

「原子力発電所の柔軟性のある運転」
(2018年5月7日 欧州原子力産業会議 (FORATOM) 発表のポジションペーパー)

2018年5月
日本原子力産業協会 国際部

欧州原子力産業会議 (FORATOM) は2018年5月7日、ポジションペーパー「原子力発電所の柔軟性のある運転」(冊子電子版*A4判、本文9頁)を発表し、柔軟な運転が可能な原子力発電所は、出力が変動する再生可能エネルギーを補う最良のパートナーになり得るとの見解を示した。

欧州では昨今、変動性の再生可能エネルギーのシェアが増大するにつれ、CO₂の排出を削減しつつ、消費者に手頃な価格で手に入れることができる電力の供給確保が課題となっている。ポジションペーパーは、原子力の柔軟性のある運転こそ、欧州が掲げるCO₂排出量の削減とエネルギーの供給保証という2大目標の同時達成に役立つと強調している。

以下にFORATOM発表のポジションペーパーの仮訳を紹介する。正確な内容については、原文*を参照されたい。

* <https://www.foratom.org/press-release/foratom-outlines-flexible-nuclear-solution-to-intermittent-renewable-challenge/>

ポジションペーパー「原子力発電所の柔軟性のある運転」

エグゼクティブ・サマリー

1. はじめに
2. 技術的側面
 - 2.1 柔軟性とは
 - 2.2 原子炉は柔軟性をもち得るか?
3. 実現条件
 - 3.1 規制面
 - 3.1.1 技術支援機関
 - 3.1.2 原子力規制機関
 - 3.2 経済面
4. 結論

「原子力発電所の柔軟性のある運転」

風力や太陽のような再生可能エネルギー源は、欧州の電力システムの脱炭素化に役立つ利用可能なツールの1つである。再生可能エネルギーが今日直面する課題は、太陽が照っているときや風が吹いているときに限られるという、間欠性の性質である。

それゆえ、なぜ再生可能エネルギーは、天候に左右されない唯一の大規模な電力生産形式である原子力のような、他の低炭素エネルギー源との組み合わせが必要なのか。

原子力——

ベースロード電力および柔軟性のある電力の両方を提供

ネットワークの安定性を確保

電力システムの脱炭素化

EU の政策——

低炭素エネルギー源における長期投資の特殊性を認識しなければならない

長期的かつ予測可能な炭素価格を提供しなければならない

間欠性の再生可能エネルギーのパートナーとして、柔軟な電力生産に報酬を与えなければならない

「原子力発電所の柔軟性のある運転」 2018年5月7日 欧州原子力産業会議（FORATOM）

エグゼクティブ・サマリー：

- ・原子力発電は、欧州連合（EU）の発電システムの重要な要素であり、かつ欧州の発電システムの脱炭素化における再生可能エネルギーの主要パートナーである：原子力発電所は、EU域内で約27%の電力を供給し、低炭素電力の約50%を供給している。
- ・欧州のエネルギーミックスにおいて出力が変動する再生可能エネルギーのシェアが増大するにつれ、CO₂の排出を削減しながら、消費者にとって手頃な価格で手に入れることができる電力の供給確保が課題である。
- ・原子力発電所は柔軟性の低いベースロード電源として広く認識されているにもかかわらず、いくつかのEU加盟国においては、原子力発電は柔軟性と送電網の安定性の要求に十分な解決策を提供できる大規模電源であるということである。技術的には、既存の原子力発電所や新しい原子炉設計では、周波数制御と負荷追従運転の両方をこなす性能があるものの、EU域内において実施状況は不均一である。いくつかの加盟国や地域では現在、原子力発電所の柔軟な運用の必要性やインセンティブがないが、他の加盟国では柔軟な運転が確立され、実績を積んでいる。
- ・原子力発電所の柔軟な運転は、下記に依存する。
 - ・適用可能な規制の枠組：系統運用者と原子力安全規制者によって設定される条件（設計・運転段階で）を含み、加盟国ごとに異なる可能性がある。
 - ・市場環境を考慮した運転者の商業上の決定：原子力発電は、他の化石燃料による発電と比べて、初期の資本コストが高く、燃料コストや運転コストは比較的低いので、全出力運転が一般的に最善の選択と考えられている。
- ・原子力発電は、EUの電力システムを脱炭素化する重要電源として、長期的に見てEU域内で必要である。したがって、EUは、低炭素電源に対する長期的投資の特殊性を認識した電力市場や長期的かつ予測可能な炭素価格を可能とするCO₂排出量取引制度（EU-ETS）を正しく機能させる必要がある。
- ・原子力発電所の柔軟性のある運転に対する要請が高まるにつれ、間欠的な再生可能エネルギーの割合が拡大している電力システムのなかで、柔軟な運転が可能な電源に報酬を与えられるよう、適切なメカニズムを電力市場の設計に盛り込むことが必要である。

1. はじめに

大抵の場所では、最善の経済的・技術的オプションは、原子力発電所をベースロードモードで運転することである——すなわち、保守や燃料交換が許す限り、全出力運転をすることである。このことにより、原子力発電所は柔軟性に欠け、それゆえ変動性の再生可能エネルギーの高いシェアと両立しないと考える人もいるが、適切な枠組が適用されれば、両者が非常に相補的であることが分析によって示されている。

化石燃料への輸入依存や気候変動に対する懸念から、EU は、再生可能エネルギーの開発促進を盛り込む政策の策定を決定した。現在の目標は、2020 年までに最終エネルギー消費に占める再生可能エネルギーの割合を 20% にすることであるが、最近では、2030 年までに 27~35% にすることが議論されている。最終エネルギー消費において、27% の再生可能エネルギーを目標とすることは、電源構成における再生可能エネルギーの設備容量は約 45% 程度を意味することを明確にすべきである。

しかしながら、風力や太陽光など間欠性の再生可能エネルギーの急速な拡大は、必要に応じて柔軟性のある電力を提供できる技術の必要性を高めている。電力生産において変動性の再生可能エネルギーのシェアが増大するにつれ、EU の将来の送配電ネットワークの信頼性やレジリエンスの懸念も高まっている。

今日、ブリュッセルでのエネルギーに関する議論は、“脱炭素化電力システムに向けたエネルギーの移行”ができるよう、より柔軟な欧州の送電網を求めており、欧州委員会 (EC) も、積極的に支援している。しかしながら、柔軟性とエネルギーの移行の概念はともに、注意深い定義が必要である。柔軟性はそれ自身が目標ではなく、システムの信頼性とセキュリティに妥協することなく、受入可能なコストで、電力供給のしつかりとした脱炭素化の達成に役立つイネイブラーとしてあるべきだ。

次ページに示すオプションはどれも、それ自身、変動性の再生可能エネルギーシェアの拡大による影響を単独で管理することは期待できないことを認識する必要がある。これは、今日のシステム調整の場合でさえ言えることだ。むしろ、オプションの組み合わせが、他のエネルギー目標、特に電力システムの脱炭素化を可能にしつつ、電力供給の柔軟性を与えることができるという考え方への転換が必要である。また、変動性の再生可能エネルギーが必要とするバックアップオプションが、追加のシステムコストを生み、実施段階において技術的課題に直面する可能性があることを認識することが重要である。そのシステムコストは、変動性の再生可能エネルギーのシェアの拡大に付随する価格として基本的に認識すべき消費者に課される必要があるであろう。個々の課題は、克服するための集中的な努力が必要であり、状況が進展するにつれ、絶えず再評価される必要があるであろう。

電力ネットワークに柔軟性のあるサービスを提供するのに役立つオプション（一部、潜在的な限界を含む）：

- ・ガス、石炭、バイオマス発電所：これらは全て、今日のシステム調整に役立っている。しかしながら、それらはまた、低減しなければならないCO₂排出や大気汚染の問題を引き起こす。気候変動の緊急性に関するエビデンスが増えており、天然ガスは、目標を達成するための過渡的技術として限定的な役割を果たすことが示唆されている。
- ・エネルギー貯蔵：現在の技術（有名なものは、蓄電池や揚水）は、電圧や周波数制御に理想的であり、制限された時間で供給することができる。しかしながら、経済的に見合うべく、より長いタイムスケールで大規模なエネルギー貯蔵を行うためには、技術的な性能とコストにおいて根本的なブレイクスルーが必要であろう。水力発電と揚水発電は、地理的な制約に直面し、深刻な環境影響になり得る。一方、蓄電池は、潜在的な原材料およびリサイクル可能性に制約が存在する可能性がある。
- ・需要側管理（デマンドサイドマネジメント、DSM）：これは、価格信号に応答して別の時間に容易かつ経済的に移転可能な、融通性のあるシステム上の瞬時需要の一部に依存するものである。デジタル“スマートグリッド”技術の展開は、これを支援するものと期待される。需要側管理は、より良い管理システムへの機会を提供する一方、真の需要弾力性の可能性は限られており、電力の重要な利点、すなわち必要時に需要を満たすのを差し控えることを顧客に期待するのは非現実的である。
- ・変動性の再生可能エネルギーの抑制：これには、適切な制御システムを変動性の再生可能エネルギーの発電機に組み込む必要がある。また、参加している変動性の再生可能エネルギーへの補償支払いにより、システム・セキュリティの理由から、燃料費ゼロの変動性の再生可能エネルギーの発電を犠牲にする意思が必要である。
- ・原子力発電の負荷追従（柔軟性のある運転）：これには、原子炉が設計、燃料および原子炉制御に応じて柔軟な発電モードで動作するように物理的に適合することが必要である。これまで、フランスの3分の2の原子力発電所が、柔軟な運転モードで日常的に運転されている。変動性のある再生可能エネルギーの抑制と同様、失われた発電報酬に見合うだけの補償が必要となろう。また例えば、サーマルサイクルの影響や重要な部品の摩耗や裂傷の可能性に対する懸念がある。

2. 技術的側面

2.1 柔軟性とは

発電システムの柔軟性は、発電システムの設計や運転において固有の特徴である、発電システムは、常に発電と消費の空間的、時間的バランスを確保するよう設計されている。発電システムの柔軟性は、電力システムが費用対効果の高い方法でシステムの安全性を維持するために、必要に応じて、発電と消費を適応させることができる程度を表す。柔軟性とは、供給と需要の急速かつ大きな変化に直面するなかで、継続的なサービスを維持する発電システムの能力である。¹

¹ Flexibility options in electricity systems -ECOFYS- March 2014

発電プラントの柔軟性のある運転モード

- ・周波数調整（一次調整力）：生産と消費バランスの直接的な構図である。生産が過剰であれば周波数は上がり、逆の場合は減少する。周波数が乱れた後、短期間（0～15秒の間）で最も実現可能な運転システムの状態を復元することを目的とする一次周波数調整は、完全に自動であり、分散化されている。
- ・二次調整力／負荷追従：需要への適応は、自動化されている。負荷変動とそれに続く一次調整力の後、システム周波数は通常の周波数と合致しない。このため、二次周波数調整が、システム周波数を通常の基準値に戻すために必要である。二次調整力は、発電システムの中央レベルで開発された制御アクションである。
- ・三次調整力／負荷追従：需要への適応は、運転者によってなされる。三次周波数調整力は、コスト最小化の範囲を考慮して、関連する発電機間で負荷変動の影響をさらに長期的に細分化することを表す。この調整は、一定の周波数レベルでなされる。

2

² Load-following operating mode at Nuclear Power Plants (NPPs) and incidence on Operation and Maintenance (O&M) costs. Compatibility with wind power variability – JRC 2010

2.2 原子炉は柔軟性を持ち得るか？

欧州のいくつかの国（フランス、ドイツ、スロバキア、チェコなど）では、原子力発電所は、実際にかかなりの負荷追従や柔軟に運転操作できる能力を有している。原子力発電所のような能力導入の背景には、概して国、あるいは地域のエネルギーミックスにおいて原子力シェアが比較的高く、ゆえに、需要の変化に応じて電力システムの安定性に貢献する必要があるからである。それにも関わらず、このことは、原子力エネルギーが変動性の再生可能エネルギーの間欠性を補う能力を大規模に実証している。実際、原子力発電は、それができる唯一の大規模かつ天候に左右されない低炭素技術のように見える。より小規模な容量であるが、他の低炭素技術としてバイオマスがあるが、送電を考えた際に、低炭素なバイオマスをどの程度にするかについて疑問が増している。

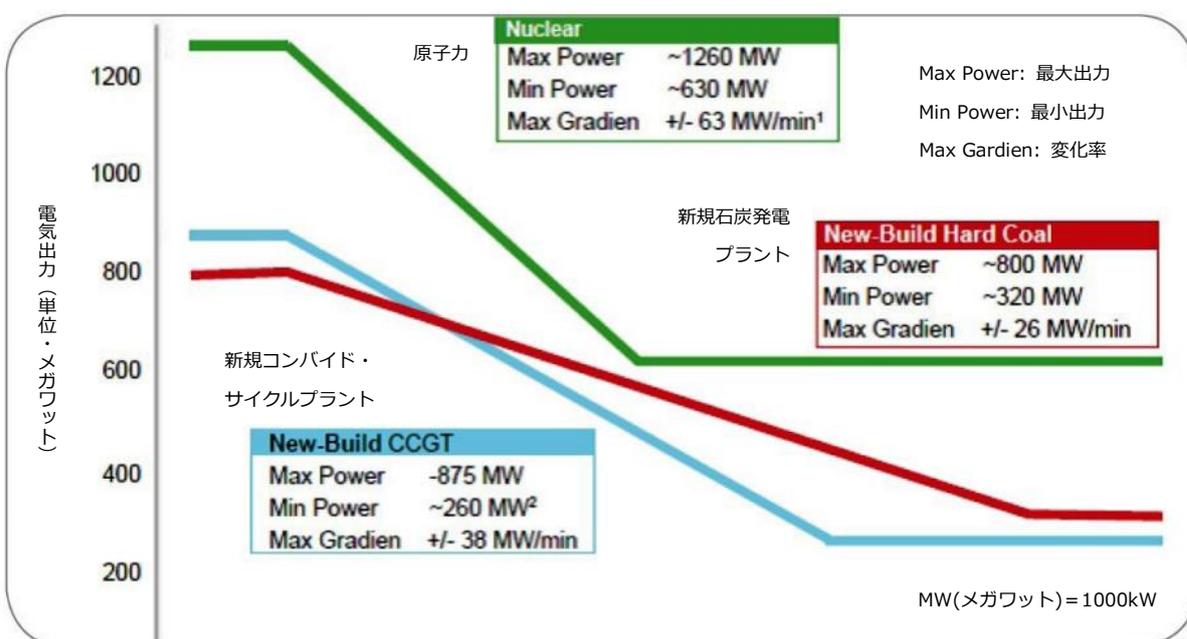


図 1： 原子力、石炭、コンバインド・サイクル（CCGT）各発電所の負荷追従能力の比較³

³ Nuclear Energy Factsheets Load following capabilities of Nuclear Power Plants – SNETP 2017

	最大出力	最小出力	変化率(出力)
原子力プラント	~126 万 kW	~63 万 kW	+/- 6.3 万 kW/分
新規石炭発電プラント	~80 万 kW	~32 万 kW	+/- 2.6 万 kW/分
新規コンバインド・サイクルプラント	~87.5 万 kW	~26 万 kW	+/- 3.8 万 kW/分

世界の原子力発電所の大半は、ベースロードモードで運転されている。その出力は、全体の発電サイクルの間、多かれ少なかれ一定のままである（一般的に最大定格出力で）。これは、運転が容易かつ最大限の経済効果が得られるからである。しかしながら、これまでの経

験によれば、多種多様な原子力技術は、原子力安全規制者によって必要な技術的要件が規定され認可されれば、実際に負荷追従運転に対応することができる（VVER を含む PWR、BWR など）。負荷追従能力を備えたこれら原子力発電所の設計や許認可の間に開発された分析、および現在までに蓄積された経験のフィードバックは、この運転モードが最高の安全基準に準拠していることを示している。

様々な機能を組み合わせると、2010年にドイツの原子力発電所は、1,000万kWまでの電力変動を吸収することができた。フランスでは、負荷変動が可能な3基中2基の平均だが、原子力発電所の全体電力調整能力が30分未満で2,100万kW（すなわち、21基の出力）である。さらに、送電網から一時的に原子炉を解除することも可能で、その後の再稼働も可能である。“ホットスタンバイ”状態にしておけば、2～3時間のうちに全出力で運転を復帰することができる。

将来の原子力発電所の安全かつ信頼性の高い運転に向け設計仕様を調和する目的で、欧州の電力会社が開発した一連の文書である欧州電力要求（EUR）は、周波数制御（一次調整力、二次調整力の両方）や負荷随従能力の要件を含んでいる。今でも既に既存の大半の運転中の原子力発電所は、十分に欧州電力要求に適合している。

3. 実現条件

3.1 規制面

原子炉の柔軟な運転は、技術支援機関と原子力規制機関双方の特定の規制面を遵守しなければならない。

3.1.1 技術支援機関

典型的には、系統運用機関は、系統コードにより、系統システムへのアクセスと使用を統括している。系統コードは、系統ユーザーが遵守しなければならない技術的、商業的要件を規定している。系統コードは、周波数制御や負荷追従のために特定の能力を持つ発電ユニットを必要とする可能性がある。原子力発電所の所有者／運転者は、要件がどのように解釈されるのか、そして要件の遵守がどのように評価されるのかの共通認識を確保するために、初期段階から系統運用機関と協議に入る必要がある。

3.1.2 原子力規制機関

原子力発電所の安全運転を統括する特定の規制は、加盟国間でもさまざまであるが、一般的な規制の哲学は、一貫している：原子力発電所は、運転認可や安全基準によって定められた範囲内で設計、建設、運転しなければならない。各国の規制枠組には小さな変化が見られるものの、原子力規制機関の役割と責任は一貫している：安全運転を確保する規制要件の確立と維持、所有者／運転組織によるこれら要件遵守の監督、そして原子力発電所の設計や許認可基盤変更の承認である。原子力安全は、いかなる側面にも優先する、それゆえ、原子力安全規制機関は、柔軟性のある運転決定に重要かつ主要な役割を果たし、できるだけ早い段階から意思決定プロセスに関与することが不可欠である。

3.2 経済面

経済的な観点から、原子力発電所をベースロード運転することは、一般的に最も経済的に有利な方法と考えられている。新規原子力ユニットは上流の資本コストが高いが、運転・保守および燃料のコストの総額は、他の化石燃料の発電所に比べて、安価である。それゆえ、競争市場においては、発電による収益は通常、全出力運転で最大となる。原子力の均等化発電原価（LCOE）を他の技術と正確に比較計算する場合には、原子力の設備利用率は85%⁵と考慮される。長期運転（LTO）プログラムの一部となっている原子炉の場合、状況は異なる。寿命延長のための資本コストが新規炉の場合より大幅に低いため、電気料金は非常に安価で、より柔軟な運転でも経済的なマージンを提供する。

⁵ Projected Costs of Generating Electricity 2015 Edition – IEA/OECD-NEA

したがって、様々な時間に様々な程度で負荷追従のために原子力発電所の出力を物理的に上昇、下降させることは、原子力発電所の運転時の経済性にももちろん影響するであろう。原子力発電所の所有者／運転者は、系統システムや国のエネルギー政策全般に価値あるものとして、柔軟性のある運転を提供することを検討し、関連費用が補償されることを期待するであろう。

電力市場の設計は、間欠性の再生可能エネルギーの割合が拡大するシステムのなかで、柔軟性のある運転に報酬を与えるための適切なメカニズムを含むよう構築する必要がある。

負荷追従運転実施の決定は、その柔軟性が国の電力市場によっていかに評価されるか、また法的／規制面の制約によって、大きく左右される。

4. 結論

原子力発電所は、ベースロード運転と柔軟な運転の両方が可能な、大規模かつ天候に左右されない、唯一の低炭素電源である。

原子力発電所は柔軟性がなく、ベースロード電源としてのみ運転可能と広く認識されているが、技術的観点からは、原子力発電は認可を受ければ、他の電源（ガス、石炭、あるいは水力）と同様に周波数制御や負荷追従運転が可能で、送電網への安定性をもたらすことができる、大変柔軟性の富むものとなり得ることを実際の経験が示している。

柔軟性の観点から言えば、原子力は、化石燃料のように CO₂ を排出せず、あるいは水力発電のように水の利用に依存せずとも、柔軟性を提供できる唯一の電源であることから、変動性の再生可能エネルギーの最良のパートナーである。

EU は、炭素価格の長期予測を含む、機能的な電力市場と炭素市場が必要である。それは、補助金を必要としない市場におけるすべての低炭素電源のための公平な競争の場につながるであろう。そのような市場においては、柔軟性のための適切な報酬が、原子力発電所の運転者に柔軟な運転を促すものとなろう。



欧州がエネルギーの供給確保と同時に CO2 排出削減にコミットするならば、再生可能エネルギーの柔軟なパートナーとして、低炭素な原子力発電を真剣に受け入れる必要がある――

FORATOM 事務局長 イヴ＝デバゼィユ

間欠性の再生可能エネルギー問題への柔軟性のある原子力発電による解決

柔軟性のある原子力発電所は、変動性の再生可能エネルギーのベストパートナーであり、欧州が 2 つの主要目標を達成するのに貢献する：

- ・エネルギー供給の安定確保
- ・CO2 排出削減

今日、原子力発電はベースロード電源としてしか活用できないという誤解が一般的に広まっているが、これは必ずしも正しくはなく、原子力発電は柔軟に運転が可能である。原子力発電は、送電網の安定性や柔軟性に必要な大規模な解決策である。間欠性の再生可能エネルギーと柔軟な原子力発電を組み合わせることにより、欧州は、手頃な価格で供給安定性を確保するとともに、電力システムを脱炭素化するであろう。

原子力発電の柔軟性と言え、2 つの要素を勘案する必要がある：すなわち、規制の枠組（加盟国によって異なる）と市場環境である。

それゆえ、フォーラトムは、EU のエネルギー政策が以下について確保することが必要であると考えている：

- ・低炭素電源における長期投資の特殊性をふまえた機能性の高い電力市場
- ・長期かつ予測可能な炭素価格を提供する機能的な CO2 排出量取引制度（EU-ETS）
- ・間欠性の再生可能エネルギーの割合が拡大するシステムのなかで、柔軟な運転にきちんとした報酬を与える適切なメカニズムの実施

以上