

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 15 日現在

機関番号：32682

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26450322

研究課題名(和文) 電力自由化における再生可能エネルギーの推進と地域経済の活性化に関する研究

研究課題名(英文) Study for Promotion of Renewable Energy and revitalization of regions

研究代表者

大江 徹男 (Oe, Tetsuo)

明治大学・農学部・専任教授

研究者番号：60409498

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：再生可能エネルギー導入に積極的なドイツでは、再生可能エネルギーが電力供給の中核を担うまでに拡大しているが、導入拡大に従い、需給調整という問題が注目されている。変動性の高い太陽光発電や風力発電による発電量の急増で、需給調整が重要な問題として提起されている。

実際に、需給調整市場の動向を見ると、2013年以降は明らかに再生可能エネルギーの増加にもかかわらず、需給調整市場でTSOが入札で確保した電力量は減少に転じている。また、実際に利用した調整力と入札で確保した調整力の比率を見ると、ほとんどの入札分は利用されていないのが現実である。つまり、需給調整市場における調整は通常それほど重要ではない。

研究成果の概要(英文)：In Germany where renewable energy has been developed and one of main resources for electricity, the arrangement of supply and demand of electricity under rapid introduction of renewable energy becomes one of the most important topics because renewable energy fluctuates and it is very difficult to stop it from fluctuating.

In reality, TSO does not play an important role in the arrangement market of electricity and most of electricity TSO secures is not used. Therefore arrangement by TSO is not so important as we suppose.

研究分野：経済学

キーワード：再生可能エネルギー 電力需給

### 1. 研究開始当初の背景

再生可能エネルギー導入に積極的なドイツでは、再生可能エネルギーが電力供給の中核を担うまでに拡大しているが、導入拡大に従い、需給調整という問題が注目されている。変動性の高い太陽光発電や風力発電による発電量の急増で、需給調整が重要な問題として提起されている。日本国内の再生可能エネルギーの比率はきわめてわずかであるが、今後その比率が上昇することが予想されるだけに、ドイツが直面している課題とその課題に対する取り組みから学ぶことは多い。

### 2. 研究の目的

本研究では、再生可能エネルギーの導入増大に伴う需給調整の現状について検討する。具体的には、送電系統運用業者である TSO (Transmission System Operator) による需給調整の負担増加問題である。ドイツでは、通常インバランス精算は発電事業者や小売事業者により構成されているインバランスグループが担当している。バランシンググループ毎に、先物・先渡し、相対、前日市場の結果を含めた前日計画を策定する。当日市場は終了するまで (ゲートクローズ) 卸電力取引所に設けられている当日市場を活用し、必要に応じて前日計画を修正する。バランシング責任者が供給側と需要側の両方を保有する場合は、供給側と需要側の差分を相殺することができる。バランシンググループが計画値を提出して、仮に計画値と実績値の間にかい離が生じ (インバランス) かつバランシンググループが自らのグループ内で需給調整できない場合、TSO が需給調整市場で調整力を調達して最終的な需給調整を行う。

このような状況下で、TSO による調整力発動による需給調整の頻度が増加しているとの指摘がある。つまり、再生可能エネルギー導入の急激な増加によって需給調整市場における TSO の調整力の利用が増え、負担が増加している点が問題視されている。

また、再生可能エネルギー、特に供給量の変動が大きい太陽光発電と風力発電の導入拡大によって、需給を安定させるために近隣諸国への電力輸出が増加していると指摘されている。つまり、変動性の高い再生可能エネルギーの供給量が増加したために、想定外の大量の電力量が輸出され、近隣諸国の需給調整あるいは系統管理に重大な影響を与えているという指摘である。

このような論点の検討に必要なことは、まずドイツ国内の需給調整市場の現状分析である。本論では再生可能エネルギー導入が急激に拡大しているドイツを対象に、再生可能エネルギー導入の拡大が電力需給に与える影響について、ドイツ国内の需給調整市場の利用状況を分析する。

### 3. 研究の方法

最初にこれまでの先行研究の整理を実施した。そのうえで、これまでの論点整理や調査の作業仮説や調査枠組みの検討を行い、その後調査結果の検討を実施した。

今回の調査に関してはドイツのデータを活用して、可能な限り鳥瞰図的な視点から包括的な分析を実施した。その後ドイツにおける現地調査を実施し、聞き取り調査、資料収集を行った。

### 4. 研究成果

#### (1) 電力市場の構造

ドイツにおける電力の需給調整は幾つもの層から構成されている。まず先物と現物取引があり、現物には前日市場と当日市場がある。前日及び当日市場には、European Power Exchange (EPEX)、先物と先渡しを運営する市場には European Energy Exchange (EEX) がある。

前日市場は、EPEX の取引が 12 時に終了し、12 時 40 分には取引結果が公表される。前日市場の取引終了が実運用の前日であるため、その後に当初の想定とは異なる状況が発生し、需給に大きな影響を与えることが考えられる。したがって、バランシンググループは、インバランスを回避するために当日市場において需給調整を実施しなければならない。当日市場では、実運用日の前日の 16 時から 15 分幅の取引が開始され、実運用の 30 分まで開かれる。

#### (2) 需給調整の仕組み

このように前日市場後に確定した需給計画と需要予測誤差等による偏差は、当日市場を活用して調整される。実運用の 30 分前に当日市場は終了するが、バランシンググループは、当日市場を活用してゲートクローズまでの間に需給調整を実施する。

2006 年まで、ドイツの需給調整は、各 TSO が行っていたが、再生可能エネルギー電源の普及が進むと、各 TSO が独自に需給の調整能力を確保することはコストの面から望ましくないと認識されるようになった。そこで、ドイツ全体で需給調整能力を確保するためにドイツ需給調整市場 (regelleistung.net) が創設された。その後、このドイツ需給調整市場で確保した需給調整能力をメリットオーダーで運用する Grid Control Cooperation が設立された。

なお、バランシンググループが完全に調整することができない場合、インバランスが発生することになる。その場合、TSO が需給調整市場で最終的に調整することになる。その発生費用は発生に責任があるバランシンググループが負担する。

#### (3) TSO による需給調整

ドイツの TSO が最終的な需給調整に用いる調整力は、応答時間の違いから、プライマリ調整力、セカンダリ調整力、ミニット調整力

に分けられる。これらの3つの調整力それぞれの技術要件をクリアした事業者のみが需給調整市場の入札に参加することができる。需給調整に用いられるのは、主にセカンダリとミニット調整力で、セカンダリ調整力だけでは対応できない場合、ミニット調整力が発動される。

プライマリ調整力については、TSOからの指令ではなく、各発電機が自動的に周波数偏差を検出して発動する、いわゆるガバナフリー運転に近い特性を有している。セカンダリ調整力は運転予備力に近い運用で活用されており、電力の需給調整と周波数コントロールが目的である。ミニット調整力はセカンダリ調整力とは異なり、待機予備力に近い運用となる。セカンダリ調整力は周波数偏差が生じると、必要な調整力は5分以内にメリットオーダーで発動される。ミニット調整力は、電源の計画外の停止や再生可能エネルギー電源の予測出力が大幅に外れたときなどに使われる。ミニット調整力は、15分以内での起動が求められる。また、供給力が極端に減少し、調整力では対応できない場合には、需給調整のためだけに発電する予備電力を稼働させる。

以上のように、プライマリ調整力とセカンダリ調整力は実運用の前週に調達は終了し、ミニット調整力も実運用の前日には入札で確保される。セカンダリとミニット調整力は、過去の需給を考慮して、3か月毎（四半期）に見直され、その期間内はセカンダリ調整力は週ごとに、ミニット調整力は毎日、それぞれ定められた容量が需給調整市場において確保される。

TSOはゲートクローズから実運用までの間に各調整力のうち“どの程度”、“どこ”の調整力を利用するか、判断する。実運用時間が近づくにつれ、再生可能エネルギー等の予測の精度が高まるので、より正確に利用計画を策定することができる。実運用開始後も、想定外の変化に対して各種調整力を活用して対応することになる。ただし、調整力はすでに前日時点で確定しているため、ゲートクローズ以降TSOが調整に利用できる調整力には限界がある。したがって、想定以上の変動が発生した場合には、調整力以外の対応策が求められる。

次に、需給調整市場の現状について確認しておこう。

#### (4) 系統管理の現状と課題

##### 1) 需給調整

最初にTSOの系統管理に関するコストを確認する。全体としては、TSOが負担する総コストはほぼ横ばいあるいは微減状態である。ただし、内訳を見るとかなり異なった傾向が混在している。需給調整のために使用するプライマリ、セカンダリ、ミニットの各調整力の費用の合計額は、2009年の8億2,500万ユーロから2014年には4億3,700万ユーロに

減少している(47%減)。

減少が著しいのがセカンダリ調整力で、2010年の5億500万ユーロから2014年には2億2,800万ユーロまで減少した(55%減)。ミニット調整力も2009年に一旦2億6,600万kWhにまで増加した後に、2010年に8,500万kWhまで急激に縮小した。2014年には1億600万ユーロである。なお、プライマリ調整力はほぼ横ばい状態である。

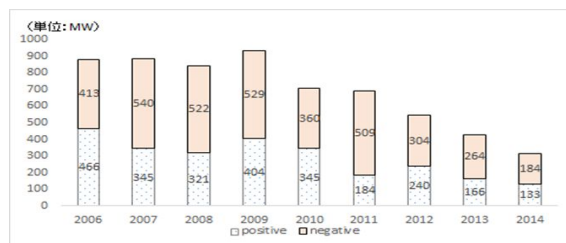
以上より、少なくとも需給調整力については、再生可能エネルギー導入が急拡大しているにもかかわらず、その取引規模は大きく減少している。それでは、次にセカンダリ調整力について詳しく分析を行う。

##### 2) セカンダリ調整力

需給調整市場には、上げ代(positive)と下げ代(negative)がある。何らかの事故等で発電所が止まり、想定外の供給力の停止状態が発生した時、需給調整市場で入札にかけて確保(契約)しておいた待機あるいは部分運転中の発電設備から電力を調達する。逆に、再生可能エネルギーの発電量が想定以上に増加して、供給過剰になる場合、余った電力を購入する、あるいは稼働中の発電量を削減することで需給を調整する。

それでは、需給調整に必要な調整力は確保されているのであろうか。図1は、入札で確保されたセカンダリ調整力のうち、実際に利用された容量の各年の平均値を示している。実際の平均利用容量を見ると、2009年のpositiveで404MW、negativeで529MWであったが、2014年の平均利用容量はpositiveが133MW、negativeが184MWと、両方ともに減少傾向である。

図1 セカンダリ調整力の平均利用容量の推移



資料：Monitoring report 2008,2009,2014より作成

問題は、TSOが確保した需給調整力全体のうち、実際の需給調整にどの程度利用されているか、という点にある。表1には、入札で確保されたセカンダリ調整力の最大及び最小容量に対する平均利用容量の比率を示している。2014年時点の比率は、positiveで最大容量の5.3%、最小容量の6.7%と極めて小さい。2009年の12.6%、16.2%と比較すると明らかに減少傾向にある。negativeも同様で、2014年の数値はそれぞれ7.4%と9.7%、2009年の23.1%と25.7%、と明らかに減少傾向にある。とりわけnegativeの減

少が著しい。これは図3のセカンダリ調整力の平均利用容量の推移と同じである。

表1 セカンダリ調整力の入札容量と利用容量の推移

(単位:MW, %)						
	2009	2010	2011	2012	2013	2014
positive						
最大容量①	3,212	3,206	2,231	2,109	2,473	2,500
最小容量②	2,493	2,209	2,073	2,081	2,073	1,992
平均利用容量③	404	345	184	240	166	133
平均利用率(対最大容量比)-③/①	12.6	10.8	8.2	11.4	6.7	5.3
平均利用率(対最小容量比)-③/②	16.2	15.6	8.9	11.5	8.0	6.7
negative						
最大容量④	2,290	3,121	2,228	2,149	2,418	2,500
最小容量⑤	2,059	1,918	2,044	2,114	2,018	1,906
平均利用容量⑥	529	360	509	304	264	184
平均利用率(対最大容量比)-⑥/④	23.1	11.5	22.8	14.1	10.9	7.4
平均利用率(対最小容量比)-⑥/⑤	25.7	18.8	24.9	14.4	13.1	9.7

資料: Monitoring report 各年度版より作成

以上より、セカンダリ調整力に関しては、通常の状態では入札で確保された調整力のほとんどが利用されていないことは明らかである。むしろ、年々再生可能エネルギーの導入量拡大と反比例する形で調整力に余裕が生まれている。

実際に調整力として活用された電力量を見ても同じような傾向が見られる。全体的に減少傾向は明らかで、2008年にはpositiveが2.8TWh、negativeが4.6TWhであったが、2014年にはpositiveが1.2TWh、negativeが1.6TWhに激減している。negativeは2011年を除けば一貫して減少傾向を示している点も同じである。

#### (5)まとめ

再生可能エネルギーの導入増大に伴い、需給調整や系統管理が困難になっているとの課題に対して、本論ではその現状について検討した。近年のデータから判断する限りにおいて、再生可能エネルギー導入が需給調整を困難にしているという仮説は、特別な緊急事態が発生しない限り、現時点では現実的ではない。

実際に、需給調整市場の動向を見ると、2012年までは再生可能エネルギー導入と需給調整市場での調整力の入札規模が連動するように増加していたが、2013年以降は明らかに再生可能エネルギーの増加にもかかわらず、需給調整市場でTSOが入札で確保した電力量は減少に転じるという、正反対の傾向が浮き彫りとなった。

また、実際に利用した調整力と入札で確保した調整力の比率を見ると、ほとんどの入札分は利用されていないのが現実である。つまり、TSOによる需給調整市場が通常それほどの重要性を持っていないともいえる。この点は、先行研究では全く対象とならなかった事象であり、本論で初めて本格的に分析の対象とした。この現象が定着した場合、今後も再生可能エネルギーの導入を積極的に推進しても、需給調整は容易になるであろう。それ

だけにこの論点は重要である。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計2件)

1. 坂内久・河原林孝由基(2016)「再生可能エネルギー発電と農業の兼営の可能性・課題 営農型太陽光発電(ソーラーシェアリング)を中心に」協同組合研究誌 季刊『にじ』査読無、2016年春号(第653号)(一社)JC総研、pp.150~166.

2. 大江徹男(2015)「東日本大震災後の節電の効果及び継続性について 東京電力管内を対象として」『明治大学社会科学研究所紀要』第54巻第1号、pp.121~149

3. 大江徹男(2014)「東京電力管内の電力需給の推移とESCOによる節電の可能性についての考察」『明治大学社会科学研究所紀要』第53巻第1号、pp.127~153.

〔学会発表〕(計0件)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
国内外の別:

取得状況(計0件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
取得年月日:  
国内外の別:

〔その他〕  
ホームページ等

#### 6. 研究組織

(1)研究代表者

明治大学農学部専任教授

大江 徹男 (Oe, Tetsuo)

研究者番号: 60409498

(2)研究分担者

明治大学研究・知財戦略機構研究推進員（客  
員研究員）

坂内 久 （Hisashi Bannai）

研究者番号： 00712316

(3)連携研究者

（ ）

研究者番号：

(4)研究協力者

（ ）