



電源のパフォーマンスを評価するアンシラリーサービス制度

米カリフォルニア州の取り組み

2016/08/08

電力システム改革論を斬る！

電力改革研究会

Policy study group for electric power industry reform

1. はじめに

我が国では、政府が進めている一連の電力システム改革の中で、2020 年度に発送電分離（送配電部門の法的分離）が予定されている。発送電分離に伴い、従来は垂直統合体制の一般電気事業者が担っていた、電力システムの周波数を維持する義務は、一義的に送配電会社（一般送配電事業者）の義務になる。しかし、一般送配電事業者はそのために必要な電源を持っていないため、周波数調整用の電源を契約や市場を通じて調達することになる。我が国では、この調達をオープンな公募により行うこととしており、現在その具体的な仕組みが議論されている。

このような調整力のことをアンシラリーサービス（Ancillary Services、以下 AS）^{注1）}と呼び、それを調達するための市場を AS 市場と呼ぶ。発送電分離を先行して実施してきた、欧米諸国では、当然に AS 市場は存在しているが、近年、自然変動電源の導入進展を背景に、調整力の応答速度別に市場を創設するなど、能力の高い AS がより多くの報酬を得られるような仕組みの改善が志向されている。これにより、能力の高い AS を市場に提供するインセンティブを高めることが狙いである。

米国では、2011 年 10 月に連邦エネルギー規制委員会（Federal Energy Regulatory Commission、以下 FERC）が、ISO/RTO の卸電力市場に周波数調整を提供する調整電源への対価が公正かつ妥当となるように、①周波数調整として提供する容量への支払い、②パフォーマンスに応じた支払い、という 2 段階式支払制度の導入を義務付けた最終規程（FERC Order 755）を公表した。これを受け、各市場はパフォーマンスに応じた評価を行う仕組みを創設している。その中でも、California ISO（以下 CAISO）では、電源種別によらず、公平にパフォーマンスに応じた評価を行う仕組みを採用している。

そこで、本稿では、CAISO における電源のパフォーマンスに応じた AS の調達と対価支払方法について解説する。

2. パフォーマンスに応じた対価とは

ここで言うパフォーマンスとは、系統運用者の指令に基づき、電源が周波数調整をいかに迅速に行ったかである。自然変動電源の増大に伴い、パフォーマンスに優れた AS 供給源としての電源のニーズが高まることから今後想定されるため、パフォーマンスに優れた電源が、より多くの収入を得られるしくみの構築が重要である。迅速な出力変化は、電源設備への負担も大きい。パフォーマンスに優れた電源がより多くの報酬を得られる仕組みは、この点でも合理的である。

図 1 に電源 1、電源 2 が指令に基づいて周波数調整を行ったイメージを示す。30 分間における各電源の

発電電力量を Q_n 、出力変化量（マイレージ）を L_n とする。 $Q_1 = Q_2$ のとき、30 分間の発電電力量〔MWh〕のみを評価した場合、各電源の得られる収入（=MWh 市場価格×発電電力量）は同額となる。しかし、電源 1 の方がより変化する指令に追従しており、系統への貢献度は大きい。この価値を電源のパフォーマンスと位置づけると、その指標はマイレージ（ L_n ）で評価することができる。すなわち、各電源に対してマイレージに応じた収入を付加することで、系統への貢献により即した対価の支払ができる。図 1 では、 $L_1 > L_2$ となるため、電源 1 の方がより多くの収入を得ることができる。

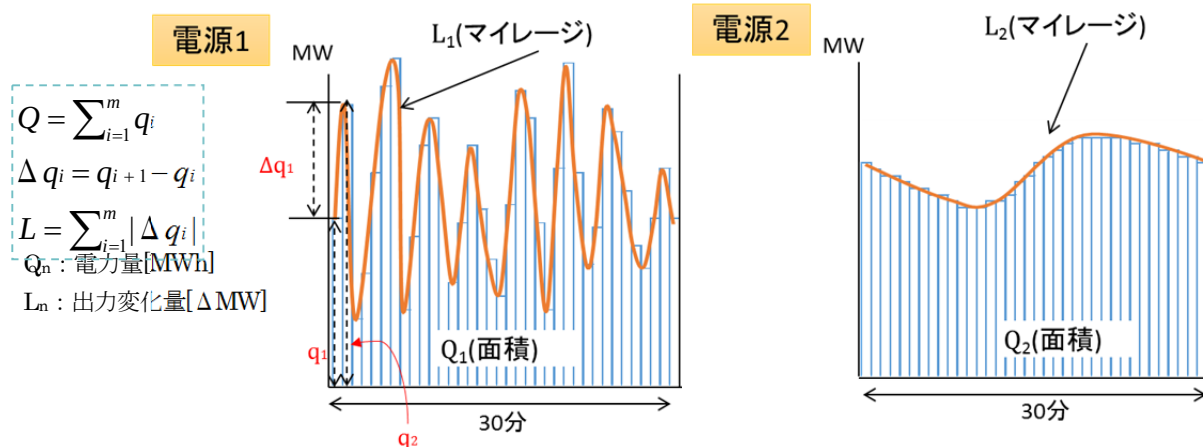


図 1：各電源の周波数調整イメージ
(出所) 筆者作成

3. CAISO による周波数調整力の調達の流れ（入札から精算まで）

CAISO における AS には、以下の 5 種類がある。

- ① 周波数調整（Regulation Up and Regulation Down）
- ② 瞬動予備力（Spinning Reserve）
- ③ 非瞬動予備力（Non-Spinning Reserve）
- ④ 電圧調整（Voltage Support）
- ⑤ ブラックスタート（Black Start）

このうち、パフォーマンスに応じた支払の対象は、①周波数調整である。

CAISO では、周波数調整のための電力容量を、前日に調達する『周波数調整市場（前日）』ならびに当日の不足分を調達する『周波数調整市場（当日）』から 15 分単位で調達する。この章では入札から精算までの流れを紹介する。

なお、CAISO は、周波数調整のための容量を上げ側、下げ側で別々に調達する。つまり、上げ側、下げ側それぞれで、入札から精算までのプロセスを踏むことになる。3. 1 以下の記述は上げ側を想定している。

3. 1 入札

周波数調整市場に参加を希望する事業者は、容量〔MW〕、容量入札額〔\$/MW〕、機会費用〔\$/MW〕、マイルーজ入札額〔\$/ΔMW〕を入札する。

(1) 容量、容量入札額

- 電源の出力余力など周波数調整力の供出容量〔MW〕を容量として入札し、さらにこの単価を容量単価として入札する。

(2) 機会費用

- 周波数調整力に供出する電源がエネルギー市場で落札できた場合に得られたであろう利益を機会損失（費用）という。
- FERC Order 755 に基づき、入札者は、機会費用を提示できる。現状、CAISO は機会費用の算出方法をルール化していないので、入札額は市場参加者の判断に委ねられる。CAISO では、機会費用の算出を支援する理論とモデルを作成しており、今後、実際のデータを用いた改良を始めるところである。

(3) マイルーজ入札額

- 詳しくは後述する。出力指令に対する電源の4秒単位の出力変化量の絶対値の合計をマイルージ〔ΔMW〕として、この単価〔\$/ΔMW〕を入札する。

3. 2 予想コストの算出

CAISO は、応札した個々の電源について、当該電源が落札した場合に想定される支払額（予想コスト）を次式により算出する。これらの情報から各電源を落札した場合の最終の支払額を想定して、次式により予想コストを算出する。CAISO では、周波数調整のための容量を上げ側、下げ側で個別に調達しており、それぞれに対して決済価格が決まる。

$$\text{予想コスト} = \underbrace{\text{容量入札額} + \text{機会費用}}_{\text{容量に対する対価}} + \underbrace{\text{マイルージ入札額} \times \text{系統マイルージ乗数}}_{\text{パフォーマンスに対する対価}}$$

$\text{〔\$/ΔMW〕} \quad \text{〔ΔMW/MW〕}$

なお、算定に用いられる、系統マイルージ乗数（System mileage multiplier）の定義は以下の通りである。
 系統マイルージ乗数は、過去1週間の実績から、周波数調整容量1MW当たりのマイルージ調達量で表される。
 24時間帯別に、1時間単位で、次式により計算される。

$$\text{系統マイルージ乗数} = \frac{\text{対象時間帯の全電源のマイルージの過去1週間合計〔ΔMW〕}}{\text{対象時間帯の周波数調整落札全容量の過去1週間合計〔MW〕}}$$

$\text{〔ΔMW/MW〕} \quad \div \text{〔MW〕}$

例を用いて、系統マイルージ乗数の計算方法について解説する。表1に午前7時～8時までの1時間における

系統全体の電源による上げマイレージの前週実績が示されている。表 1 から系統マイレージ乗数は 3.61 ($=9300 \div 2575$) と算出される。この系統マイレージ乗数は、翌週の日曜日から土曜日における同時間帯（午前 7 時～ 8 時までの 1 時間）に適用される。

表 1 午前 7 時～ 8 時までの 1 時間のマイレージ乗数計算例
(出所) 文献 2

午前 7～8 時	金曜	土曜	日曜	月曜	火曜	水曜	木曜	合計
容量	350	400	375	350	375	375	350	2575
電源 A マイレージ	800	600	400	100	250	500	600	3250
電源 B マイレージ	500	500	500	250	300	400	300	2750
電源 C マイレージ	700	600	700	100	500	200	500	3300
全マイレージ	2000	1700	1600	450	1050	1100	1400	9300
マイレージ乗数								3.61

系統マイレージ乗数は、確保する電源の容量から、必要なマイレージ量を計算するために使用される。表 1 において、次の月曜日午前 7 時～ 8 時までの 1 時間に確保したい周波数調整上げ容量が 350MW であった場合、必要な上げマイレージ量は 1263 [ΔMW] ($=350 \times 3.61$) となる。

調達容量と必要マイレージ量の関係を、図 2 を用いて説明する。先行制御の指令値（青実線）から上側の緑点線までの距離が周波数上げ容量（350MW に相当）、先行制御の指令値から下の緑点線までの距離が周波数下げ容量である。周波数上げマイレージは、赤実線のうち、緑塗り部分に含まれる部分の長さの合計（1263ΔMW に相当）である。

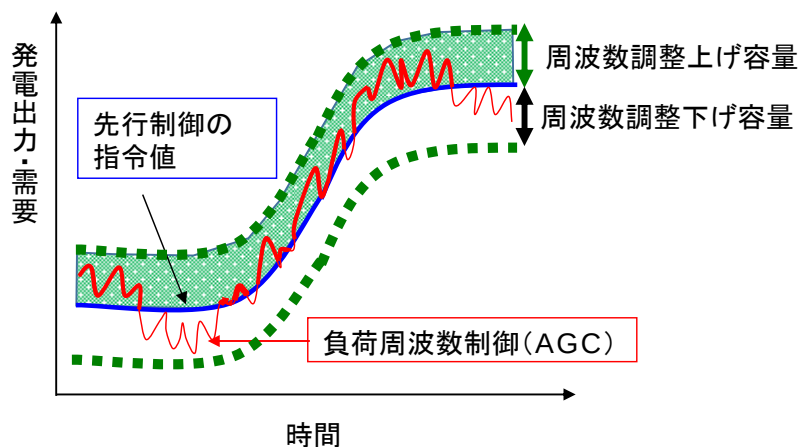


図 2：需要曲線と周波数調整イメージ
(出所) 筆者作成

注1) AS の供給者は主に電源であるが、理論上はデマンドレスポンスや蓄電池等も供給者になり得る。本論の電源は、理論上 AS になり得るデマンドレスポンスや蓄電池等も含んだ概念と理解されたい。

3. 3 調整済コストの算出

CAISO は、入札額の評価を、予想コストに電源毎の実績から算出した確度を加味した調整済コストから行う。入札した電源の評価はこの調整済コストに基づいて行われ、調整済コストの低い電源から落札していく。ただし、決済価格は予想コストに基づいて決まる（詳しくは後述）。つまり、予想コストが同じ電源であれば、確度の高い電源が調整済コストを低く抑えられるので、落札に有利となる。

$$\text{調整済コスト} = \text{予想コスト} \div \text{確度}$$

確度（Accuracy）の定義は、以下の通りである。

CAISO は、各周波数調整電源に対し、4 秒インターバルで負荷周波数制御（automated generation control、以下 AGC）設定点〔MW〕の信号を送信している。確度は、AGC 設定点に対してどれだけ正確に応答したかを表す指標であり、AGC 設定点と実際の電源出力のテレメーター値を比較して算出する。実際の計算は次式で表され、15 分間毎に計算される。

$$\text{確度} = (\text{AGC 設定点の 15 分間合計} - \text{偏差の絶対値の 15 分間合計}) \div \text{AGC 設定点の 15 分間合計}$$

上記の計算式は、15 分間における AGC 設定点に対応した電源の確度を反映し、0~100%の範囲となる。表 3 に確度の計算例を示す。表 2 において、確度は次のように計算される。（本例は 1 分間の確度の計算例である）

$$\text{確度} = (200 - 21) \div 200 = 0.895 = 89.5\%$$

表 2 周波数上げ調整範囲における確度計算
（出所）文献 2 を元に筆者加工

	周波数調整インターバル(4秒)															合計
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
AGC設定点	10	15	12	18	10	15	12	21	10	15	12	18	10	7	15	200
実際の測定値	9	14	11	19	10	14	11	19	7	14	11	22	10	10	14	195
偏差の絶対値	1	1	1	1	0	1	1	2	3	1	1	4	0	3	1	21
確度	= (200 - 21) ÷ 200 = 0.895 = 89.5%															

3. 4 落札電源の決定

例題を使って、落札までの流れを解説する。表 3 は、周波数上げ調整の必要量 100MW に対して、7 台の電源が周波数上げ調整に入札した例である。入札情報に基づき CAISO は予想コストを算出、さらに確度を加味した調整済コストを計算し、調整済コストの低い順に落札順位を決定する。

表 3 では、落札順位に基づいて電源 G・A・C・F・B の 5 台が落札している。電源 B については、図 3 に示すように、入札した容量全てではなく、必要量 100MW に到達するまでの残りの容量（20MW）が約定容量となっている。

表3 7台の電源による周波数上げ調整電源の落札プロセス
(出所) 文献2を元に筆者加工

系統マイレージ乗数(a) 5 [ΔMW/MW]
周波数調整必要量(b) 100 [MW]

		←入札者が決める項目→				←CAISOが計算・決定する項目→							
		容量に関する項目		マイレージに関する項目	容量に関する項目合計 \$[/MW] (D)	マイレージに関する項目合計\$[/MW](E) (E=C×a)	予想コスト \$[/MW] (F)	確度 ^(※) (G)	調整済コスト \$[/MW] (H)	落札順位	落札	約定容量 [MW]	
限界ユニット		容量入札額\$[/MW] (A)	機会費用\$[/MW] (B)	マイレージ入札額\$[/Δ MW] (C)			(F=D+E)		(H=F÷G)				
電源A	20	\$5.00	\$2.00	\$0.50	\$7.00	\$2.50	\$9.50	85%	\$11.18	2	Yes	20	
電源B	30	\$7.00	\$2.00	\$0.80	\$9.00	\$4.00	\$13.00	85%	\$15.29	5	Yes	20	
電源C	20	\$9.00	\$0.00	\$0.30	\$9.00	\$1.50	\$10.50	85%	\$12.35	3	Yes	20	
電源D	20	\$0.00	\$0.00	\$3.00	\$0.00	\$15.00	\$15.00	80%	\$18.75	6	No	0	
電源E	20	\$1.00	\$12.00	\$0.10	\$13.00	\$0.50	\$13.50	70%	\$19.29	7	No	0	
電源F	20	\$7.00	\$0.00	\$1.00	\$7.00	\$5.00	\$12.00	95%	\$12.63	4	Yes	20	
電源G	20	\$6.00	\$0.00	\$0.10	\$6.00	\$0.50	\$6.50	80%	\$8.13	1	Yes	20	

※前月の実績から算出
25%を下回る場合は、認証を取り消される。

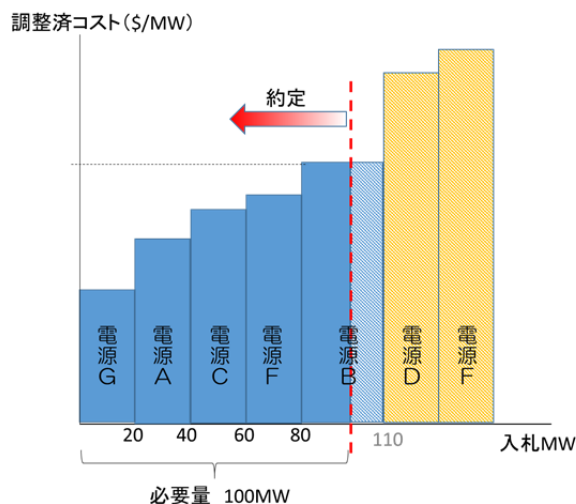


図3 落札順位決定のイメージ
(出所) 筆者作成

さらに、CAISO では、落札電源の決定に際して、電源固有マイレージ乗数という電源毎に過去の運転実績から算出される乗数を用いて、各電源が供給可能なマイレージを計算し、系統におけるマイレージ必要量を満たしているかどうかのチェックを行う。

電源固有マイレージ乗数は、当該電源が、過去の確度と認証を受けた際に登録した変化速度(分単位)を元に、次式により算出される。(表4参照)

$$\text{電源固有マイレージ乗数}(A6) = \text{系統マイレージ乗数}(A1) \times (10 / \text{認証された容量に到達するまでの時間}(A3)) \times (\text{電源の実績確度}(A4) / \text{前週の系統確度}(A2))$$

表4 電源固有マイレージ乗数の計算例

(出所) 文献3

		電源 a	電源 b	電源 c	電源 d	電源 e	電源 f
A1	系統マイレージ乗数	5	5	5	5	5	5
A2	系統確度 ^{注2)}	90%	90%	90%	90%	90%	90%
A3	認証された容量に到達するまでの時間(1~10 分までの整数値、秒単位は切り上げ) ^{注3)}	1	10	1	10	1	10
A4	電源の実績確度	100%	100%	50%	50%	90%	90%
A5	認証された周波数調整容量	20	20	20	20	20	20
A6	電源固有マイレージ乗数 =A1X(10/A3)X(A4/A2)	55.6	5.6	27.8	2.8	50.0	5.0
	供給可能な最大マイレージ=A5XA6	1111	111	556	56	1000	100

3. 5 決済価格の決定

マイレージの決済価格は、落札された電源のうちマイレージ入札額の最高値が全電源に一律に適用される (Pay as Clear 方式)。予想コストの決済価格も同様に Pay as Clear 方式で決まる。容量決済価格については、マイレージ決済価格と予想コストの決済価格から次式で算出する。

$$\text{容量決済価格} = \text{予想コストの決済価格} - \text{マイレージ決済価格} \times \text{系統マイレージ乗数}$$

表3の例では、マイレージ決済価格は\$1.00、予想コストの決済価格は\$13.00、容量決済価格は\$8.00 (= \$13.00 - \$1.00 × 5) となる。この容量決済価格は機会費用を含んだ金額となる。

次に、周波数調整容量やマイレージ決済価格が、『周波数調整市場 (前日)』と『周波数調整市場 (当日)』で異なる場合、当該時刻の15分間のマイレージ決済価格は、『周波数調整市場 (前日)』および『周波数調整市場 (当日)』の両方のマイレージ決済価格の加重平均価格となる。

例えば、ある電源が、『周波数調整市場 (前日)』においてマイレージ決済価格\$1.00 で 80MW、『周波数調整市場 (当日)』においてマイレージ決済価格\$2.00 で 20MW の周波数調整容量としてそれぞれ落札された場合、この15分間のマイレージ価格は\$1.20 (= \$1.00 × 80 / (80 + 20) + \$2.00 × 20 / (80 + 20)) となる。『周波数調整市場 (前日)』で落札され、『周波数調整市場 (当日)』で落札されなかった場合、決済価格は\$1.00 のままである。『周波数調整市場 (前日)』で落札されず、『周波数調整市場 (当日)』のみで落札された場合、マイレージ決済価格は\$2.00 となる。このようにして、マイレージ決済価格は電源毎に1つに決められる。

注2) 系統確度は、系統マイレージ乗数と同様、24 時間帯別に1時間単位で計算される。対象時間帯の系統確度は、系統における電源の確度の過去1週間分の単純平均である。

注3) 認証を受けた際に登録した変化速度を用い、1~10の整数値が入る。数値が小さいほど、認証された容量に到達するのが早いことを表す。周波数調整力となるための条件として、各電源は10分以内に認証された容量に到達することが要求されている。

3. 6 精算

マイレージの精算は、給電指令に応じた実績マイレージに対して支払いが行われ、次式で計算される。

$$\text{マイレージ精算額} = \text{マイレージ決済価格（単価）} \times \text{実績マイレージ} \times \text{確度}$$

また、容量の精算は次式で計算され、先に述べたとおり、機会費用を含んだものになっている。

$$\text{容量精算額} = \text{容量決済価格（単価）} \times \text{落札容量}$$

実績マイレージの算出方法は、以下の通りである。

CAISO では、AGC 設定点の変化量の絶対値を「マイレージ」と表現している。図4の例で、時刻 $t_0 \sim t_5$ における AGC 設定点の変化量（緑矢印で示される長さ）の合計がマイレージとなる。

実績マイレージはこの AGC 設定点の変化量を 15 分間合計して算出する。「マイレージ×確度」は、各電源が有効に働いたマイレージの指標となっており、精算に用いられている。

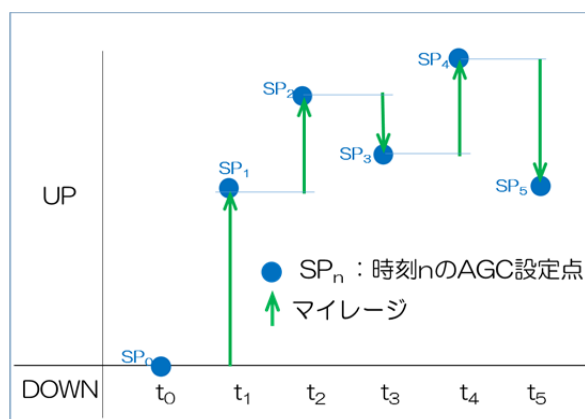


図4 AGC 設定点とマイレージの関係
(出所) 筆者作成

4. おわりに

CAISO では、2012 年に電源種別によらずパフォーマンスに応じて評価する仕組みを創設した。直近の 2013～2015 年の調整力調達実績を見ると、周波数調整力の容量ではガス火力のウェイトが大きい（図 5）、マイレージについては、貯水式水力発電が半分近くを供給している。現状、CAISO のマイレージ調達費用は非常に少ない（図 6）が、貯水式水力発電が安価なマイレージ供給源となっているようである（図 7）。また、周波数調整市場の決済価格はエネルギー市場価格と比べて非常に安価となっている（図 8～10）。これは、機会費用が適正に反映されておらず、容量決済価格も低く抑えられているためと考えられる。

以上、CAISO における周波数調整市場の仕組みについて説明した。まだ発展途上の仕組みであるが、「パフォーマンスに優れた電源がより多くの収入を得られる仕組み」に先駆的に取り組んでいる興味深い事例である。今後、自然変動電源の導入が一層進むことが想定される我が国にも示唆に富むものであり、今後も動向を注視していきたい。

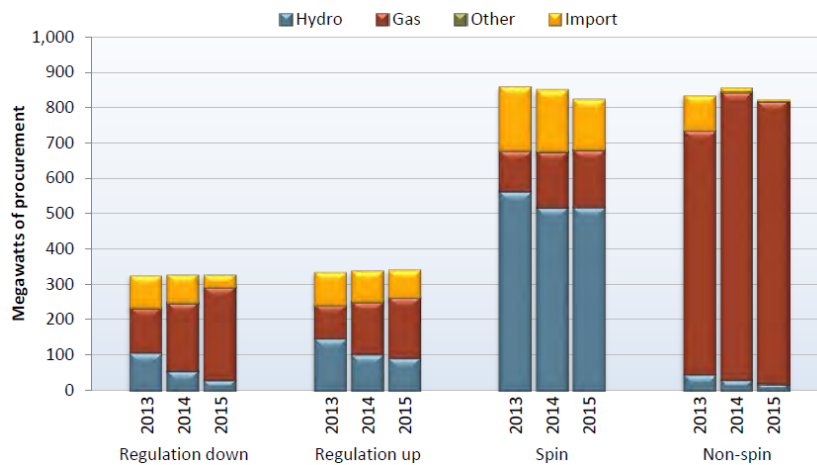


図5 調整力の調達量（電源種別）
（出所）文献 8

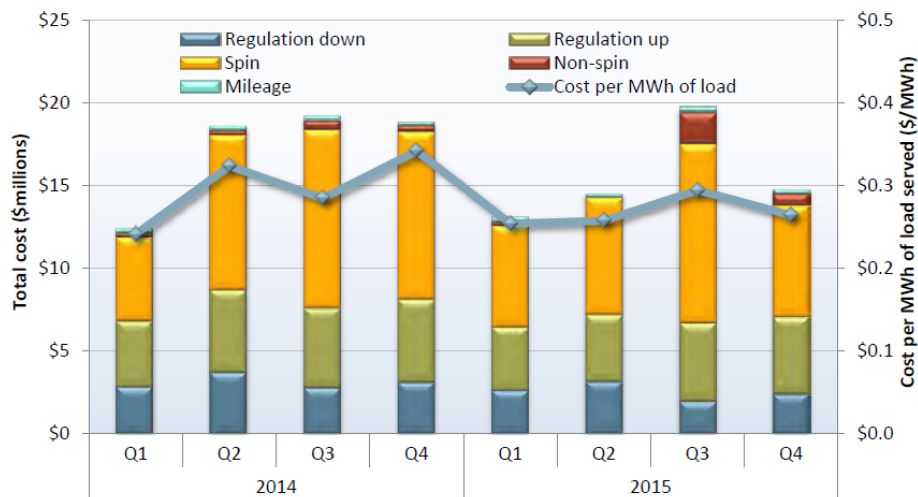


図6 AS 費用（種類別）
（出所）文献 8

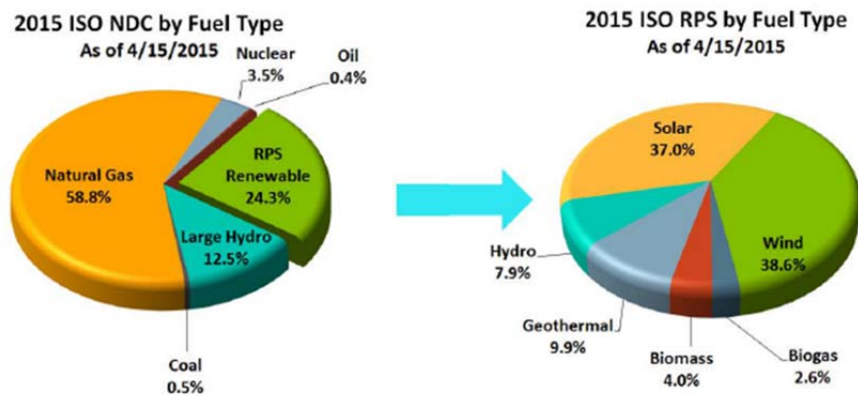


図7 CAISO の電源構成
（2015 年夏季の電力の供給力(NDC)：65,288MW）
（出所）文献 9

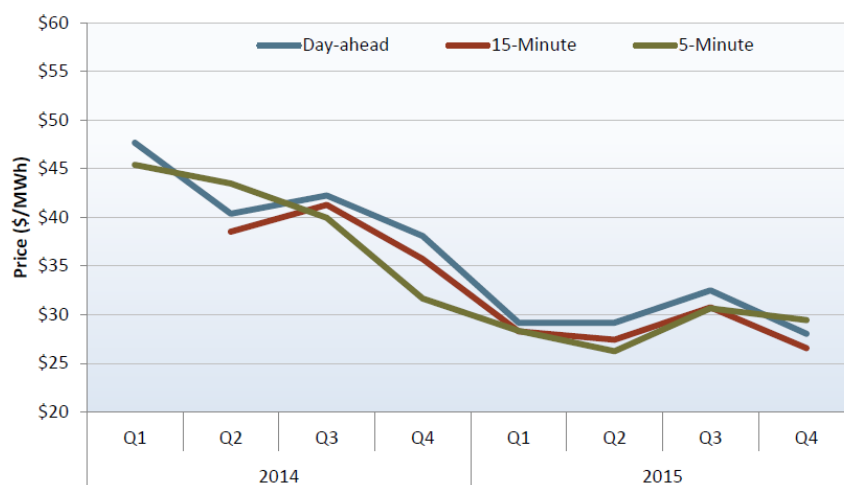


図8 エネルギー価格（オフピーク時間帯）
（出所）文献 8

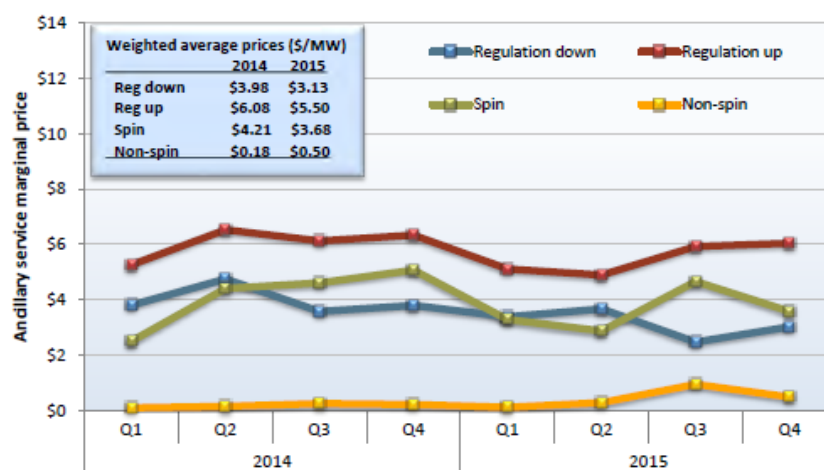


図9 AS 価格（前日）
（出所）文献 8

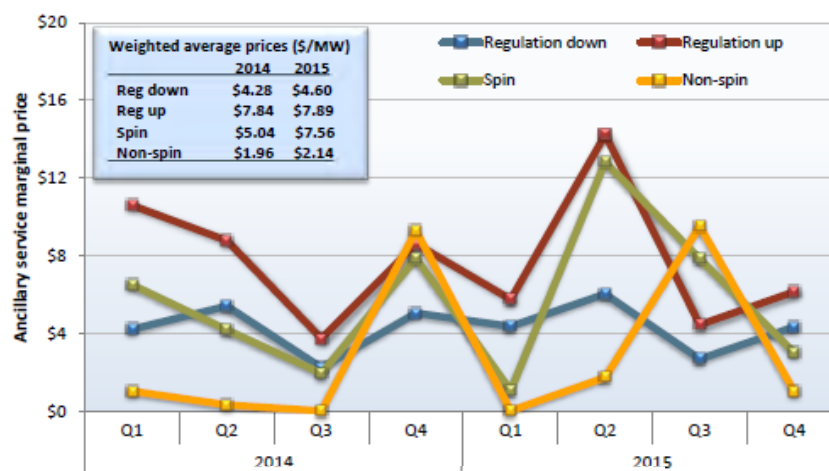


図10 AS 価格（当日）
（出所）文献 8

<参考文献>

- 1) FERC Order 755
<https://www.ferc.gov/whats-new/comm-meet/2011/102011/E-28.pdf>
- 2) CAISO ; Pay for Performance Regulation Revised Straw Proposal (2012.1)
<https://www.caiso.com/Documents/PayPerformanceRegulationRevisedStrawProposal.pdf>
- 3) CAISO Business Practice Manual for Market Operations V44 Attachment J (2016.6)
[https://bpmcm.caiso.com/Pages/BPMDetails.aspx?BPM=Market Operations](https://bpmcm.caiso.com/Pages/BPMDetails.aspx?BPM=Market%20Operations)
- 4) CAISO ; Business Requirements Specification Pay for Performance Regulation (2013.5)
<http://www.caiso.com/Documents/BusinessRequirementsSpecification-Pay-Performance.pdf>
- 5) CAISO ; Pay for Performance Regulation (FERC Order 755) Updated with Year One Design Changes (2013.2 作成、2015.2.17 更新)
https://www.caiso.com/Documents/Pay-PerformanceRegulationFERC_Order755Presentation.pdf
- 6) CAISO ; Fifth Replacement Electric Tariff (2015.1)
http://www.caiso.com/Documents/Section8_AncillaryServices_Jan1_2015.pdf
- 7) CAISO ; 2014 Annual Report (2015.6)
http://www.caiso.com/Documents/2014AnnualReport_MarketIssues_Performance.pdf
- 8) CAISO ; 2015 Annual Report (2016.5)
<http://www.caiso.com/Documents/2015AnnualReportonMarketIssuesandPerformance.pdf>
- 9) CAISO ; 2015 SUMMER LOAD & RESOURCES ASSESSMENT (2015.5)
<https://www.caiso.com/Documents/2015SummerAssessment.pdf>

執筆者：東京電力ホールディングス株式会社 経営技術戦略研究所 経営戦略調査室
杉山 ゆり子、大木 功、戸田 直樹