

電源起動・出力配分ロジックの技術検証 (検証A) の進捗報告について

2024年8月19日

資源エネルギー庁・電力広域的運営推進機関

- 第2回本検討会（2023年9月20日）において、「同時市場における電源起動・出力配分ロジックの技術検証会（以下「技術検証会」という。）」を設置したこと、また、同時市場に関するロジック技術検証（検証A）の進め方、ならびに具体的な技術検証項目（アウトプットの評価方法やロジックのカスタマイズ等）について、報告を行った。
- その後、第2回技術検証会（2023年11月13日）と第4回本検討会（2023年11月27日）、第3回技術検証会（2024年1月25日）と第6回本検討会（2024年2月5日）、第4回技術検証会（2024年3月25日）と第8回本検討会（2024年4月19日）、ならびに第5回技術検証会（2024年5月29日）と第10回本検討会（2024年6月19日）において、検証状況の進捗報告を行った。
- 先日、第6回技術検証会（2024年8月2日）を開催し、下記内容に関する議論を行ったため、本日はその内容について進捗報告を行う。
 - 「⑥起動費等が回収可能な価格算定ロジックの検討」における海外調査・技術的特徴の確認
 - 「⑦前日同時市場後のSCUC・SCEDロジック」における時間前市場の検証

1. 検討状況の概要について

2. 検討状況の報告

- －⑥. 「起動費等が回収可能な価格算定ロジックの検討」における
海外調査・技術的特徴の確認
- －⑦. 「前日同時市場後のSCUC・SCEDロジック」の時間前市場の検証

1． 検討状況の概要について

2． 検討状況の報告

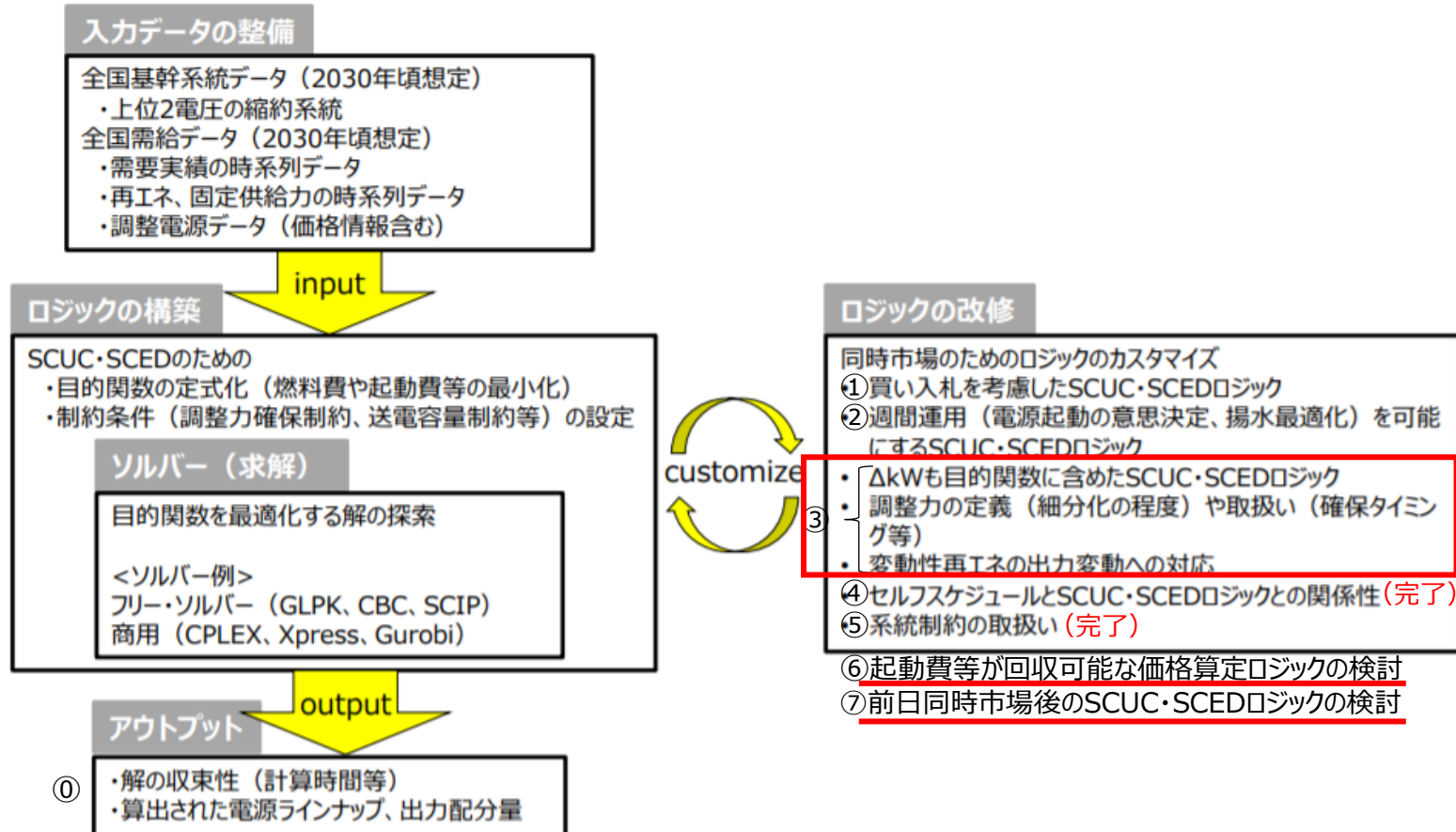
- －⑥．「起動費等が回収可能な価格算定ロジックの検討」における
海外調査・技術的特徴の確認
- －⑦．「前日同時市場後のSCUC・SCEDロジック」の時間前市場の検証

- 検証A（同時市場に関するロジック技術検証）における検証項目と、各検討状況については下表のとおり。
- 本日は、検討に進捗があった項目⑥および⑦の検討状況（下表の太字）について報告する。

検証項目	検討状況
①基本ロジックの構築	・ロジックを構築・実装し、動作検証済み （今後、収束性向上・火力応動特性のモデル化に取り組む予定）
①買い入札を考慮したSCUC・SCEDロジック	・エリア単位で買い入札を集約して、系統制約を考慮したモデルで動作検証済み（今後、ノード単位での検証に取り組む予定） ・需要曲線の簡略化手法について検討を実施
②週間運用（電源起動の意思決定、揚水最適化）を可能にするSCUC・SCEDロジック	・週間計画の実態調査の上、週間計画の取り扱いを整理（今後、具体的なロジック構築・実装に取り組む予定）
③調整力の定義も踏まえたkWh・ΔkW同時最適ロジック（変動性再エネの出力変動への対応含む）	・現時点の調整力の定義見直しの議論を踏まえたロジック・ΔkW入札価格を考慮したロジックを構築・実装し、動作確認済み（今後、三次インセンティブの検証に取り組む予定）
④セルフスケジュールとSCUC・SCEDロジックとの関係性	・電源差替を小規模系統モデルで模擬し、動作検証を実施（完了）
⑤系統制約の取扱い	・厳密なロジック（制約条件）による対応は困難な見込み（完了） ・適切なフリンジ（マージン）を設定すれば、発動制限ΔkWに対応可能な示唆を得た（今後、運用容量等作業会で深掘り予定）
⑥起動費等が回収可能な価格算定ロジックの検討	・海外調査および数種の手法の技術的特徴を整理（完了） （今後、制度論として将来の日本での導入可否を深掘り予定）
⑦前日同時市場後のSCUC・SCEDロジック	・前日の時間前同時市場についてロジック構築・一部検証を実施（今後、当日の時間前同時市場等についてロジック構築・検証予定）

（参考）Aの検証の具体的なイメージ（全体像）

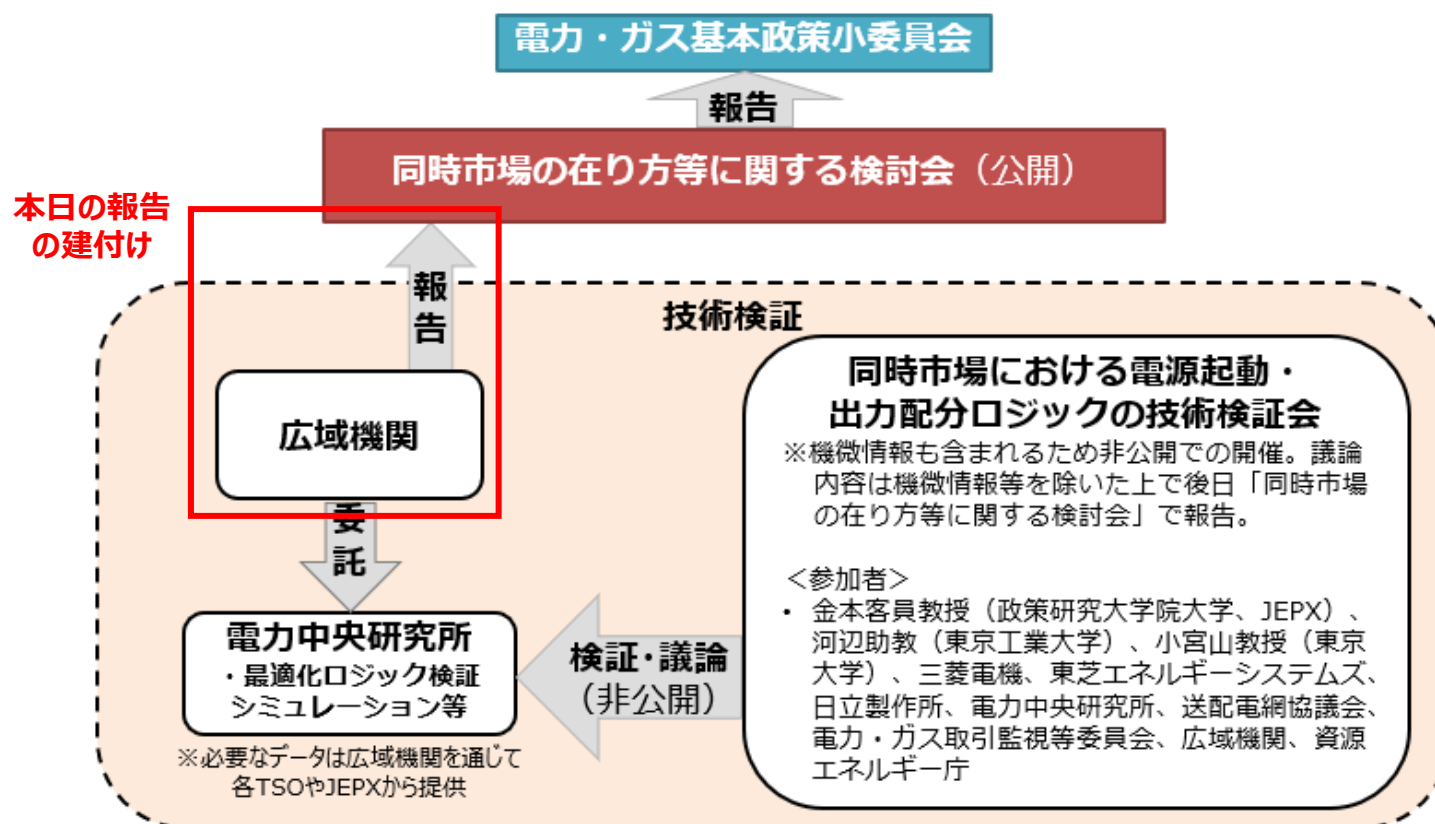
- 全国の需給・系統データの模擬（2030年頃の将来想定）を行い、長期に亘り活用が見込まれる同時市場の最適化ロジックとしての実現性・妥当性を検証。



第三者検証体制（同時市場における電源起動・出力配分ロジックの技術検証会）の設置

8

A) 電源起動・出力配分（SCUC・SCED）ロジックの検証にかかる第三者検証体制の構築

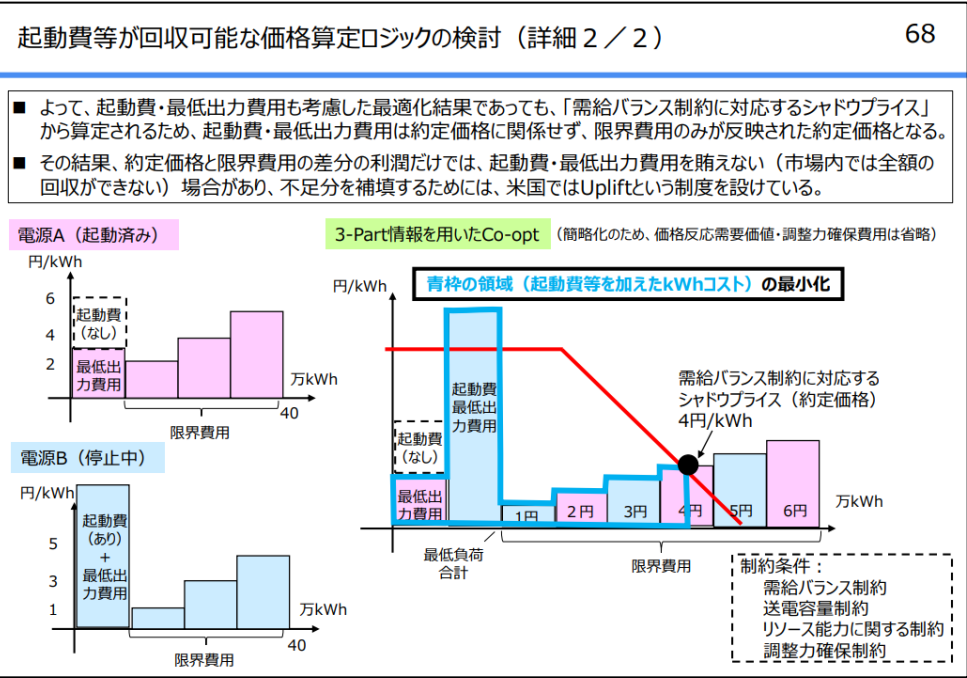


1. 検討状況の概要について

2. 検討状況の報告

- －⑥. 「起動費等が回収可能な価格算定ロジックの検討」における
海外調査・技術的特徴の確認
 - － 1. 海外における起動費等の扱いと価格算定方法
 - － 2. 価格算定方法の技術的な特徴の深掘り
 - － 3. 今後の進め方（技術検証会での議論内容）
- －⑦. 「前日同時市場後のSCUC・SCEDロジック」の時間前市場の検証

- 第2回同時市場の在り方等に関する検討会（2023年9月20日）において、kWh・ΔkWの同時最適化の先行事例である米PJMの例を挙げ、約定価格としてシャドウプライスを採用している場合には、起動費等も考慮した同時最適化結果であっても、シャドウプライスが+1kWh出力した時の価格という性質上、増分費用カーブのみ反映された約定価格となることで、市場内では起動費等を含めた費用を回収できない場合が生じる可能性があるため、不足分を補填するUpliftの仕組みが必要であることを確認した。
- 他方で、Upliftは市場外精算の仕組みでもあり、透明性の観点からは、なるべく低減させることが望ましいことから、将来に向けては、Upliftを低減可能な価格算定方法について、海外事例も参考に検討することとしていた。
- 今回、海外事例も参考に、いくつかの手法について、簡単なケース（数値例）を示しながら特徴の整理を行った。



起動費等が回収可能な価格算定ロジックの検討（検証の進め方）

69

■ Upliftは市場外精算の仕組みでもあり、透明性の観点からは、なるべく低減させることが望ましいとの考え方のもと、海外においてもUpliftの低減方法について研究されているが、殆ど実用化には至っていない。

■ 一方で前述のとおり、仮に起動費等を市場価格に反映する（Upliftを可能な限り減らす）となった際は、価格算定ロジック（SCUC・SCEDロジックと同種のロジック）の改良を要することから、海外の研究動向等も参考に、upliftの低減方法の研究動向、および実装可能性についても検証していくこととしたい。

	凸包プライシング	ELMP（整数緩和）	AIC	Non-uniform pricing
考え方の概要	非凸な総費用曲線を、凸に近似	起動1or停止0ではなく、0～1に制約を近似 結果的に、限界費用単価に、起動費／設備量を加算したことが等価	最適化後、約定価格に、起動費／稼働量を加算	どの入札者も損失を被らない制約のもと、入札者のUplift負担の最大額を最小化するような約定価格を決定
適応事例	なし	PJMのfast-start	なし	なし（R&D段階）
起動費回収漏れ	△あるが最小化	△ある	○なし	○なし
その他の評価	×計算時間を要し、実用に耐えられない ○最適稼働から乖離するインセンティブが小さい	○容易に計算可能 △整数緩和する量が多いほど、最適稼働から乖離 △起動費を稼働時間で割り付けるロジックではないため、fast-startなど最小運転時間の短い電源にしか適用されていない	○容易に計算可能 ×約定価格で起動費を回収でき、フル運転するインセンティブが生じることで、最適稼働から乖離	? 計算負荷は不明 ○最適稼働から乖離するインセンティブが全くない

1. 検討状況の概要について

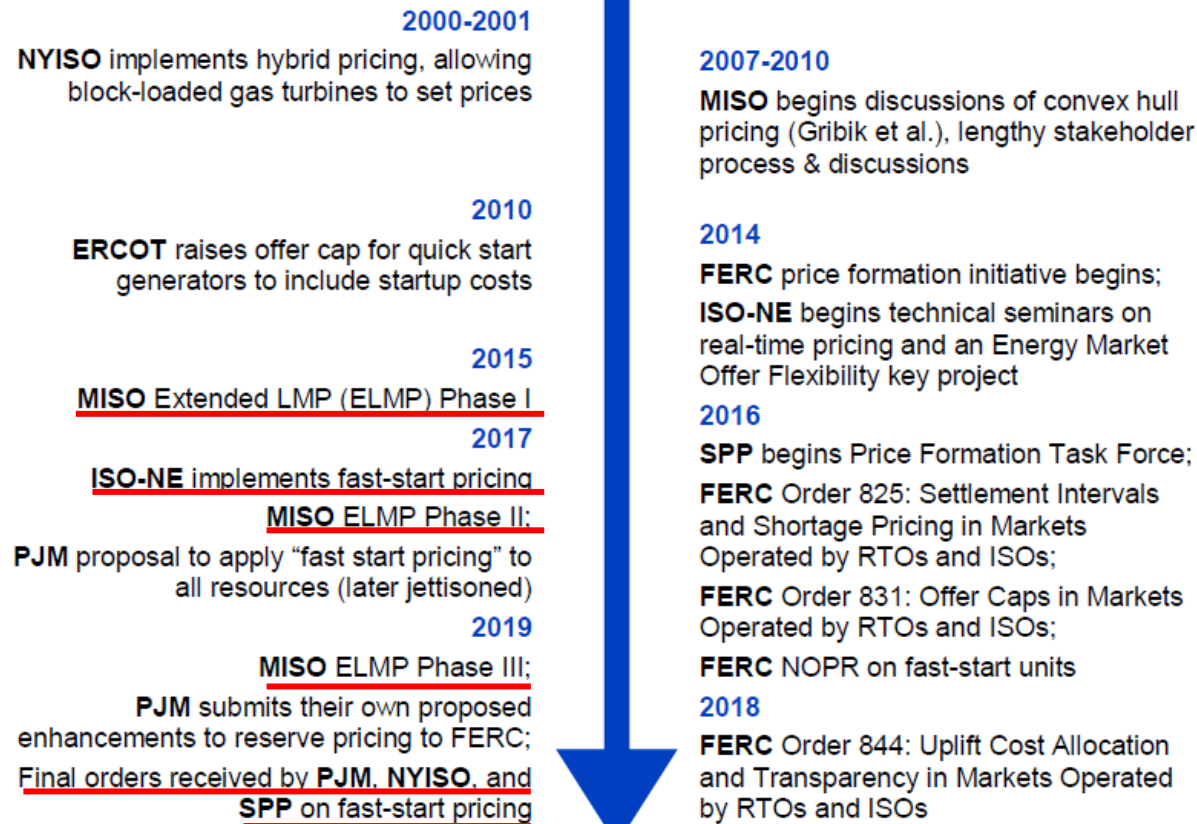
2. 検討状況の報告

- －⑥. 「起動費等が回収可能な価格算定ロジックの検討」における
海外調査・技術的特徴の確認
 - － 1. 海外における起動費等の扱いと価格算定方法
 - － 2. 価格算定方法の技術的な特徴の深掘り
 - － 3. 今後の進め方（技術検証会での議論内容）
- －⑦. 「前日同時市場後のSCUC・SCEDロジック」の時間前市場の検証

- まずは米国における起動費等のロジック上での扱い、価格算定方法の種類と特徴について調査を行った。
- 米国の起動費等のロジック上での扱いについて、2010年代にFast-Start電源の起動費等を価格反映させるような取り組み（Fast-Start Pricing※）が検討され、実際に一定の要件を満たす電源に絞って、起動費等を価格算定に反映しているISOも存在する。

【価格算定に関数する米国での取り組み】

※ ELMP（詳細は後述）に近い価格算定方法



- 米PJMにおいて、Fast-Start Pricingの適用を受けるための要件は、「1時間以内に応動可能」、「最低運転時間が1時間以内」、「オンラインで運転中」である。これらの要件を満たす起動停止の柔軟性が高い電源がFast-Start電源であり、想定されるリソースとして、燃料電池・ディーゼル・水力・蓄電池などが挙げられている。
- Fast-Start電源は、大型電源に比べて、相対的に起動停止回数が多く、（起動期間が短いため）1コマあたりの起動費も相対的に大きくなることから、約定価格にこれらの起動費等の影響を適切に反映させるために、米国では、これらの起動費等を価格算定に反映することが検討されたものと推察される。

- Once a unit is deemed Fast Start capable, they must also meet the following requirements in order to qualify for Fast-Start Pricing:

- Notification Time + Startup Time $\leq$ 1 hour
- Minimum Run Time $\leq$ 1 hour
- Online and running for PJM

- Resources deemed FS capable by default:

- Generation Type:

- Fuel Cells
- All CTs
- Diesels
- Hydro
- Battery
- Solar
- Landfill
- Wind

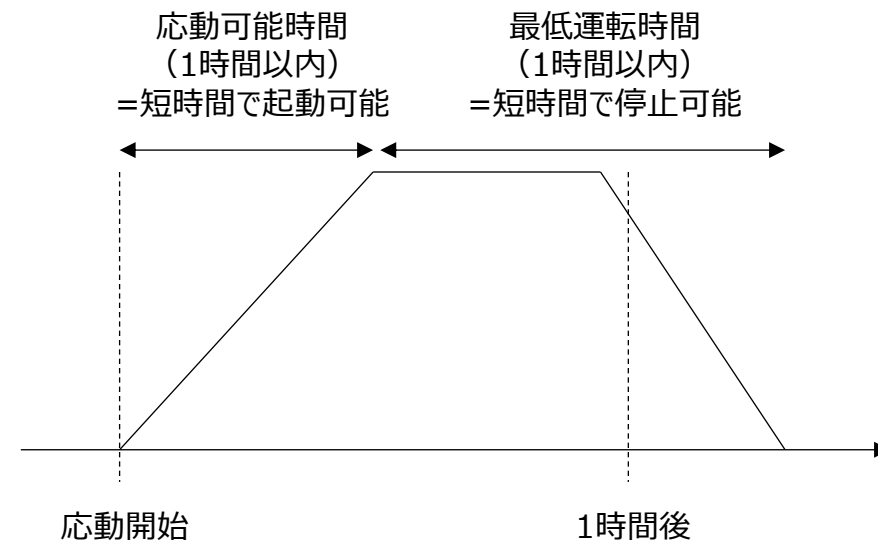
- All Economic Load Response

- Resource deemed not FS capable by default*:

- Combined Cycle
- Steam
- Nuclear

*Resources may request to be considered FS Capable

【米PJMにおけるFast-Start電源の要件イメージ】



- 他方で、米PJMは当初、Fast-Start電源の要件を明確化せず、多くの電源の起動費等を価格算定に反映させる方向でFast-Start Pricingを導入しようとしたが、FERCにより要件を明確化するように指示を受けた経緯がある。
- Uplift低減の副作用として、後述する逸失利益（＝SCUCロジックに結果を委ねないインセンティブ）が生じることも考えると、米国のように、対象とする電源をFast-Start電源に絞る等の工夫（制限）が必要になるとも考えられる。

FERC approves most of PJM's fast-start pricing changes

Specifically, PJM was directed to apply fast-start pricing to all fast-start resources and to include commitment costs in energy prices for fast-start resources in both the day-ahead and real-time markets, among other changes. FERC also stipulated that fast-start resources would be eligible for fast-start pricing only if they were able to start up in one hour or less and had a minimum run time of one hour or less.

- 次に、Upliftを低減可能な価格算定方法について、海外文献も参考に、種類および特徴を確認した結果は、下表のように整理される。（各方法の考え方および特徴については、次章で簡単な数値例を用いて深掘りする）
- 凸包プライシングはUpliftと逸失利益（=SCUCロジックに結果を委ねないインセンティブ）を最小化できるが、計算負荷の課題があり、計算負荷の低い方法として、ELMPやAIC等があるが、いずれも逸失利益が増大してしまう。

【価格算定方法の種類と特徴※1】

	考え方	起動費等の 約定価格反映	Upliftの 発生	逸失利益 の発生※2	SCUCロジック 外の計算負荷
シャドウプライス	系統全体で+1kWh出力した ときの価格	反映しない	発生 (標準)	なし	低
凸包プライシング	非凸な総費用曲線から近似 した凸関数のシャドウプライス	反映する	発生 (最小化)	発生 (最小化)	高
ELMP (整数緩和)	起動停止変数（0or1）を、 0～1に線形緩和して、出力 配分・価格算定 (結果的に、増分費用カーブに、起動費等 ／出力上限を加算したことと等価)	反映する	発生 (ボラティリティ低下)	発生	中 (出力配分自体 が変わる)
AIC (Uplift平均化)	事後的に、シャドウプライスに、 起動費等／発電出力を加算	反映する	なし (約定価格に内部化)	発生	低

※1 次ページを参考としているが、深掘り内容も踏まえて一部修正している
※2 逸失利益が発生する場合、SCUCロジックに結果を委ねないインセンティブとなる

	Method	Commitment Cost in Price	Uplift Payment Calculation	Incentive to Stay on Dispatch	Computational Difficulty	Notable Properties
シャドウプライス	Integer Programming ("Traditional")	Not included	Outcome	N/A	Low	Mathematical properties of LMP pricing
凸包プライシング	Convex Hull Pricing	Incorporated	Minimized	Incorporated into method	High	Minimizes make-whole payments and lost opportunity costs
ELMP	Modified Integer Programming	Incorporated	Volatility reduced	Not explicit	Mid	Prices are less volatile
AIC	Generalized Uplift	Incorporated	Internal	Incorporated into method	High	All participants are charged or receive payments that sum to zero
	Semi-Lagrangian Relaxation	Incorporated	None	Not explicit	High	Single price paid without side-payments
	Dual Pricing Algorithm	Incorporated	Internal	Penalties	Low	Make-whole payments allocated to participants, method conditioned based on preferences
	PJM Proposal	Incorporated	Minimized	Compensated	Low	All resources can set price

1. 検討状況の概要について

2. 検討状況の報告

- －⑥. 「起動費等が回収可能な価格算定ロジックの検討」における
海外調査・技術的特徴の確認
 - － 1. 海外における起動費等の扱いと価格算定方法
 - － 2. 価格算定方法の技術的な特徴の深掘り
 - － 3. 今後の進め方（技術検証会での議論内容）
- －⑦. 「前日同時市場後のSCUC・SCEDロジック」の時間前市場の検証

- 海外文献も参考に確認した価格算定手法について、その技術的な特徴を深掘り（より具体的に理解）するため、簡単なケース（数値例）を用いて、シャドウプライスを含めた価格算定手法の特徴の違いを確認した。
- 簡単なケースとして、電源A（起動費がなく増分費用カーブが相対的に高い電源）と、電源B（起動費があり増分費用カーブが相対的に安い電源）の2電源を用いた下記ケースを設定した。

【パラメータ】

	電源A	電源B
増分費用カーブ[円/kWh]	14	8
起動費 [万円]	0	30
出力上限 [万kWh]	10	10

【変数】

	電源A	電源B
発電機出力 [kWh]	q_A	q_B
起動停止変数 [0 or 1]	u_A	u_B
需要 [万kWh]	D	

【SCUCロジック】

目的関数

$$14q_A + 8q_B + 0u_A + 30u_B \rightarrow \min$$

制約条件

$$\text{需給バランス制約} \quad q_A + q_B = D$$

$$\text{出力上下限制約（電源A）} \quad 0 \leq q_A \leq 10u_A$$

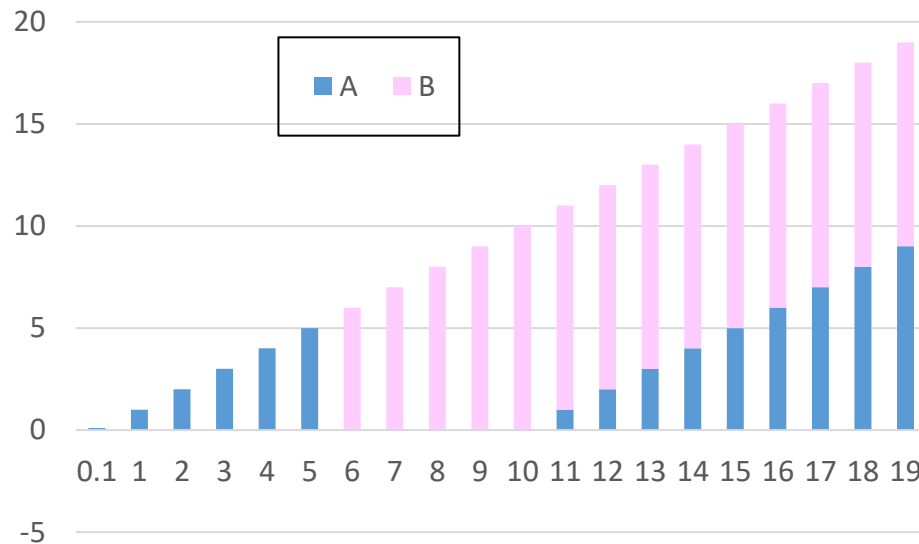
$$\text{出力上下限制約（電源B）} \quad 0 \leq q_B \leq 10u_B$$

$$\text{起動停止} \quad u_A, u_B = \{0, 1\}$$

- まずはシャドウプライスの技術的な特徴の深掘りを行った。
- 前ページのSCUCロジックの最適解は、左図のようになり、需要が0～5万kWhのときは電源Aのみが起動・出力し、需要が5～10万kWhのときは電源Bのみが起動・出力し、需要10～20万kWhのとき電源Bは出力上限に達して残りを電源Aが起動・出力する。
- 総費用（増分費用カーブ+起動費）関数は、右図のようになり、需要0～10万kWhにおいて非凸な形状となる。
（数理的に、非凸性がある場合はUpliftが生じる可能性がある。非凸性とUpliftの関係の詳細は次ページ以降を参照）

【発電機出力】

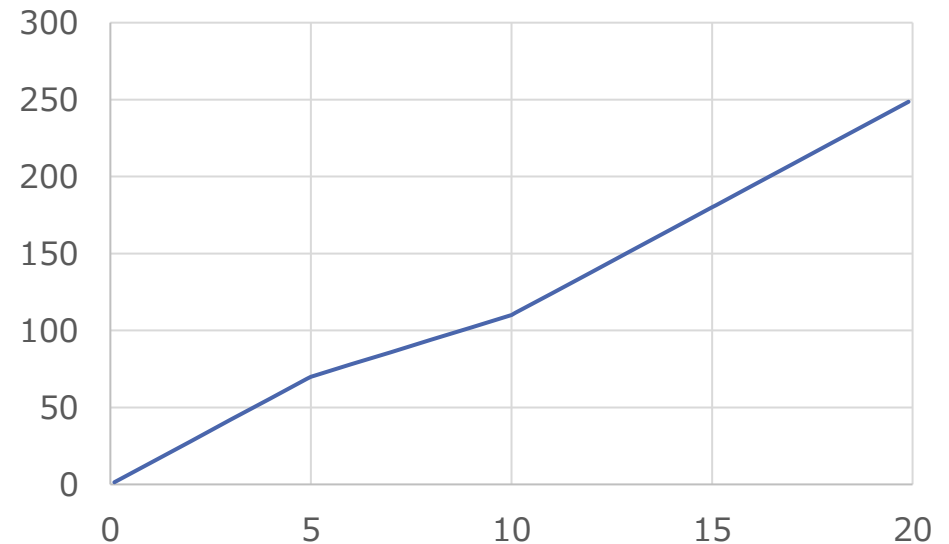
出力 [万kWh]



需要D [万kWh]

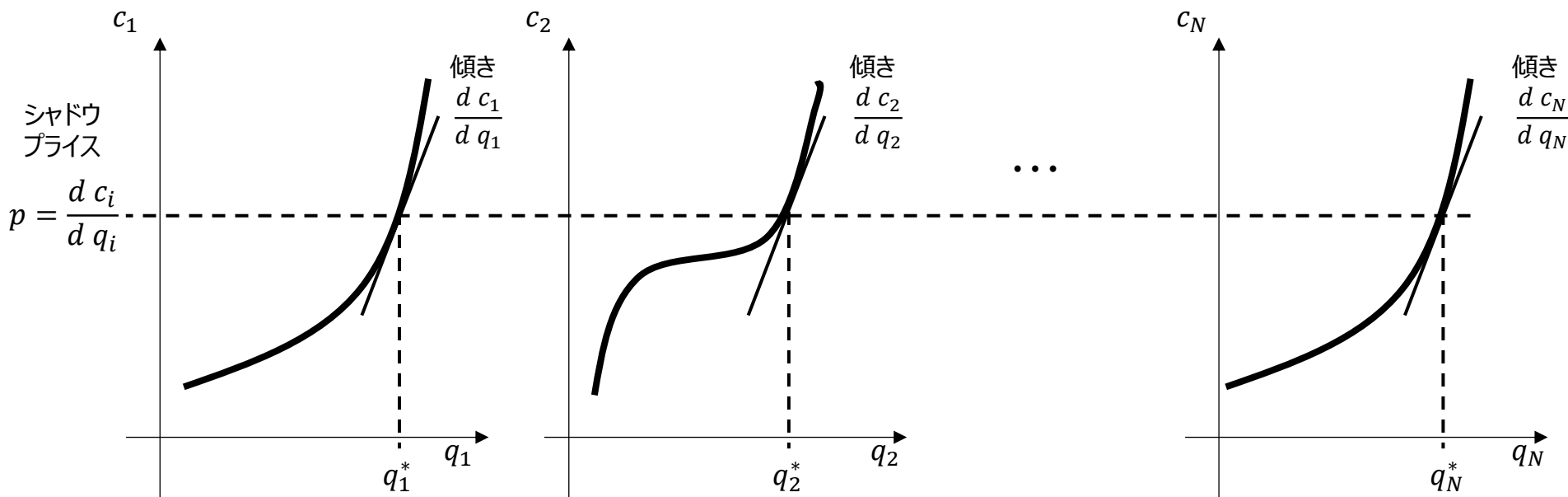
【総費用（増分費用カーブ+起動費）関数】

金額 [万円]



需要D [万kWh]

- N台の電源 i ($i=1, 2, \dots, N$) の出力を q_i 、費用関数 $c_i(q_i)$ とする。
- 費用関数の合計を最小化すると、費用関数の傾き $\frac{d c_i}{d q_i}$ が均衡（一致）する出力 q_i^* となり、シャドウプライス（約定価格） p は費用関数の傾き $\frac{d c_i}{d q_i}$ となる。



- 電源*i*の収支 π_i は中段左式のようになり、 π_i の単位あたりの変化量は中段右式として得られる。
- 費用関数が凸性を持つ場合、出力の増加に従って、費用関数の傾きは常に増加し続け（常に $\frac{d^2 c_i}{d q_i^2} \geq 0$ ）、収支 π_i の単位あたりの変化量は常に増加することから、収支 π_i が負になることはない。（Upliftは発生しない）
- 他方で、非凸性を持つ場合は、費用関数の傾きの増加が負（ $\frac{d^2 c_i}{d q_i^2} < 0$ ）となりえるため、収支 π_i の単位あたりの変化量が減少となることがあり、収支も負となる可能性がある。（Upliftが発生する可能性）

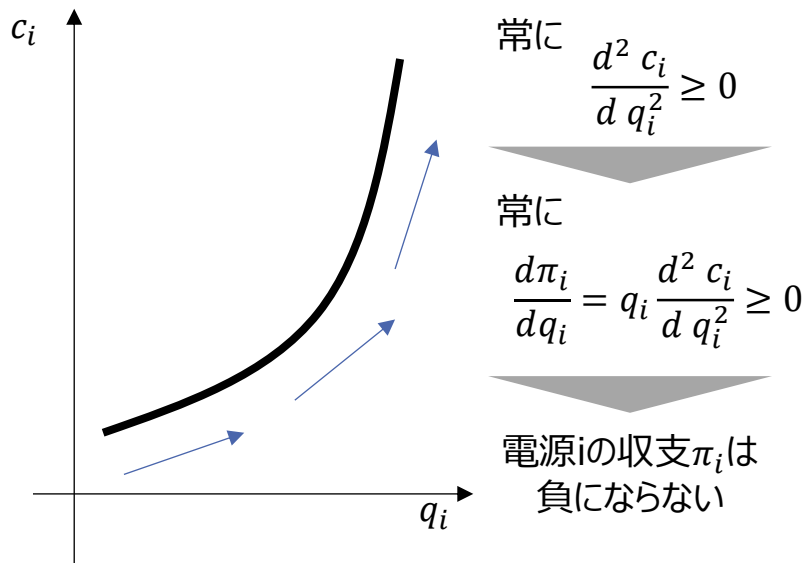
【電源*i*の収支】

$$\pi_i = p q_i - c_i = q_i \frac{d c_i}{d q_i} - c_i$$

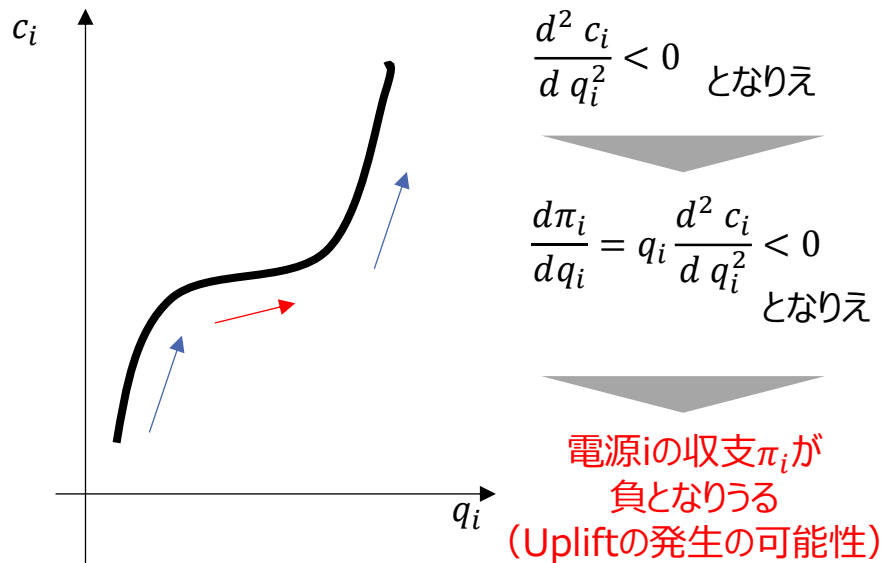
【電源*i*の収支の単位あたりの変化量】

$$\frac{d \pi_i}{d q_i} = \frac{d c_i}{d q_i} + q_i \frac{d^2 c_i}{d q_i^2} - \frac{d c_i}{d q_i} = q_i \frac{d^2 c_i}{d q_i^2}$$

【費用関数が凸性を持つ場合】



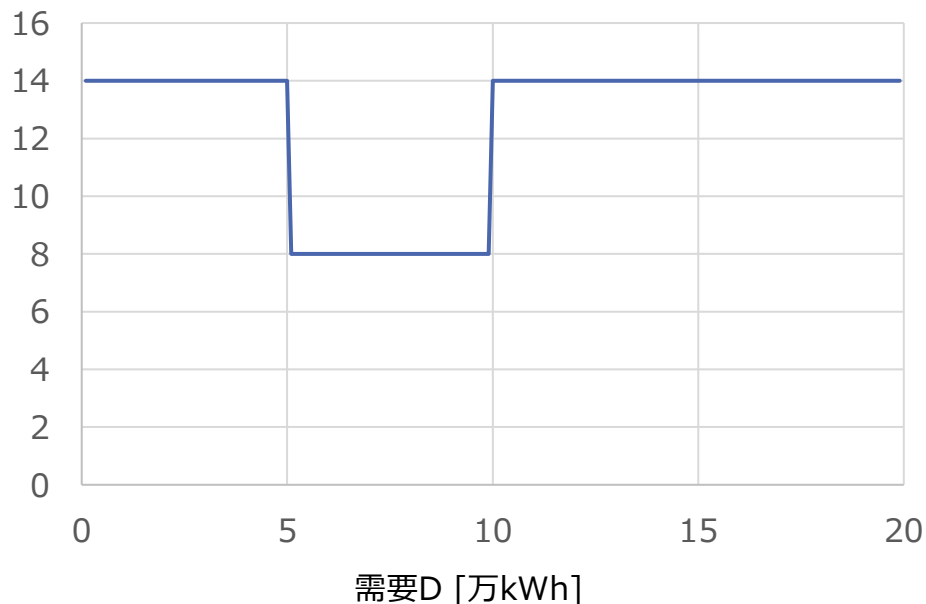
【費用関数が非凸性を持つ場合】



- 約定価格（シャドウプライス）は左図のようになり、需要が0～5万kWhのときは稼働・出力している電源Aの増分費用カーブ（14円/kWh）となり、需要が5～10万kWhのときは稼働・出力している電源Bの増分費用カーブ（8円/kWh）となり、需要10～20万kWhのときはマージナル電源Aの増分費用カーブ（14円/kWh）となる。
- そのため、シャドウプライスのもとで算定されるUpliftは右図のようになり、需要が5～10万kWhで生じることとなる。

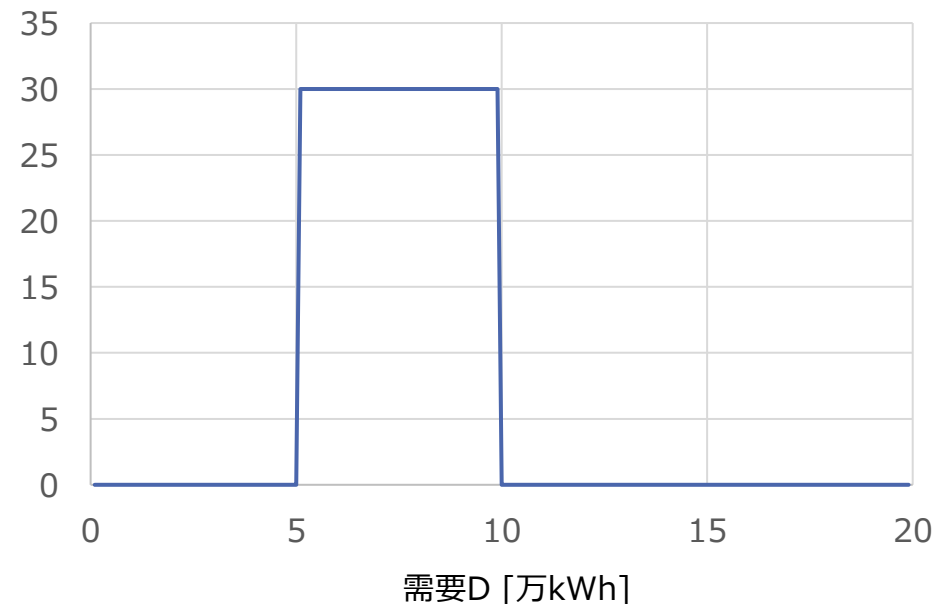
【約定価格（シャドウプライス）】

価格 [円/kWh]



【Uplift】

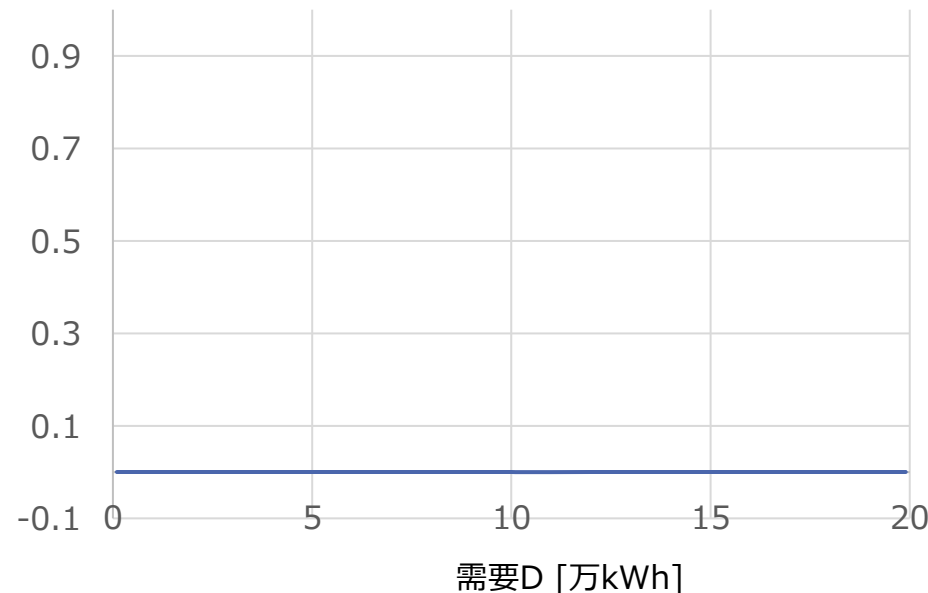
金額 [万円]



- 続いて、逸失利益（起動電源が定格出力から抑制された時に機会損失が生じる状態となっているか）については、シャドウプライスが、マージナルな電源の増分費用カーブとなっていることから、全く発生しない。
- 逸失利益が発生しないということは、SCUCロジックに結果を委ねないインセンティブが働かない（≡発電事業者としてSCUCの最適化結果に委ねようとする）ことを意味する。

【逸失利益】

金額 [万円]

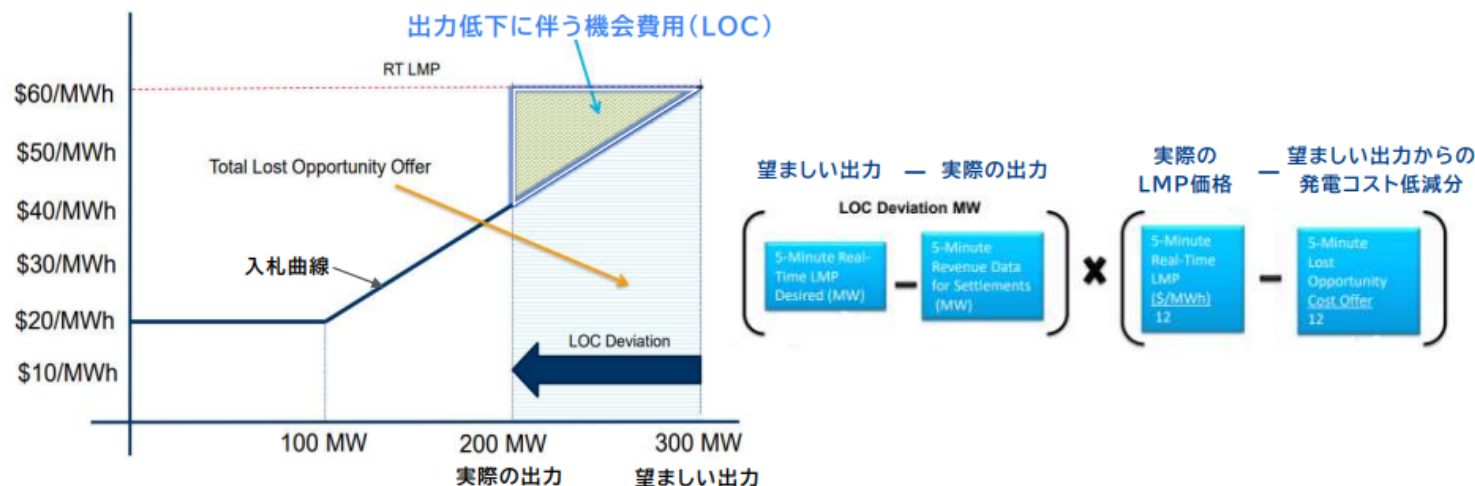


Lost Opportunity Costとは



- PJMのディスパッチによって出力低下・停止なされた場合に発生した機会費用を補填する仕組みである。
 - ▶ 例えば前日市場でスケジュールリングされていた電源が、リアルタイムにおける上げ調整力(Regulation)を確保するためにPJMが前日市場のスケジュールから持ち下げてバランス調整の指示に従った場合や、PJMのリアルタイムディスパッチに従ったために前日市場のスケジュールリングとの乖離量(deviation)が発生した場合、リアルタイムで発電していれば得られた収入に対する機会費用が発生する。この機会費用をLost Opportunity Costとして電源に補填している。
(※上記以外にLost Opportunity Costが発生するケースがあるか、確認中)

Lost Opportunity Costの概念図



出所) PJM, "Lost Opportunity Cost Credit Overview", 閲覧日2023年9月29日, <https://www.pjm.com/-/media/committees-groups/committees/mic/2020/20200708/20200708-item-06a-lost-opportunity-cost-overview.ashx>

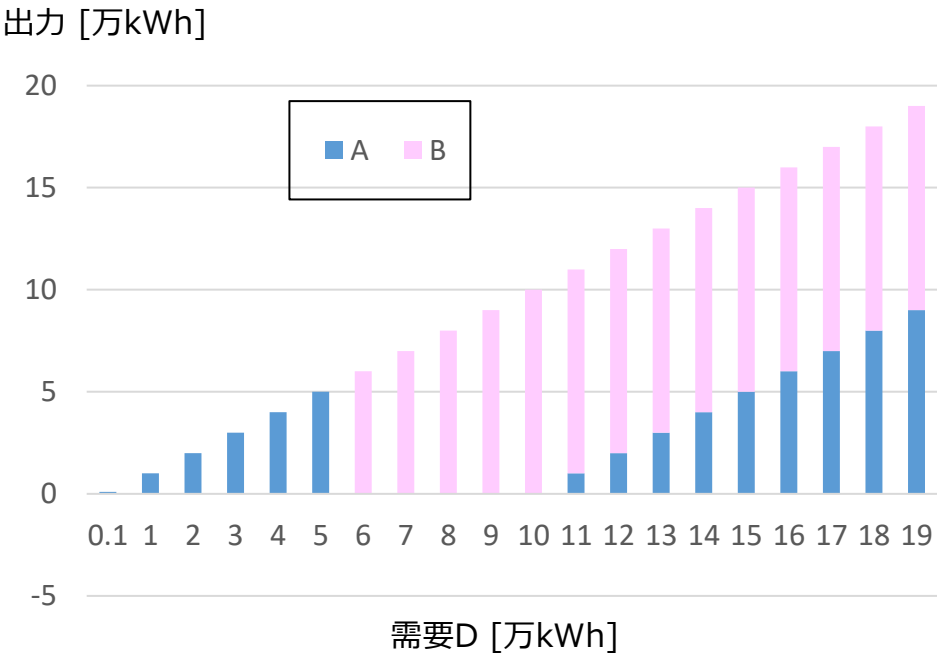
PJM, PJM Regulation Lost Opportunity Cost Overview, p.2-5, 2022年9月20日 より三菱総合研究所一部加筆・修正

Copyright © Mitsubishi Research Institute

22

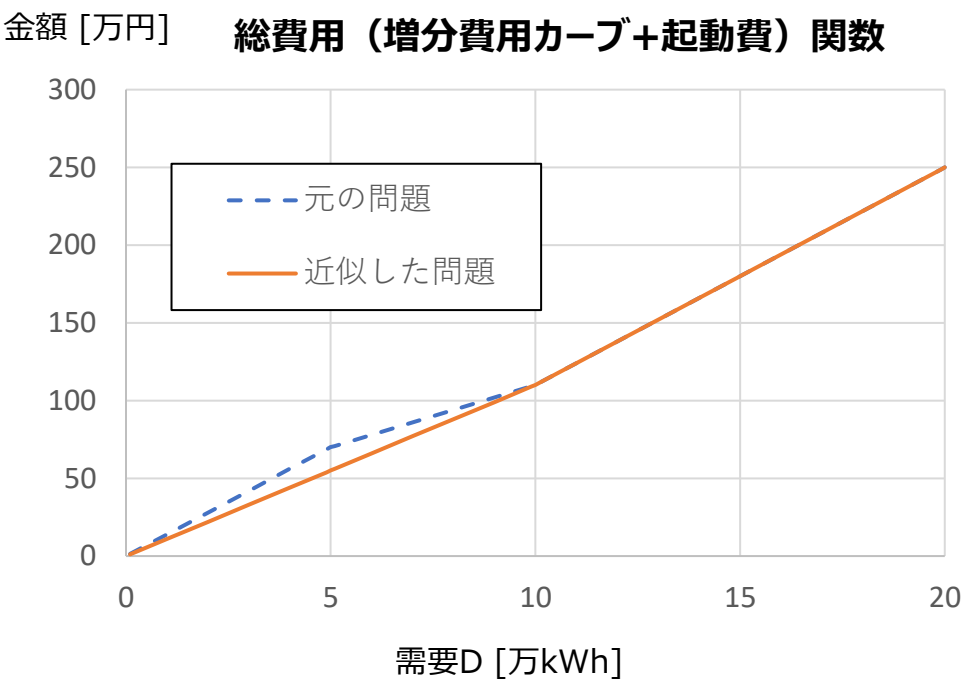
- 凸包プライシングとは、非凸性な元の最適化問題に対して、なるべく近い凸性の最適化問題への近似を行い、近似した最適化問題のシャドウプライスにより価格算定を行う方法（考え方）となっている。
- 近似した最適化問題および価格は、ラグランジュ双対問題によって得ることができるが、導出および解探索の難しさが課題となっている。（詳細は次ページ以降参照）

【発電機出力（シャドウプライスと同じ）】



	電源A	電源B
増分費用カーブ[円/kWh]	14	8
起動費 [万円]	0	30

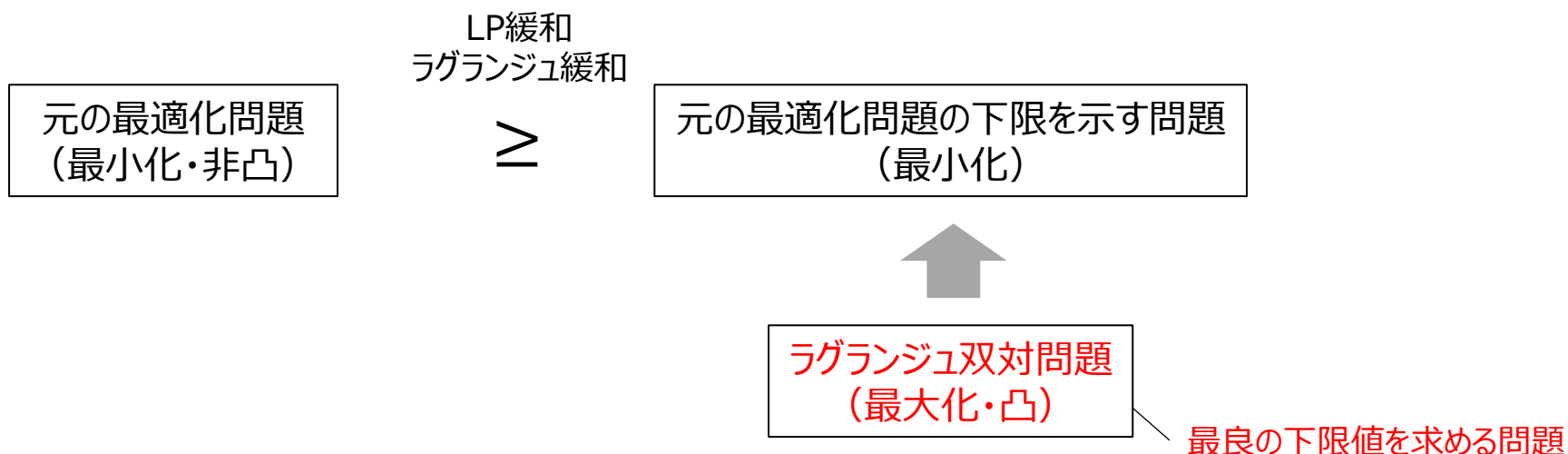
【凸包プライシングの考え方のイメージ】



- 凸包プライシングの導出の考え方は下図のようになり、元の問題よりも最適化した目的関数値が小さくなるように緩和（変換）したラグランジュ双対関数（元の問題の下限を示す問題）に対し、最良（最大）となる下限値を求めるラグランジュ双対問題（凸となることが数理的に証明されている※）を作成して解く考え方で導出される。
- 次ページ以降で、上記の凸包プライシングの考え方を、簡単なケース（数値例）に適用して説明する。

※山下信雄「双対問題」

<http://www-optima.amp.i.kyoto-u.ac.jp/~nobuo/Ryukoku/2002/course5.pdf>



- まず、元の問題（左式）について、起動停止を示す変数 u_A, u_B をLP緩和（0~1の間を取ることを許容）すると、右式のように書ける。
- 制約条件が緩和されたため、LP緩和した問題は、元の問題よりも、最適化結果として得られる目的関数値は小さくなる。

元の最適化問題

目的関数

$$14q_A + 8q_B + 30u_B \rightarrow \min$$

制約条件

$$q_A + q_B = D$$

$$0 \leq q_A \leq 10u_A$$

$$0 \leq q_B \leq 10u_B$$

$$u_A, u_B = \{0, 1\}$$

 $\geq$

LP緩和した最適化問題

目的関数

$$14q_A + 8q_B + 30u_B \rightarrow \min$$

制約条件

$$q_A + q_B = D$$

$$0 \leq q_A \leq 10u_A$$

$$0 \leq q_B \leq 10u_B$$

$$0 \leq u_A \leq 1$$

$$0 \leq u_B \leq 1$$

- 続いて、LP緩和した問題の目的関数に、制約条件の左辺に定数（ラグランジュ未定乗数 $\lambda, v_1, v_2, v_3, v_4$ ）を乗じた項を追加する。（この操作をラグランジュ緩和、変形した目的関数をラグランジュ緩和関数と呼ぶ）
- 最適化すると、等式の制約条件は0、不等式の制約条件は負となり、ラグランジュの未定乗数 v_1, v_2, v_3, v_4 は正と仮定しているため、LP緩和した問題よりも、ラグランジュ緩和した問題の方が、目的関数値が小さくなる。

LP緩和した最適化問題

目的関数

$$14q_A + 8q_B + 30u_B \rightarrow \min$$

制約条件（左右の辺を変更）

$$D - q_A - q_B = 0$$

$$q_A - 10u_A \leq 0$$

$$q_B - 10u_B \leq 0$$

$$u_A - 1 \leq 0$$

$$u_B - 1 \leq 0$$

$$0 \leq q_A, q_B, u_A, u_B$$

 $\geq$

ラグランジュ緩和した最適化問題

目的関数

$$\begin{aligned} &14q_A + 8q_B + 30u_B \\ &+ \lambda(D - q_A - q_B) \\ &+ v_1(q_A - 10u_A) \\ &+ v_2(q_B - 10u_B) \\ &+ v_3(u_A - 1) \\ &+ v_4(u_B - 1) \rightarrow \min \end{aligned}$$

制約条件

$$D - q_A - q_B = 0$$

$$0 \leq q_A, q_B, u_A, u_B$$

$$0 \leq v_1, v_2, v_3, v_4$$

- ラグランジュ緩和した問題を変数 q_A, q_B, u_A, u_B について整理すると、左式ようになる。
- 非有界（目的関数を最小化した際に、 q_A, q_B, u_A, u_B が無限に大きくなる）とならない条件は、 q_A, q_B, u_A, u_B の係数が正となることである。
- そのうえで、残りの項を最大化すれば、元の問題の最良の下解値を得ることができる。
（この最適化問題を、ラグランジュ双対問題と呼ぶ）

ラグランジュ緩和した最適化問題

目的関数

$$(14 - \lambda + v_1)q_A + (8 - \lambda + v_2)q_B \\ + (-10v_1 + v_3)u_A + (30 - 10v_2 + v_4)u_B \\ + D\lambda - v_3 - v_4 \rightarrow \min$$

制約条件

$$D - q_A - q_B = 0$$

$$0 \leq q_A, q_B, u_A, u_B$$

$$0 \leq v_1, v_2, v_3, v_4$$

非有界とならないためには、 q_A, q_B, u_A, u_B の係数が正

非有界としたうえで、最大化すれば、元の問題の最良の下解値

ラグランジュ双対問題

目的関数

$$D\lambda - v_3 - v_4 \rightarrow \max$$

制約条件

$$0 \leq 14 - \lambda + v_1$$

$$0 \leq 8 - \lambda + v_2$$

$$0 \leq -10v_1 + v_3$$

$$0 \leq 30 - 10v_2 + v_4$$

$$0 \leq v_1, v_2, v_3, v_4$$

- ラグランジュ双対問題を解くために、制約条件を整理すると左式のようなになる。
- 目的関数値を最大化するためには、 λ をなるべく大きく、 v_3, v_4 をなるべく小さくすればよい。
- 目的関数を最大化するように、 λ, v_3, v_4 を一つずつ順番に変化させて、解の候補を求めると右表のとおりとなる。

ラグランジュ双対問題

目的関数

$$D\lambda - v_3 - v_4 \rightarrow \max$$

制約条件

$$\left. \begin{array}{l} \lambda \leq 14 + v_1 \\ \lambda \leq 8 + v_2 \end{array} \right\} \lambda \leq \min(14 + v_1, 8 + v_2)$$

$$0 \leq v_1 \leq \frac{1}{10}v_3$$

$$0 \leq v_2 \leq 3 + \frac{1}{10}v_4$$

$$0 \leq v_3, v_4$$

【ラグランジュ双対問題の解の候補】

	候補①	候補②
λ	14	11
v_1	0	0
v_2	6	3
v_3	0	0
v_4	30	0
目的関数値	14D-30	11D

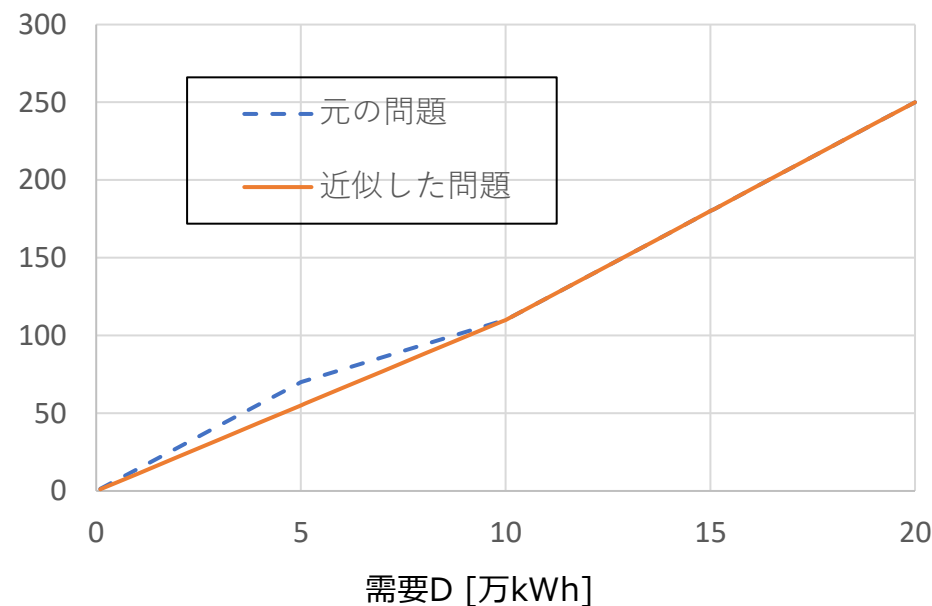
- 目的関数値が最大となるものが最適解となるため、 $D \leq 10$ のとき目的関数値が $11D$ となり、 $10 \leq D$ のとき目的関数値は $14D-30$ となり、元の問題から近似した凸関数は右図のようになる。
- また、近似した凸関数のシャドウプライスは λ に対応しており、 $D \leq 10$ のとき11円/kWhとなり、 $10 \leq D$ のとき14円/kWhとなる。
- 今回は手計算でも導出可能なレベルだが、変数が増えると、ラグランジュ双対問題の導出および解くことが難しくなる。

【ラグランジュ双対問題の解の候補】

	候補①	候補②
λ	14	11
v_1	1	0
v_2	6	3
v_3	0	0
v_4	30	0
目的関数値	$14D-30$	$11D$
	$D \leq 10$	$10 \leq D$

【凸包プライシングの総費用関数】

金額 [万円]



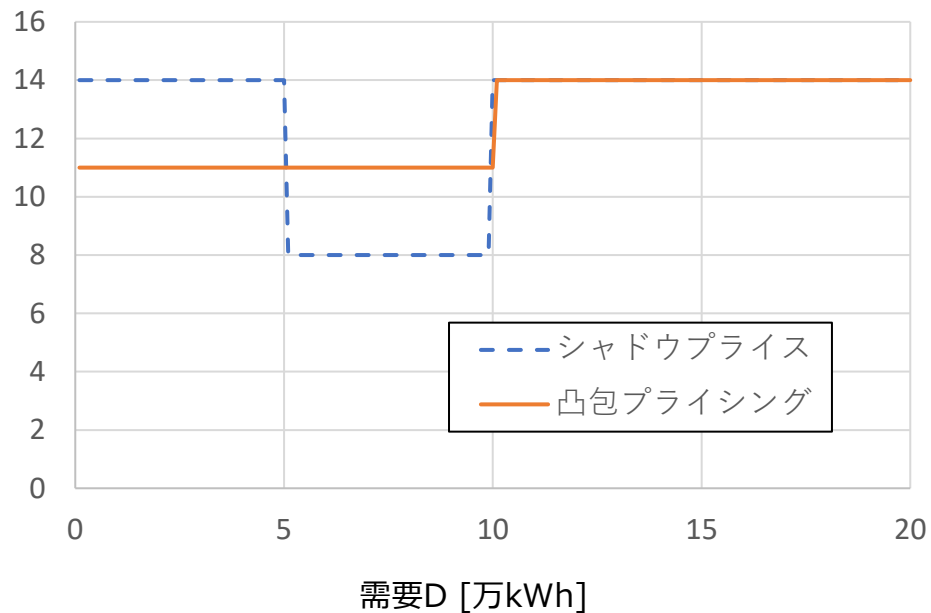
近似関数 $11D$
シャドウプライス11円/kWh

近似関数 $14D-30$
シャドウプライス14円/kWh

- 簡単なケース（数値例）における、凸包プライシングでの約定価格およびUpliftは下図の通りとなる。
- シャドウプライスに比べ、Upliftを低減（最小化）できるが、あくまでも元の問題からの近似であるため、0にならない。

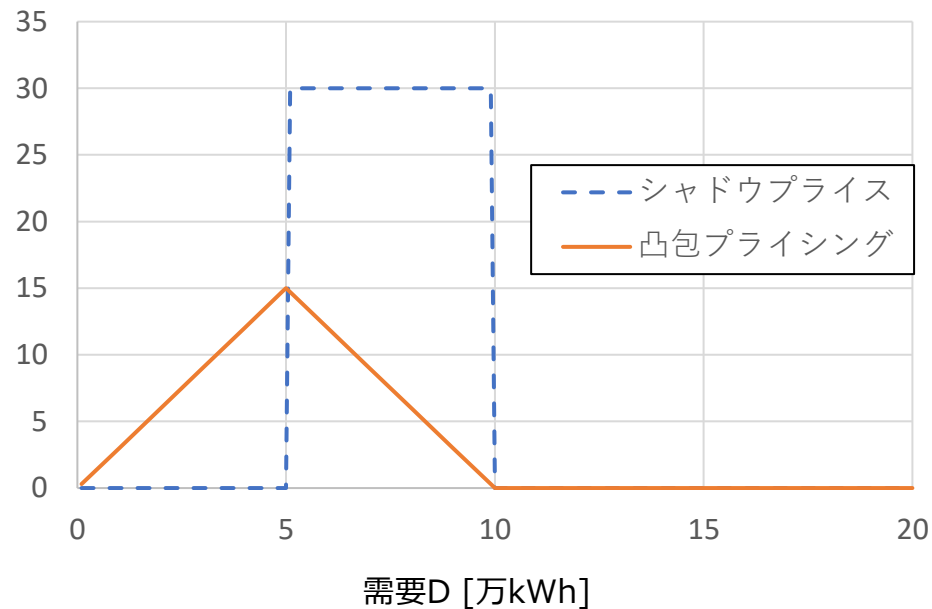
【約定価格】

価格 [円/kWh]



【Uplift】

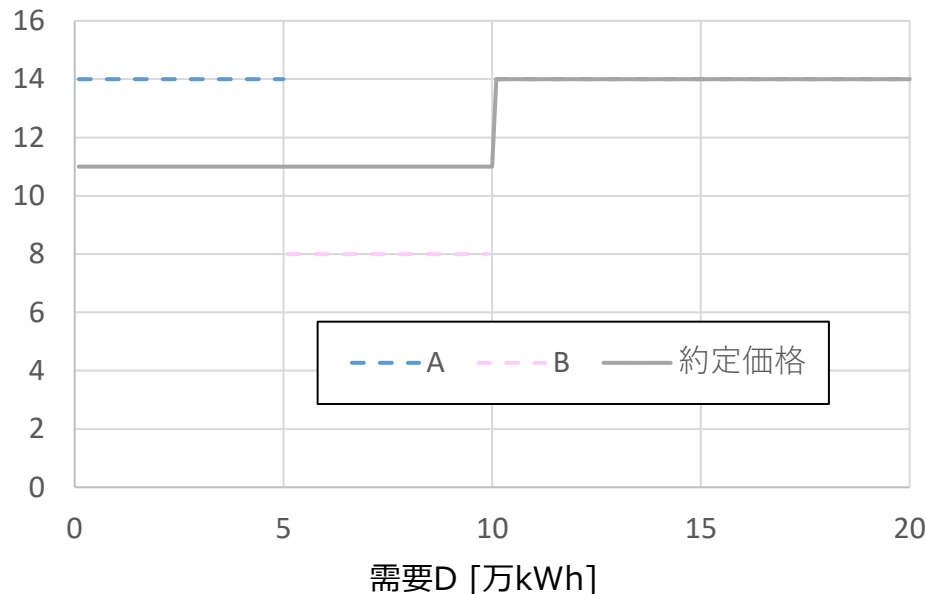
金額 [万円]



- 次に、凸包プライシングにおける、約定価格と各電源の増分費用カーブ（部分負荷時のみ）を左図に、逸失利益（起動電源が定格出力から抑制された時に機会損失が生じる状態となっているか）を右図に示す。
- 凸包プライシングの約定価格は、マージナルな電源の増分費用カーブで約定価格を決めていたシャドウプライスから乖離するため、需要5～10万kWhにおいて（見かけ上の）逸失利益が生じ、SCUCロジックに結果を委ねない（この例では、電源Bがセルフ入札等により、出力上限で運転しようとする）インセンティブが生じることとなる。

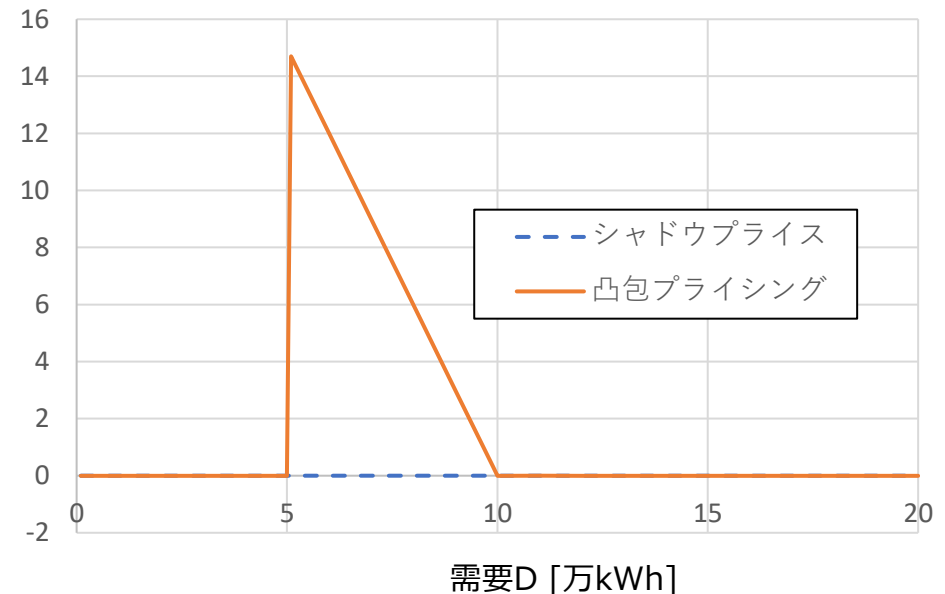
【約定価格と各電源の増分費用カーブ（部分負荷時のみ）】

価格 [円/kWh]



【逸失利益】

金額 [万円]



- 凸包プライシングは導出の難しさに課題があるため、より簡易な価格算定方法としてELMPがある。
- ELMPは、起動停止を示す変数 u_A, u_B をLP緩和（0～1の間を取ることを許容）して、出力配分自体を変えた上で価格算定を行う方法（考え方）となり、ELMPの目的関数としては、増分費用カーブに発電機出力毎に変換した起動費単価（起動費等/出力上限※）を加えて最適化していることと同義となる。

※ 起動期間が複数コマにまたがる場合は、起動費等/（出力上限×起動期間）

元の最適化問題

目的関数

$$14q_A + 8q_B + 30u_B \rightarrow \min$$

制約条件

$$q_A + q_B = D$$

$$0 \leq q_A \leq 10u_A$$

$$0 \leq q_B \leq 10u_B$$

$$u_A, u_B = \{0, 1\}$$

LP緩和した最適化問題（ELMP）

目的関数

$$14q_A + 8q_B + \frac{30}{10}q_B \rightarrow \min$$

起動費

$$\frac{30}{10}q_B$$

出力上限

制約条件

$$q_A + q_B = D$$

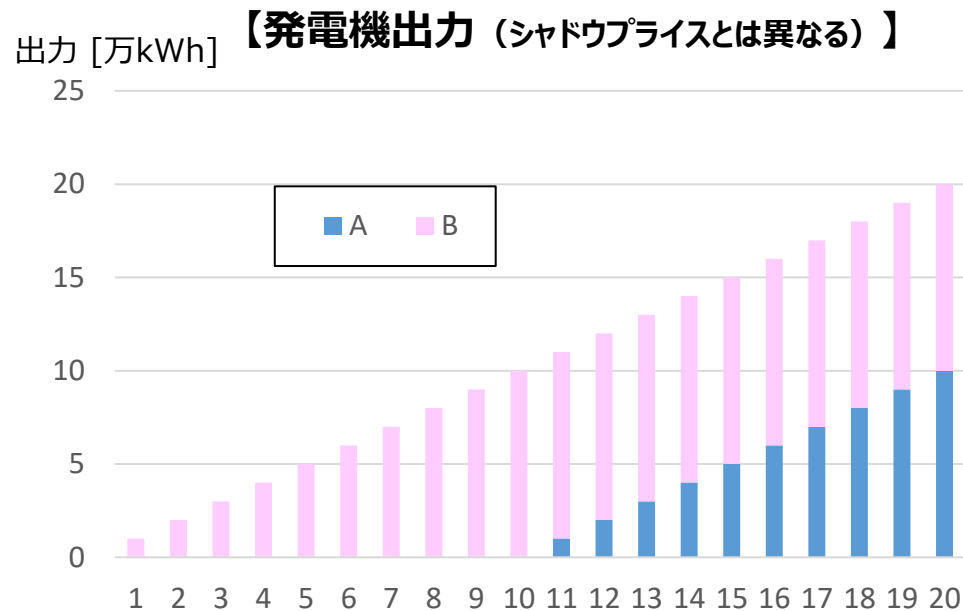
$$0 \leq q_A \leq 10u_A$$

$$0 \leq q_B \leq 10u_B$$

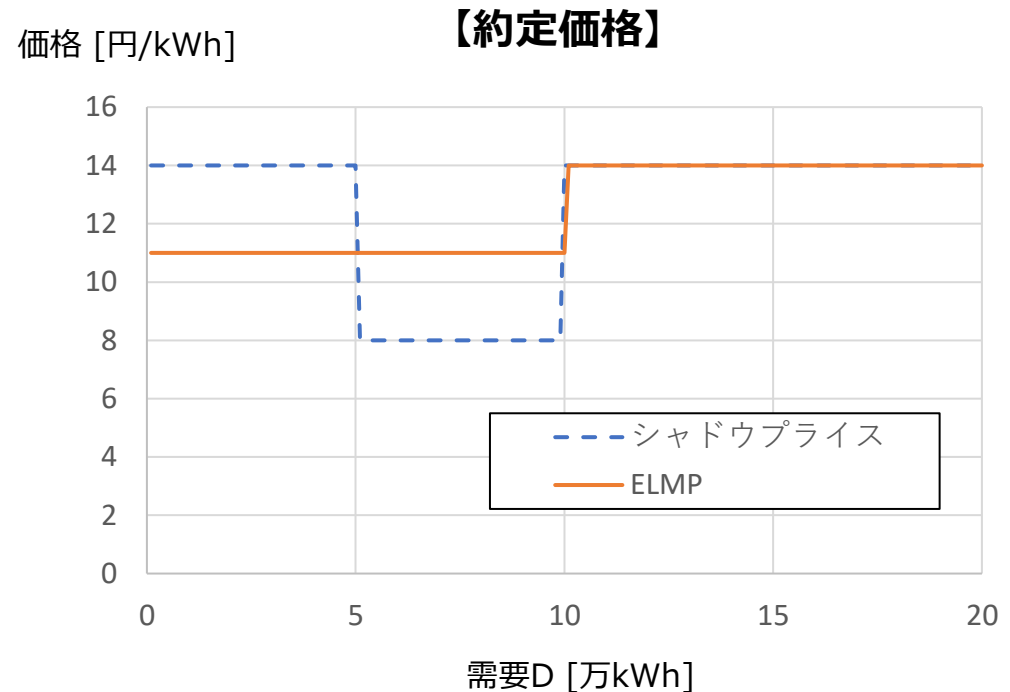
$$0 \leq u_A \leq 1$$

$$0 \leq u_B \leq 1$$

- ELMPによる（元の結果から変わった）出力配分結果を左図、約定価格を右図に示す。
- 増分費用カーブに起動費単価（起動費/出力上限）を加算した単価は、電源B（11円/kWh）の方が電源A（14円/kWh）よりも安いいため、需要0～10万kWhでは電源Bのみが起動・出力し、需要10～20万kWhでは電源Bは出力上限に達して、残りを電源Aが起動・出力する。
- 約定価格については、需要0～10万kWhでは電源Bの単価（11円/kWh）となり、需要10～20万kWhでは電源Aの単価（14円/kWh）となる。



	電源A	電源B
増分費用カーブ[円/kWh]	14	8
起動費 [万円]	0	30

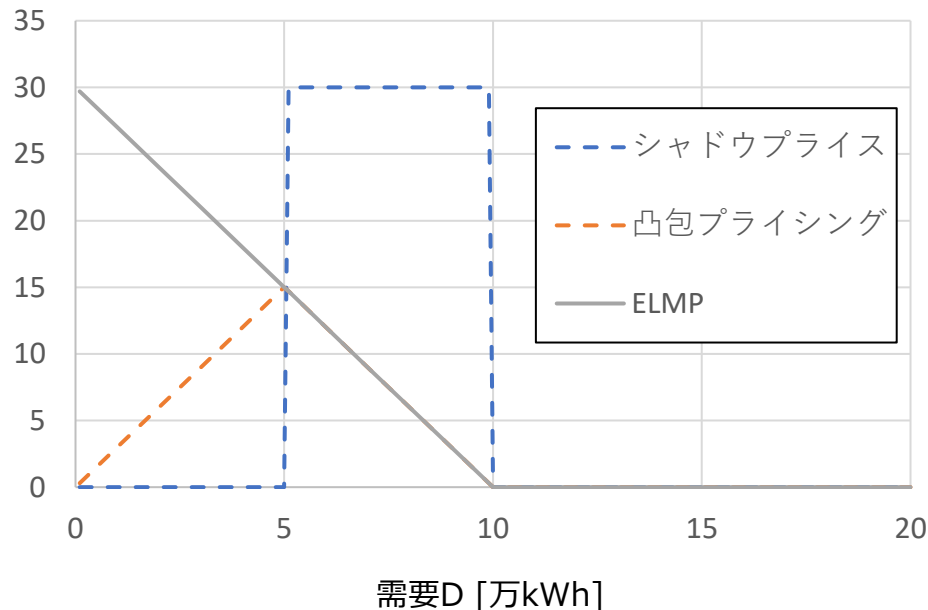


- ELMPの出力配分・約定価格から算定されるUpliftを左図、逸失利益（起動電源が定格出力から抑制された時に機会損失が生じる状態となっているか）を右図に示す。
- 凸包プライシングに比べ出力配分結果自体を変えてしまうことから、需要0～5万kWhにおいて、Upliftと逸失利益（SCUCロジックに結果を委ねないインセンティブ※）ともに、凸包プライシングよりも大きくなっている。

※ 凸包プライシング同様に、この例でも電源Bがセルフ入札等により、出力上限で運転しようとする。

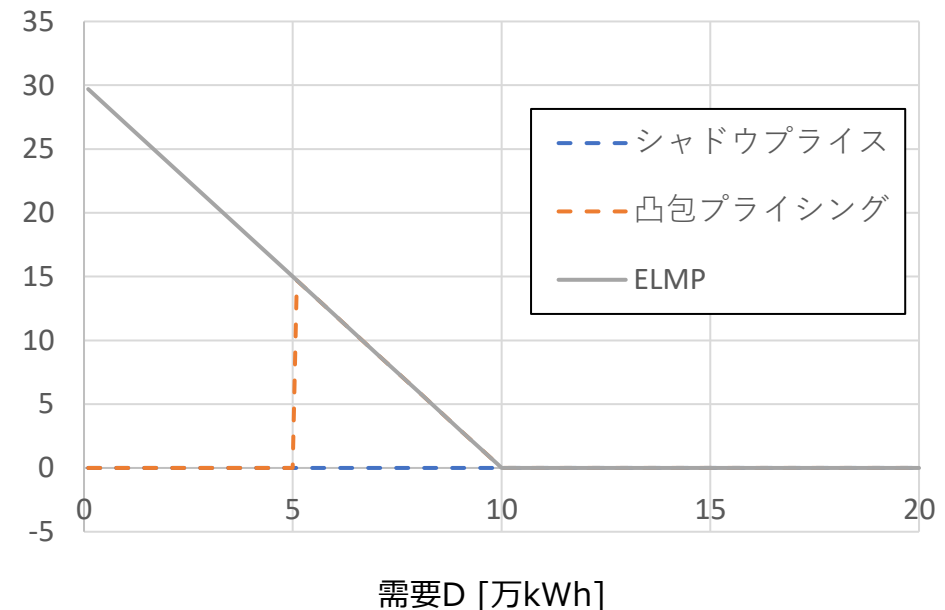
【Uplift】

金額 [万円]



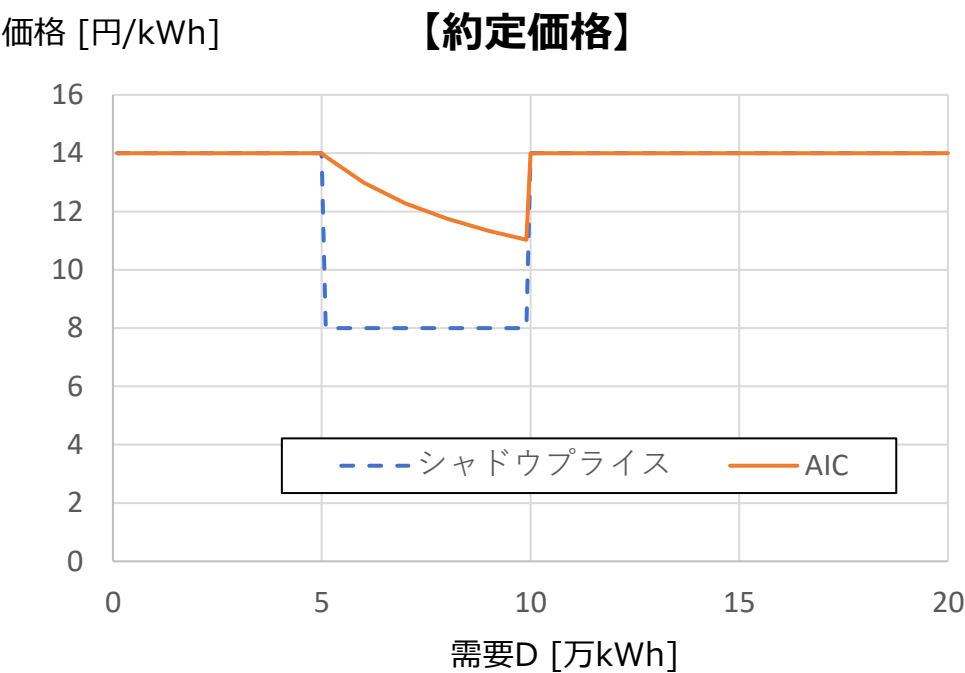
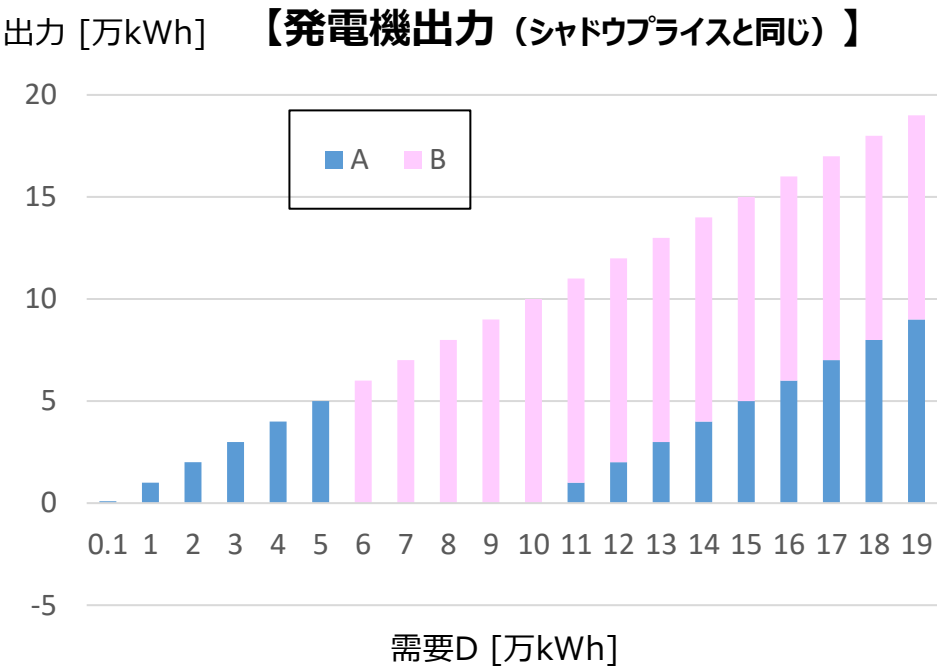
【逸失利益】

金額 [万円]



- ELMPの他にUpliftを全く生じさせない価格算定方法として、AICと呼ばれる、SCUCの出力配分自体は変えずに、事後的に、シャドウプライスに起動費単価（起動費等/出力）を加算する方法（考え方）もある。
- AICでの約定価格は右図のようになり、起動費のある電源Bが稼働し、シャドウプライスではUpliftが生じる需要5～10万kWhで、シャドウプライスに起動費単価（起動費等/出力※）が加算されている。

※ 起動期間が複数コマにまたがる場合は、起動費等/（出力×起動期間）



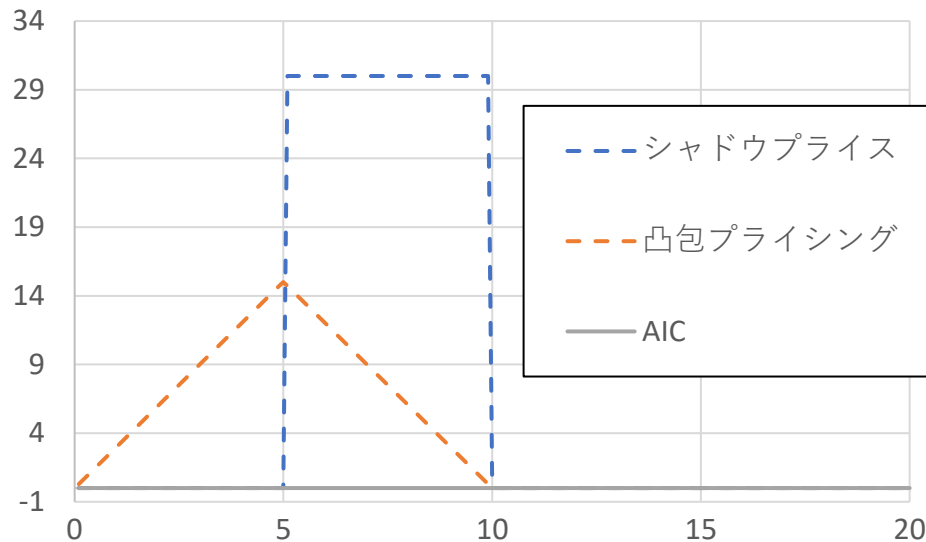
	電源A	電源B
増分費用カーブ[円/kWh]	14	8
起動費 [万円]	0	30

- AICの約定価格により算定されるUpliftを左図、逸失利益（起動電源が定格出力から抑制された時に機会損失が生じる状態となっているか）を右図に示す。
- AICでは、Upliftが生じないように起動費単価を加算しているため、Upliftは0となる一方で、逸失利益（SCUCロジックに結果を委ねないインセンティブ※）については、凸包プライシングよりも大きくなっている。

※ 凸包プライシング同様に、この例でも電源Bがセルフ入札等により、出力上限で運転しようとする。

【Uplift】

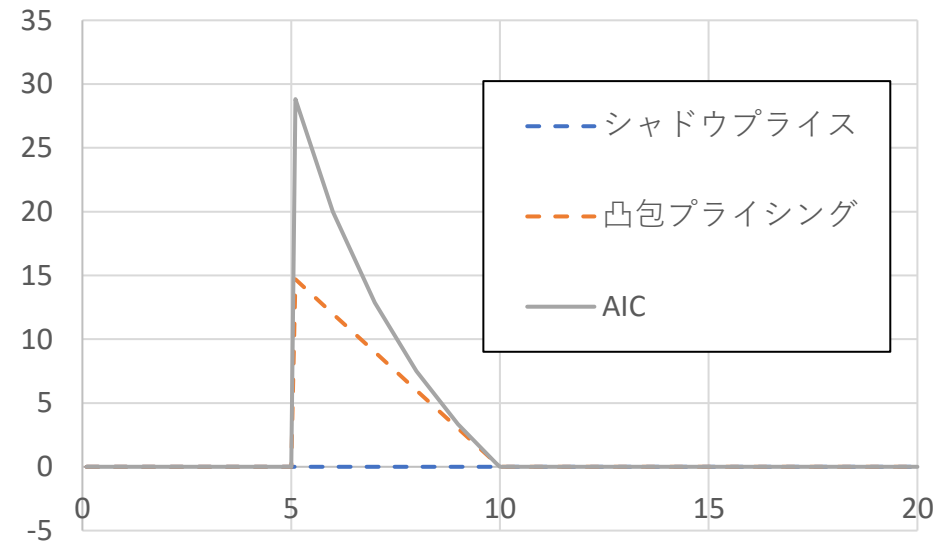
金額 [万円]



需要D [万kWh]

【逸失利益】

金額 [万円]



需要D [万kWh]

- Upliftを低減可能な価格算定方法について、海外事例も参考に、種類・特徴を整理した結果は、下表のとおり。
- シャドウプライスでは逸失利益（SCUCロジックに結果を委ねないインセンティブ）が生じないが、それ以外のどの価格算定方法においても、Uplift低減の副作用として逸失利益が生じることを考えると、米国のように、対象とする電源をFast-Start電源に絞る等の工夫（制限）が必要になるとも考えられる。

【価格算定方法の種類と特徴】

	考え方	起動費等の 約定価格反映	Upliftの 発生	逸失利益 の発生※	SCUCロジック 外の計算負荷
シャドウプライス	系統全体で+1kWh出力した ときの価格	反映しない	発生 (標準)	なし	低
凸包プライシング	非凸な総費用曲線から近似 した凸関数のシャドウプライス	反映する	発生 (最小化)	発生 (最小化)	高
ELMP (整数緩和)	起動停止変数（0or1）を、 0～1に線形緩和して、出力 配分・価格算定 (結果的に、増分燃料費単価に、起動費 等／出力上限を加算したこと等価)	反映する	発生 (ボラティリティ低下)	発生	中 (出力配分自体 が変わる)
AIC (Uplift平均化)	事後的に、シャドウプライスに、 起動費等／発電出力を加算	反映する	なし (約定価格に内部化)	発生	低

※ 逸失利益が発生する場合、SCUCロジックに結果を委ねないインセンティブとなる

1. 検討状況の概要について

2. 検討状況の報告

- －⑥. 「起動費等が回収可能な価格算定ロジックの検討」における
海外調査・技術的特徴の確認
 - － 1. 海外における起動費等の扱いと価格算定方法
 - － 2. 価格算定方法の技術的な特徴の深掘り
 - － 3. 今後の進め方（技術検証会での議論内容）
- －⑦. 「前日同時市場後のSCUC・SCEDロジック」の時間前市場の検証

- 第6回技術検証会においては、凸包プライシングの優位性（将来的な検証の余地）や、シャドウプライスにおいても例外的に逸失利益が発生するケース等について、様々なご示唆をいただいたが、Uplift低減可能な価格算定方法の技術的な特徴（課題）については、賛同いただいた。
- 引き続き、頂いたご示唆や海外動向も参考としつつ、将来的な日本における導入要否について、（制度論として）深掘りしていくこととしてはどうか。

【⑥起動費等が回収可能な価格算定ロジックの検討に関する議論概要】

- 凸包プライシングは、計算負荷が高い課題があるが、凸計画問題のように、双対化により制約を減らすことで解きやすくなるかもしれない。一律に計算負荷が高くなるのか、実際の問題に適用して検証する余地はある
 - ⇒MIPの計算は凸包が見つければ速くなることが知られているが、大規模な問題においては凸包自体を見つけることが難しい。凸包プライシングは、凸包を見つけるための計算が大変であると言われている。この点は、新たに検証をしなくても、米国で多数シミュレーションが行われている
- シャドウプライスでは逸失利益が生じないとされているが、発電で限界価格が決定される場合はそうであるが、例えばScarcity Pricingで価格が付く場合などでは逸失利益が生じる。他にもCAISOでは、リアルタイム市場は5分単位だが、再エネ変動の時間的つながりのため、15分先まで計算しており、最初の5分間分を使っているの、逸失利益が発生する。欧州では、良い仕組みでないかもしれないが、Upliftが必要な入札は不落として、逸失利益を許容しない
 - ⇒Scarcity Pricingのように逼迫時など、例外的な場合の逸失利益の扱いをどうするかという点はあるが、平時の傾向としては、今回確認のとおりであり、海外事例も見ながら引き続き検討していく
- 逸失利益の定義を記載いただいているが、 ΔkW 供出における逸失利益であり、今回はkWh約定だけを取り扱っており、混乱している。そのうえで、逸失利益が発生するので、セルフ入札をするというインセンティブがあると書いてあるが、AICのように起動費を加算されるなら市場に参加しても損はせず、市場に参加しないインセンティブがあるのか分からなかった
 - ⇒逸失利益は正確にはLOC（Lost Opportunity Cost）であり、 ΔkW のための抑制なのか、出力配分の結果としての抑制なのかの違いはあるが、同様のものであり、自身の増分燃料費カーブより高い約定価格が付いたことが事後的に判明した場合に、より利益があげられるということで、以降のSCUCに結果を委ねないインセンティブになるという趣旨である
 - ⇒起動している電源は費用回収できるが、停止している電源の観点もある。高い約定価格があれば動かしたいということで、OTCマーケットなどの他の市場で同価格が付けば、SCUCの外で成約するという行動も起こりうる
- Upliftの判定期間など、Upliftの回収ともセットで、トータルで制度を検討する必要がある

1. 検討状況の概要について

2. 検討状況の報告

- －⑥. 「起動費等が回収可能な価格算定ロジックの検討」における
海外調査・技術的特徴の確認
- －⑦. 「前日同時市場後のSCUC・SCEDロジック」の時間前市場の検証
 - － 1. 前回までの振り返りと今回の検証事項
 - － 2. 前日の時間前市場の検証
 - － 3. 今後の進め方（技術検証会での議論内容）

- 第9回本検討会（2024年5月22日）において、時間前市場に対する基本的な方針として「時間前同時市場の導入を第一目標」としつつ、都度SCUC・SCED計算するシステム設計のハードル（実現性）の高さも示されていることから、ロジック技術検証（検証A）において技術的な検証を行うこととした。
- 第10回本検討会（2024年6月19日）では、時間前同時市場のイメージを整理したうえで、前日および当日の時間前同時市場の検証の方向性について議論を行った。
- 今回は、まずもって、前日の時間前同時市場のロジック構築・挙動確認を行ったので、ご議論いただきたい。

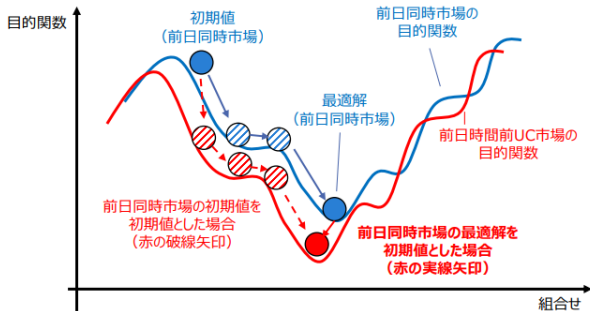
前日の時間前同時市場の検証内容について

54

- 前日同時市場とは異なり、前日の時間前同時市場では、前日同時市場の約定結果を引き継ぐ、つまり最適解に近い初期値を用いるため、定性的には、収束性は向上する（計算負荷は低くなる）と考えられる。
- 以上を踏まえ、前日同時市場の約定結果を初期値としてSCUCを行い、前日同時市場（初期値はゼロベース）と収束性（計算負荷）や電源ラインナップ・出力配分量の比較を行うこととしてはどうか。
- なお、同じ前提条件のまま最適解を初期値とすると、そもそも解の探索が不要（計算が瞬時に終了）となるため、前日の時間前同時市場においては、前日同時市場から一定程度の需要変動等※を与えた条件を設定する。

※ 需要変動だけでなく、再エネ変動を模擬することも考えられる。

【初期値の違いによる最適解探索の違いイメージ】



当日の時間前同時市場の検証内容について

55

- 当日の時間前同時市場では、発電機起動特性により、前日同時市場に比べSCUCにより起動停止を決める電源が減る（解探索空間が狭くなる）ため、定性的には、収束性は向上する（計算負荷は低くなる）と考えられる。
- また、時間の経過とともに、計算対象期間も減少するため、より一層、収束性は向上するものと考えられる。
- 以上を踏まえ、当日のいくつかの断面において、足元実績（前日の時間前同時市場、ならびに直前の当日時間前同時市場）を基準に、一部の電源の起動停止を固定し、計算対象期間の減少も考慮して計算を行い、収束性（計算負荷）や電源ラインナップ・出力配分量の比較を行うこととしてはどうか。
- また、こちらも同じ前提条件のまま、足元実績（≒直前の最適解）を初期値とすると、解の探索が不要（計算が瞬時に終了）となるため、当日の時間前同時市場でも、一定程度の需要変動等※を与えた条件を設定する。

※ 需要変動だけでなく、再エネ変動を模擬することも考えられる。

【当日の時間前同時市場のイメージ】



起動停止固定割合は、イメージのため、第62回専門会合の調査結果（石油・ガス火力計）の数値を記載しているが、実際には事業者からの入札情報をもとに決まる

1. 検討状況の概要について

2. 検討状況の報告

- －⑥. 「起動費等が回収可能な価格算定ロジックの検討」における
海外調査・技術的特徴の確認
- －⑦. 「前日同時市場後のSCUC・SCEDロジック」の時間前市場の検証
 - － 1. 前回までの振り返りと今回の検証事項
 - － 2. 前日の時間前市場の検証
 - － 3. 今後の進め方（技術検証会での議論内容）

- 前日の時間前同時市場については、前日同時市場の約定結果を引き継ぐことを想定し、前日同時市場の約定結果を初期値としてSCUCを行い※、前日同時市場（初期値はランダム）との「収束性（計算負荷）」ならびに「電源ラインナップ」・「出力配分量」の比較を行うこととしていた。
- 上記の検証方針の基づき、下表のように検証ケースを設定した。

※ ただし、同じ前提条件のまま最適解を初期値とすると、そもそも解の探索が不要（計算が瞬時に終了）となるため、前日同時市場から一定程度の需要変動等を与えた条件を設定。

ケース	想定市場	需要	初期値
①	前日同時市場	高需要（7/31）	ランダム
②	前日の時間前 同時市場	高需要（7/31） +2%	前日SCUCの約定結果
③		高需要（7/31） -2%	前日SCUCの約定結果
④	前日同時市場	低需要（4/27）	ランダム
⑤	前日の時間前 同時市場	低需要（4/27） -2%	前日SCUCの約定結果
⑥		低需要（4/27） +2%	前日SCUCの約定結果

- その他のシミュレーション条件は、これまでのロジック検証と同様の設定とした。
- また、一定程度の需要変動（前提条件）については、前日想定需要の平均的な誤差の±2%を参考に、全コマの需要を一律に±2%増減させて設定した。

【需要断面】

- ・2断面：低需要断面 4/27、高需要断面 7/31

【シミュレーション対象期間】

- ・24時間（30分×48コマ）

【電力系統・発電機模擬】

- ・系統：広域連系系統モデル（ノード単位）
- ・需要価格弾力性：なし
- ・火力燃料費関数：二次関数を区分線形化（abc定数を基に7区分）

【制約条件】

- ・発電機関係
 - 起動停止に関わる制約（MUT、MDT、起動停止回数、起動費切替）
- ・系統関係
 - ブランチ潮流、フェンス潮流
（低需要断面の前日同時市場、高需要断面の前日同時市場・前日の時間前同時市場）

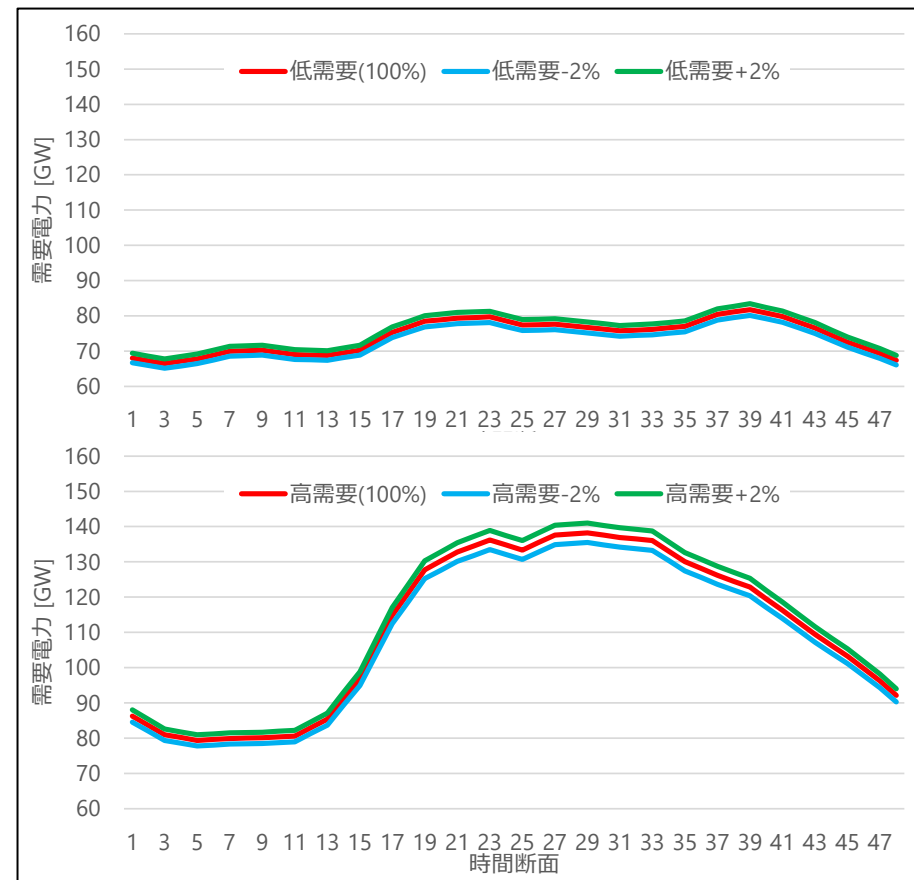
【ペナルティ】

- ・予備力、調整力
- ・ブランチ潮流、フェンス潮流（低需要断面の前日の時間前同時市場）

【最適化計算の設定】

- ・MIPGap = (上界値 - 下界値) / 上界値：高需要断面0.3%、低需要断面1.0%、
- ・電源起動停止の状態指定：フリー

難収束となる断面
のため高めに設定



- 前日想定需要については、小売想定よりTSO需要想定の方が平均的な精度は高く、小売想定の場合、平均的に±2%（98%～102%）の誤差が存在している。
- 時間前同時市場の検証にあたっては、例えば上記を参考として、需要変動を±2%（98%～102%）と条件設定して、検証を進めることも考えられるか。
- また、前日以降の変動としては、需要以上に再エネ変動が大きいことも考えられるため、再エネ変動実績を分析の上、条件設定して検討を進めることも考えられる。

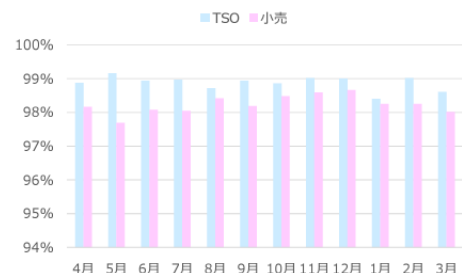
前日想定需要の正確性について（2/3）

全体データ 過小データ 過大データ

14

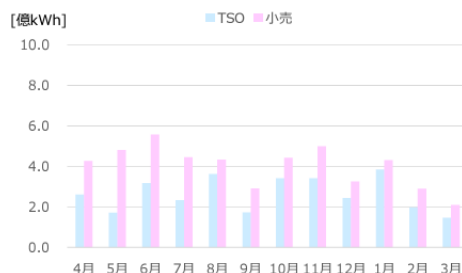
- 次に、「全データ」から「過小データ」のみを対象して、同様の分析を行った。
- 実需要に対する前日想定需要の比率において、TSO想定需要は、年間を通して小売想定需要より高く、年平均で小売想定需要に比べ約0.7%精度が高かった。
- 実需要と前日想定需要の差分の累積値については、TSO想定需要の方が小売想定需要より少なく、年間合計で約17億kWh少なかった。これは、安定供給面で不足分が少なく、TSO想定需要の方が全体的に高い精度で想定していたことを表していると考えられる。

【実需要に対する前日想定需要の比率（月平均）】



(算定式) 前日想定需要/実需要

【実需要と前日想定需要の差分（月累積）】



(算定式) Σ | 前日想定需要 - 実需要 |

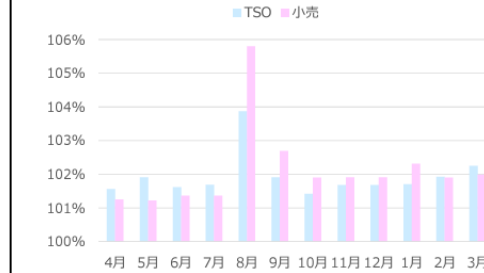
前日想定需要の正確性について（3/3）

全体データ 過小データ 過大データ

15

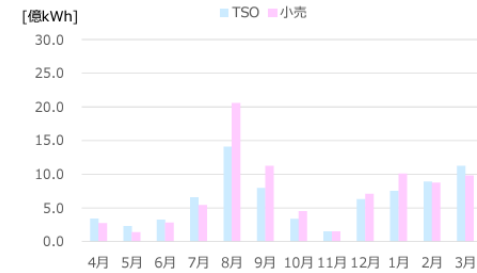
- 最後に、「全データ」から「過大データ」のみを対象して、同様の分析を行った。
- 実需要に対する前日想定需要の比率において、TSO想定需要が、小売想定需要より高い場合もあれば、低い場合もあり、特に傾向は見られなかった。
- 実需要と前日想定需要の差分の累積値については、比率と同様の傾向であった。一方で、年間合計ではTSO想定需要の方が小売想定需要より少なく、約4億kWh少なかった。これは、不要となる電源起動が少なく、TSO想定需要の方が全体的に高い精度で想定していたことを表していると考えられる。

【実需要に対する前日想定需要の比率（月平均）】



(算定式) 前日想定需要/実需要

【実需要と前日想定需要の差分（月累積）】

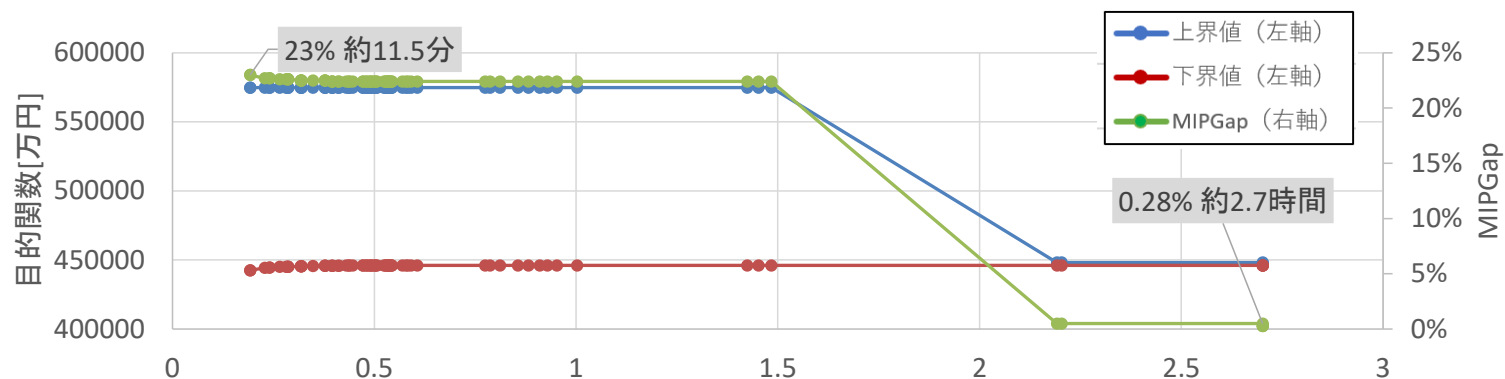


(算定式) Σ | 前日想定需要 - 実需要 |

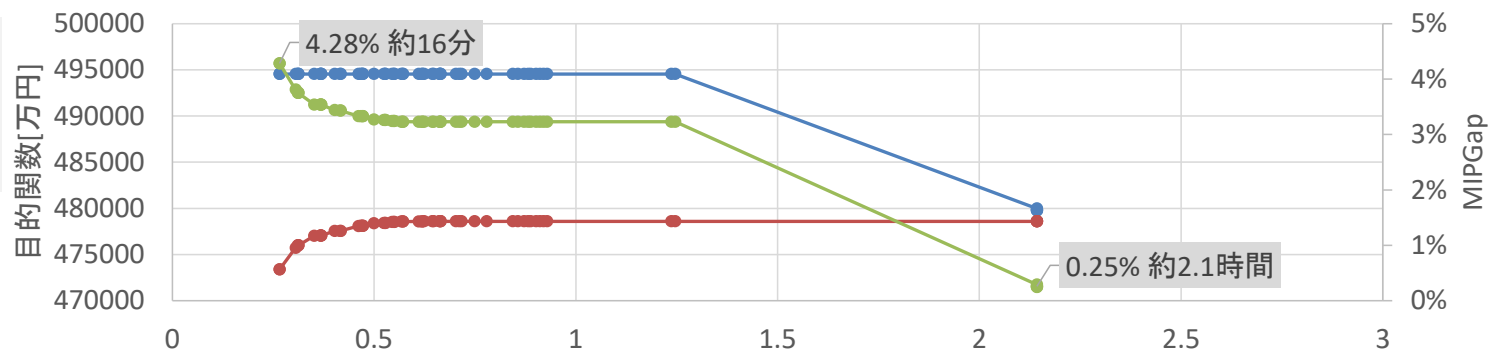
- まずは、先述の検証ケースにおける、「収束性（計算負荷）」の確認結果を下表に示す。
- 高需要では、前日同時市場（①）に比べ、前日の時間前同時市場（②③）の計算時間が短くなっている一方、需給条件がさらに厳しくなる②（高需要+2%）は、③（高需要-2%）よりも計算時間が長くなっている。
- 低需要については、前日同時市場（④）に比べ、需給条件が緩和する低需要+2%（⑥）の計算時間が短くなっている一方、低需要-2%（⑤）では計算時間が長くなっている。
- これは、低需要では再エネ抑制が生じており、最低負荷の火力の運転台数の制約等を満たすことが相対的に厳しい需給条件であり、さらに需要を減らす前提（⑤）では、求解困難性が増すためと考えられる。

ケース	想定市場	需要	初期値	MIP Gap	計算時間
①	前日同時市場	高需要（7/31）	ランダム	0.28%	2.7 hour
②	前日の時間前 同時市場	高需要（7/31） +2%	前日SCUCの約定結果	0.25%	2.1 hour
③		高需要（7/31） -2%	前日SCUCの約定結果	0.30%	28 min
④	前日同時市場	低需要（4/27）	ランダム	0.75%	5.4 hour
⑤	前日の時間前 同時市場	低需要（4/27） -2%	前日SCUCの約定結果	0.56%	8.0 hour
⑥		低需要（4/27） +2%	前日SCUCの約定結果	0.88%	4.9 hour

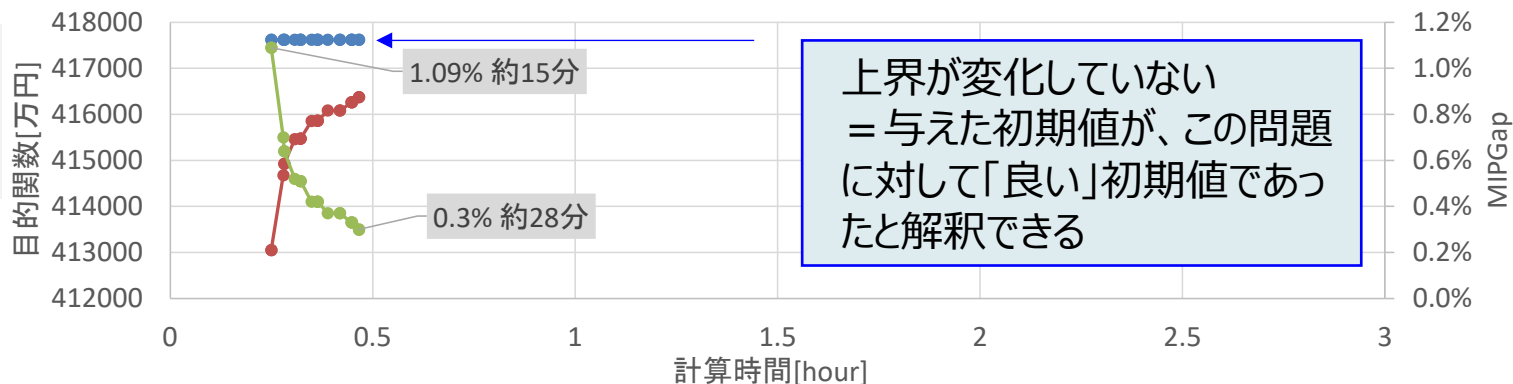
ケース① 高需要断面 (基準)



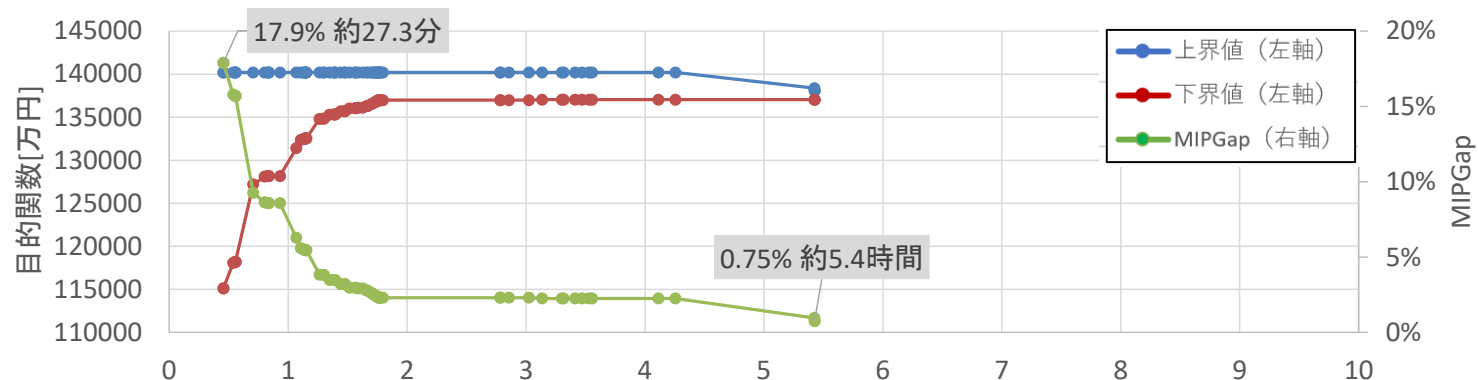
ケース② 高需要断面 (需要+2%)



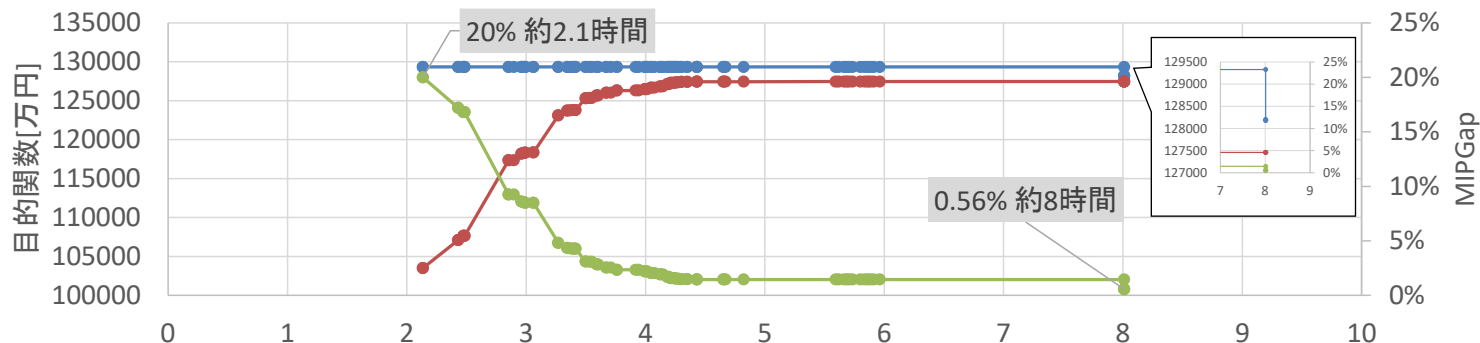
ケース③ 高需要断面 (需要-2%)



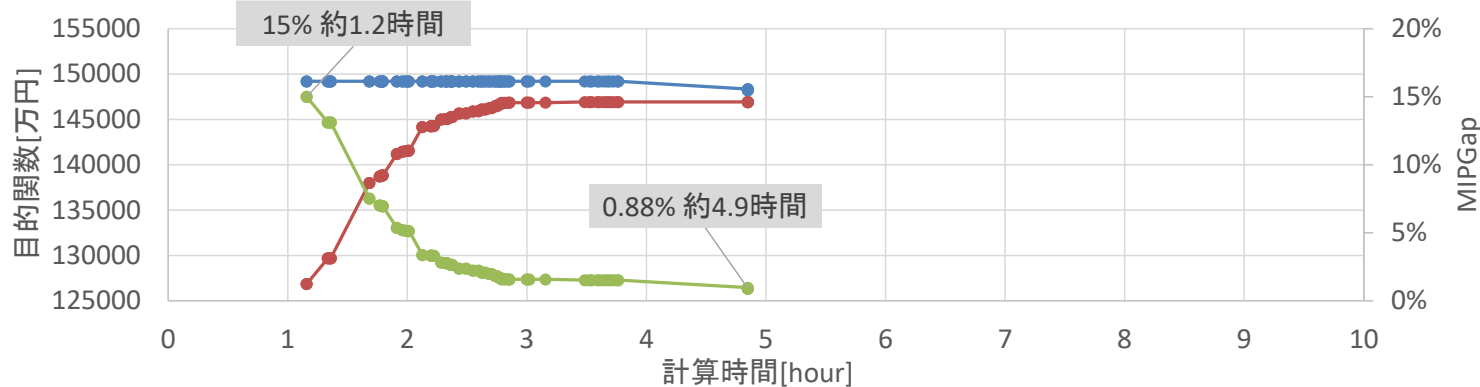
ケース④
低需要断面
(基準)



ケース⑤
低需要断面
(需要-2%)



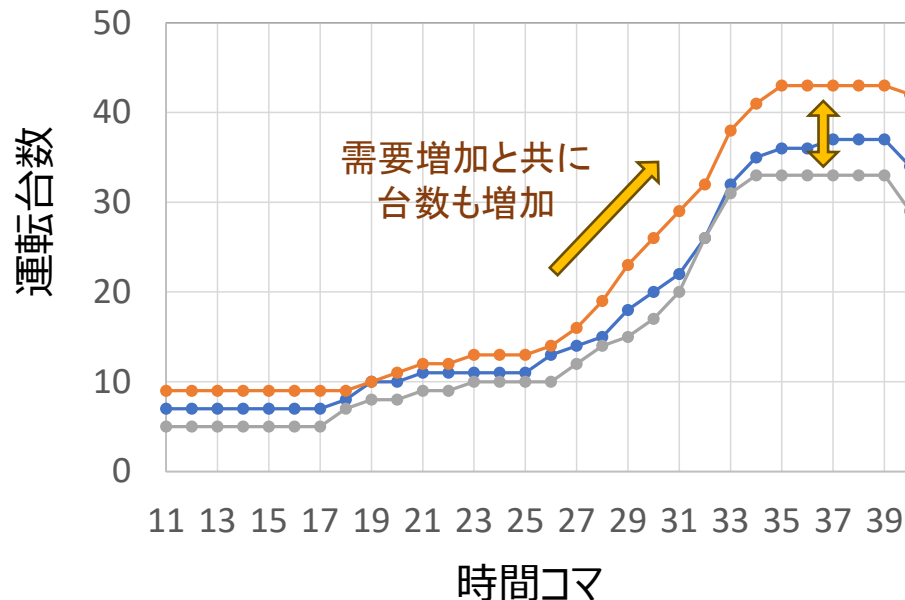
ケース⑥
低需要断面
(需要+2%)



- 次に「電源ラインナップ」について確認するため、需給変動により最も起動停止台数の変化するMACC・ACCの運転台数について比較を行った。
- その結果、高需要断面・低需要断面ともに、需要の増減に合わせて、電源の起動あるいは停止がされていることを確認した。

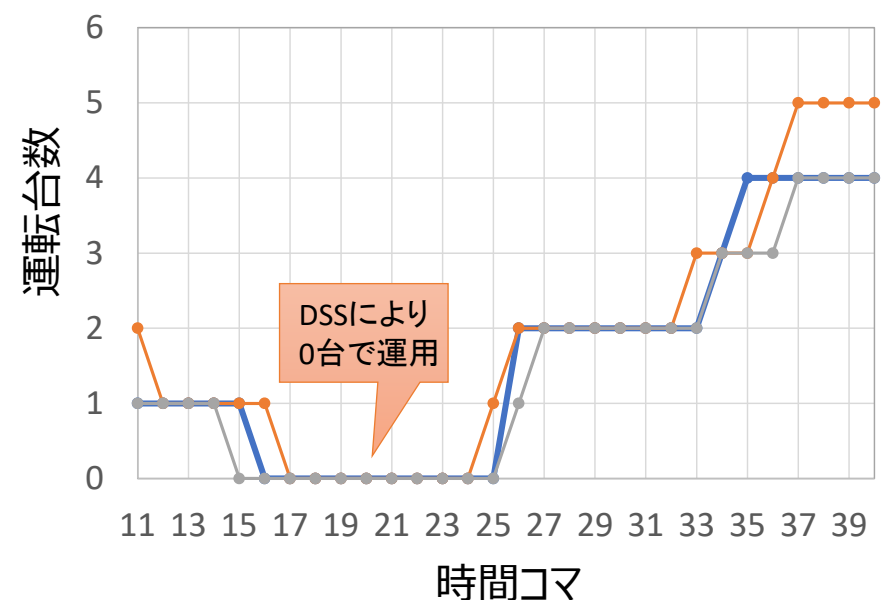
【高需要断面】

MACC・ACC



【低需要断面】

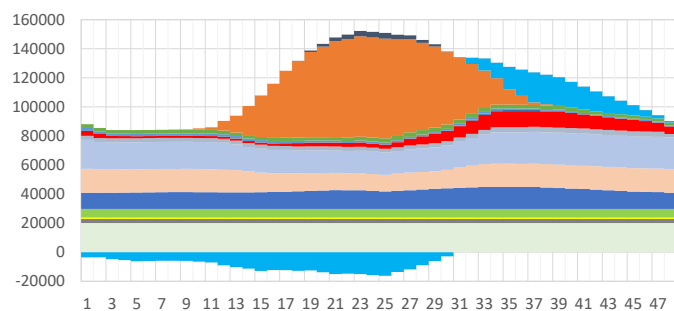
MACC・ACC



■ 需要変動に対して、電源の態勢に大きな影響は見られない。

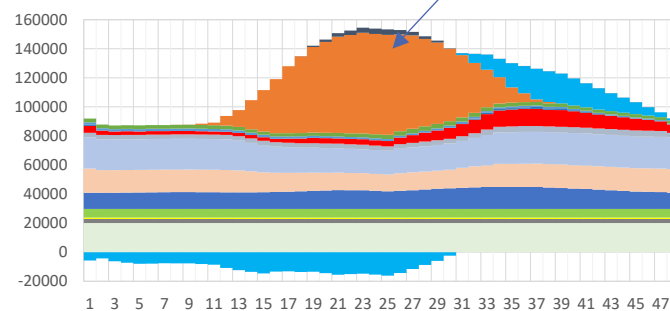
【高需要断面】

③高需要-2%

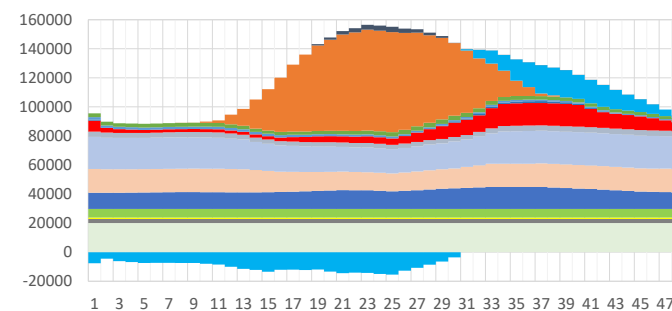


系統混雑のため一部で再エネ抑制が発生

①高需要

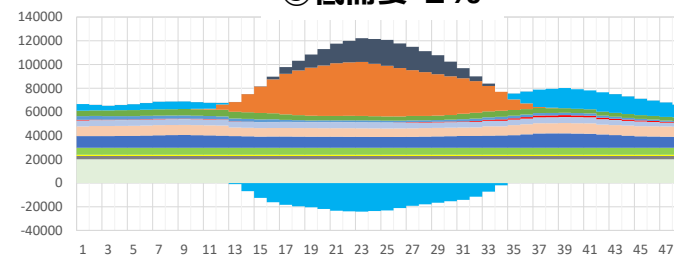


②高需要+2%



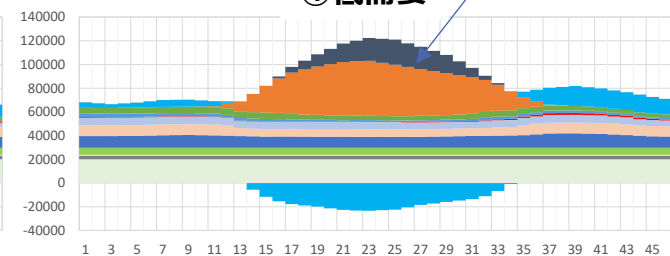
【低需要断面】

⑤低需要-2%

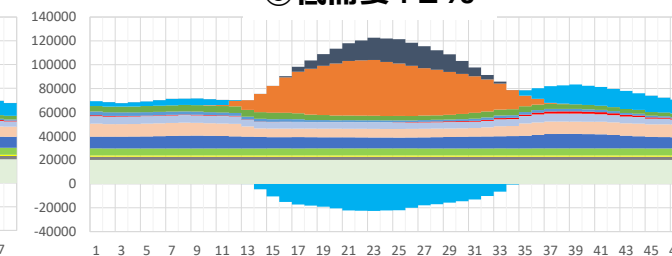


余剰電力のため大規模な再エネ抑制が発生

④低需要

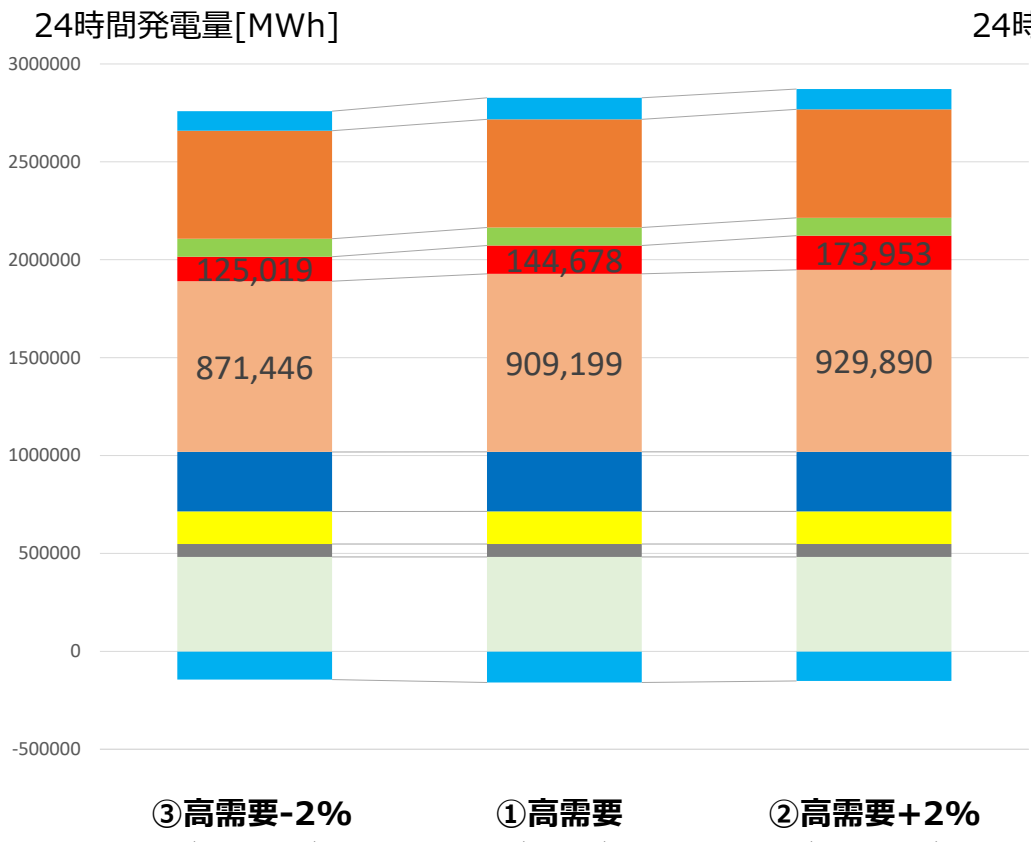


⑥低需要+2%

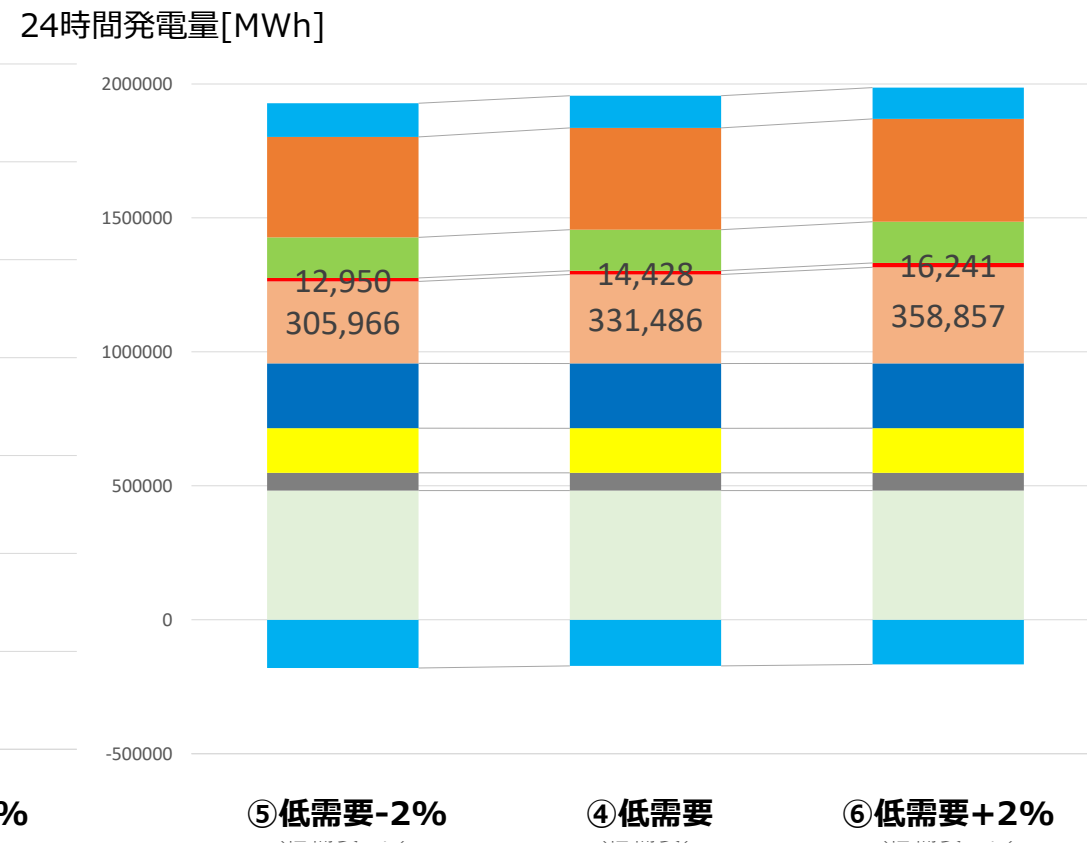


■ 続いて「出力配分量」の結果を確認した結果、需要の増減に応じて、主に火力（石炭・MACC・ACC）の出力増減がなされていることを確認した。

【高需要断面】

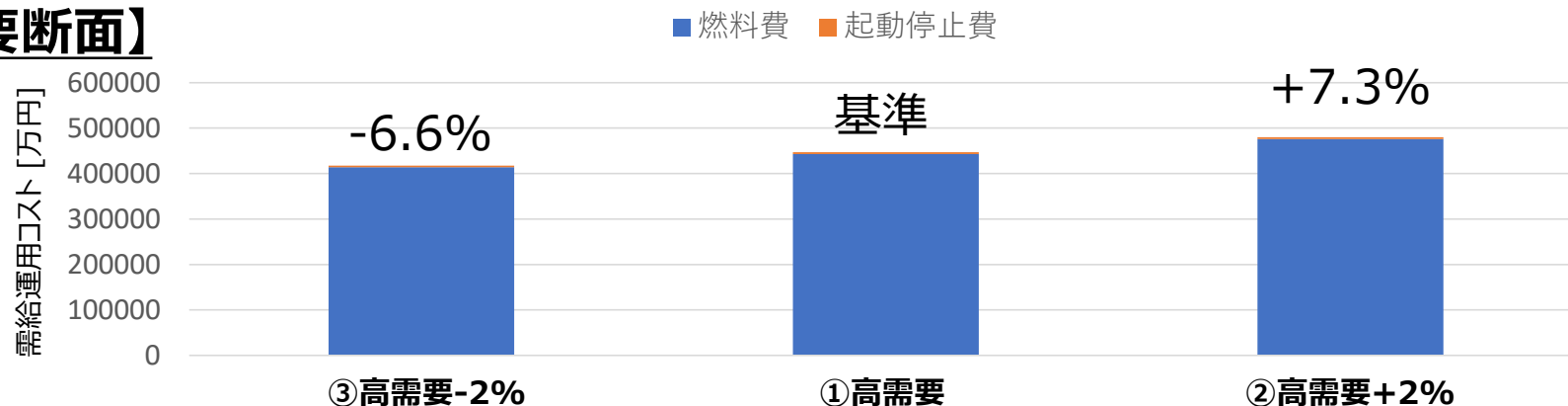


【低需要断面】

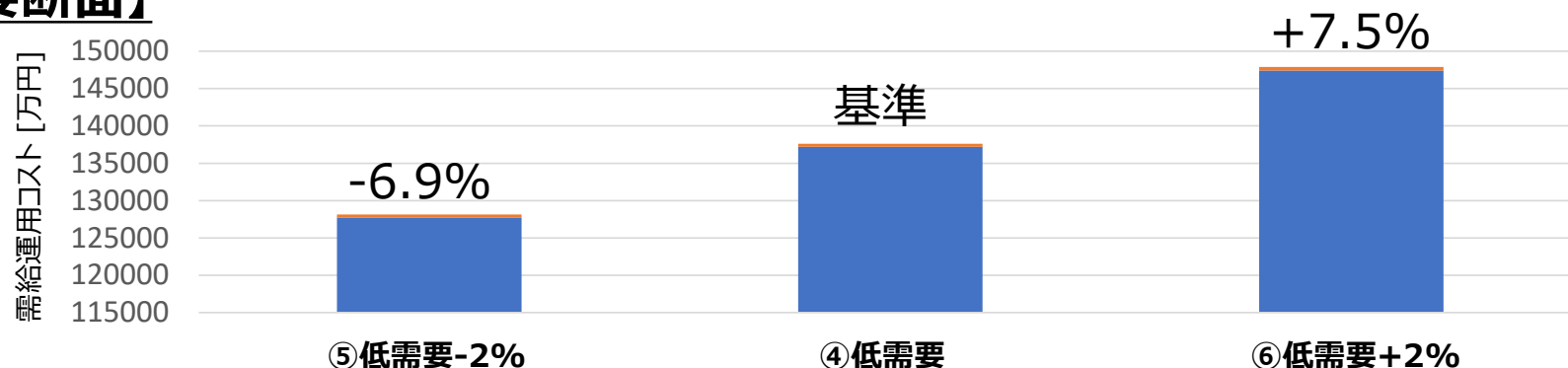


■ 最後に、需給運用コストへの影響を確認した結果、需要増減に応じて、正しく燃料費が増減していることを確認した。

【高需要断面】



【低需要断面】



1. 検討状況の概要について

2. 検討状況の報告

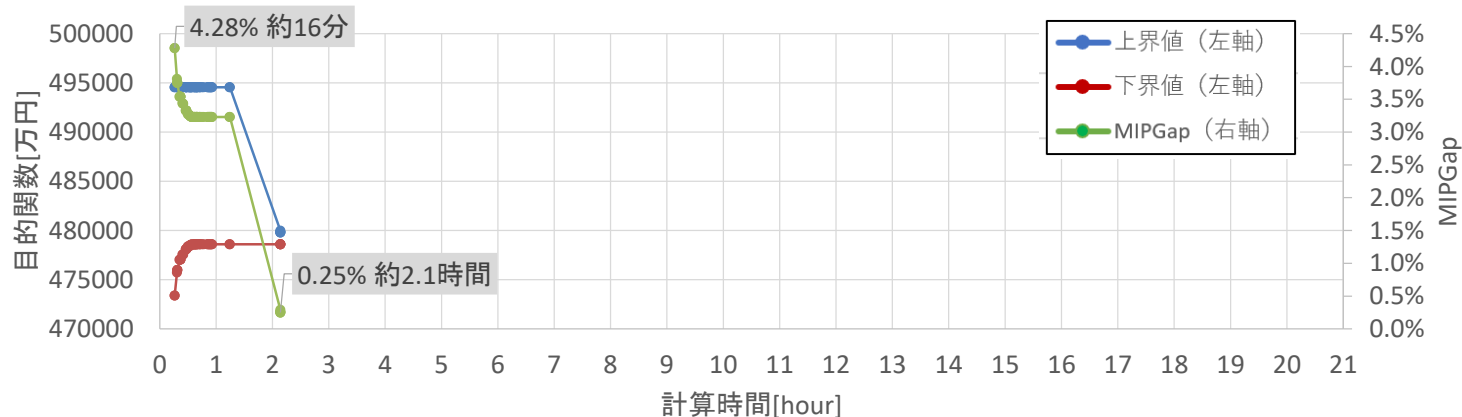
- －⑥. 「起動費等が回収可能な価格算定ロジックの検討」における
海外調査・技術的特徴の確認
- －⑦. 「前日同時市場後のSCUC・SCEDロジック」の時間前市場の検証
 - － 1. 前回までの振り返りと今回の検証事項
 - － 2. 前日の時間前市場の検証
 - － 3. 今後の進め方（技術検証会での議論内容）

- 第6回技術検証会においては、初期値がランダム（Gurobiツール内の工夫）の方が収束性が高い可能性があるのではないかとご指摘や、前日市場の結果の一部を固定して（解探索の領域を狭くして）最適化を行う工夫、再エネ変動（予測大外し）等の条件設定、ザラバとの対比（評価方法）等に関してご示唆をいただいた。
- 一つ目のご指摘については、技術検証会后、需要変動を与えたケースで初期値をランダムに設定した場合と比較し、前日同時市場の約定結果を引き継ぐ方が収束性が高いことを確認した。

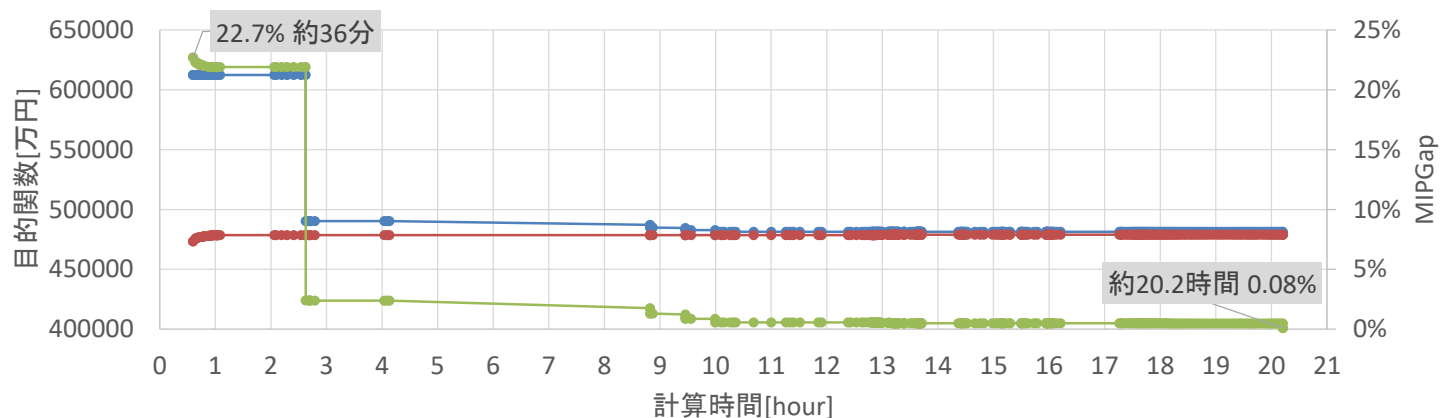
【⑦前日同時市場後のSCUC・SCEDロジックに関する議論概要】

- 収束過程を見ると、低需要では実行可能解の探索時間が伸びており、初期値ランダム（Gurobiツール内の探索手法）とした方が、優れている可能性もある
⇒ 高需要については、初期値をランダムにして、探索時間が短くなることを確認しているが、低需要は引き続き確認していく
- CAISOのマニュアルを見ると、前日市場のあとにRUCがあり、RUCでは前日市場の結果を固定し、差分だけを計算している。ただし、当然、安定供給上の問題があれば、固定部分を変更する。収束性が改善されると思われるので、試して頂いてもよいかと考える
- 米国のように、前日市場で一旦確定して、差分を精算する考え方を採用するかを考えるうえで、今回の結果は、全く固定せずに計算すると、計算自体も大変になるという示唆かと考える
⇒ 差分のみ扱ってはどうかという点については、需要が増加する場合では問題ないが、減少する場合は、抑制（停止）も必要となる。この点、全て固定させるのではなく、経験則的に、固定するものと、3-Partで動かすものを切り分けて、解を求める方法もあるのではないかとアドバイスと受け止めた
- MIPGapの目標値や妥当性については、どこまで追求していくのか
⇒ あくまでMIPGapは最適性を保証するもので、どれくらい最適なのかは分からない。MIPGapが大きくても、最適解の可能性も理論的にはありえるため、需給バランス・起動停止をみて運用に耐えられるかの観点での判断も必要
⇒ 目標値について、昔は1%とされていた論文が多かったが、最近0.1%に改善されてきた。日本においても知見をためて、改善していく方向性と考えている
- 収束過程について、上界と下界の間の距離が、ほとんど変わらず、ある程度近ければ、探索を止める考え方もあると思った
⇒ 低需要断面では、需給バランスも見ながら、そのような考え方を取っているが、当日の時間前同時市場で需給バランスが大きく変わりうる場合に、そのような割り切った考え方をできるかは難しい問題である
- 収束性に関しメーカーとしてのコメントだが、経験則からルールベースのアルゴリズムを作る形も考えられるが、システム開発の立場からは、ルールが変わった時の対応が難しく、なるべく最適化で機械的にできるアプローチが望ましい

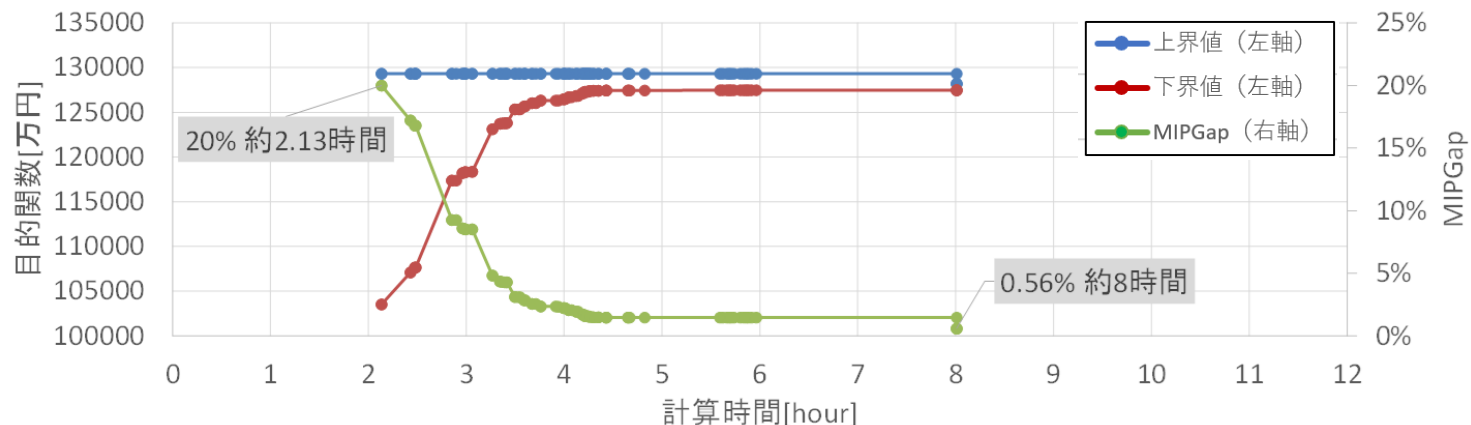
ケース②
高需要断面
(需要+2%)
(初期値 :
前日SCUCの約定結果)



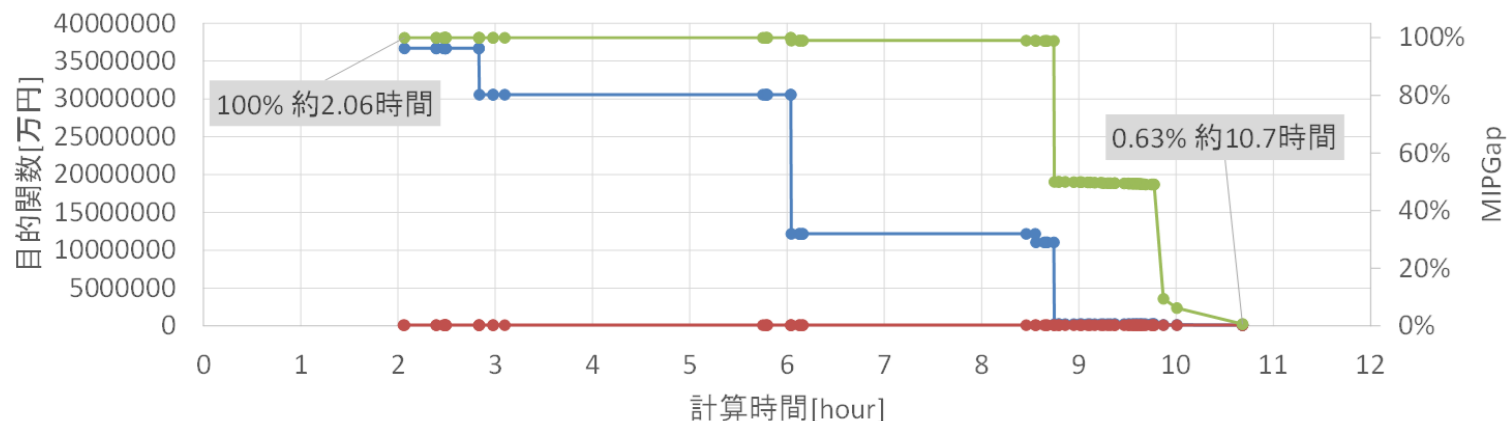
ケース②
高需要断面
(需要+2%)
(初期値 :
ランダム)



ケース⑤
低需要断面
(需要-2%)
(初期値：
前日SCUCの約定結果)



ケース⑤
低需要断面
(需要-2%)
(初期値：
ランダム)



- 今回、前日の時間前同時市場の検討において、需要変動（±2%）を模擬したケースについては、電源ラインナップ・出力配分量ともに想定通りの結果が得られたため、今後の検証については、頂いたご示唆も踏まえ、収束性を高める工夫（一部を固定した最適化など）の深掘りや、再エネ変動（予測大外し）等の模擬、ザラバとの対比に関する評価（系統制約違反への対応可否等）を行い、どのような傾向が得られるか検証を進めていく。
- また、当日の時間前同時市場の検証にあたっては、どのように足元実績を設定するか（引き継ぐか）が重要となる。
- この点、週間・前日・当日のSCUCの目的・位置付け等を踏まえたうえで、どのような約定情報を足元実績として引き継ぐべきか、制度・運用面との平仄を取る必要があるため、改めてそれらの建付けを整理の上、当日の時間前同時市場の検証を深めていくこととした。

【⑦前日同時市場後のSCUC・SCEDロジックに関する議論概要】

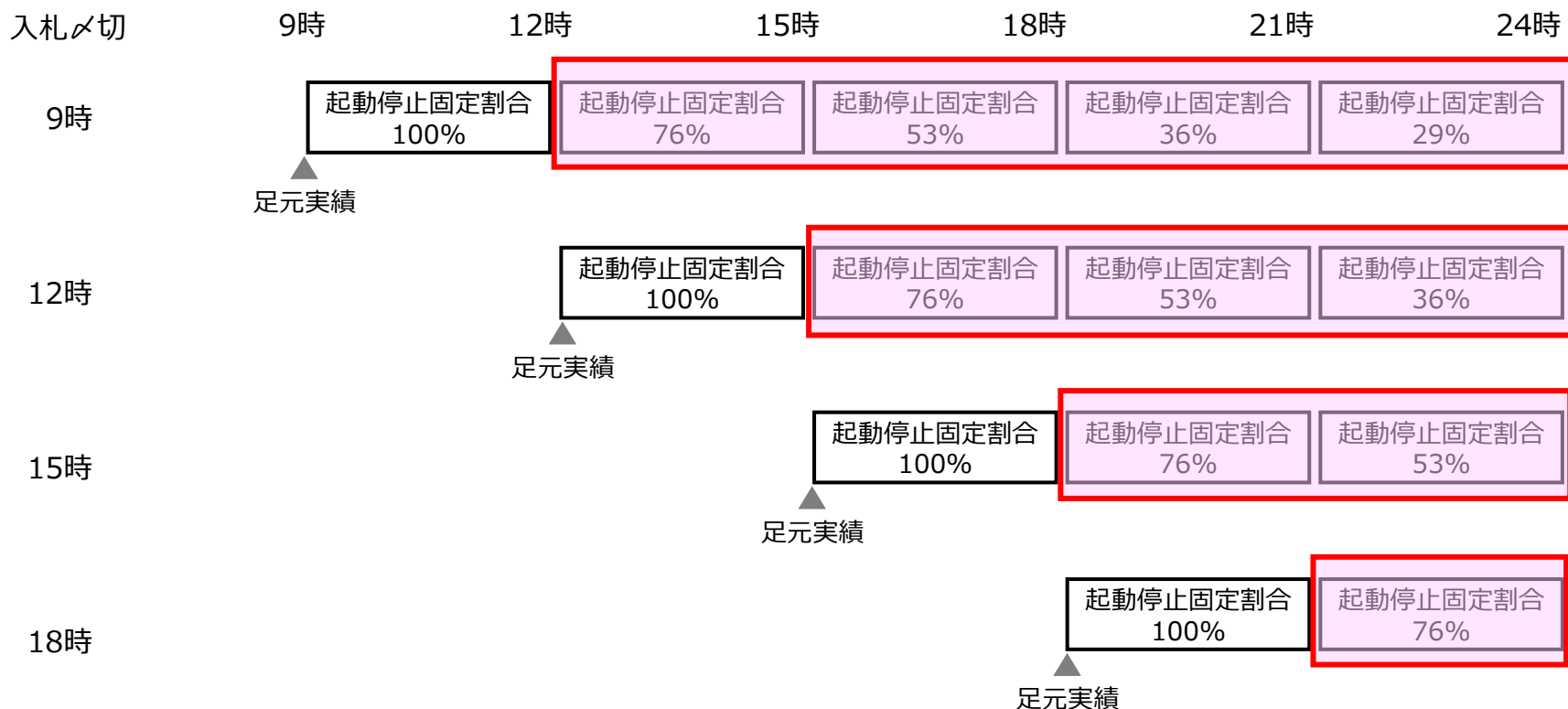
- 時間前同時市場のメリットの一つは、前日では予見できない再エネ変動による系統制約違反に対応できることであり、条件として、エリアごとに再エネ変動の特性を変える条件とすべきと考えるが、今後の検討における再エネ変動は、どのように設定するのか
 - ⇒再エネ変動については、出力自体も実績を用いており、エリア特性がある程度考慮されており、その上で過去実績をもとに作成された三次②必要量テーブルを用いることで、大外しも含め、各エリアごとのばらつきを考慮した条件を、お示しできると考えている
- 今回の結果では、収束性に課題はあるものの、需要が下振れしたときに、発電機停止ができるといった起動停止・出力配分の変更により燃料費が削減できる様子が示されているが、ザラバと比したメリットとして今回の結果をどのようにとらえているのか
- ザラバとの対比という意味では、事業者の入札が変わる概念も入れる必要があると思うが、今後議論していくのか
 - ⇒ザラバとの比較については定量的な評価はしていないが、おっしゃったことに加え、再エネ抑制も減らせることもあり、定性的にメリットがあると考えている
 - ⇒入札情報が変わった場合にも最適化自体はできるように環境は整えている
 - ⇒技術的な観点から検証を進めているが、ご助言いただいたとおり、技術的にできない部分は制度的な対応を検討するのも一つの考え方であるし、時間前で入札が変わる点は、何のためにやるか制度的な検討も大事である

- 当日の時間前同時市場の検証にあたっては、どのように足元実績を設定するか（引き継ぐか）が重要となる。
- この点、週間・前日・当日のSCUCの目的・位置付け等を踏まえたうえで、どのような約定情報を足元実績として引き継ぐべきか、制度・運用面との平仄を取る必要があるので、改めてそれらの建付けを整理の上、当日の時間前同時市場の検証を深めていくことしたい。

※ この他にも、初期時刻（入札〆切時点）から24時間分をローリングし続ける方法（イメージ）等も考えられる。

【当日時間前UC市場のイメージ】

約定対象
コマ



起動停止固定割合は、イメージのため、第62回専門会合の調査結果（石油・ガス火力計）の数値を記載しているが、実際には事業者からの入札情報をもとに決まる

(参考)
技術検証会での議論（全体）

【⑥起動費等が回収可能な価格算定ロジックの検討】

- 凸包プライシングは、計算負荷が高い課題があるが、凸計画問題のように、双対化により制約を減らすことで解きやすくなるかもしれない。一律に計算負荷が高くなるのか、実際の問題に適用して検証する余地はある
- MIPの計算は凸包が見つければ速くなることが知られているが、大規模な問題においては凸包自体を見つけることが難しい。凸包プライシングは、凸包を見つけるための計算が大変であると言われている。この点は、新たに検証をしなくても、米国で多数シミュレーションが行われている
- シャドウプライスでは逸失利益が生じないとされているが、発電で限界価格が決定される場合はそうであるが、例えばScarcity Pricingで価格が付く場合など、そうでないケースでは逸失利益が生じる。他にもCAISOでは、リアルタイム市場は5分単位だが、再エネ変動の時間的なつながりのため、15分先まで計算しており、最初の5分間分を使っているため、逸失利益が発生する。欧州では、良い仕組みでないかもしれないが、Upliftが必要な入札は不落として、逸失利益を許容しない
- Scarcity Pricingのように逼迫時など、例外的な場合の逸失利益の扱いをどうするかという点はあるが、平時の傾向としては、今回確認のとおりであり、海外事例も見ながら引き続き検討していく
- 逸失利益の定義を記載いただいているが、 ΔkW 供出における逸失利益であり、今回は kWh の約定だけを取り扱っており、混乱している。そのうえで、逸失利益が発生するので、セルフ入札をするというインセンティブがあると書いてあるが、AICのように起動費を加算されるなら市場に参加しても損はせず、市場に参加しないインセンティブがあるのか分らなかった
- 逸失利益は正確にはLOC(Lost Opportunity Cost)であり、 ΔkW の抑制なのか、出力配分の結果としての抑制なのかの違いはあるが、同様のものであり、自分の増分燃料費カーブより高い約定価格が付いたことが事後的に判明した場合に、より利益があげられるということで、以降SCUCに結果を委ねないインセンティブになるという趣旨である
- 起動している電源は費用回収できるが、停止している電源の観点もある。高い約定価格があれば動かしたいということで、OTCマーケットなど他の市場で同価格が付けば、SCUCの外で成約するという行動も起こりうる

- Upliftの判定期間など、Upliftの回収ともセットで、トータルで制度を検討する必要がある
- AICは事後的に単純な方法で補正しているが、海外文献では、AICの計算負荷が高いとなっているのはなぜか
- 海外の理由は分からず、簡単な数値例での深掘りから、事務局としては低いと評価させていただいた
- AICは、シャドウプライスよりも時間はかかるが、高速に計算できる手法を開発していて、実装可能であると主張する有力者もいる

【⑦前日同時市場後のSCUC・SCEDロジック】

- 収束過程を見ると、低需要では実行可能解の探索時間が伸びており、初期値をランダム（Gurobiツール内の探索手法を用いる）とした方が、優れている可能性もある
- 高需要については、初期値をランダムにして、探索時間が短くなることを確認しているが、低需要は引き続き確認していく
- CAISOのマニュアルを見ると、前日市場のあとにRUCがあり、RUCでは前日市場の結果を固定し、差分だけを計算している。ただし、当然、安定供給上の問題があれば、固定部分を変更する。収束性が改善されると思われるので、試して頂いてもよいかと考える
- 米国のように、前日市場で一旦確定して、差分を精算する考え方を採用するかを考えるうえで、今回の結果は、全く固定せずに計算すると、計算自体も大変になるという示唆かと考える
- 差分のみを扱ってはどうかという点については、需要が増加する場合ならば問題ないが、減少する場合は、抑制が必要となる。そういったことを考えると、全てを固定させるのではなく、経験則的に、固定できるものと、3-Partで動かさざるをえないところを切り分けて、解を求める方法もあるのではないかとアドバイスと受け止めた
- 需要変動の $\pm 2\%$ は、どの時点の予測値を基準とした変動なのか
- 前日段階を想定して、そこから24時間後までに想定される変動である

- MIPGapの目標値は妥当性や、どこまで追求していくのか
- あくまでMIPGapは最適性を保証するもので、どれくらい最適なのかは分からない。MIPGapが大きくても、最適解の可能性も理論的にはありえ、需給バランス・起動停止をみて運用に耐えられるかの観点での判断も必要
- 収束過程について、上界と下界の間の距離が、ほとんど変わらず、ある程度近ければ、探索を止める考え方もあると思った
- 低需要断面では、需給バランスも見ながら、そのような考え方を取っているが、当日の時間前同時市場で需給バランスが大きく変わる場合に、そのような割り切った考え方をできるかは難しい問題である
- 収束性に関しメーカーとしてのコメントだが、経験則からルールベースのアルゴリズムを作る形も考えられるが、システム開発の立場からは、ルールが変わった時の対応が難しく、なるべく最適化で機械的にできるアプローチが望ましい
- 今回の低需要断面以外でも、計算時間が跳ね上がる断面はあるのか
- 他の月はあまり時間がかからず、今回の低需要断面（GW付近）がワーストケースとなる
- 時間前市場だけでなく、同時市場の高需要・低需要の間でも収束性に差があり、需給バランスとか制約の厳しさで変わるものと認識した
- 低需要の方が解きづらいのは分かるが、高需要と低需要でMIPGapの目標値を変えることに違和感を感じる
- MIPGapは、悪いノードにはまってしまうと、少しずつしか縮まらず、延々と時間がかかることもある。
- MIPGapの目標値については、昔は1%とされていた論文が多かったが、改善されて0.1%に改善されてきた。日本においても知見をためて、改善していく方向性と考えている
- 時間前同時市場のメリットの一つは、前日では予見できない再エネ変動による系統制約違反に対応できることであり、条件として、エリアごとに再エネ変動の特性を変える条件とすべきと考えるが、今後の検討における再エネ変動は、どのように設定するのか
- 再エネ変動については、出力自体も実績を用いており、エリアの特性がある程度考慮されており、そのうえで過去実績をもとに作成された三次調整力②必要量テーブルを用いることで、大外しも含め、各エリアごとのばらつきを考慮した条件を、お示しできると考えている

- ゼラバとの対比という意味では、事業者の入札が変わる概念も入れる必要があるが、今後議論していくのか
- 変わった入札をもとに最適化できるように環境は整えている
- 今回の結果では、収束性に課題はあるが、需要が下振れしたときに、発電機停止ができるなど起動停止・出力配分の変更により燃料費が削減できる様子が示されているが、ゼラバと比べたメリットとして今回の結果をとらえているのか
- ゼラバとの比較については定量的な評価はしていないが、おっしゃったことに加え、再エネ抑制も減らせることもあり、定性的にメリットがあると考えている
- 技術的な観点から検証を進めているが、ご助言いただいたとおり、技術的にできない部分は制度的な対応を検討するのも一つの考え方であるし、時間前で入札が変わる点は、何のためにやるか制度的な検討も大事である

【中間取りまとめの報告】

- 系統制約に関して、CAISOのマニュアルでは、予備力とエネルギーの両方を送電容量以内とする方法をとっているようである
- そもそも米国と日本では調整力の扱い方が違う。GF・LFC（時間内変動）やN-1電源脱落は、米国と日本ともに確保しているが、EDC（予測誤差）は、米国では5分ごとのSCUCが出来るということで確保する観点がない。日本で、EDC分を確保する必要があるか、また確保した場合の扱いをどうするかについては、米国の知見だけでは解決しない課題なので、変動成分を分けて適切に議論していきたい