

科研費プロジェクト公開研究会

2023年4月24日

# 広域需給調整の導入と 再エネの出力抑制の低減について

京都大学大学院 経済学研究科

再生可能エネルギー経済学講座 特定講師

杜 依濛・馬 騰

日本では、再エネの出力抑制が広がる

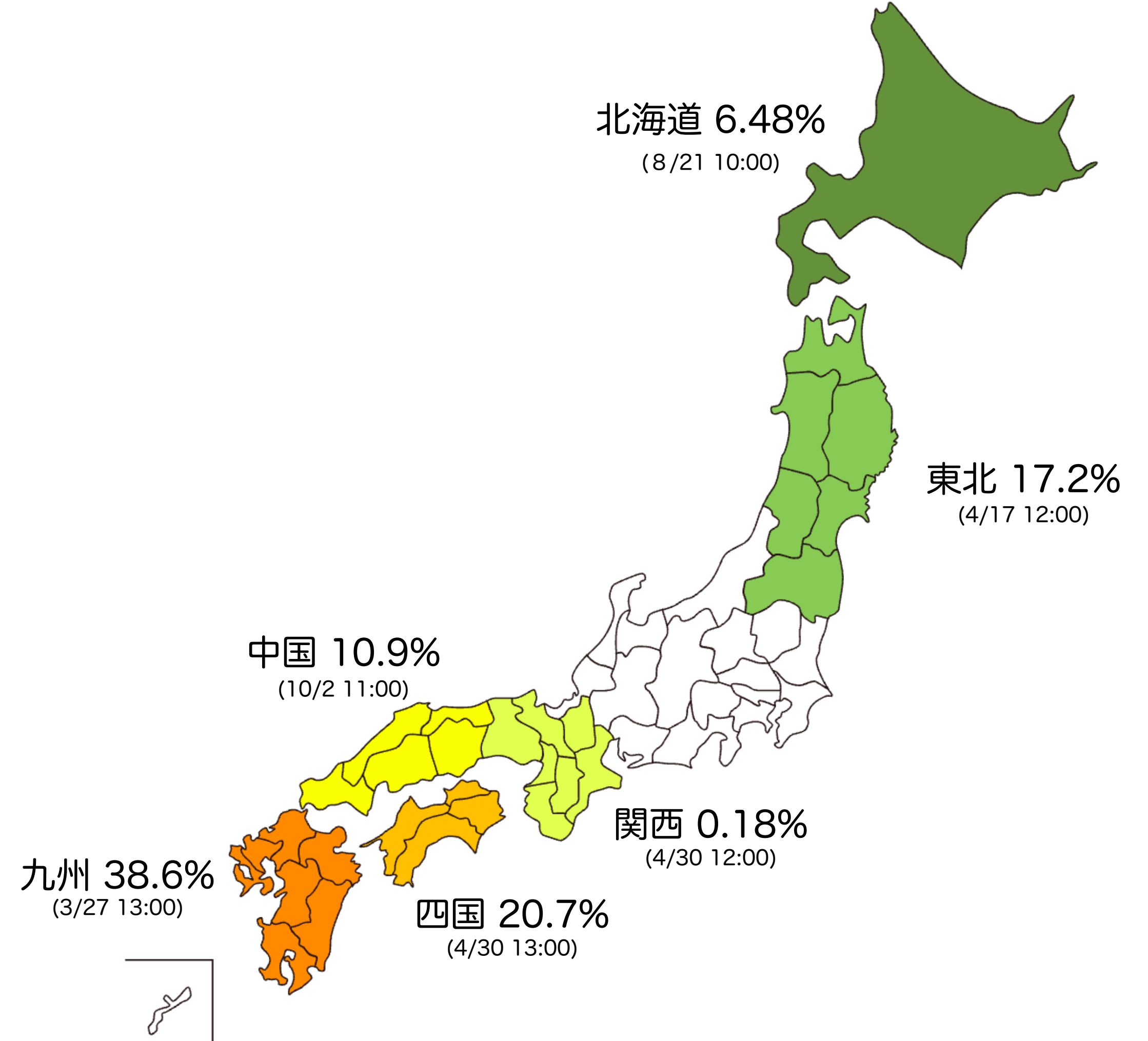


# 再エネ出力抑制の実施状況

- ❖ 日本での再エネの大規模な出力抑制は、2018年10月の九州電力管内が最初だった。同管内では、2018年から2021年までには、約250回の再エネの出力抑制が行われてきた。2021年の九州の年間再エネ出力抑制率は約5.2%にも達した。
- ❖ 2022年4月から、四国、東北、北海道、関西、中国などの大手電力管内でも、再エネの「出力抑制」が初めて行われた。

2022年最大再エネ出力抑制比率（時間当たり）

出典：エレクトリカル・ジャパン

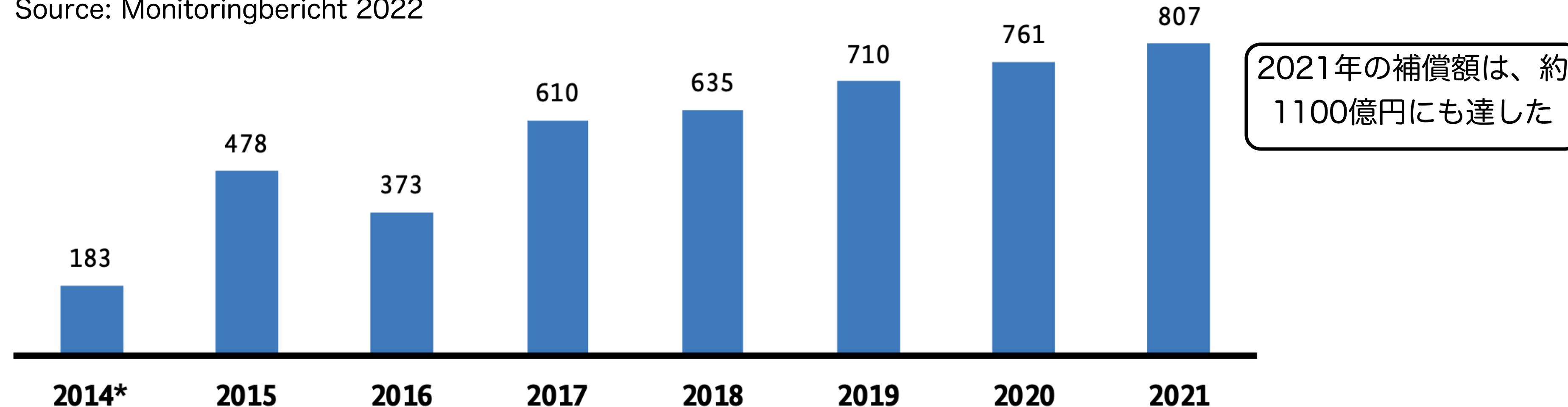


# 無補償の出力抑制

- ❖ドイツでは、再エネの出力抑制が行われる場合、再エネ促進法（EEG）で受け取ることができるはずだった損失収入の95%は送電事業者（TSO）が発電事業者に補償する。TSOが託送料金を通じて回収し、最終的には電力消費者が負担している。
- ❖日本では、無補償の出力抑制ルールが定められ、一般消費者への負担が少ない反面、再エネ発電事業者にとって売電収入が下がり、投資リスクが高まる可能性が高い。再エネの導入拡大を図るため、再エネによる発電量の効率的な運用は課題となる。

図. ドイツの出力抑制に対する補償額の推移（百万€）

Source: Monitoringbericht 2022

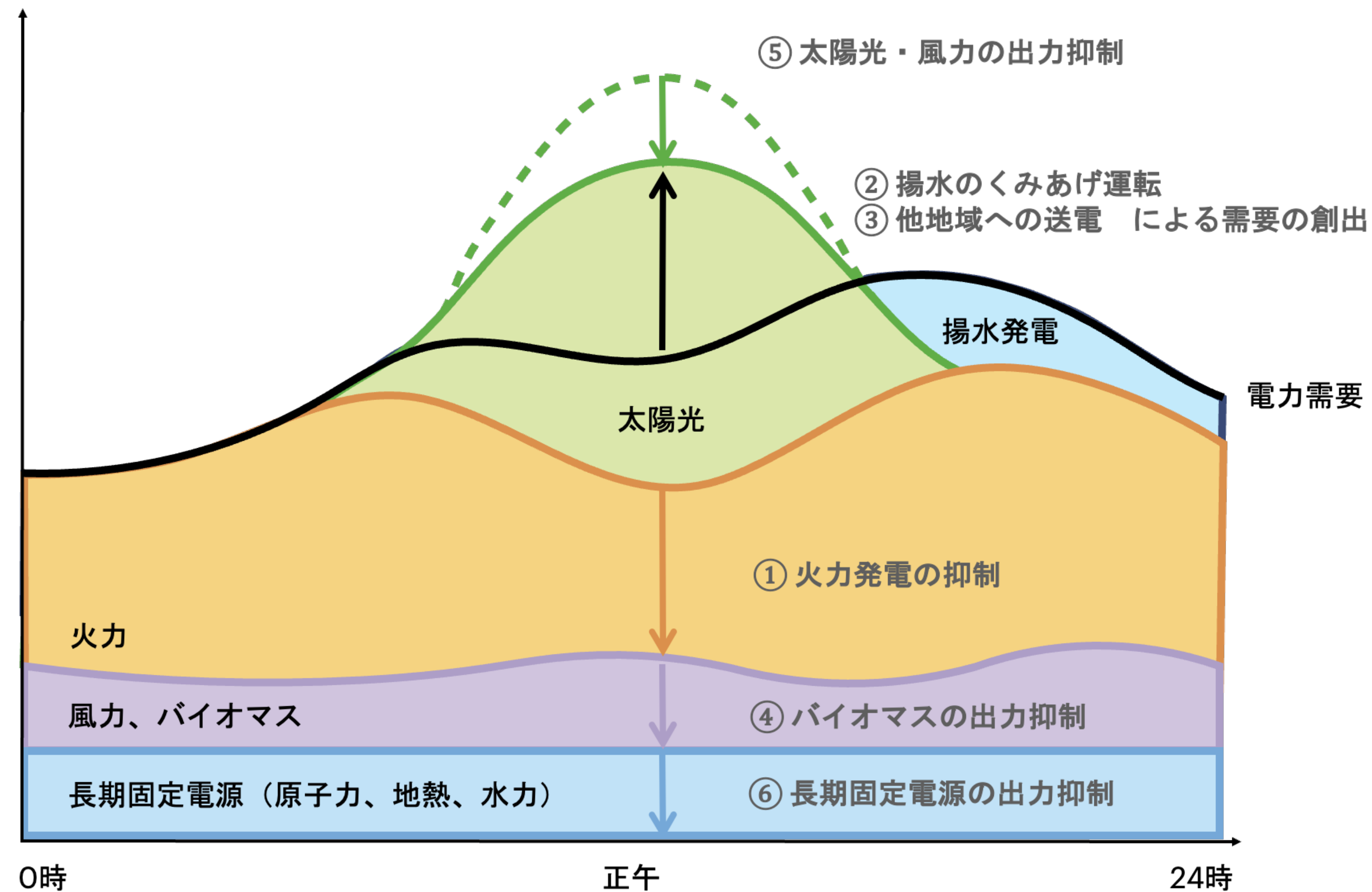


# 再エネ出力抑制を低減するための措置



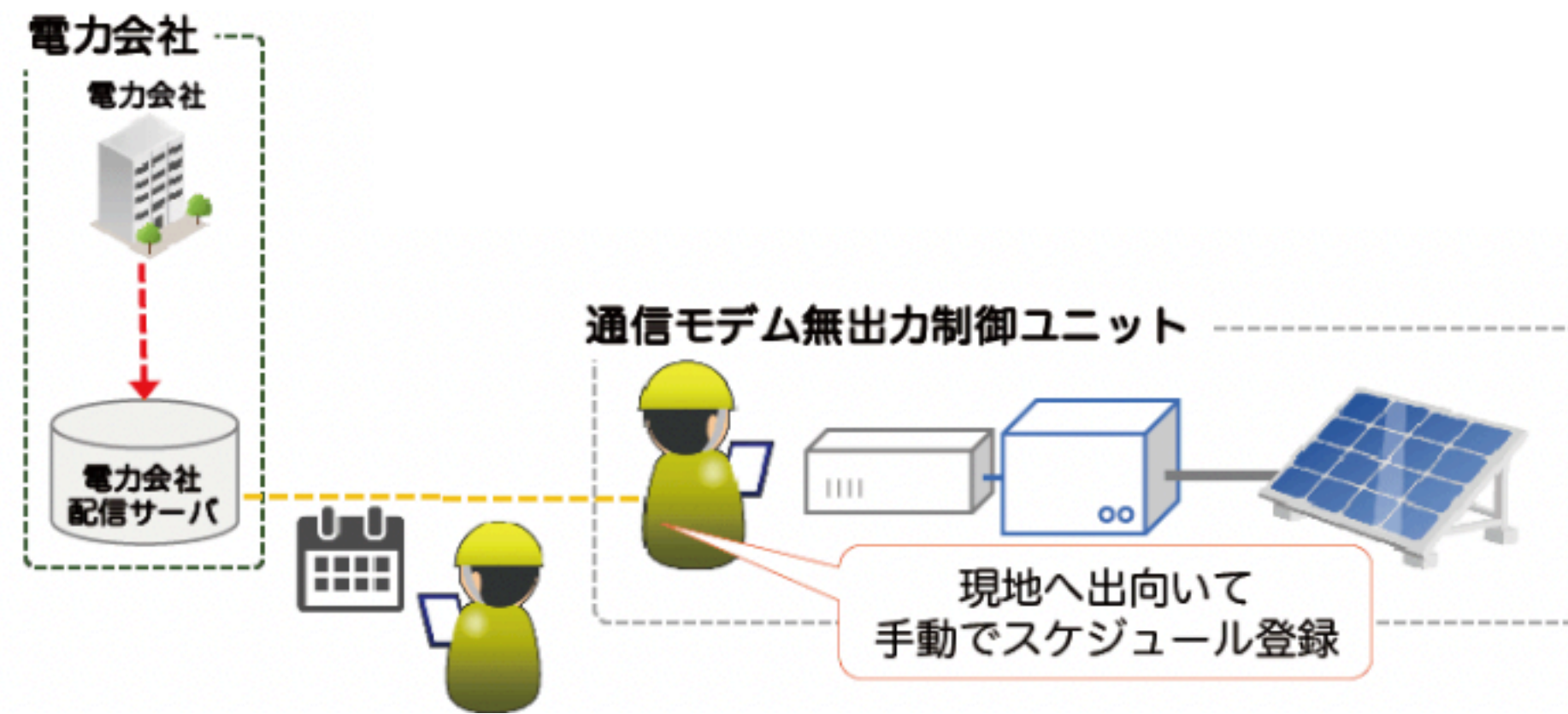
# 優先給電ルール

- ❖①から⑥の順番には、各発電機の発電コストや技術的特性が関係している。
- ❖太陽光・風力は発電に係るコストが安く（限界費用がゼロに近い）、後順位となっている。



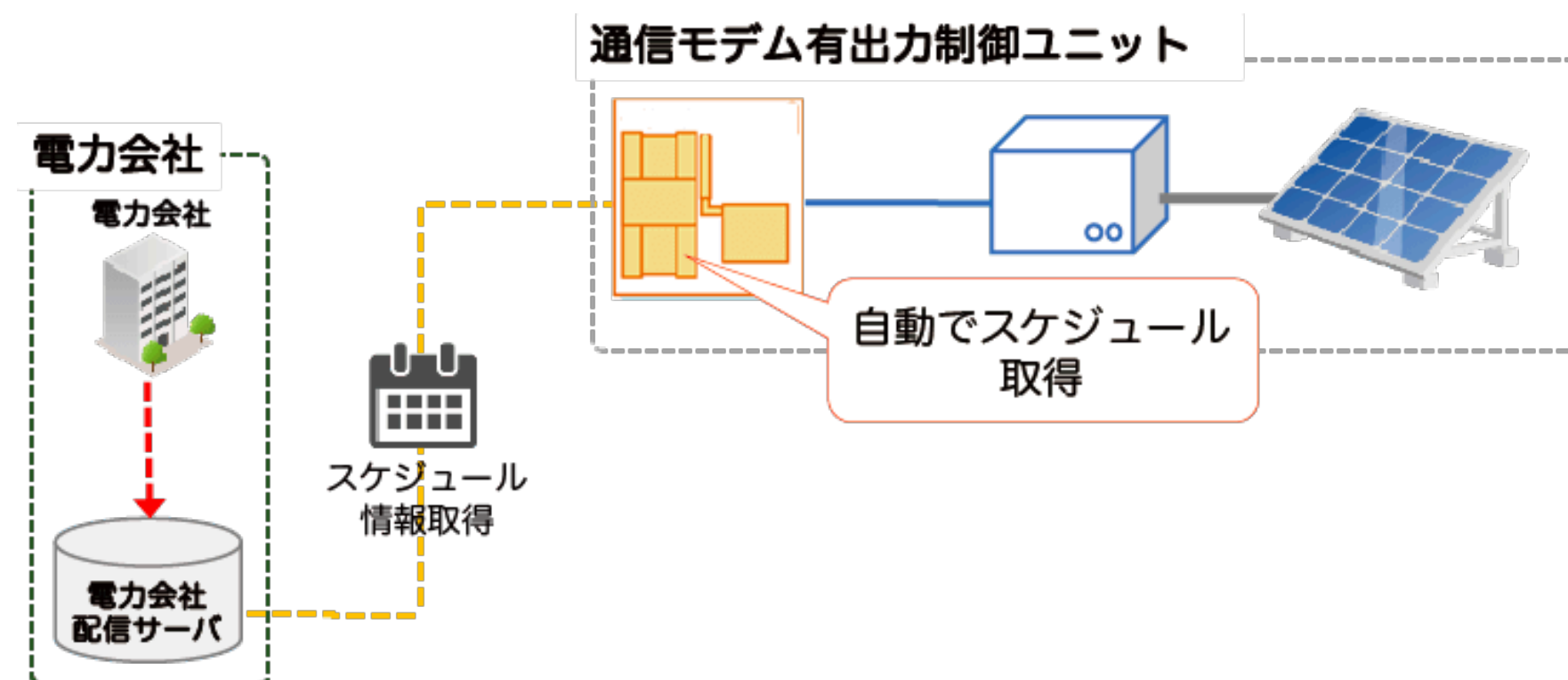
# オンライン・オフライン発電所

- ❖ オフライン発電所：出力制御機器を設置していない発電所で、出力制御実施日の前日に電力会社から電話やメールにより指令を受け、発電事業者自身が現地or遠隔で発電設備を制御



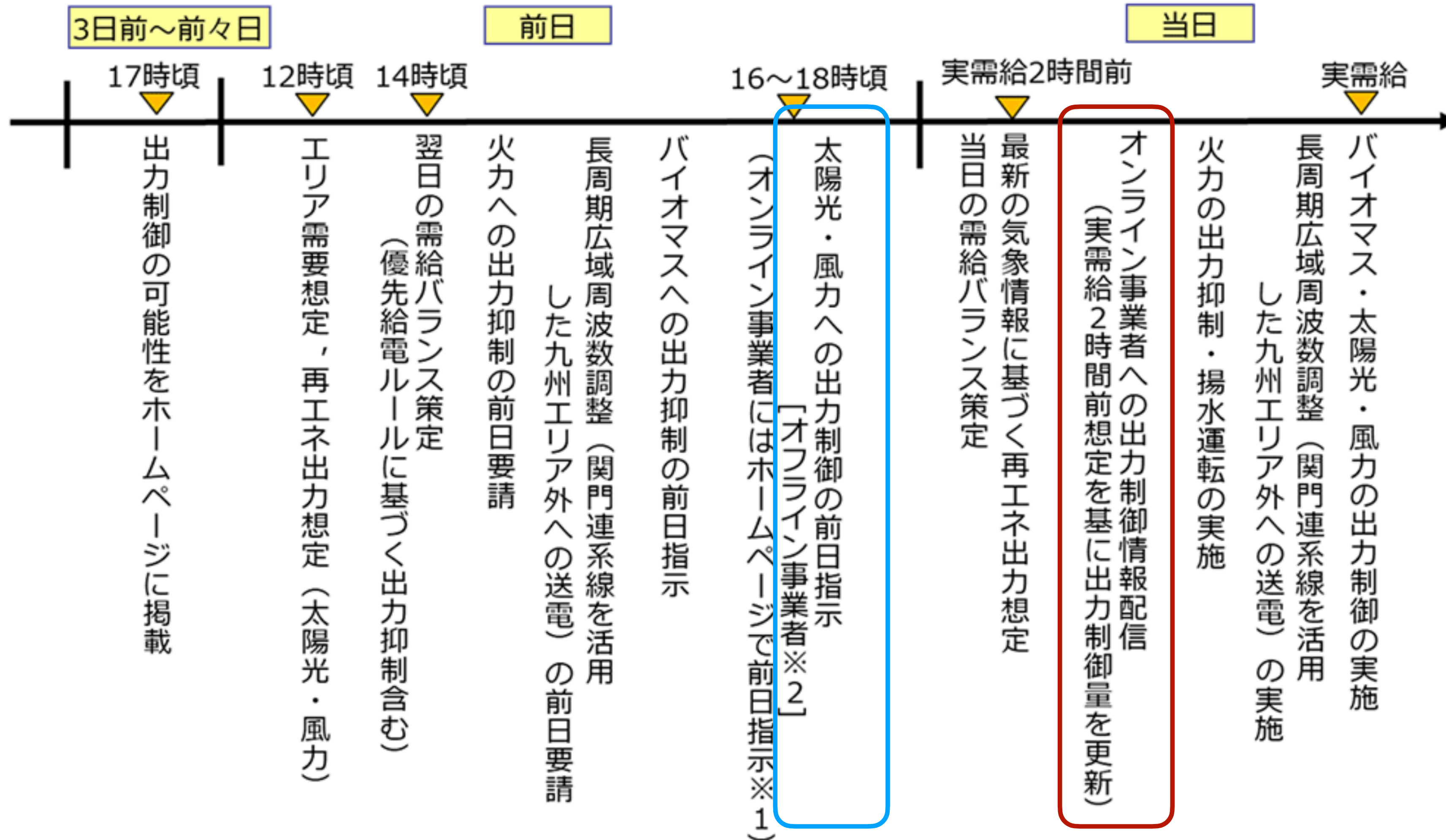
インターネットを利用できない場合、手動でスケジュールを登録し、そのスケジュールに基づいて自動的に制御を行うもの。出力制御量=多

- ❖ オンライン発電所：出力制御機器を設置している発電所で、インターネットや専用通信回線により電力会社から発電設備を遠隔制御できる発電所



インターネット経由で自動的にスケジュールを受信、そのスケジュールに基づいて自動的に制御を行うもの。出力制御量=少

# 出力抑制の流れ



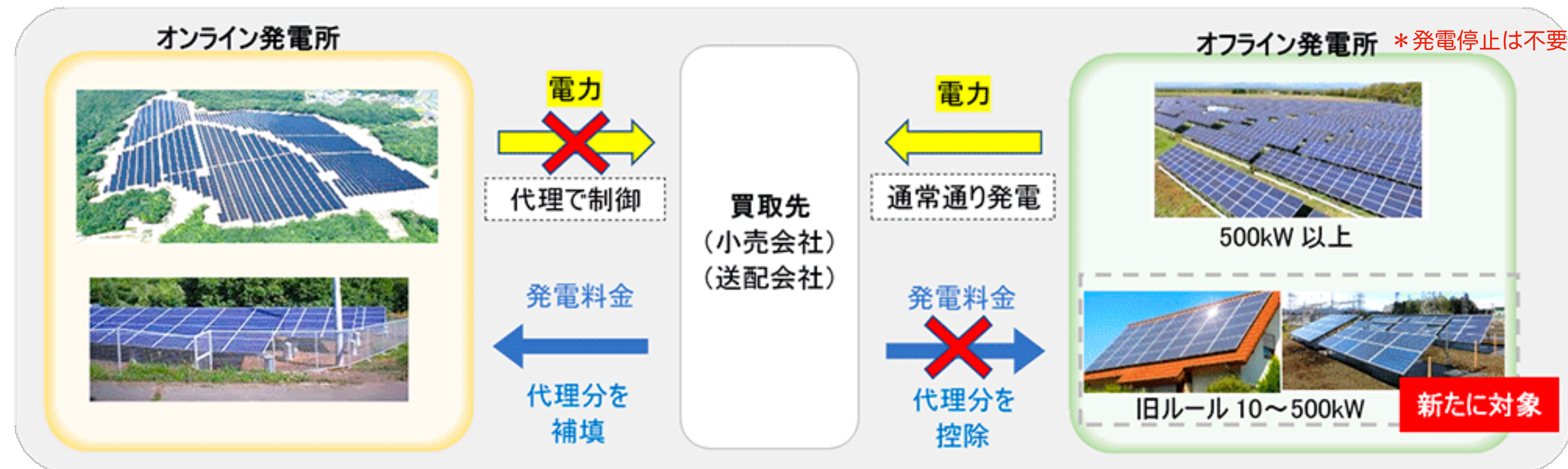
※1：オンライン事業者には、前日にホームページで出力制御の実施可能性を公表することにより前日指示を行う

※2：オフライン事業者の実制御が必要な場合



# オンライン代理制御の導入

- ❖ オンライン発電所については、2022年12月以降、自発電所に割り当てられた出力制御と、オフライン発電所に割り当てられた出力制御の代理分を実施いただくことになった。オフライン発電所自体は、発電の停止が無く、具体的な対応（発電停止操作等）も不要となった。



- ❖ 代理制御が行われた場合は、発電停止に伴う発電量の減少はないが、オンライン発電所が代理で実施した分の精算として、「本来出力制御されるはずであった時間帯の発電量（代理制御調整電力量）にFIT買取単価を乗じた金額」を2か月後の発電料金から控除する。

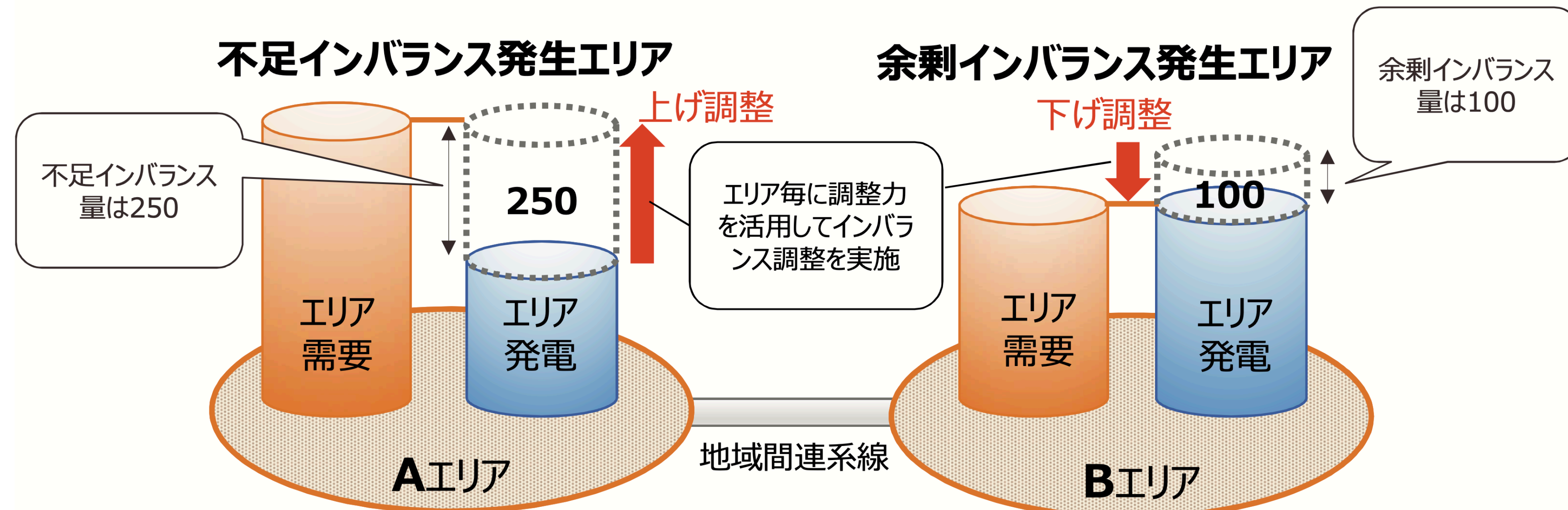
---

需給インバランスに対応する広域需給調整とは？



# 広域需給調整の実施前

- ❖ 需給インバランスとは、発電・需要電力量の30分ごとの計画値と実績値の差分。需要と供給のバランスが崩れ、需給インバランスが発生してしまうと、周波数に乱れが生じて、最悪の場合は大規模停電が発生する恐れがある。
- ❖ これまでは、一般送配電事業者がエリア毎に、調整力を利用して需給バランス調整を行っていた。
- ❖ 送配電事業者の担当エリア以外の一般送配電事業者が確保する調整力も含めて相互に活用することで、調整力コストの低減を図るため、2020年3月から広域需給調整システム（中部・北陸・関西）が導入された。

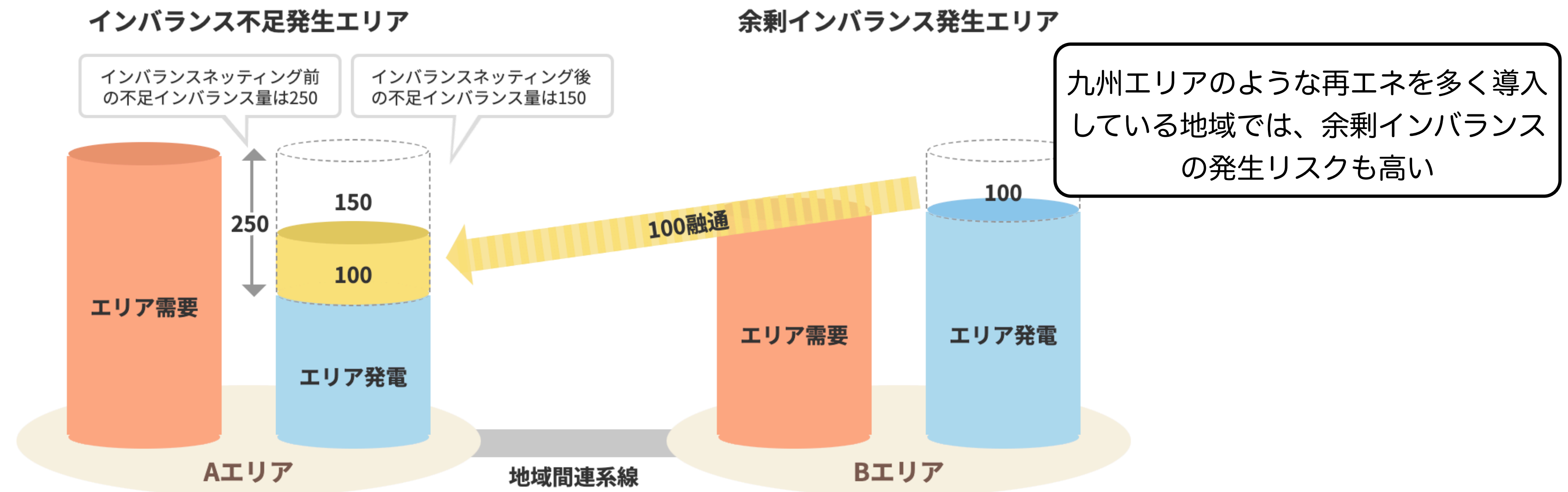


エリア毎の需給調整のイメージ

出典：「広域需給調整の概要について」2020年3月 中部・北陸・関西電力株式会社

# 広域需給調整①：インバランスネットティング

- ❖ 広域需給調整は、「インバランスネットティング」「広域メリットオーダー運用」の2ステップで行う。
- ❖ 最初は、「インバランスネットティング」により、各エリアの余剰インバランスと不足インバランスを相殺する。



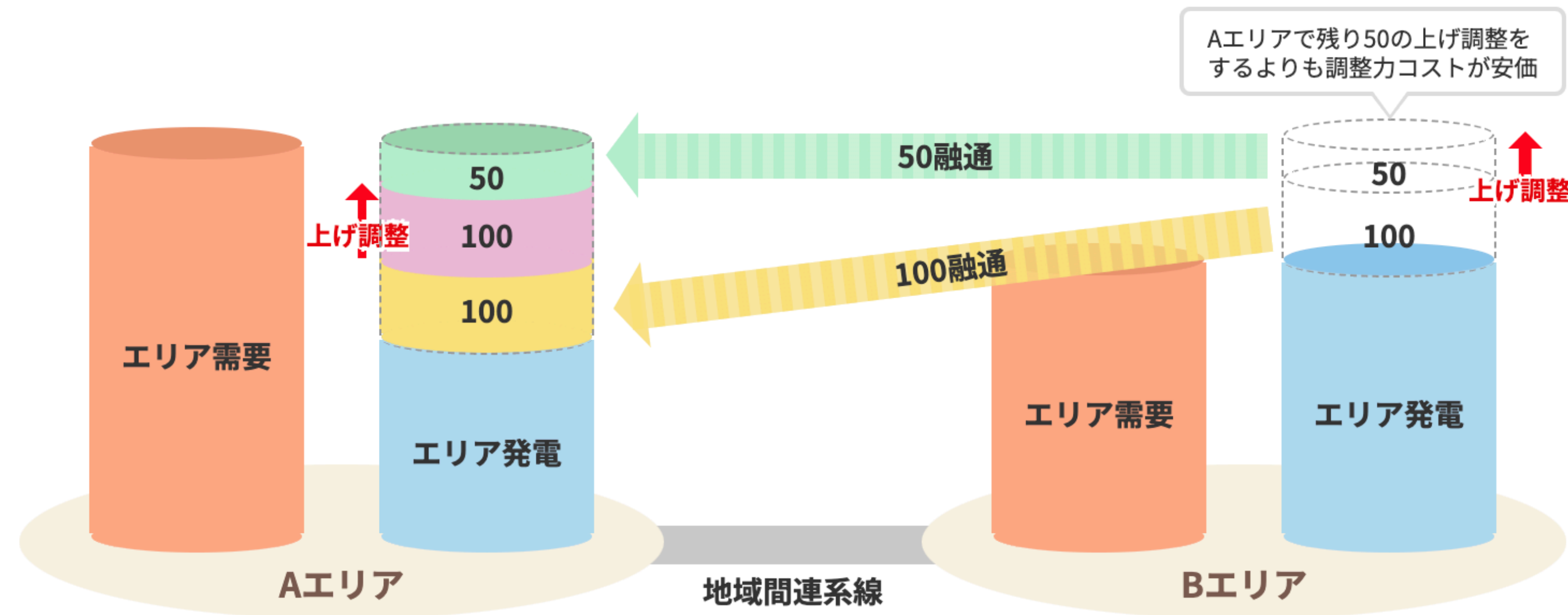
エリア間で発生するインバランスを相殺するため余剰インバランス発生エリア(B)から不足インバランス発生エリア(A)に余剰量100を融通する

- Aエリアの調整必要量は、不足250⇒不足150
- Bエリアの調整必要量は、余剰100⇒±0

調整必要量が低減

## 広域需給調整②：広域メリットオーダー運用

❖ 連系線の空容量の範囲で、両エリアのインバランスをネットィングの上、調整電源を広域的なメリットオーダーに基づき調整を行う。



全エリアで150の上げ調整をするのに最も安価な組み合わせとなるように調整力の制御量を決定・配分する

- Aエリアは、100の上げ調整
- Bエリアは、50の上げ調整

が最も安価な組み合わせの場合、50をB→Aへ融通

**調整力コストの低減**

# 需給調整業務の流れ

調整力の広域運用

実需給の  
20分前

## ① インバランスネッティング

実需給20分前までに予測した9エリア分のインバランスを、広域需給調整システムによりネッティングし、調整必要量を低減。

## ② 広域メリットオーダー

9エリアの調整力をkWh価格の安いものから運用し、ネッティング後の調整必要量を調整。

調整力の  
エリア内運用

実需給

## ③ エリア内メリットオーダー

実需給20分前までに予測できなかったインバランスや時間内変動等に対して、エリアごとに自エリアの調整力を用いて調整。

---

広域需給調整の再エネ出力抑制の低減への貢献？



# モデルとデータ

## ❖ 動学パネルモデル

$$\text{curtailment}_{it} = \alpha_0 \text{lag\_curtailment}_{it} + \alpha_1 \text{demand}_{it} + \alpha_2 \text{PHS}_{it} + \alpha_3 \text{transmitted}_{it} + \alpha_4 \text{imbalancenetting}_{it} + \alpha_5 \text{flexib\_outside}_{it} \\ + \alpha_6 \text{flexib\_inside}_{it} + \alpha_7 \text{imbalance\_forecasterror}_{it} + \gamma_i + \lambda_t + \epsilon_{it}$$

## ❖ 時間当たりパネルデータ

- 北海道、東北、関西、中国、四国、九州エリア
- 2022年4月1日～2023年2月28日

## ❖ 再エネ（太陽光・風力）抑制量

## ❖ 電力需要

## ❖ 各種電源発電量

## ❖ 連系線を通じた電力融通

## ❖ インバランスネッティング量

## ❖ 広域メリットオーダー運用量

## ❖ 域内メリットオーダー運用量

## ❖ 需給インバランス量予測誤差

変数名	単位	サンプル数	平均値	標準偏差	最小値	最大値
太陽光出力抑制量	MW	48096	5.3918	73.192	0.000	2623.0
風力出力抑制量	MW	48096	0.1928	4.0957	0.000	262.00
電力需要	MW	48096	7622.2	5367.5	190.0	27393
原子力発電量	MW	48096	874.25	1346.1	0.000	4964.0
火力発電量	MW	48096	5313.0	3601.2	85.00	15822
水力発電量	MW	48096	690.56	628.86	3.000	2840.0
太陽光発電量	MW	48096	825.81	1495.2	0.000	8775.0
風力発電量	MW	48096	133.08	238.30	0.000	1733.0
揚水発電_貯蔵量	MW	48096	116.09	329.09	0.000	3669.0
揚水発電_消費量	MW	48096	84.933	201.74	0.000	2843.0
他エリアへの電力融通	MW	48096	913.37	1272.0	0.000	6265.0
自エリアへの電力融通	MW	48096	467.91	976.81	0.000	6395.0
不足インバランス・ネッティング	MW	48096	63.196	145.36	0.000	2511.2
余剰インバランス・ネッティング	MW	48096	50.627	111.55	0.000	1881.3
他エリアの上げ調整量	MW	48096	29.109	114.73	0.000	2164.8
他エリアの下げ調整量	MW	48096	35.292	96.815	0.000	1515.0
自エリアの上げ調整量	MW	48096	31.237	127.25	0.000	2191.9
自エリアの下げ調整量	MW	48096	65.254	169.65	0.000	2934.7
余剰電力インバランス予測誤差	MW	48096	717.78	1554.1	0.000	7999.3
不足電力インバランス予測誤差	MW	48096	104.04	241.51	0.000	3223.5



# 分析結果 1-1

## 太陽光出力抑制

❖揚水発電による電力貯蔵、連系線を通じた域外への電力輸送が太陽光出力抑制の低減に貢献できる

- 1MWhの揚水電力貯蔵により、平均的に0.152%の太陽光出力抑制量が低減
- 1MWhの電力輸送により、平均的に0.254%MWhの太陽光出力抑制量が低減

❖インバランスネットティングの実施により、太陽光出力抑制量を抑えることができる

- 1MWhのインバランスネットティングにより、平均的に0.198%MWhの太陽光出力抑制量が低減される

❖広域メリットオーダーにより、他エリアでの下げ調整は、自エリアの太陽光出力抑制量の低減に貢献できる

- 1MWhの他エリア下げ調整により、平均的に0.089%MWhの太陽光出力抑制量が低減される

❖エリア内の調整力運用も、自エリアの太陽光出力抑制量の低減に貢献できる

- 1MWhのエリア内調整力の運用により、平均的に0.23%MWhの太陽光出力抑制量が低減される

インバランス  
ネットティング

広域メリット  
オーダー

域内メリット  
オーダー

表2.太陽光出力抑制に影響する要素

(MWh)	(1) 太陽光出力抑制量	(2)
太陽光出力抑制量_一日ラグ	0.1191*** (0.0025)	0.1188*** (0.0025)
太陽光出力抑制量_一時間ラグ	0.8032*** (0.0025)	0.8019*** (0.0025)
電力需要	-0.0139*** (0.0030)	-0.0231*** (0.0033)
揚水発電_貯蔵量	<b>-0.0082** (0.0030)</b>	<b>-0.0175*** (0.0034)</b>
揚水発電_消費量	0.0146*** (0.0031)	0.0242*** (0.0034)
他エリアへの電力融通	<b>-0.0137*** (0.0030)</b>	<b>-0.0230*** (0.0033)</b>
自エリアへの電力融通	0.0129*** (0.0030)	0.0217*** (0.0033)
不足インバランス・ネットティング	<b>-0.0047*** (0.0013)</b>	<b>-0.0046*** (0.0013)</b>
余剰インバランス・ネットティング	<b>-0.0060*** (0.0016)</b>	<b>-0.0063*** (0.0016)</b>
他エリアの上げ調整量	-0.0016 (0.0015)	-0.0012 (0.0015)
他エリアの下げ調整量	<b>-0.0048** (0.0017)</b>	<b>-0.0054** (0.0018)</b>
自エリアの上げ調整量	<b>-0.0067*** (0.0014)</b>	<b>-0.0063*** (0.0014)</b>
自エリアの下げ調整量	<b>-0.0057*** (0.0011)</b>	<b>-0.0060*** (0.0011)</b>
不足インバランス予測誤差	0.0017* (0.0008)	0.0015 (0.0009)
余剰インバランス予測誤差	0.0023*** (0.0003)	0.0026*** (0.0003)
固定項	4.2206*** (1.0412)	3.2697*** (0.7329)
コントロール変数	Yes	Yes
都道府県ダミー	No	Yes
月次ダミー	No	Yes
サンプル数	47952	47952
決定係数	0.765	0.769

Standard errors in parentheses \* p<0.05, \*\* p<0.01, \*\*\* p<0.001

# 分析結果 2-1

## 風力出力抑制

❖揚水発電による電力貯蔵、連系線を通じた域外への電力輸送が風力出力抑制の低減に貢献できる

- 1MWhの揚水電力貯蔵により、平均的に0.415%MWhの風力出力抑制量が低減
- 1MWhの電力輸送により、平均的に0.467%MWhの風力出力抑制量が低減

❖インバランスネットティングの実施により、風力出力抑制量を抑えることができる

- 1MWhのインバランスネットティングにより、平均的に0.156%MWhの風力出力抑制量が低減される

❖エリア内の調整力運用は、自エリアの風力出力抑制量の低減に貢献できるが、広域的な調整力の運用による効果が見られなかった

- 1MWhのエリア内調整力の運用により、平均的に0.156%MWhの風力出力抑制量が低減される

インバランス  
ネットティング

広域メリット  
オーダー

域内メリット  
オーダー

風力の出力抑制が頻発するエリアでは、広域的な調整力運用が効率的に利用されていない

表3.風力出力抑制に影響する要素

(MWh)	(1) 風力出力抑制量	(2)
風力出力抑制量_一日ラグ	0.0122*** (0.0026)	0.0117*** (0.0026)
風力出力抑制量_一時間ラグ	0.8205*** (0.0026)	0.8198*** (0.0026)
電力需要	-0.0006** (0.0002)	-0.0009*** (0.0002)
揚水発電_貯蔵量	<b>-0.0005*</b> <b>(0.0002)</b>	<b>-0.0008***</b> <b>(0.0002)</b>
揚水発電_消費量	0.0007*** (0.0002)	0.0010*** (0.0002)
他エリアへの電力融通	<b>-0.0006**</b> <b>(0.0002)</b>	<b>-0.0009***</b> <b>(0.0002)</b>
自エリアへの電力融通	0.0005** (0.0002)	0.0009*** (0.0002)
不足インバランス・ネットティング	-0.0001 (0.0001)	-0.0001 (0.0001)
余剰インバランス・ネットティング	<b>-0.0003**</b> <b>(0.0001)</b>	<b>-0.0003***</b> <b>(0.0001)</b>
他エリアの上げ調整量	0.0000 (0.0001)	0.0001 (0.0001)
他エリアの下げ調整量	-0.0002 (0.0001)	-0.0002 (0.0001)
自エリアの上げ調整量	-0.0001 (0.0001)	-0.0001 (0.0001)
自エリアの下げ調整量	<b>-0.0003***</b> <b>(0.0001)</b>	<b>-0.0003***</b> <b>(0.0001)</b>
不足インバランス予測誤差	0.0001 (0.0001)	0.0001 (0.0001)
余剰インバランス予測誤差	0.0000* (0.0000)	0.0000* (0.0000)
固定項	0.2909*** (0.0676)	0.1636*** (0.0477)
コントロール変数	Yes	Yes
都道府県ダミー	No	Yes
月次ダミー	No	Yes
サンプル数	47952	47952
決定係数	0.688	0.689

Standard errors in parentheses \* p<0.05, \*\* p<0.01, \*\*\* p<0.001

# 結論

- ❖ 広域需給調整の導入は、需給調整のコスト削減を目的としたが、再エネ出力抑制の低減にも貢献できる。
- ❖ 九州・四国・中国での広域需給調整の効果がより良く、東北・北海道地域での広域調整力の利用がまだ不足。日本では陸上風力・洋上風力の導入を進めるなら、北東部での広域調整力の効率的な運用が課題となる。
- ❖ 再エネ出力抑制を抑えるには、揚水発電を始めた蓄電システムの利用拡大が極めて重要。
- ❖ 出力制御を減らす主な方法は、電力需要が大きい首都圏や関西圏に送電することだが、九州と中国や四国、そして北海道と東北を電力需要地と結ぶ送電線の容量に限りがある。OCCTOは2021年5月に、九州と中国をつなぐ「関門連系線」など4カ所の増強案を示した。連系線増強に伴い、再エネ発電の効率的な運用が期待できる。
- ❖ 再エネ発電設備のオンライン化は、制御低減に大きな役割を果たすと考えられる。これからの研究方向は、オンライン代理制御の導入と市場機能（特に時間前市場）の運用による再エネ出力抑制への低減効果について調べること。