

EU-日本 気候変動政策シンポジウム、令和元年12月6日

非化石エネルギーの導入拡大に向けて

(Effective Maximization of Non-Fossil Energy Supply)

東京大学 小宮山 涼一

Ryoichi Komiyama, Associate Professor, The University of Tokyo

電力CO₂原単位の動向 (Carbon Intensity of Electricity)

■ 日本(Japan):

- 460 g-CO₂/kWh (2018年)、390 g-CO₂/kWh (2010年)

■ 欧州(Europe)

- 300 g-CO₂/kWh (2018年)

■ フランス(France)

- 40 g-CO₂/kWh (2018年)

■ イギリス(United Kingdom):

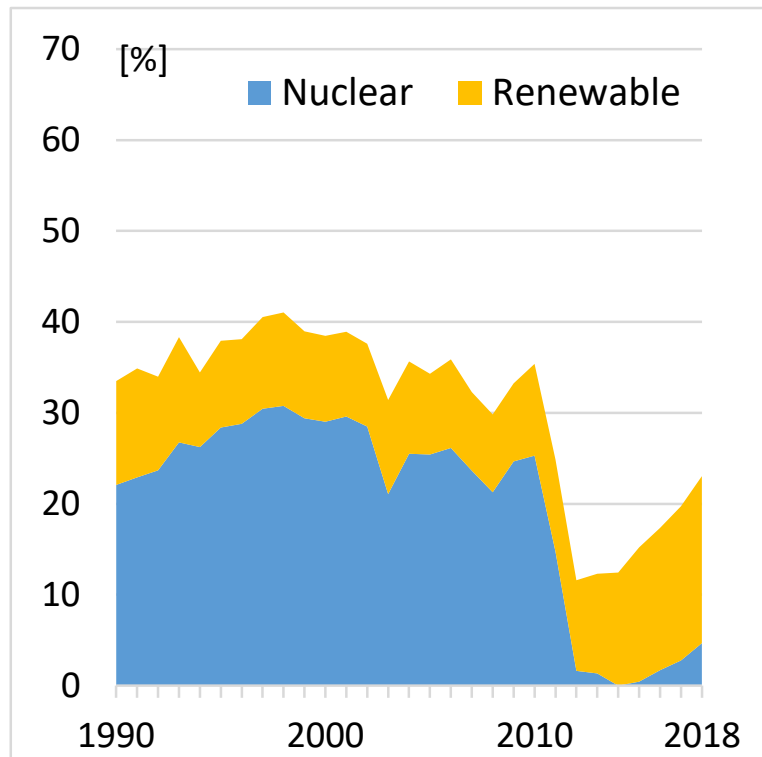
- 220 g-CO₂/kWh (2018年)

非化石電源の動向 (Non-fossil Power Supply)

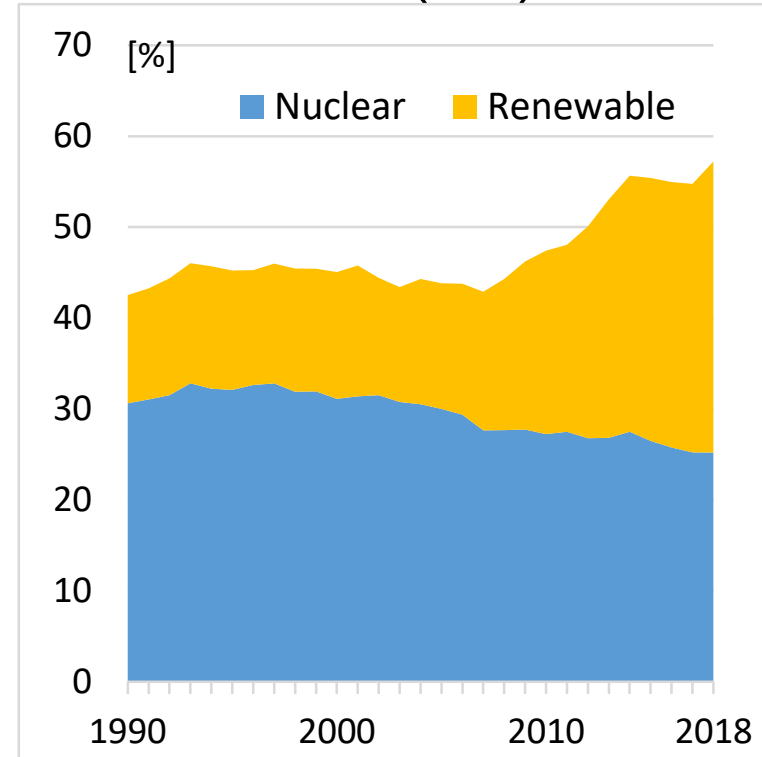
- 日本：再エネ導入拡大の一方、原子力再稼動が停滞
- 欧州：非化石電源比率は6割まで上昇

非化石電源比率 (Ratio of Non-fossil Power Supply)

日本 (Japan)

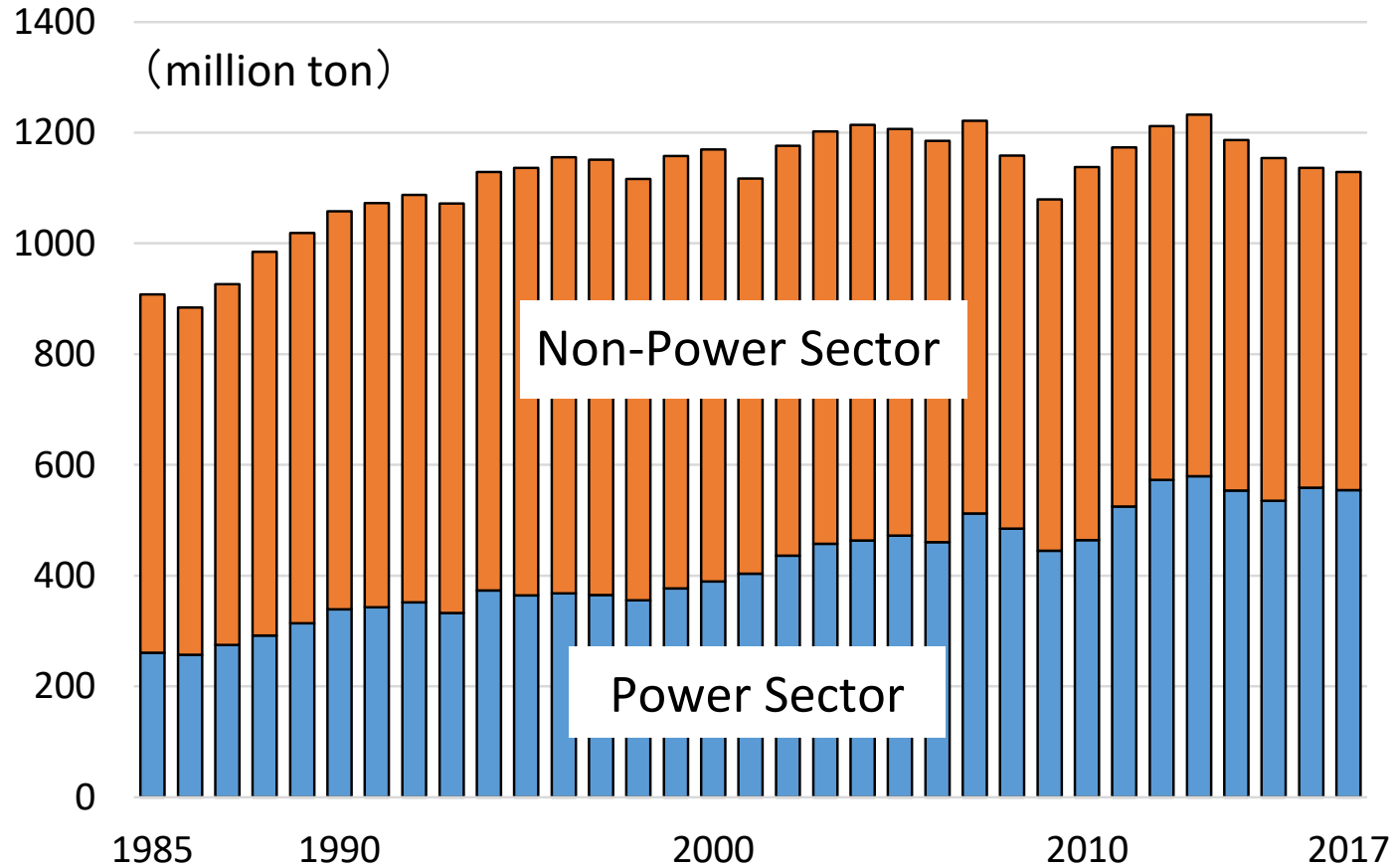


欧州 (EU)



(出所) BP Statistical Review of World Energy 2019

日本のCO₂排出量 (CO₂ Emissions in Japan)



発電部門のCO₂排出量
再エネの拡大下でも、高止まり

太陽光発電

2011年

490万kW



2017年

4,450万kW

(9.1倍増)

CO₂(発電)

2011年

5.3億トン



2017年

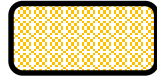
5.6億トン

(1.1倍増)

(出所)日本エネルギー経済研究所/エネルギー・経済統計要覧等をもとに作成

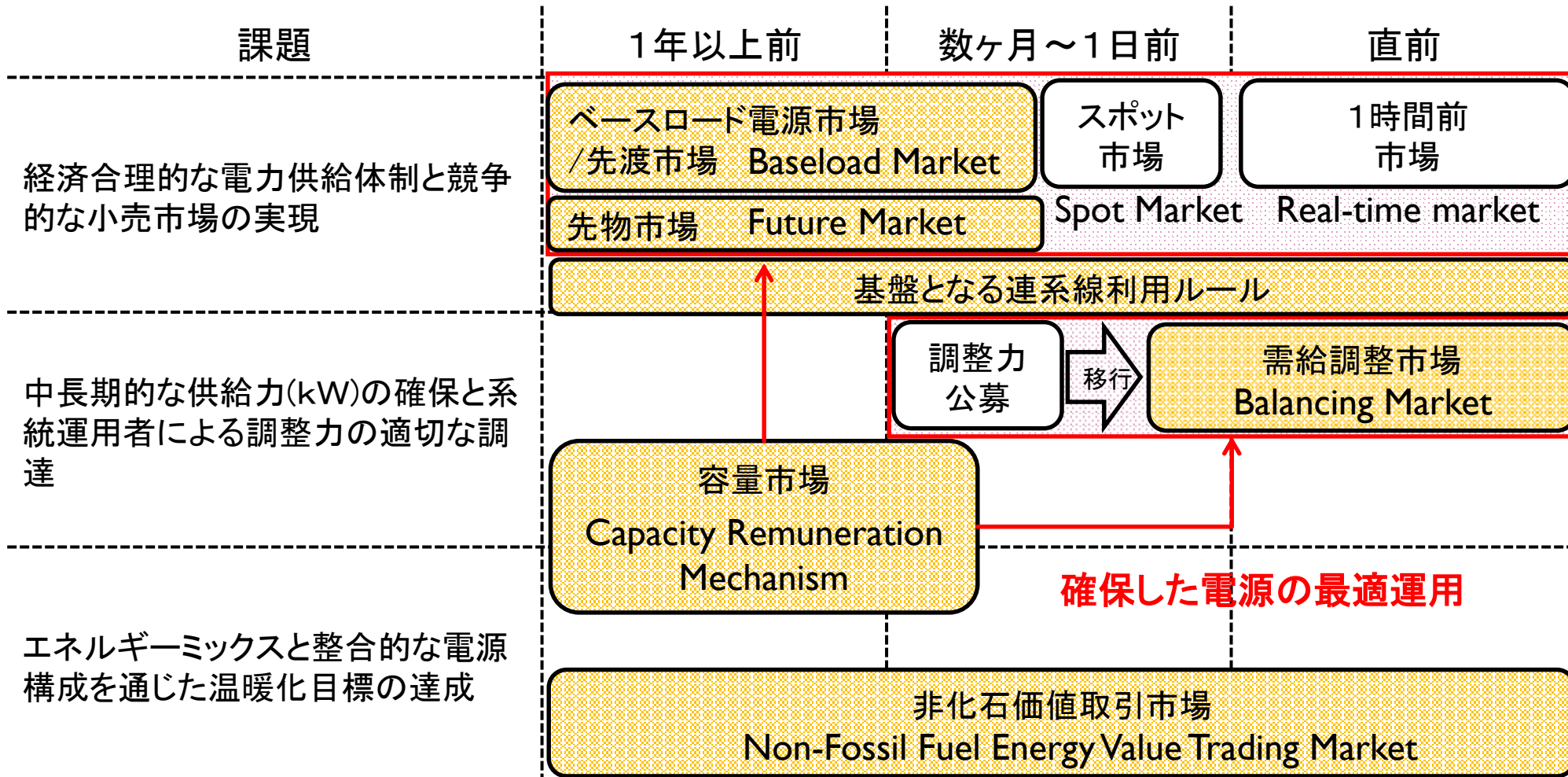
電力システム改革 (Power System Deregulation in Japan)

電力自由化の中、地球環境問題への対応をどう進めればよいか？



: 今後整備すべき市場

実需給と取引時期の関係



※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

再生可能エネルギーの大量導入 (Extensive RE Integration)

- **電力需給の変動** (Balancing issues)

調整力の確保、電力貯蔵(短周期～長周期)

- **電力システムの安定性** (Grid stability)

システムの慣性(Inertia)の維持

- **効率的な送電線利用** (Efficient usage of transmission lines)

発電側課金、N-1電制、ノンファーム接続

最適電源構成モデル (Optimal Power Generation Mix Model)

- 変数、制約条件の数で世界最大規模の電力需給モデル

- 地理的解像度：352母線、441本の基幹送電線

Geographical Resolution: 352 nodes, 441 transmission lines

- 時間解像度：1時間値、年間8760時間

Temporal Resolution: an hourly resolution, 8,760 hours

- 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

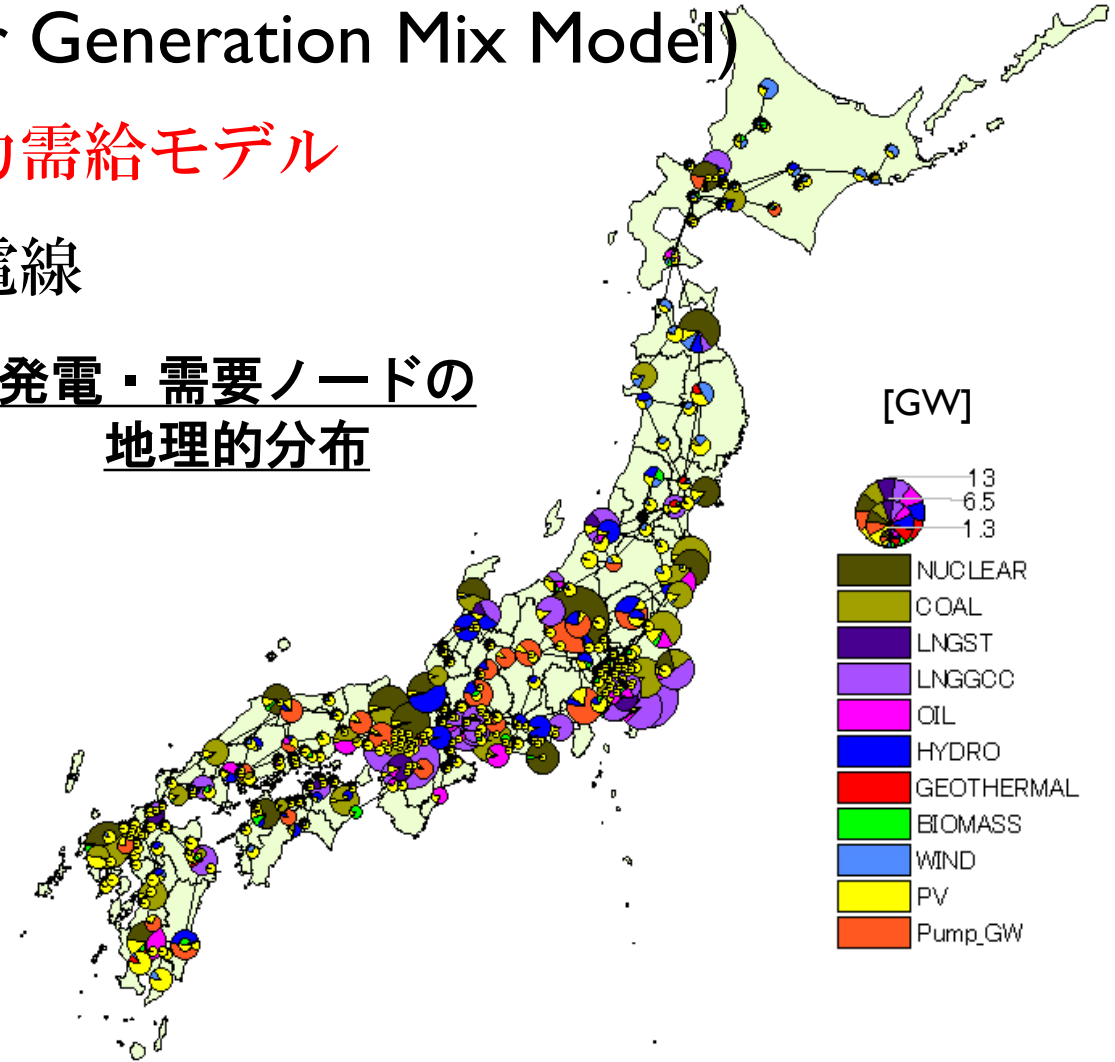
- 全量メリットオーダー取引、連系線間接オークションを想定

- 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：変数、制約条件ともに1.5億個/本以上

発電・需要ノードの
地理的分布



Reference:

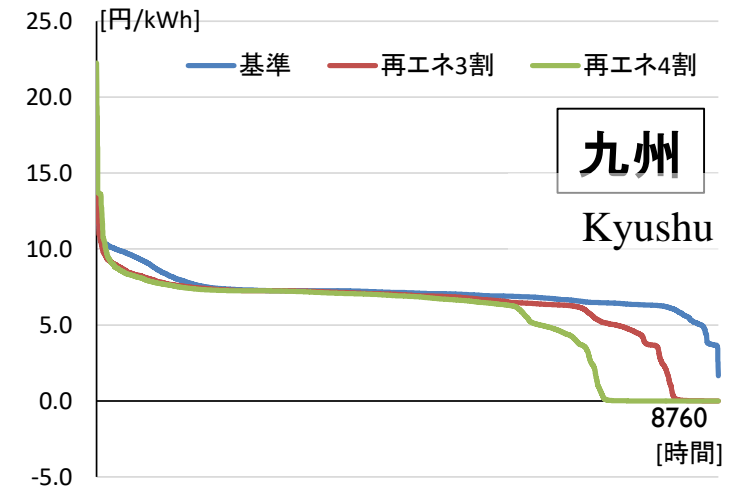
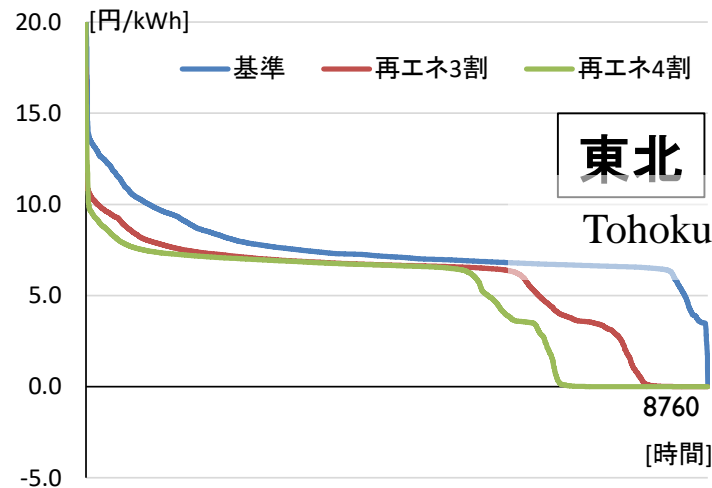
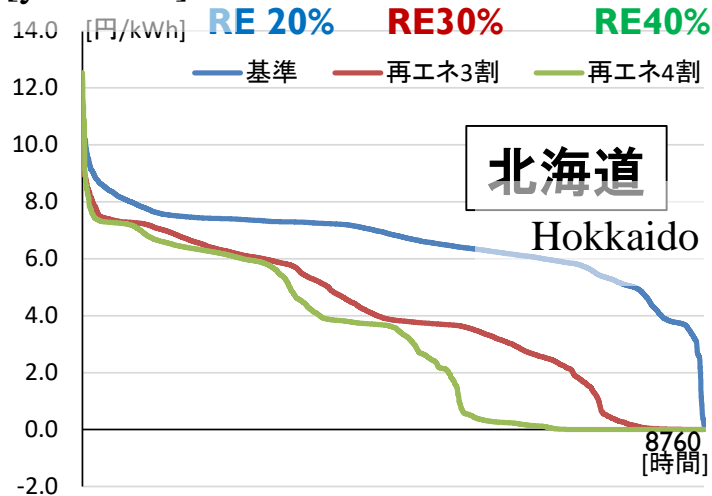
Komiyama, R., Fujii, Y., *Renewable Energy*, 139(8), 1012-1028 (2019)

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

卸電力価格(エリア価格) (Wholesale Power Price)

- 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

[yen/kWh]



* 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

RE 20%

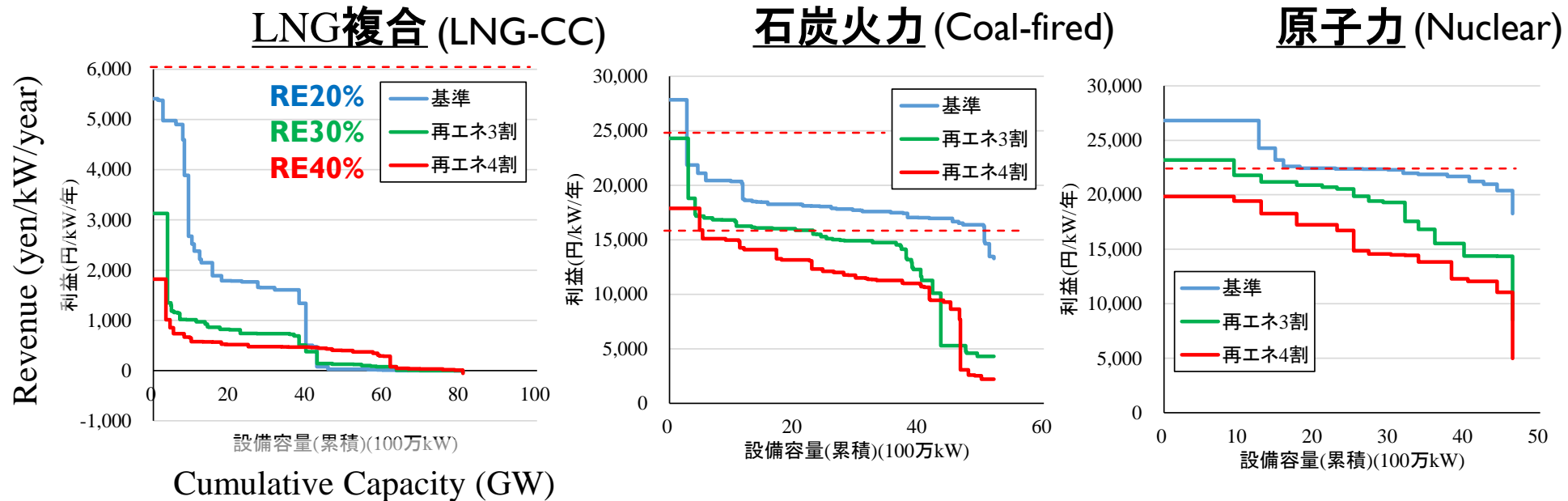
RE 30%

RE 40%

電源の収益性 (Revenue of Power Generator)

- 再エネ大量導入→卸電力価格の低下・稼働率の低下→電源の収益低下、投資回収の困難化
- 投資をいかに確保すべきか→容量市場、需給調整市場等の役割が重要に

【火力、原子力の卸電力市場からの収入】



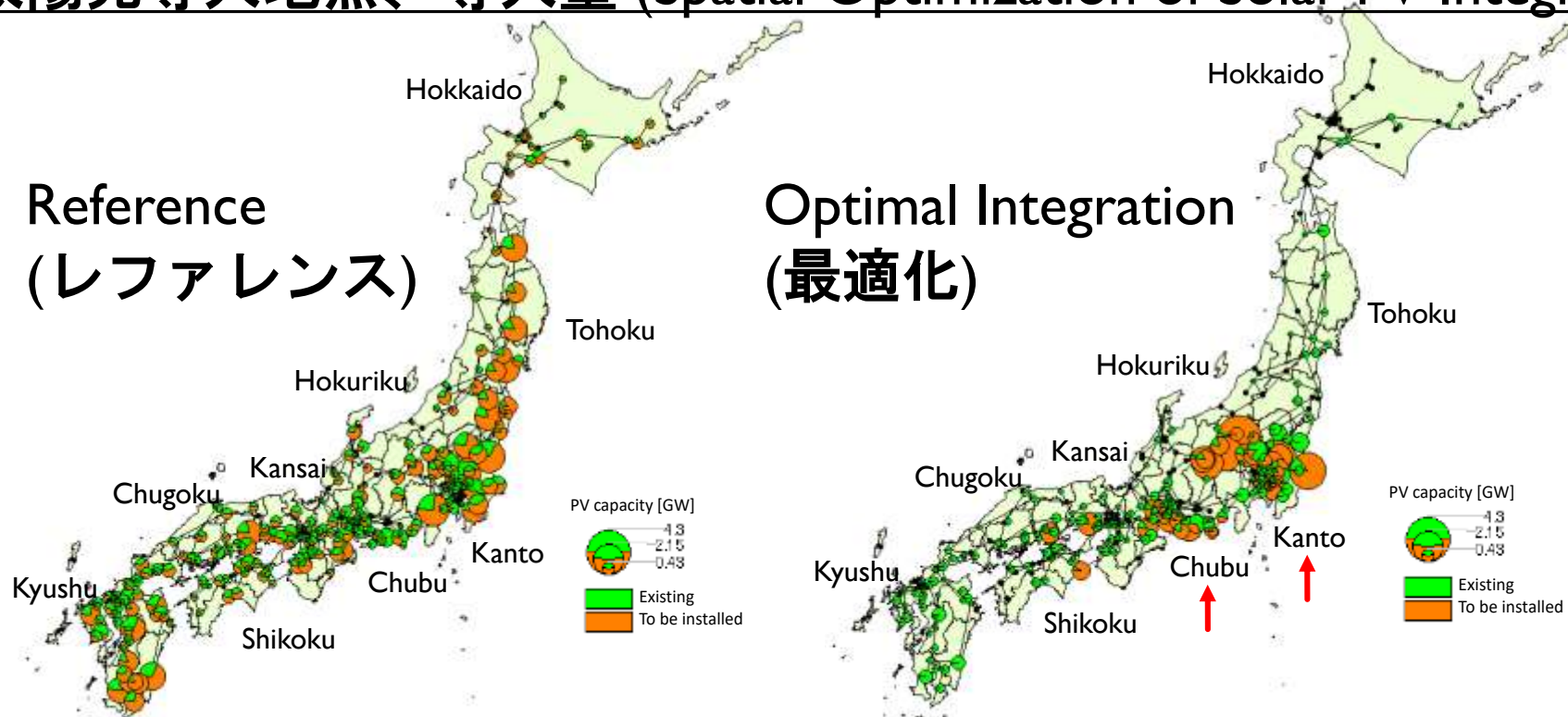
太陽光発電の電力系統への最適接続 (Optimal Grid Integration of PV)

➤ 日本の系統コスト全体が最小となる最適な太陽光発電の接続地点、接続容量を分析

*FIT未稼働容量(約4千万kW)を対象に最適化を実施

- 電力需要、調整力容量(LNGCC)の大きい関東、中部地域への導入が望ましい
- 最適化により6百万kWの太陽光導入量を節減
- 政策への示唆：地点別電力限界価格(LMP)導入、太陽光接続のゾーニング規制、導入マップ整備

太陽光導入地点、導入量 (Spatial Optimization of Solar PV Integration)



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

再生可能エネルギー・原子力の共存の実現

(Harmonization of Renewable & Nuclear Energy)

- **再エネ・原子力は脱炭素化推進の両輪**
(NU & RE are a pair of wheels for decarbonization)
- **再エネ・原子力の共存、連携技術開発が重要**
(Technical measure for NU & RE harmonization is important)
 - **原子力の負荷追従運転(GF/AFC/EDC)**
Flexible Power Operation by Nuclear
 - **新型炉開発(高温ガス炉、小型炉、高速炉他)**
Advanced Reactor (HTGR, Small Module Reactor, Fast Reactor)
 - **多様なエネルギーキャリア(熱、水素他)の利用・貯蔵技術**
Various Energy Carrier Production (Heat, Hydrogen)



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



(参考)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

➤ 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(負荷追従)

(Flexible Power Operations by Nuclear)

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

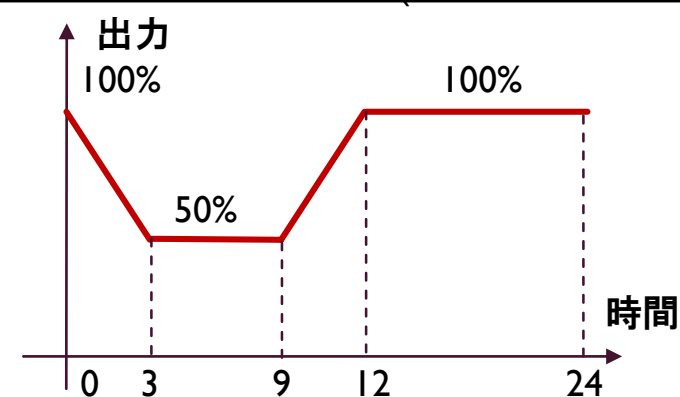
日間負荷追従運転

- 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)

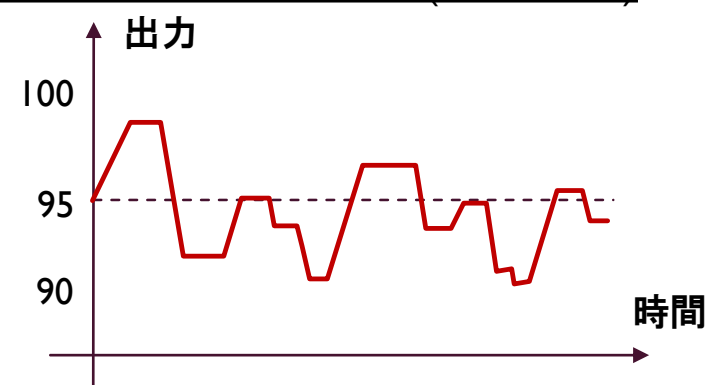
AFC運転(Automatic Frequency Control)、GF運転(Governor Free Control)

- 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)



原子力・再エネの共存戦略(熱利用)

(Heat Storage and Utilization for NU & RE Harmonization)

原子炉：熱出力一定運転＋熱貯蔵

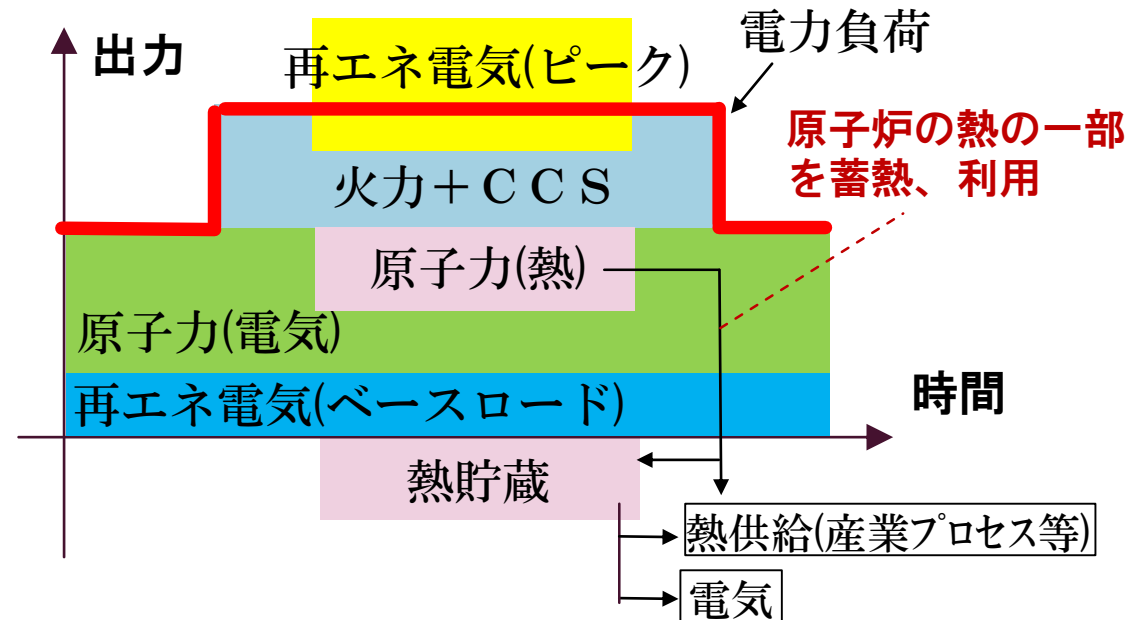
NU Reactor: Constant Heat Output + Heat Storage

→原子炉の電気出力調整

NU Electricity Output Adjustment

- 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
- 貯蔵した高温熱→産業等での利用→
ボイラ等の化石燃料、CO₂削減に貢献

原子炉の熱出力一定のまま電気出力調整



社会全体のリスク最小化 (Social Risk Minimization)

- 社会ニーズ(供給安定性、環境適合性、経済性、社会受容性他)に応える万能なエネルギー源は存在しない

No Perfect Energy Resource to Satisfy Various Social Requirements

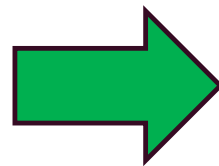
- エネルギーの選択→社会全体のリスク最小化が重要な視点

Energy Resource Selection through Social Risk Minimization is Important

社会全体のリスク

Social Risk

- 気候変動リスク
Climate Change Risk
- 地政学的リスク
Geopolitical Risk
- 災害リスク(地震他)
Natural Disaster Risk
- 経済リスク
Economic Risk
- 社会受容リスク
Social Acceptance Risk



最小化 Social Risk Minimization

最適なエネルギーミックスの実現
(再エネ、原子力、CCS、省エネ他)

Realization of Best Energy Mix
(Renewable, Nuclear, CCS, Energy Saving etc.)