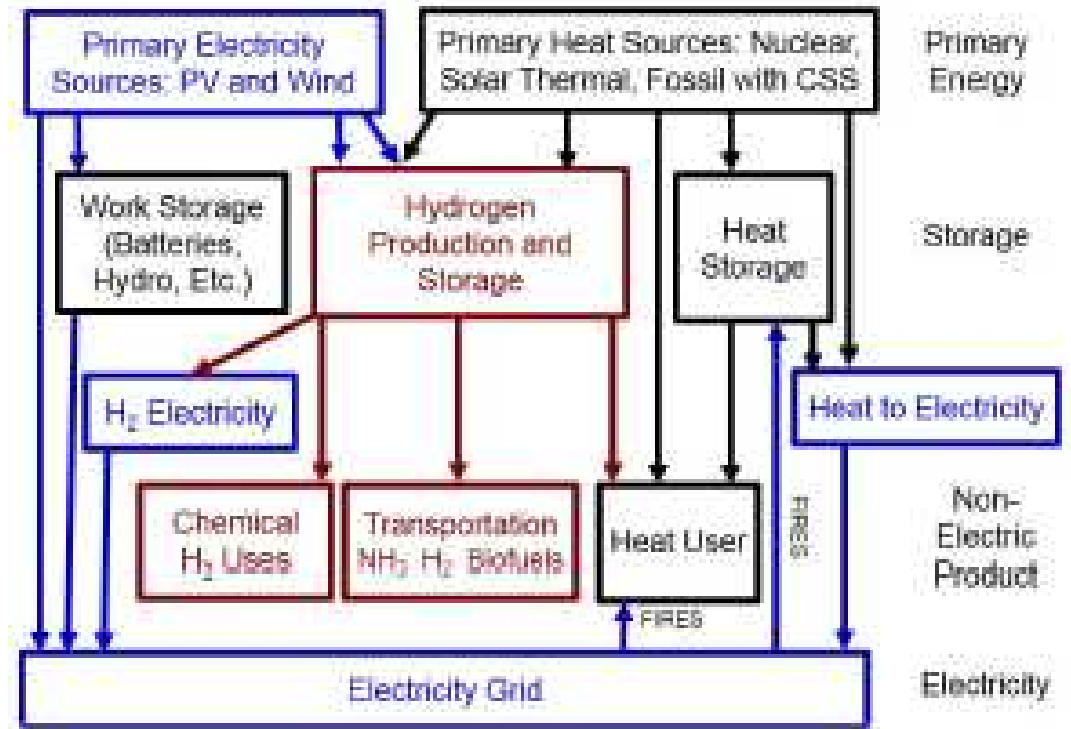
Massachusetts Institute of Technology  
77 Massachusetts Avenue, 24-215  
Cambridge, MA 02139-4307



# 原子力・再エネの共存戦略

- ◆ 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

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

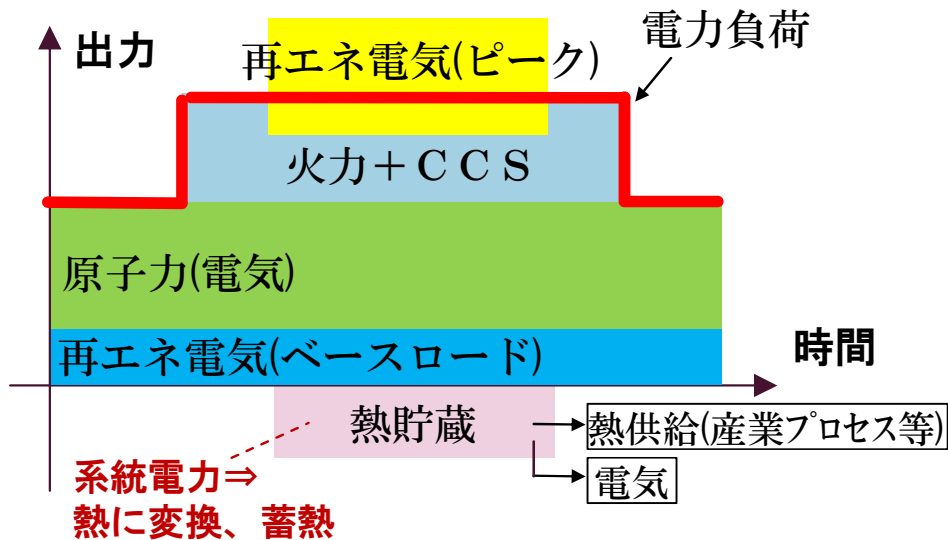


(出所)“MIT-Japan Study Future of Nuclear Power in a Low-Carbon World: The Need for Dispatchable Energy” (2017)

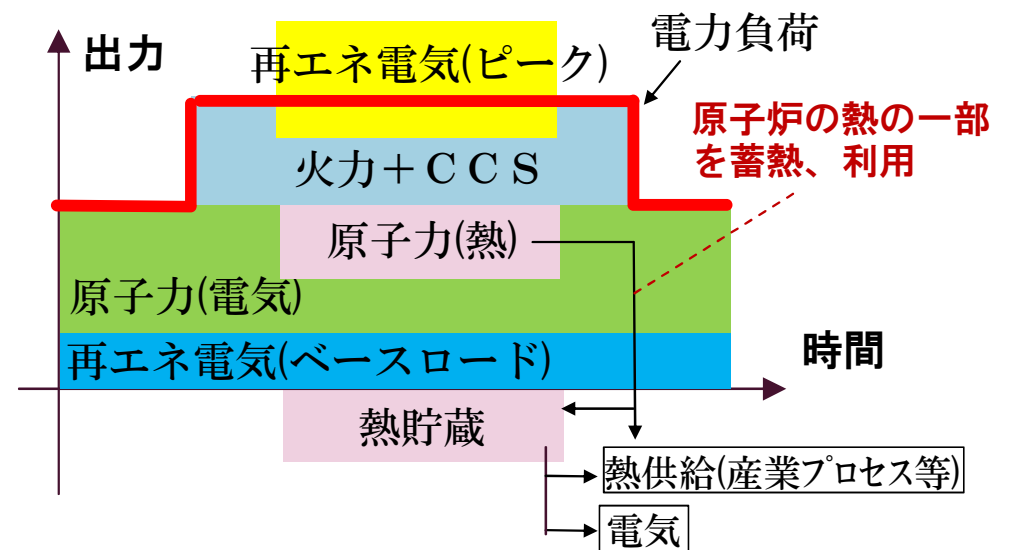
# 原子力・再エネの共存戦略(熱利用)

- 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

## 原子炉の熱出力および電気出力一定



## 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

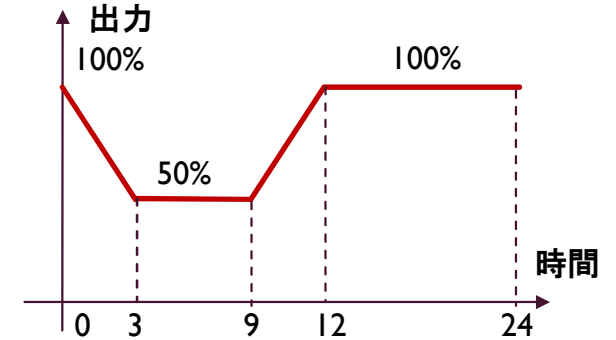
## 日間負荷追従運転

- 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)

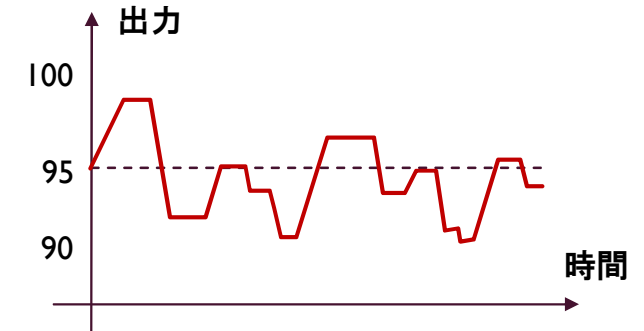
## AFC運転(Automatic Frequency Control)、GF運転(Governor Free Control)

- 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)



# 小型炉 (Small Module Reactor: SMR)

	小型炉	大型炉
建設コスト	投資リスク低減(数百億円/基)	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	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(受動的安全性)	安全対策コスト上昇
事故リスク対応	事故時の避難対策エリアが限定的、需要地近接立地	避難対策エリアが広大

## ➤ 例：高温ガス炉 (HTGR)

- 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(大量導入できなければ効果は限定的?)

# 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

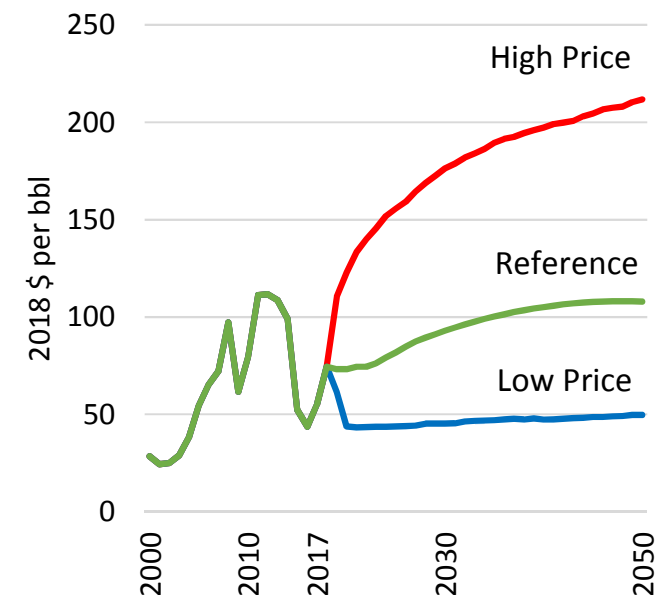
- 石油需要の低迷、米シェール急増、原油価格の伸び悩み
  - ・ 石油の上流開発投資の抑制→将来の石油危機発生火種の火種に
  - ・ 中東等産油国の石油収入減少、中東情勢流動化のリスク
- 原油価格(2050年) → 最大200ドル/バレル超えの可能性

## ■ 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))

\*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>>

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

# 結語

## 原子力技術開発の方向性：

従来からのニーズ(安全性/経済性/持続可能性/核拡散抵抗性)に加え、  
新たなニーズ(再エネ、レジリエンス)に適合した原子力技術開発も必要

- 再エネ大量導入への適合、原子力・再エネ共存の実現
  - 原子炉の負荷追従機能の向上(熱貯蔵、水素貯蔵、負荷追従運転等)
- 大規模停電リスクへの対応、電力システムのレジリエンス強化
  - 原子炉の自律運転機能の強化、ブラックアウトスタートへの対応等