

エネルギーヴェンデと経済

クリストフ・ポデウィル - コミュニケーション・ディレクター

2015年5月29日 東京

ご紹介

- 独立系超党派シンクタンク, 研究者 : 18人
- プロジェクト期間: 2012-2017 | 1500万ユーロの融資
(メルカトル基金及び欧州気候基金による)
- ミッション: ドイツでエネルギーヴェンデをどのように成功させるか
- 分析, 評価, 理解向上, 討論, 提言



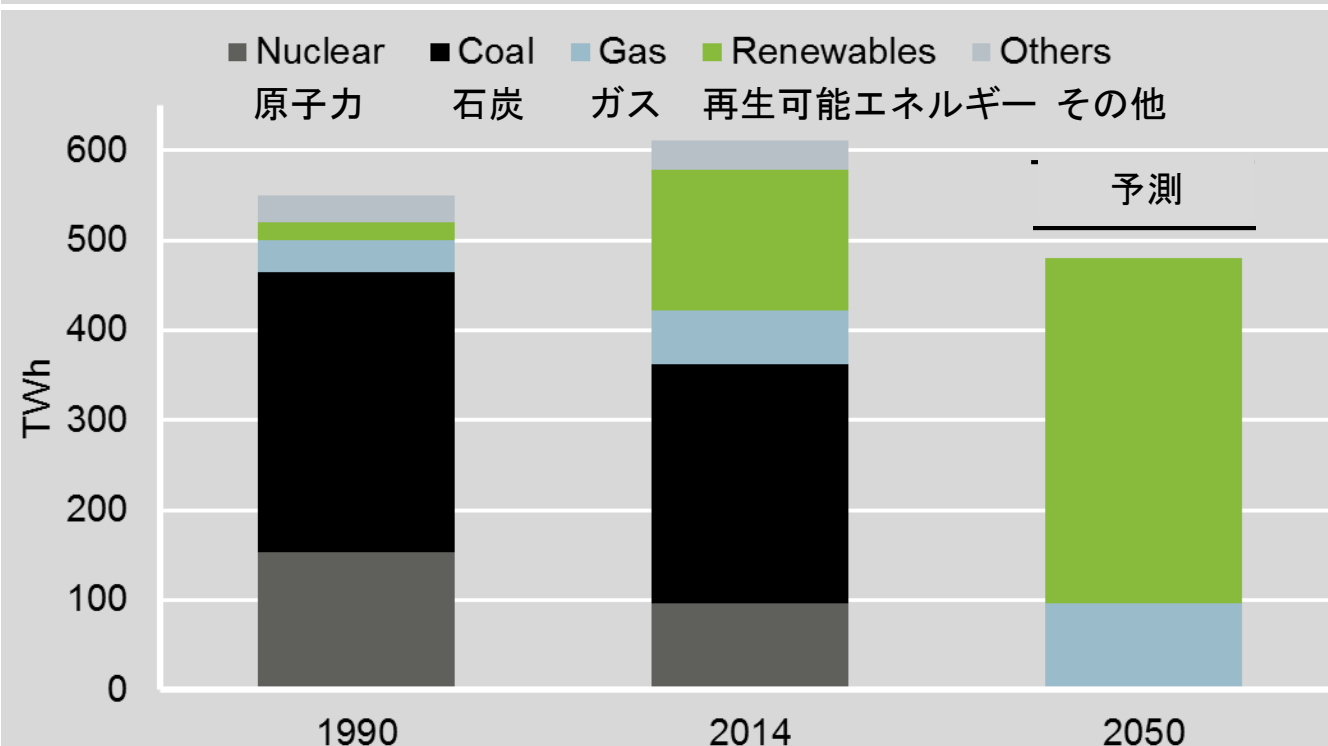
1. エネルギーヴェンデとは

- 発電部門を焦点に



エネルギーヴェンデとは、 発電システムを根本的に変えること

総発電量 (1990年, 2014年, 2050年)



出典 : AG Energiebilanzen (1990, 2014); illustration based on current targets

温室効果ガスの削減

2020年までに40%削減

2050年までに80%から95%削減 (1990年比)

原子力

2022年までに段階的にすべてのプラントを廃止

再生可能エネルギー

電力消費量の割合を 2025年までに40-45%, 2035年までに55-60%, 2050年までに少なくとも 80%

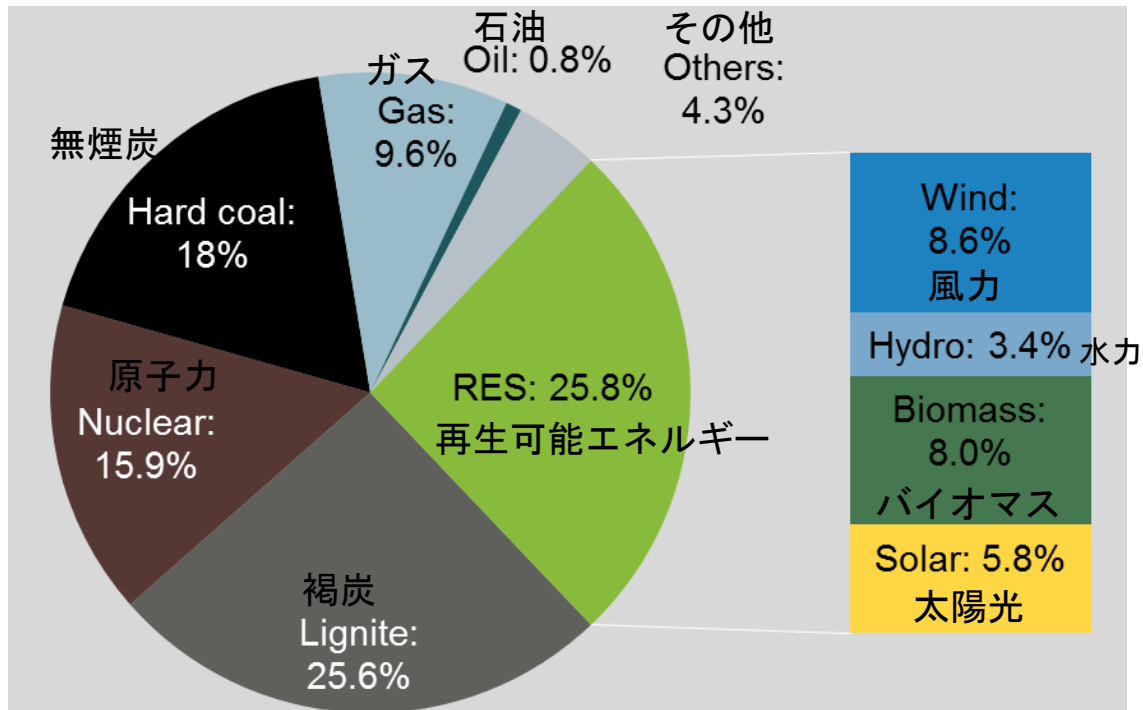
効率

2020年までに電力需要の10%削減

2050年までに25%の削減 (2008年比)

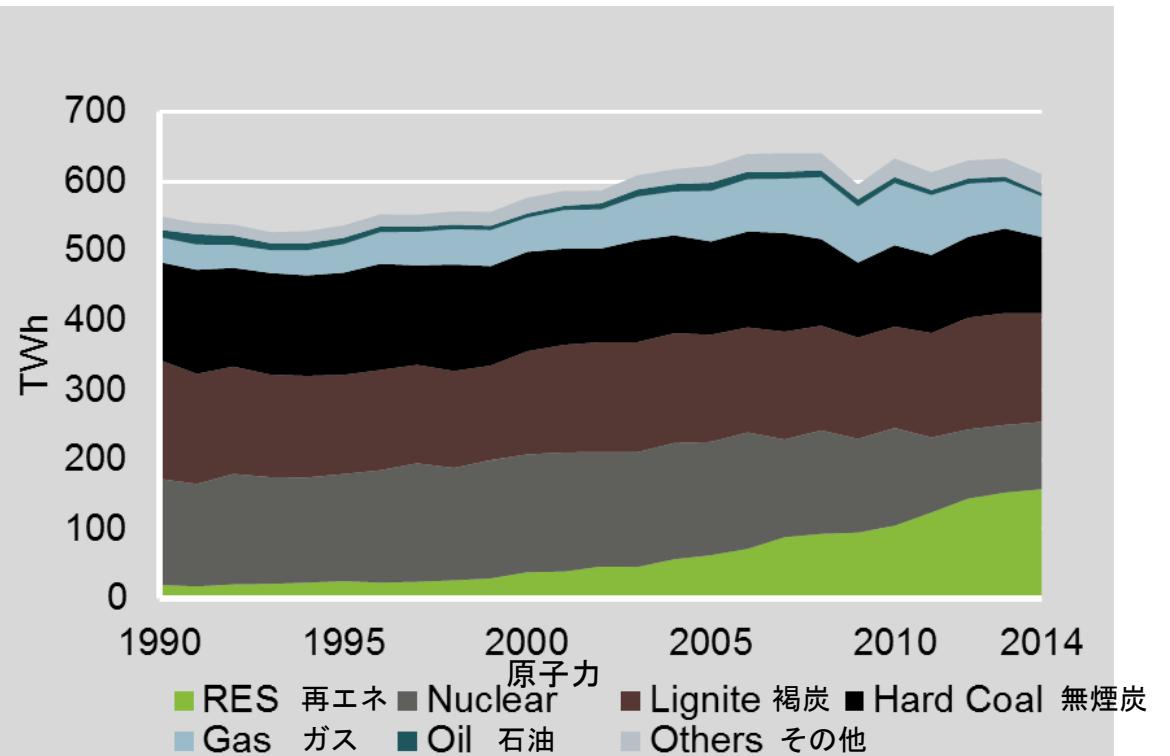
2014年のドイツの電力ミックスにおいて、再生可能エネルギーが最大で26%占める

総発電量のエネルギー源の割合 (2014年)



出典 : AG Energiebilanzen (2014年)

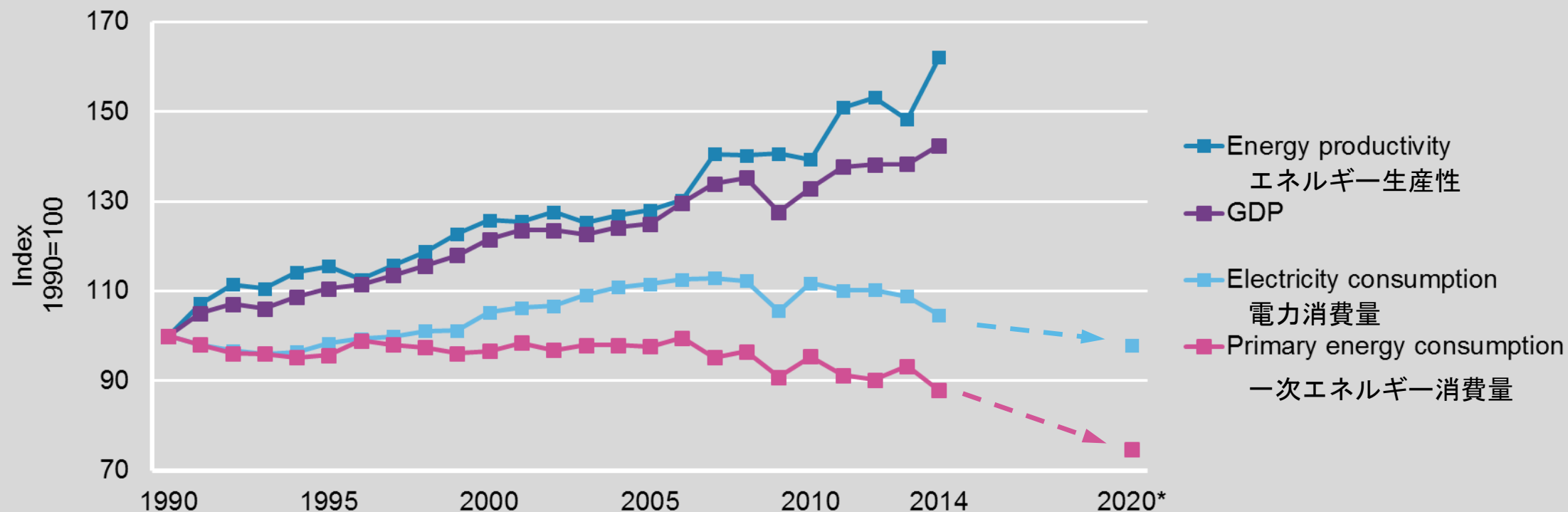
総発電量の推移 (1990-2014年, TW)



出典 : AG Energiebilanzen (2014年)

ドイツでは、経済成長とエネルギー・電気の消費量をディカップリング -再生可能エネルギーは着実に増加

エネルギー生産性、消費量と経済成長（1990 - 2014年 (Index, 1990年を100として)）



出典：AG Energiebilanzen (2014), BMWi (2014年)

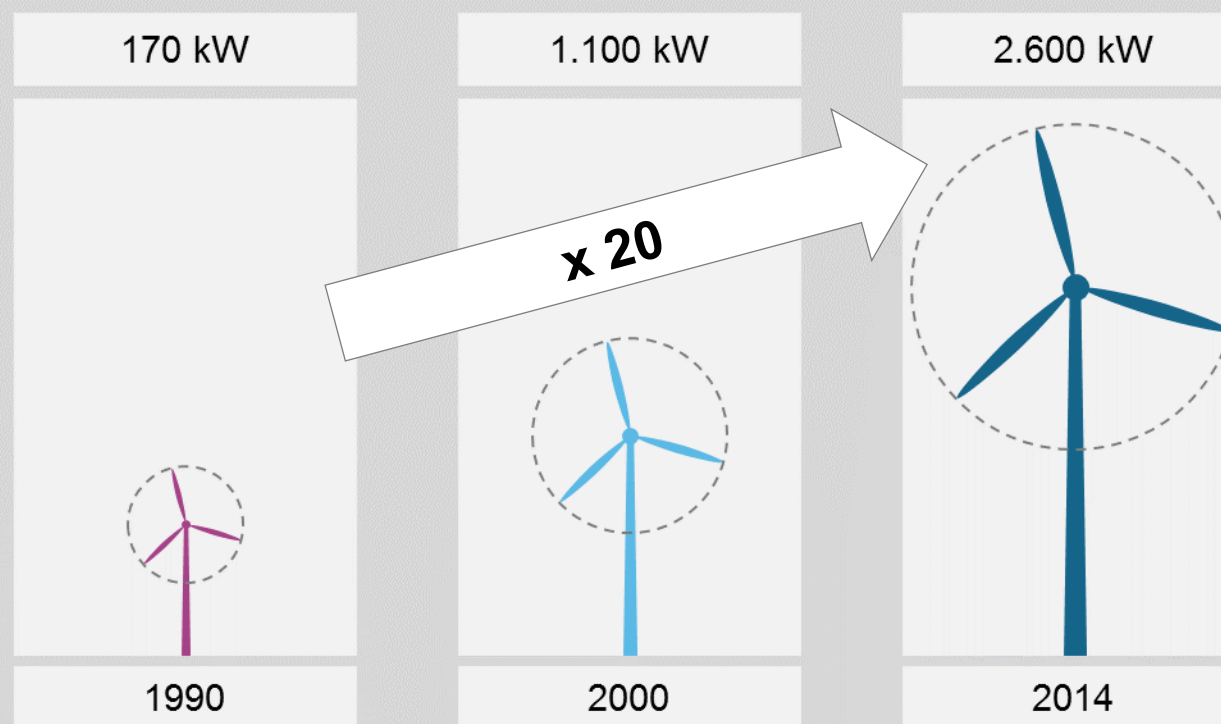
2. エネルギーヴェンデの重要な視点

「風力と太陽光が主役!」



風力エネルギーの技術が成熟し、 2-3 MWの風車が標準化

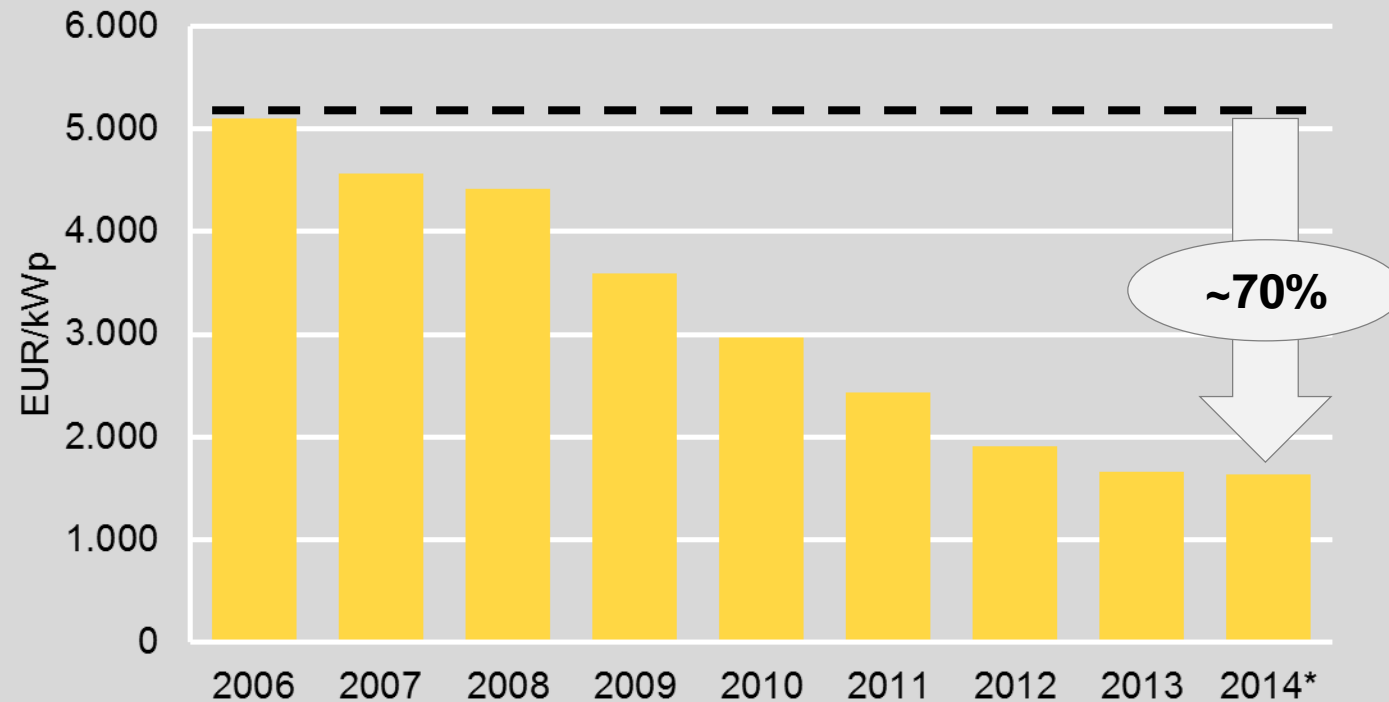
風力タービンのサイズの推移 (陸上)



出典 : Fraunhofer IWES

太陽光発電に価格破壊が生じ、 2006年以降 70%までコストが削減、 2050年までにさらに50%のコスト削減が見込まれる

新しく屋根に取り付けられた太陽光発電の平均システム価格（EUR/kWpあたり）

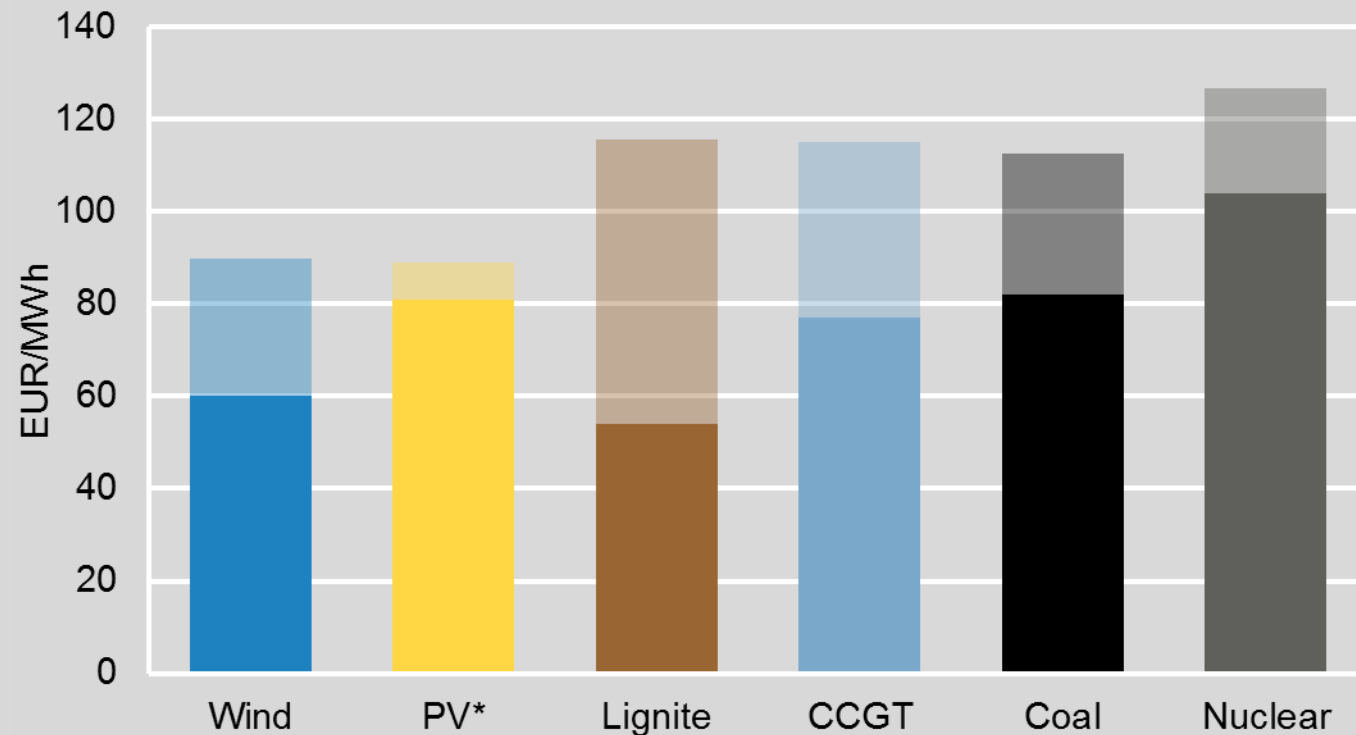


出典：BSW Solar (2014年)をもとに計算

* only Q1 2014

現在、風力と太陽光は、その他全ての新設の従来型エネルギー源に対して既に価格競争力がある

均等化発電原価(LCOE)の範囲 2015年, EUR/MWh



出典 : Agora Energiewende (2015年)

風力

太陽光

褐炭

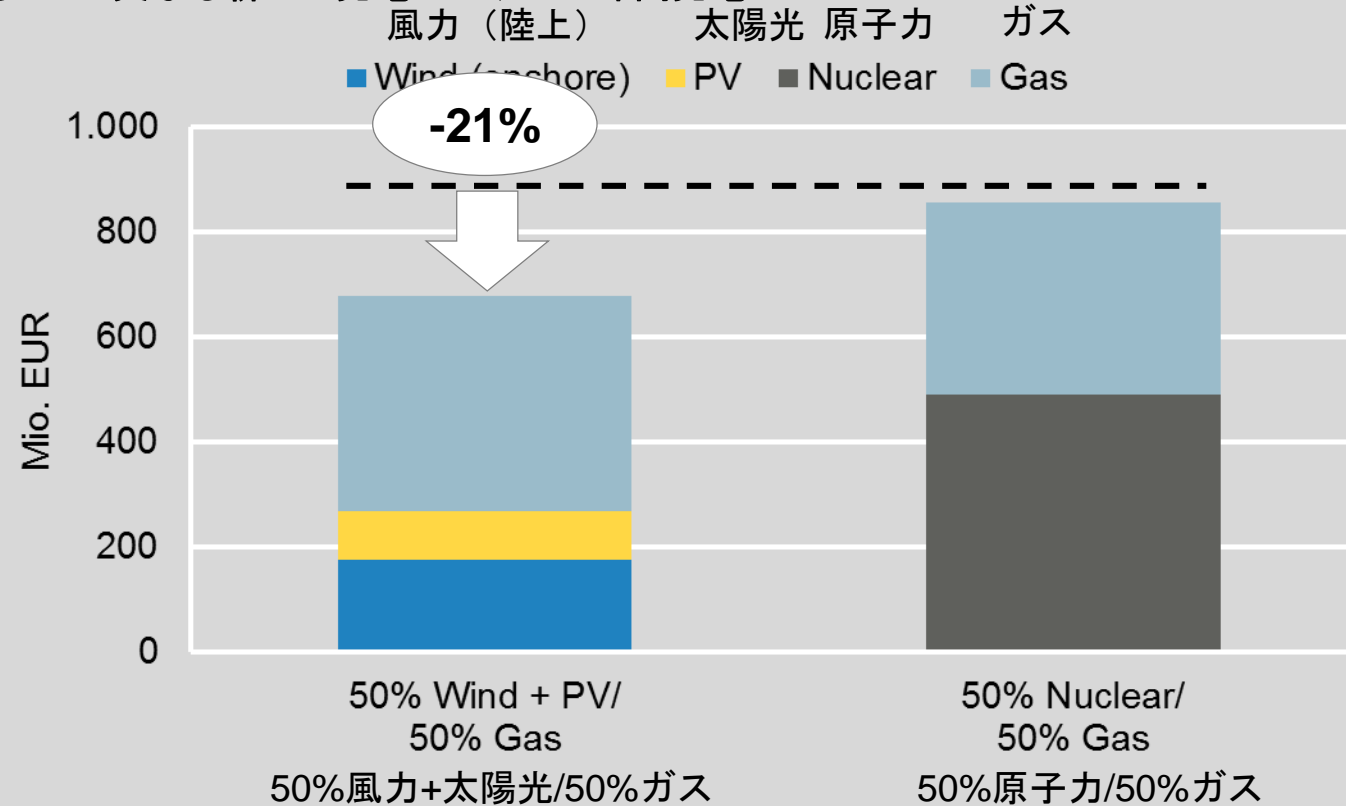
コンバインド
サイクル

石炭

原子力

風力と太陽光を組み合わせた価格においても競争力に関する状況は同じ

1 GWの需要をカバーする2つの異なる新しい発電システムの年間発電コスト

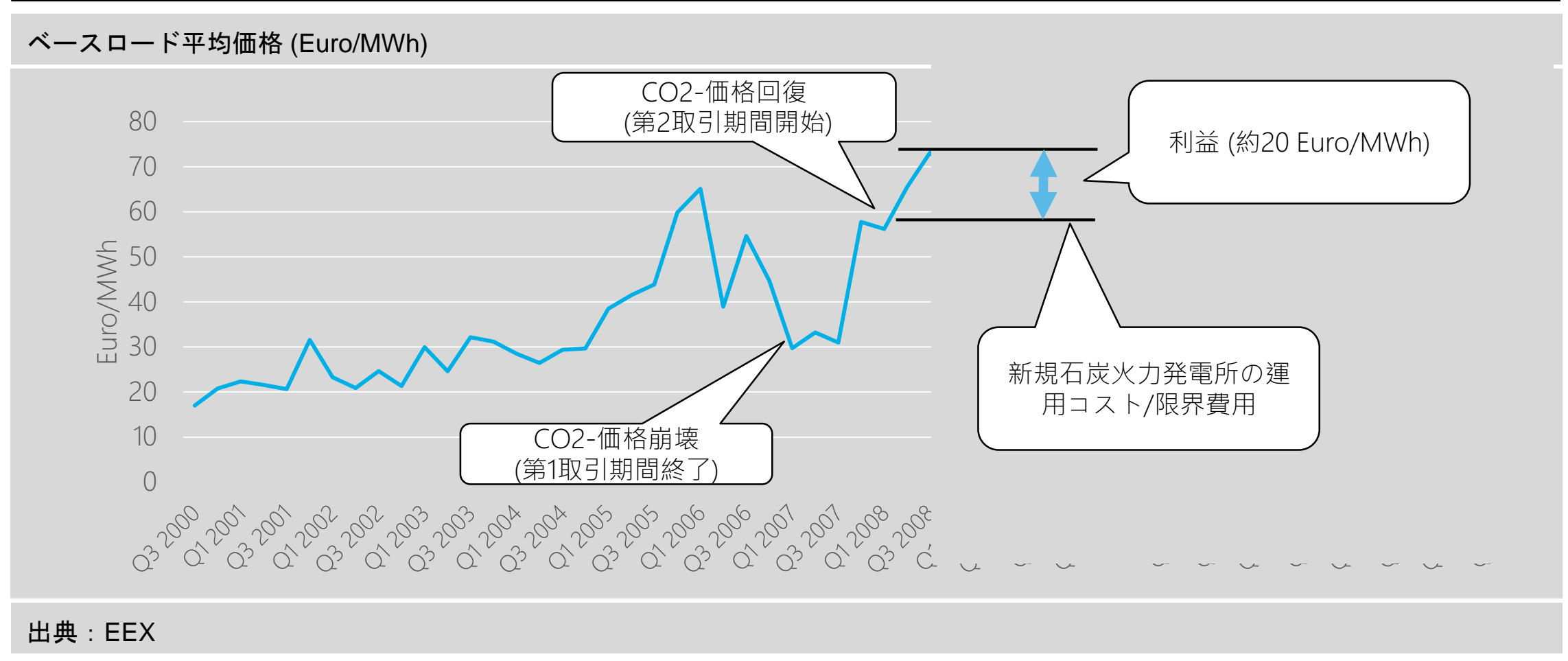


出典：Agora Energiewende (2014年)

3. 近年の石炭火力発電所の市場動向

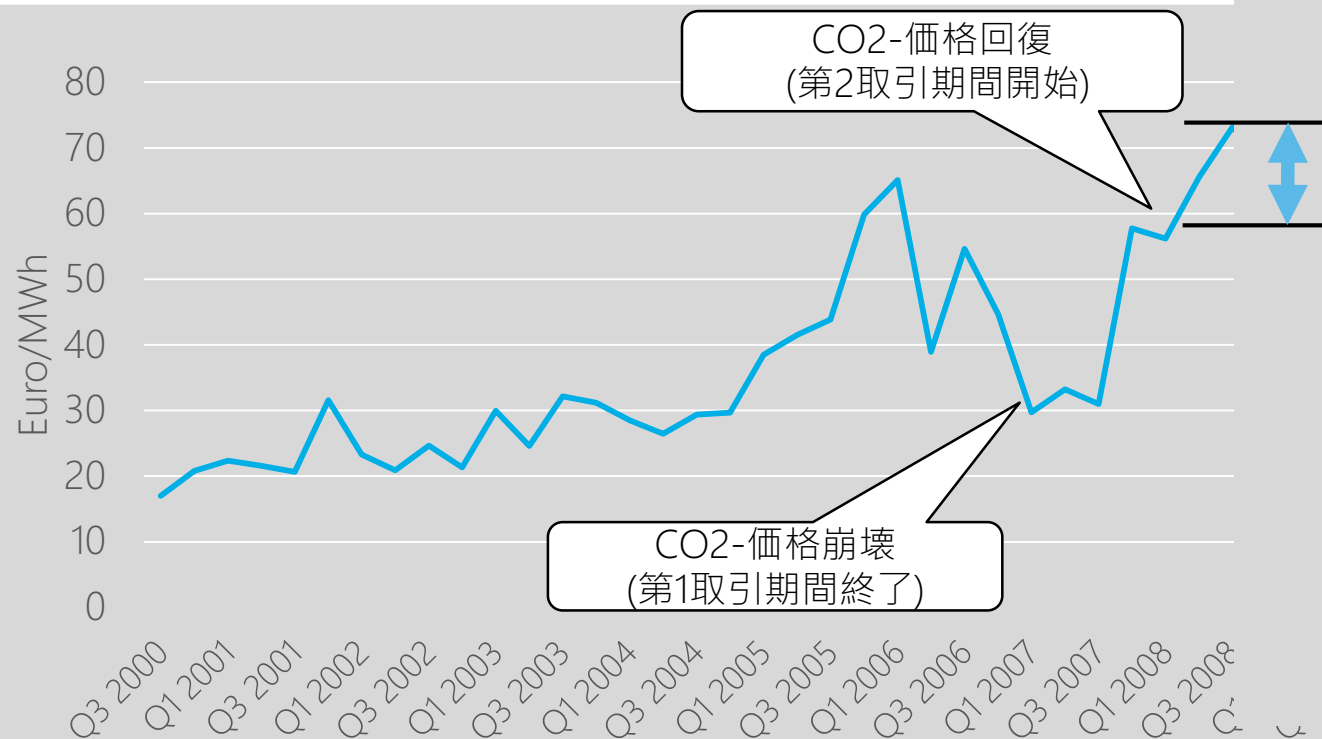


2000-2010年における電力卸売価格の推移



新規石炭火力発電所への投資が魅力的な状況

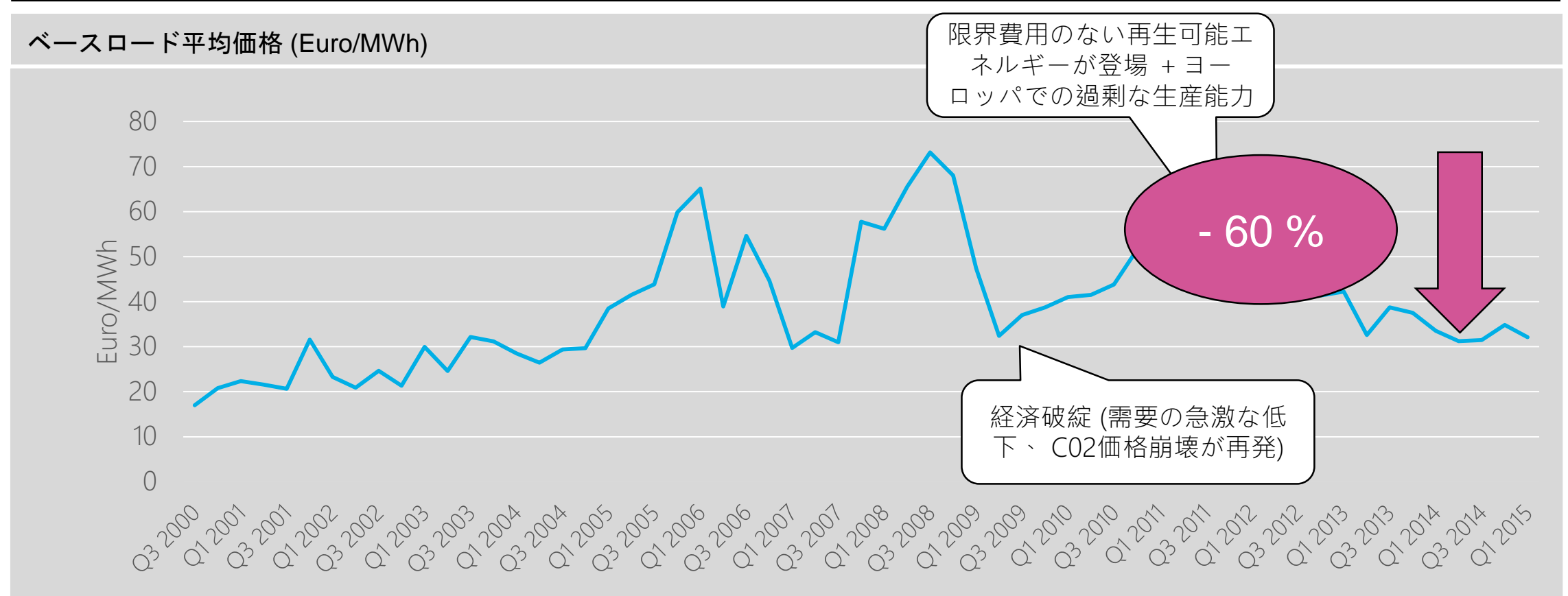
ベースロード平均価格 (Euro/MWh)



- 2006-2008年に新規無煙炭火力発電8基が承認されている
- 累積発電量 8,6 GW
- 投資資本 約136億ユーロ

出典 : EEX, Deutsche Umwelthilfe

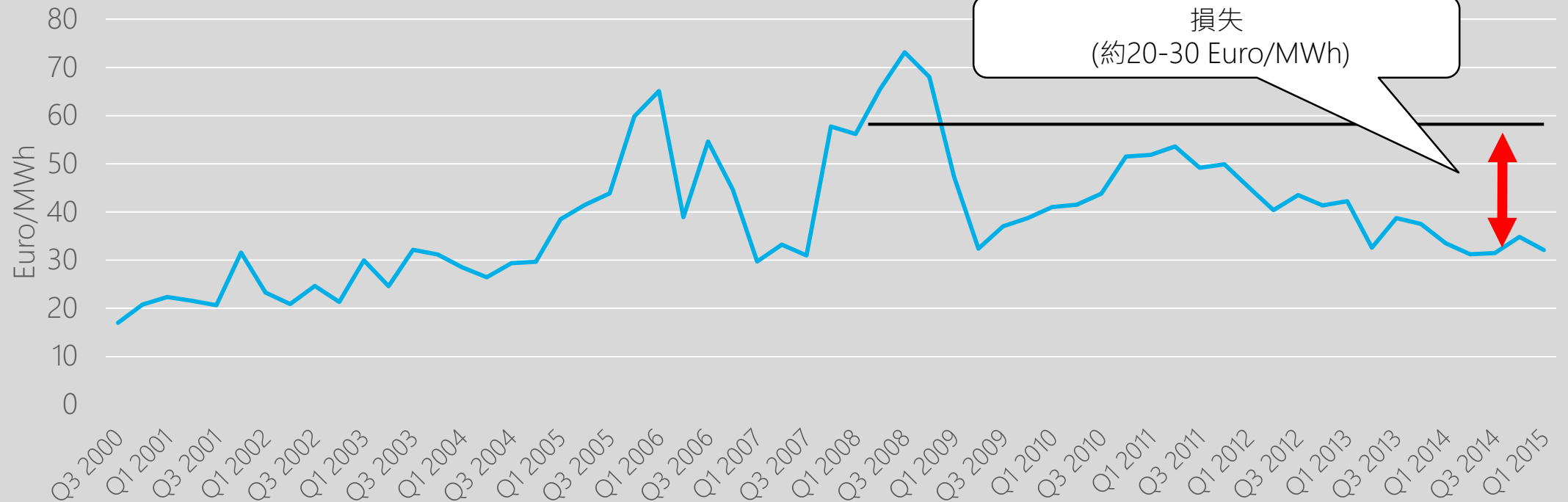
2008年以降は状況が一変



出典 : EEX; Agora Energiewende

2008年以降は状況が一変

ベースロード平均価格 (Euro/MWh)



出典 : EEX; Agora Energiewende

電力会社の株価は2008年以降、80%以上下落

E.On – 2004 – 2015年の市場動向



Finanzen100.de

RWE – 2004 – 2015年の市場動向



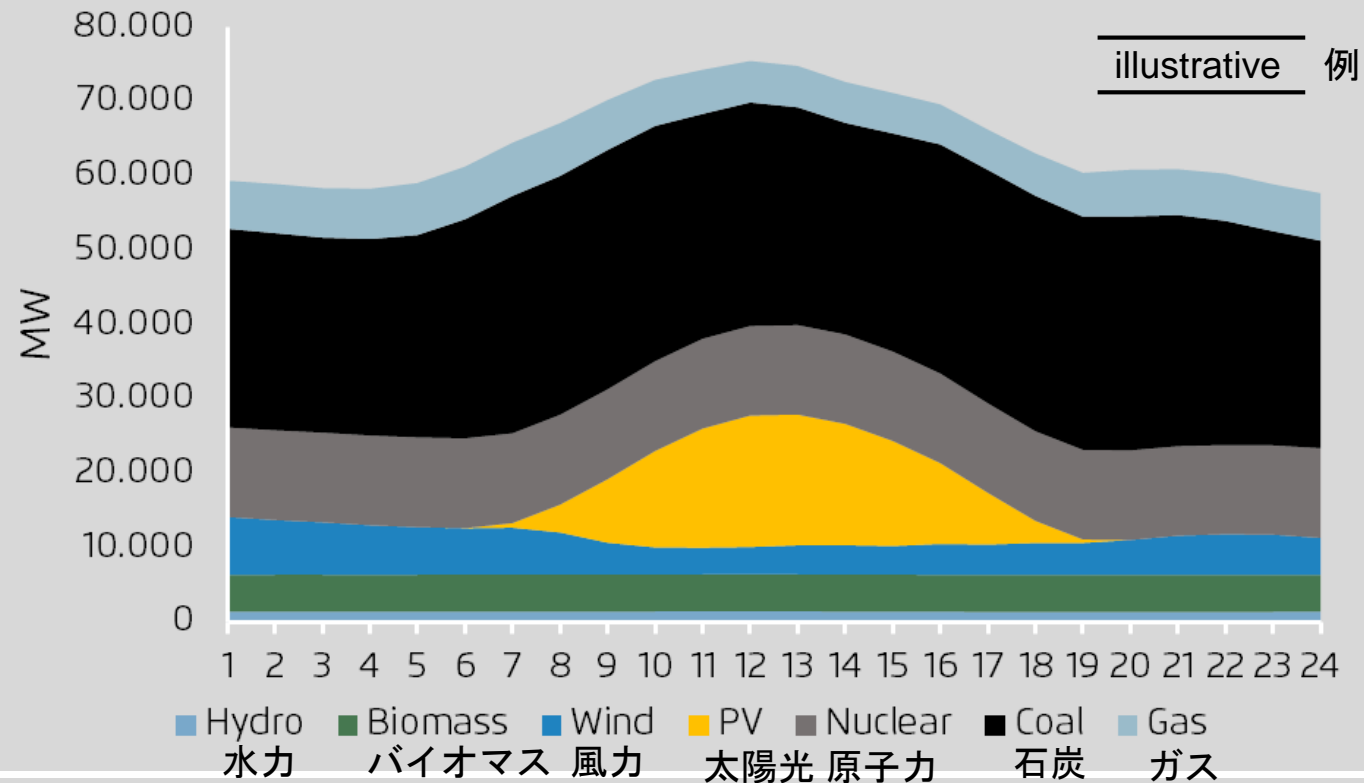
Finanzen100.de

4. 電力市場での太陽光発電の影響



太陽光発電は、古い考えの「ピーク負荷」を抑制

ドイツの発電量例 (2014年3月)



出典：Agora Energiewende (2015年)

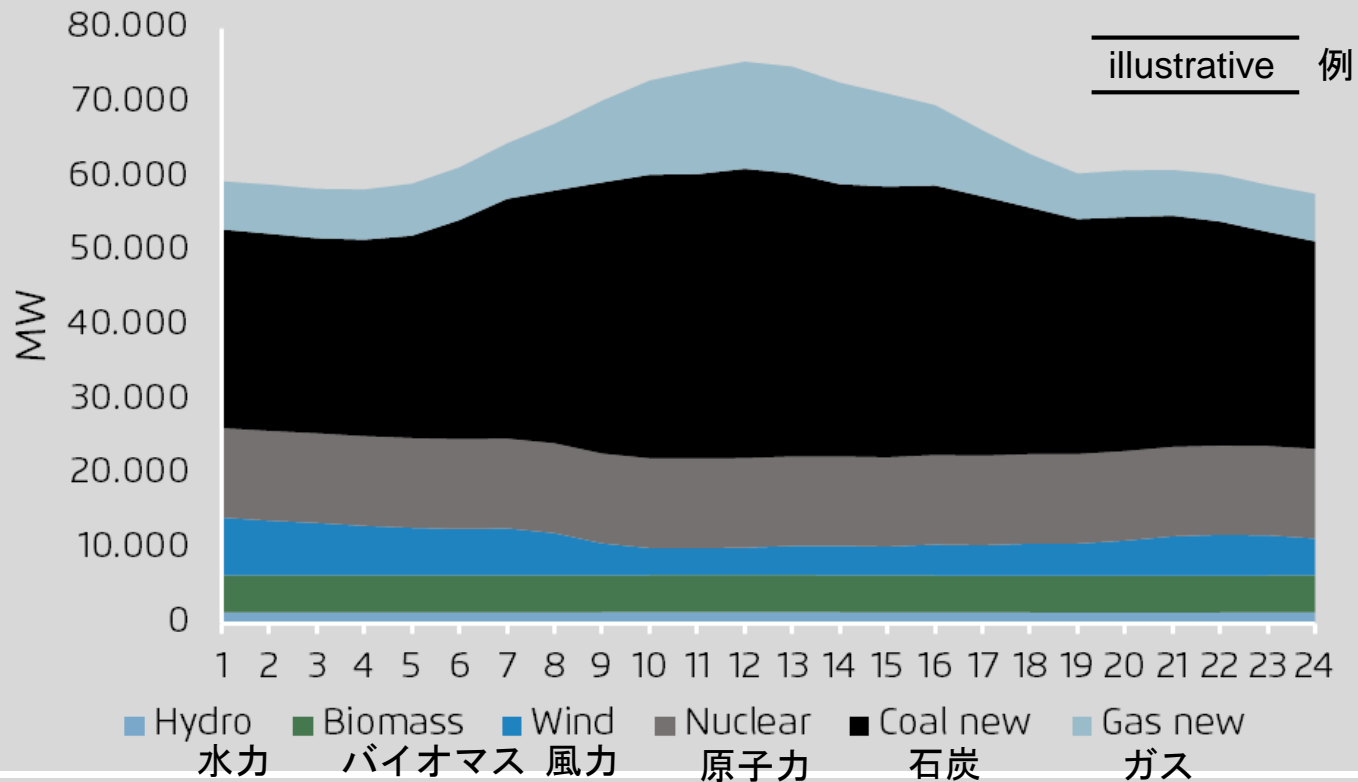
太陽光発電の負荷曲線は平均的なドイツの需要曲線によく対応する

太陽光発電がない場合には、従来の発電所のピーク負荷需要ははるかに高くなることが想定される

その結果、従来の発電所（すなわち、ガス）のピーク負荷の発生が近年の間、大幅に減少する

太陽光発電は、古い考えの「ピーク負荷」を抑制

ドイツの発電量例、太陽光発電無し (2014年3月)



出典 : Agora Energiewende (2015年)

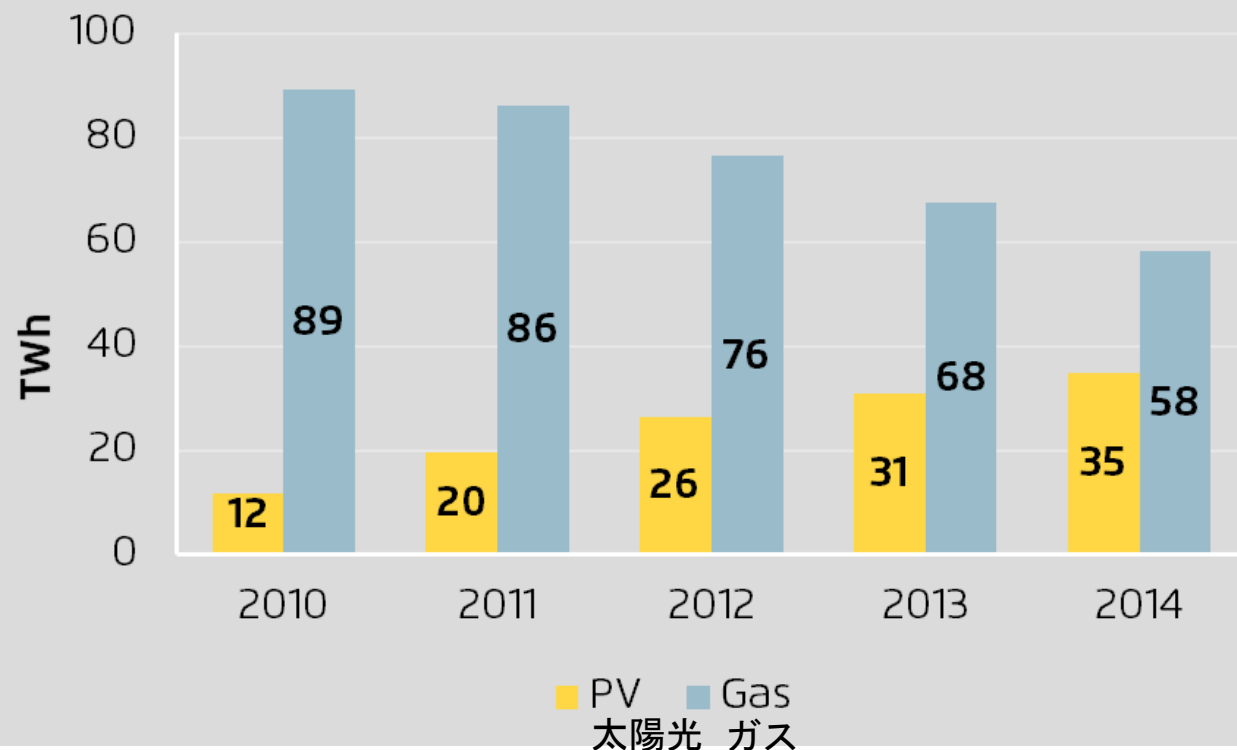
太陽光発電の負荷曲線は平均的なドイツの需要曲線に非常に対応します

太陽光発電がない場合には、従来の発電所のピーク負荷需要はるかに高くなることが想定される

その結果、従来の発電所（すなわち、ガス）のピーク負荷の発生が近年の間、大幅に減少する

天然ガスから太陽光発電への電源の代替が進む

総発電量 2010 – 2014年



出典：AG Energiebilanzen (2015年)

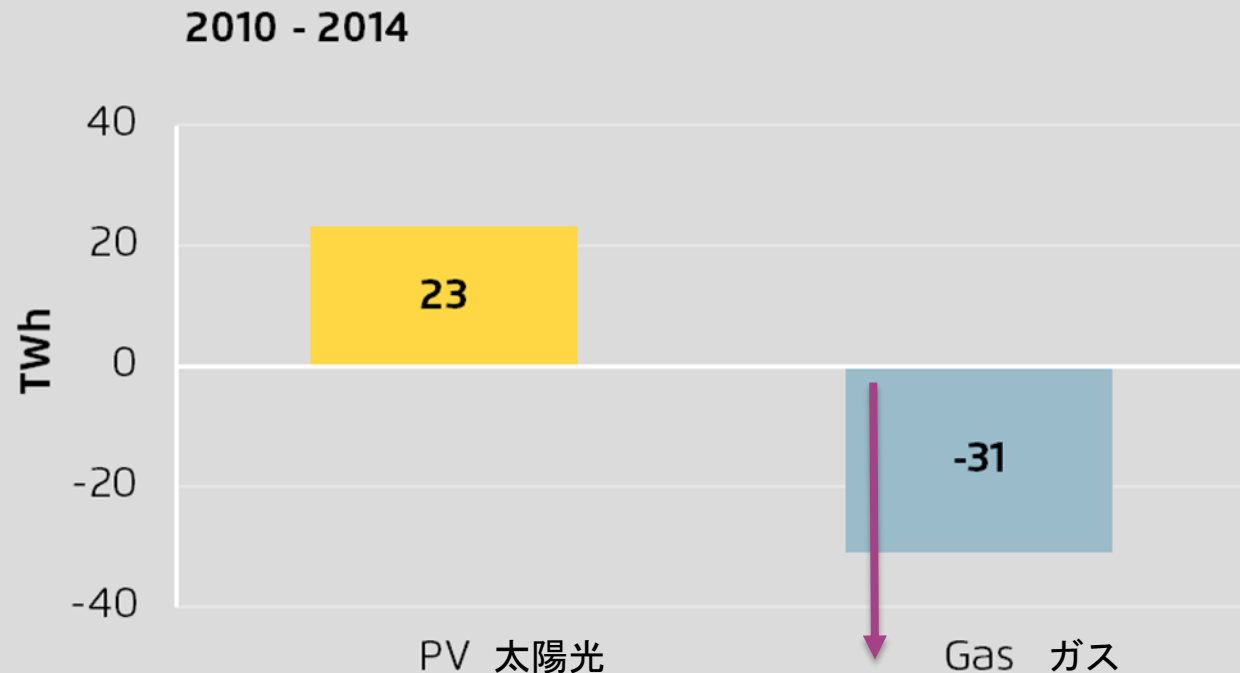
太陽光発電の負荷曲線は平均的なドイツの需要曲線に非常に対応します

太陽光発電がない場合には、従来の発電所のピーク負荷需要はるかに高くなることが想定されます

その結果、従来の発電所（すなわち、ガス）のピーク負荷の発生が近年の間、大幅に減少している

天然ガスから太陽光発電への 電源の代替が進む

総発電量の変化 2010 - 2014年



出典 : AG Energiebilanzen (2015年)

= ドイツの
需要の6%

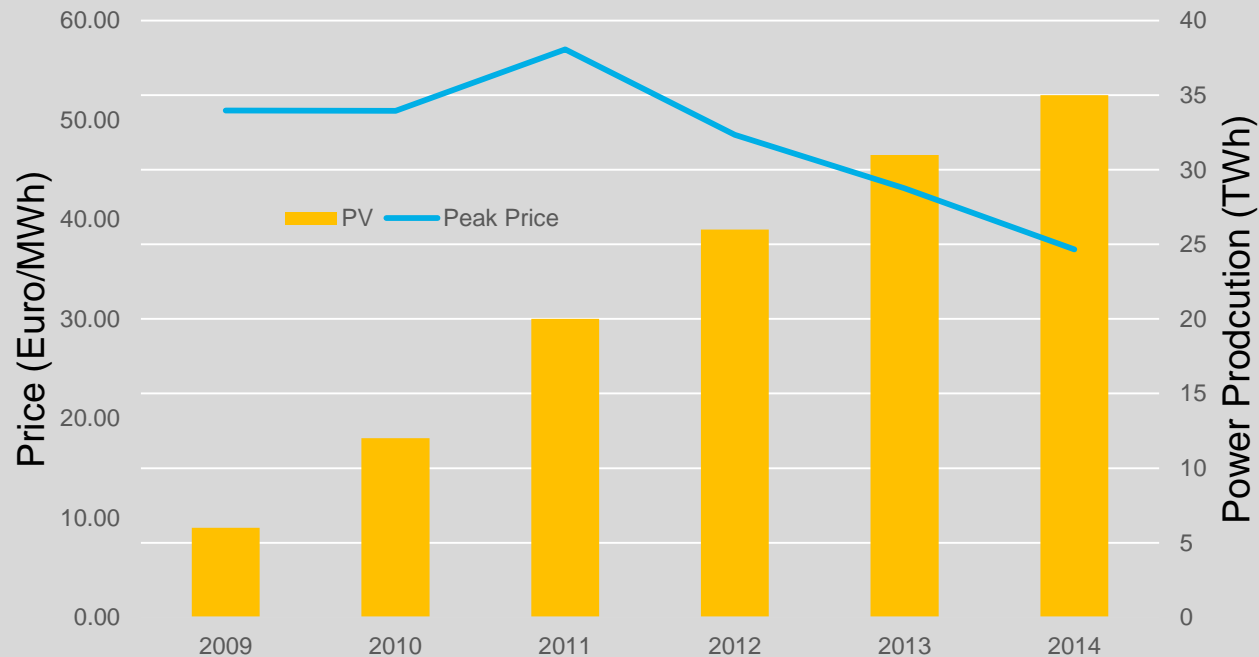
太陽光発電の負荷曲線は平均的なドイツの需要曲線に非常に対応します

太陽光発電がない場合には、従来の発電所のピーク負荷需要はるかに高くなることが想定されます

その結果、従来の発電所（すなわち、ガス）のピーク負荷の発生が近年の間、大幅に減少する

太陽光とその他の再生可能エネルギーが卸売発電価格を下げることに貢献

EPEX-Spotでの平均卸売価格 vs. 太陽光の量



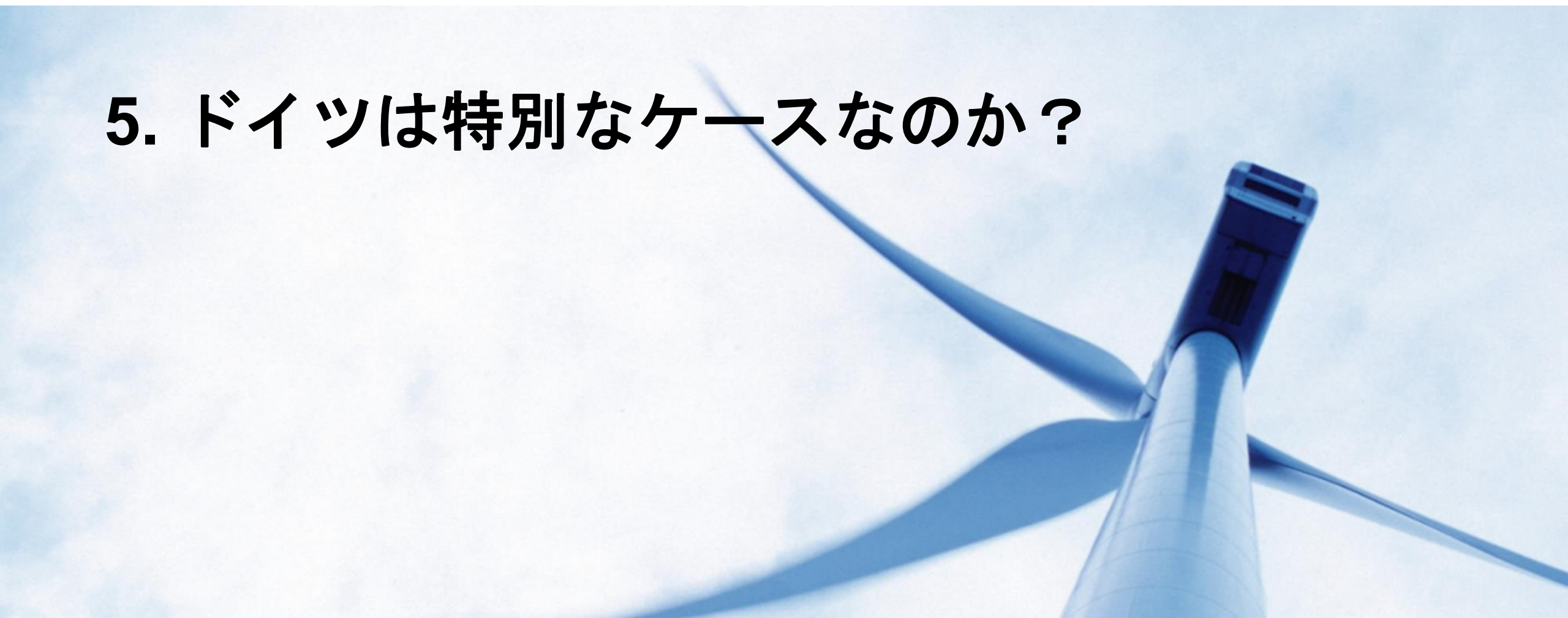
2009年からピーク電力の平均卸売価格が20%以上の低下

効率を伴って、風力と太陽光が主な原動力

電力市場の状況が大会社（e.onなど）のグリーンへの転換を加速

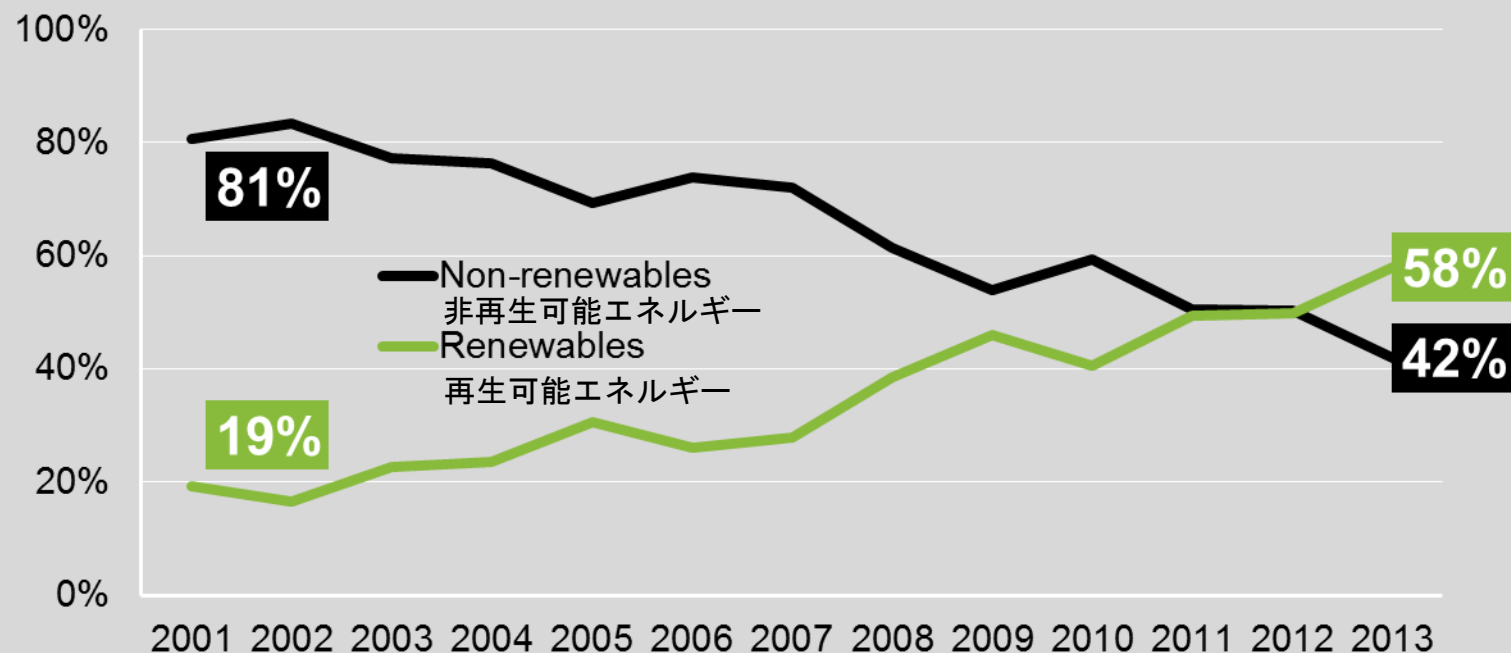
出典：Agora Energiewende (2015年)

5. ドイツは特別なケースなのか？



再生可能エネルギーへの国際的な投資が化石燃料への投資と逆転

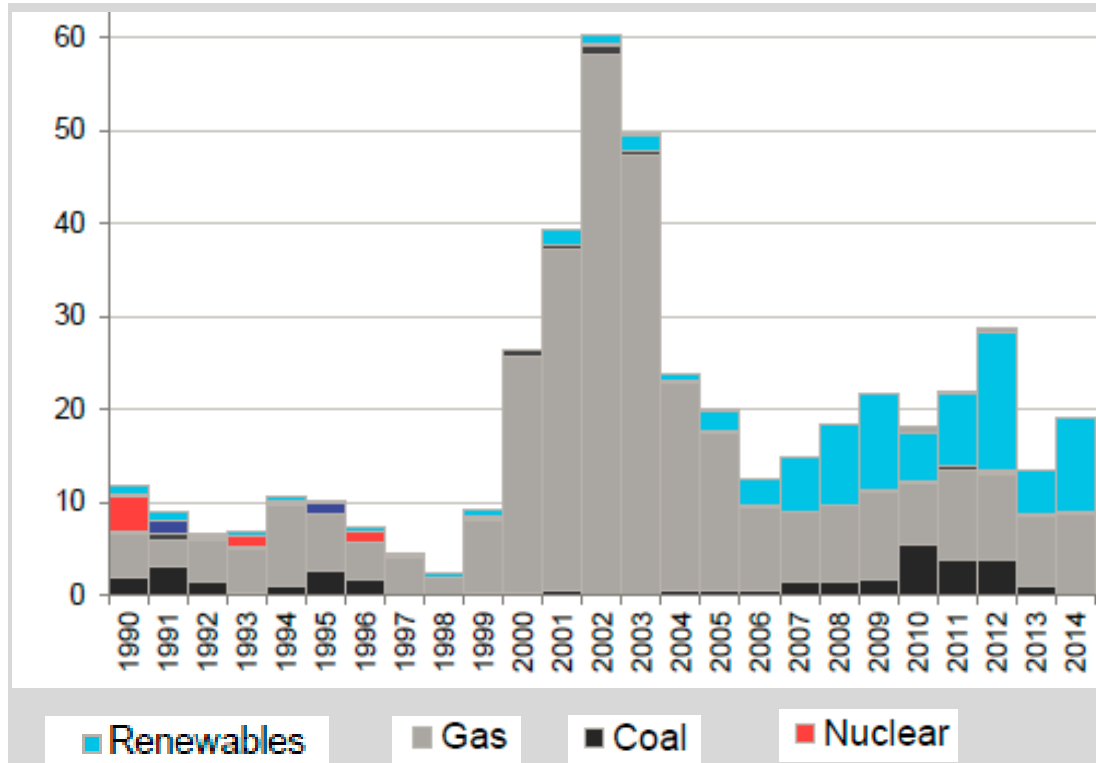
国際的な投資の割合推移 2001 – 2013年



出典：IRENA (2014年)

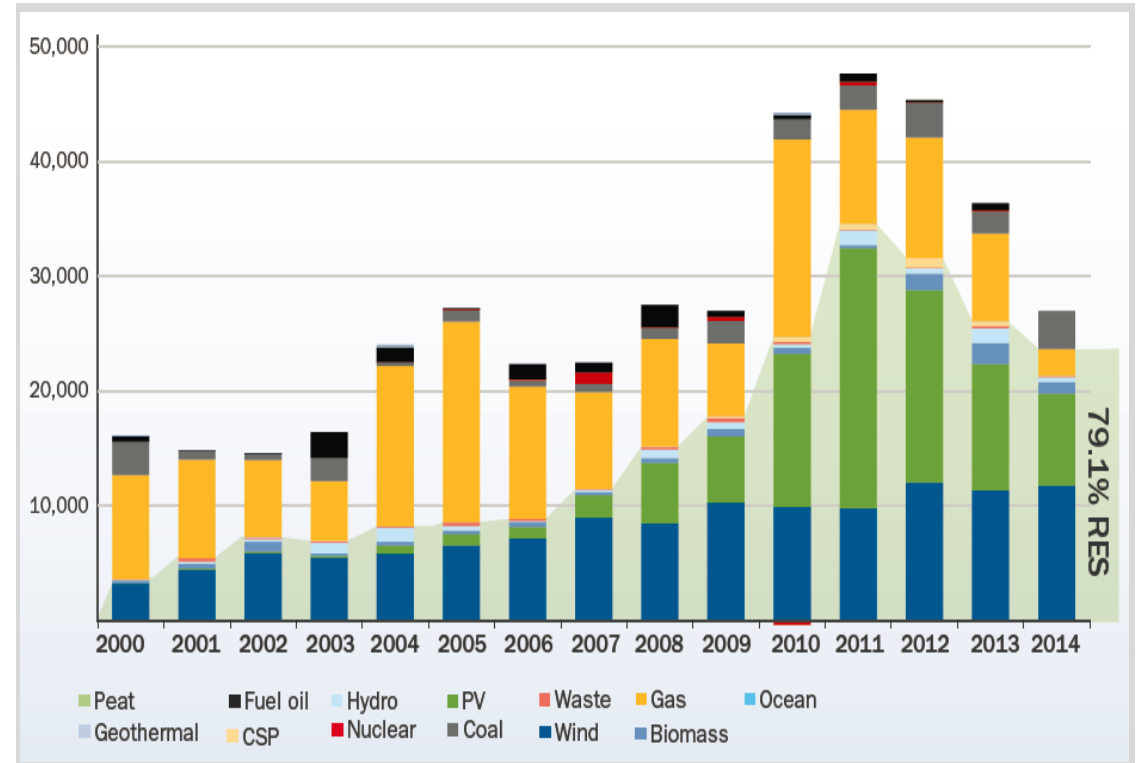
アメリカ、ヨーロッパ、中国では、再生可能エネルギーへの投資が、従来型エネルギーへの投資を上回る

アメリカでの発電所新設. 1990-2014年 (in GW)



出典：Frankfurt School-UNEP Centre/BNEF (2015年)

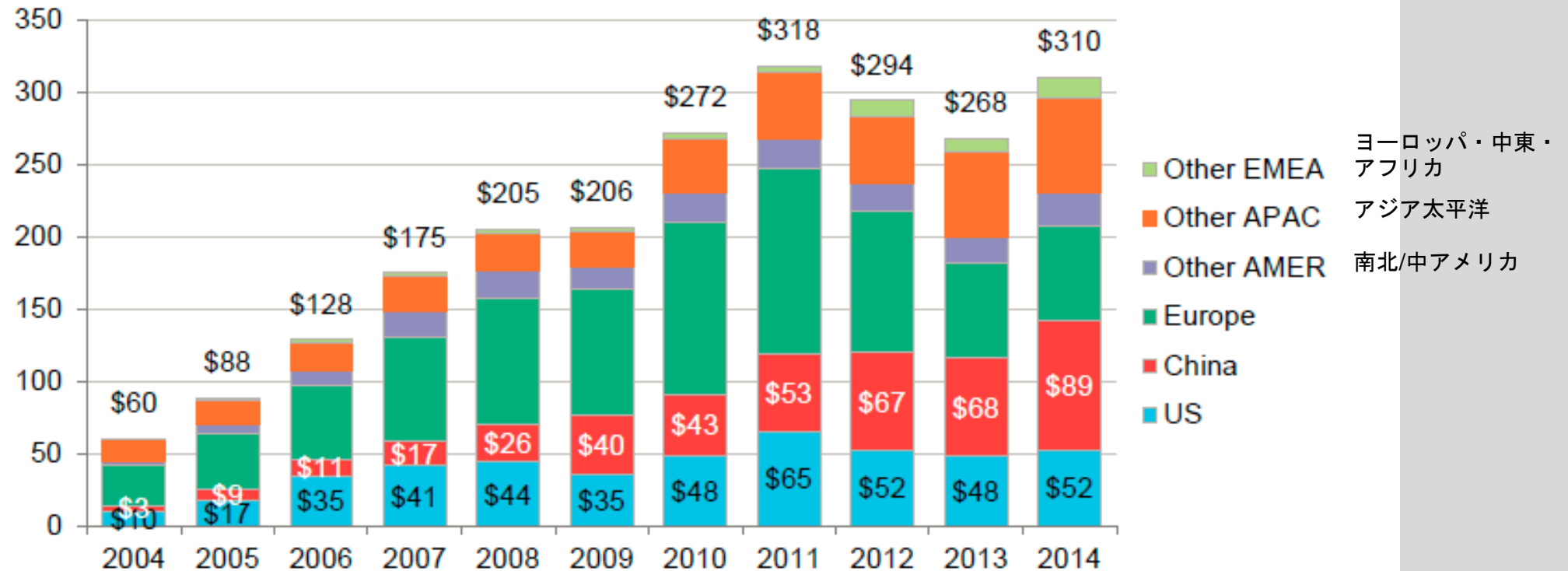
欧州での発電所新設 2000-2014年 (in MW)



出典：EWEA (2015年)

先進国・発展途上国の国際市場で 再生可能エネルギーが普及拡大

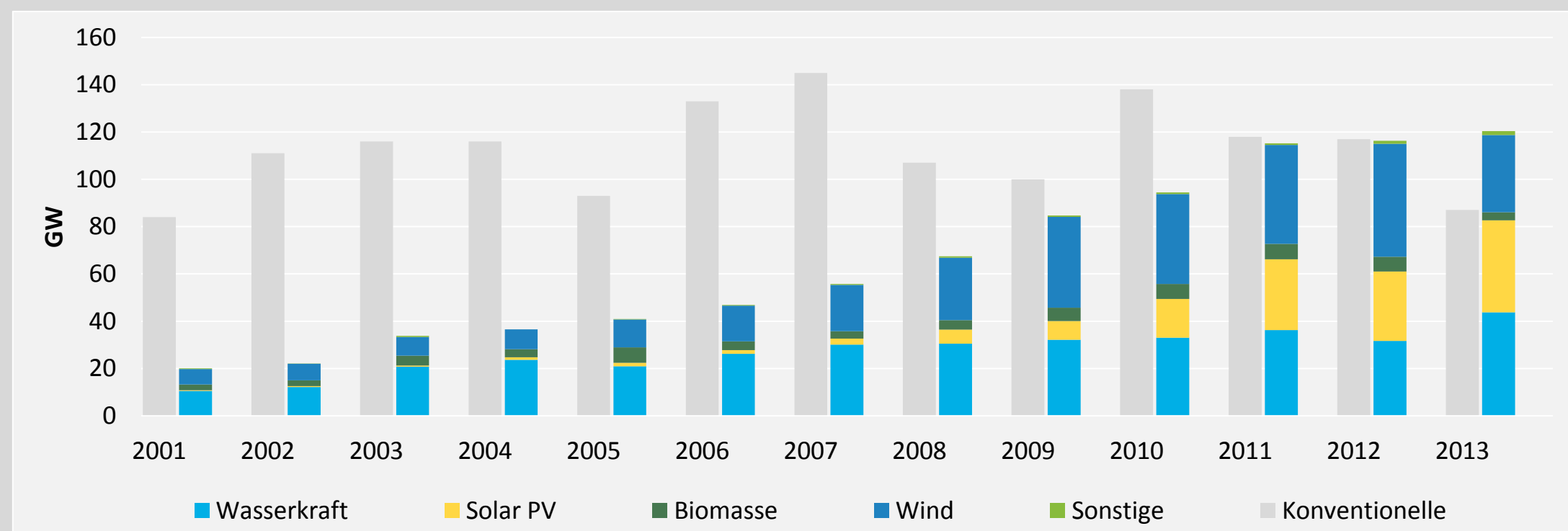
再生可能エネルギーへの国際的な投資 10億USAドル



出典：Bloomberg New Energy Finance (2015年)

風力と太陽光は国際的な新設発電所において 有力なエネルギー源である

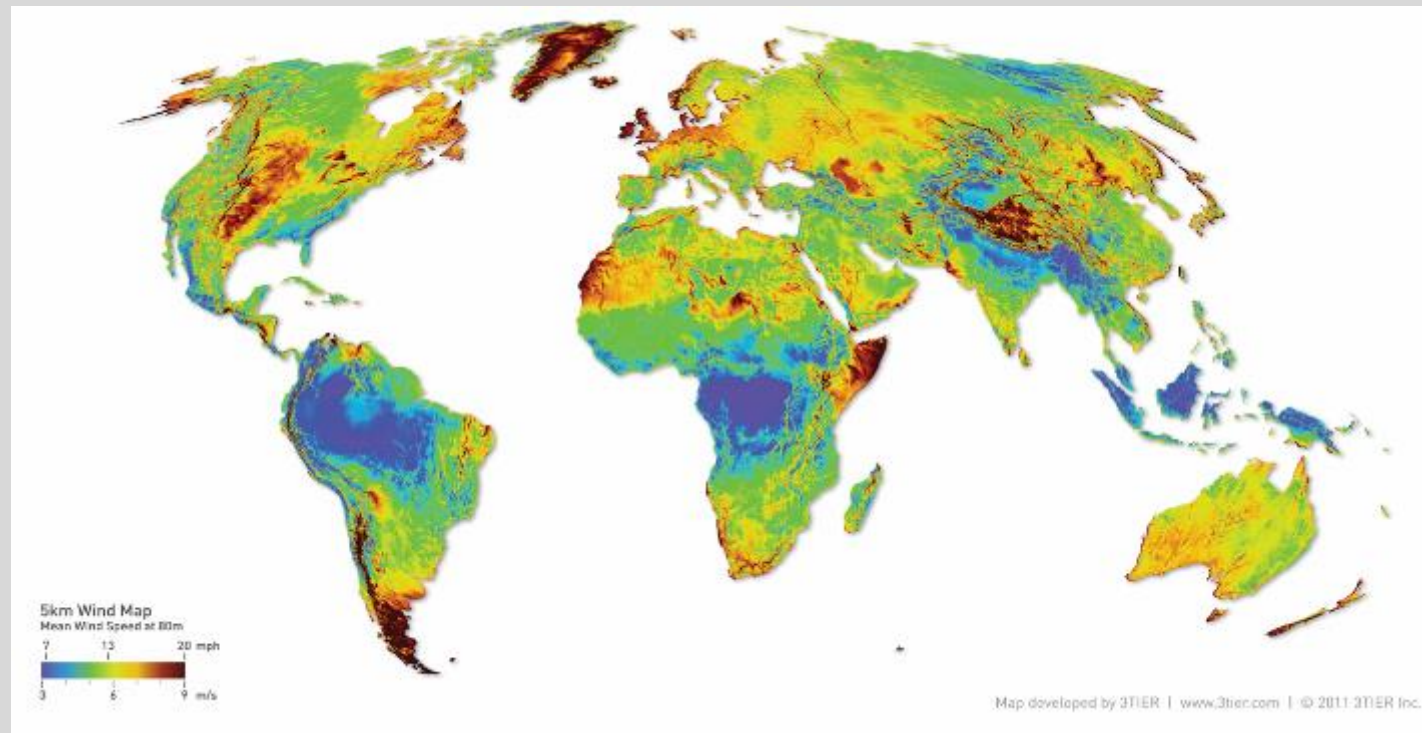
国際的な種類別の発電容量増加分 2001-2013年



出典：IRENA (2014年)

風力発電：理由は単純 世界中どこでも風が吹く...

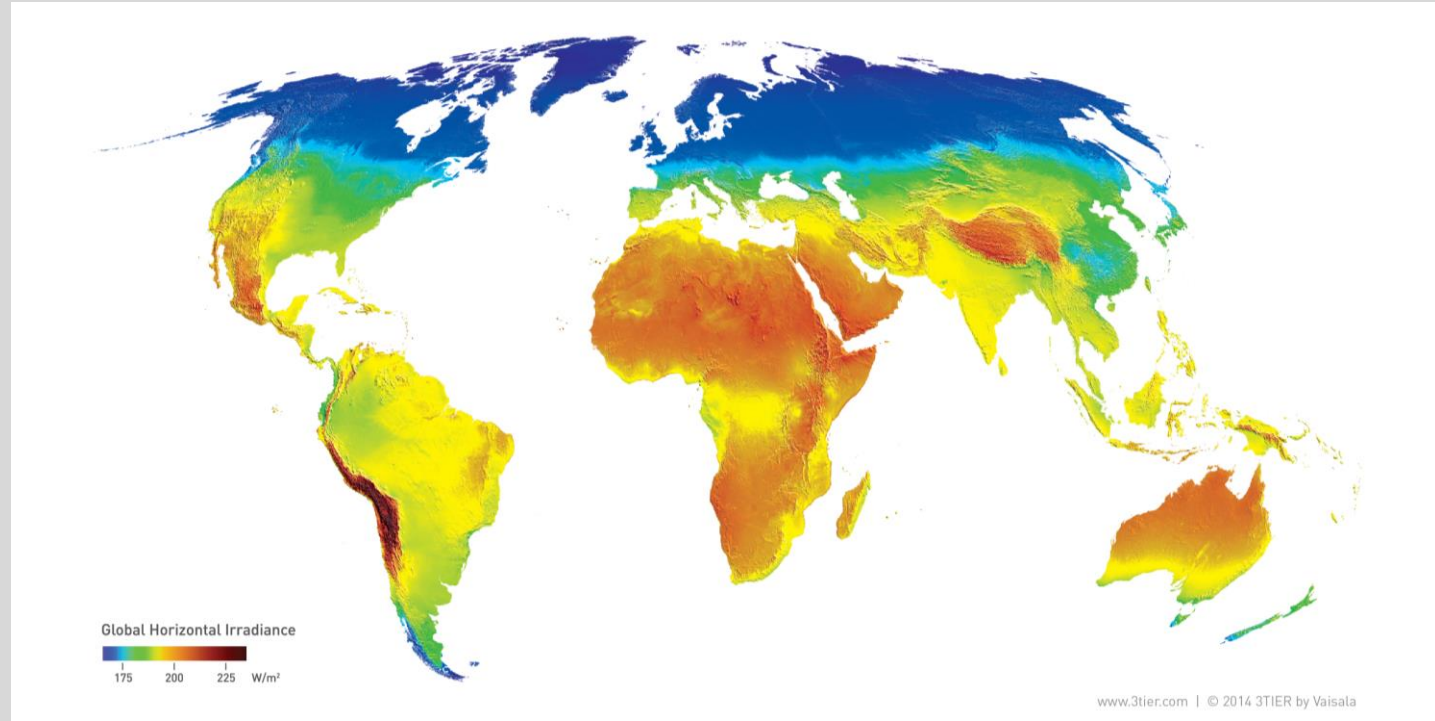
平均風速（標高80m）



出典：3TIER (2011年)

太陽光発電： ほとんどの地域ではドイツより日射量が多い！

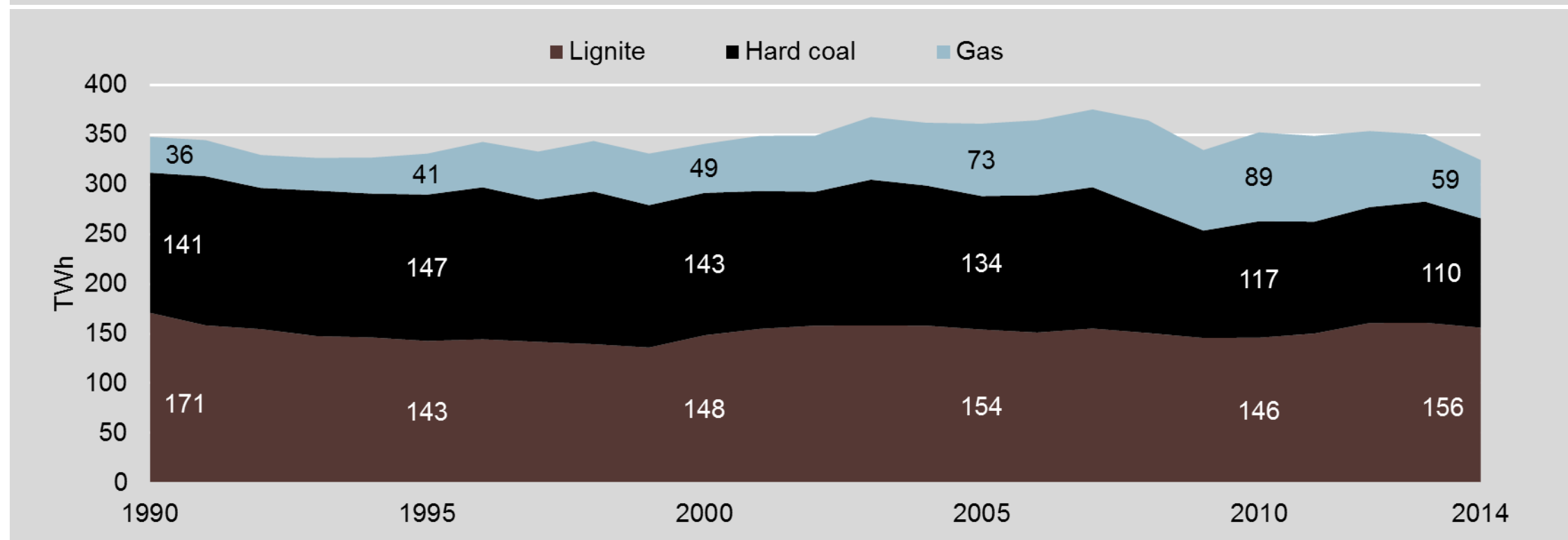
面積あたりの年間日射量 W/m²



出典：3TIER (2011年)

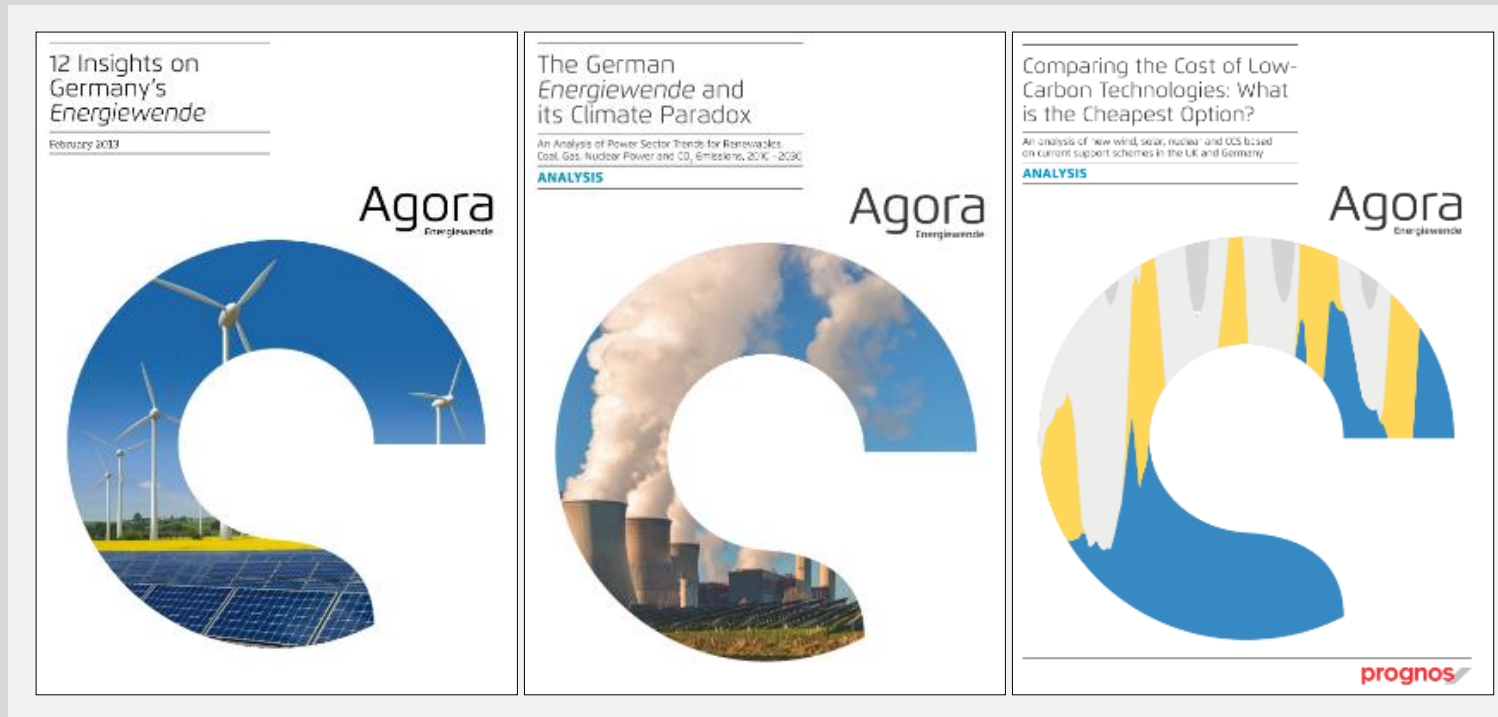
ドイツでは化石燃料（特に石炭）を使った発電所に関して一貫性のある戦略が必要

褐炭、無煙炭、ガス発電所からの総発電量 1990-2014年



出典：AG Energiebilanzen (2014年)

追加情報・事例は以下のサイトで閲覧可能
www.agora-energiewende.org



Agora Energiewende
Rosenstraße 2
10178 Berlin

T +49 (0)30 284 49 01-00
F +49 (0)30 284 49 01-29
www.agora-energiewende.de



ご清聴ありがとうございました。

Agora Energiewende is a joint initiative
of the Mercator Foundation and
the European Climate Foundation.

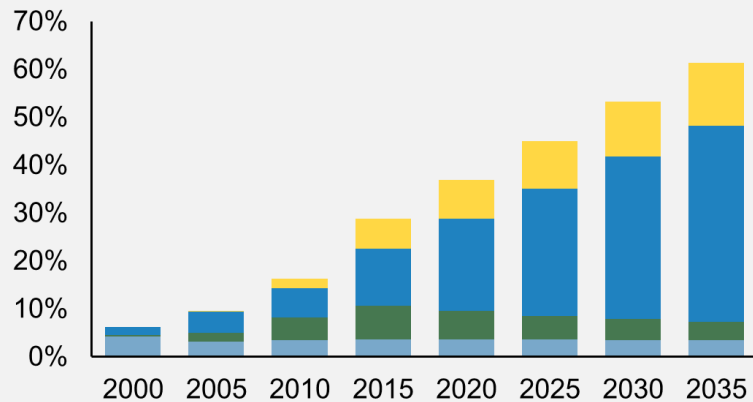
補足 1.



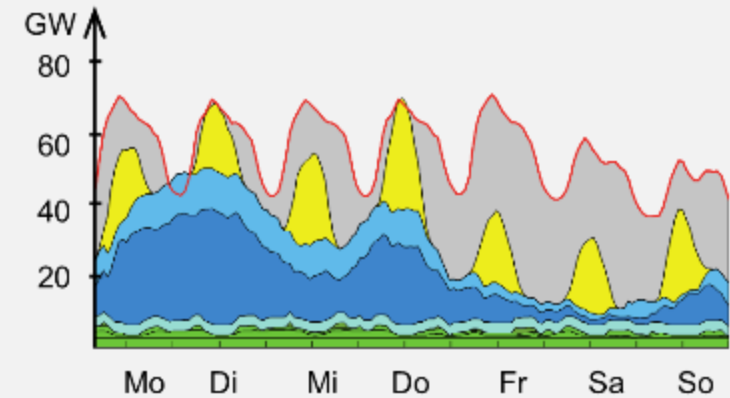
柔軟性への挑戦



変動する再生可能エネルギー (風力と太陽光)は、 電力システムに変革をもたらす

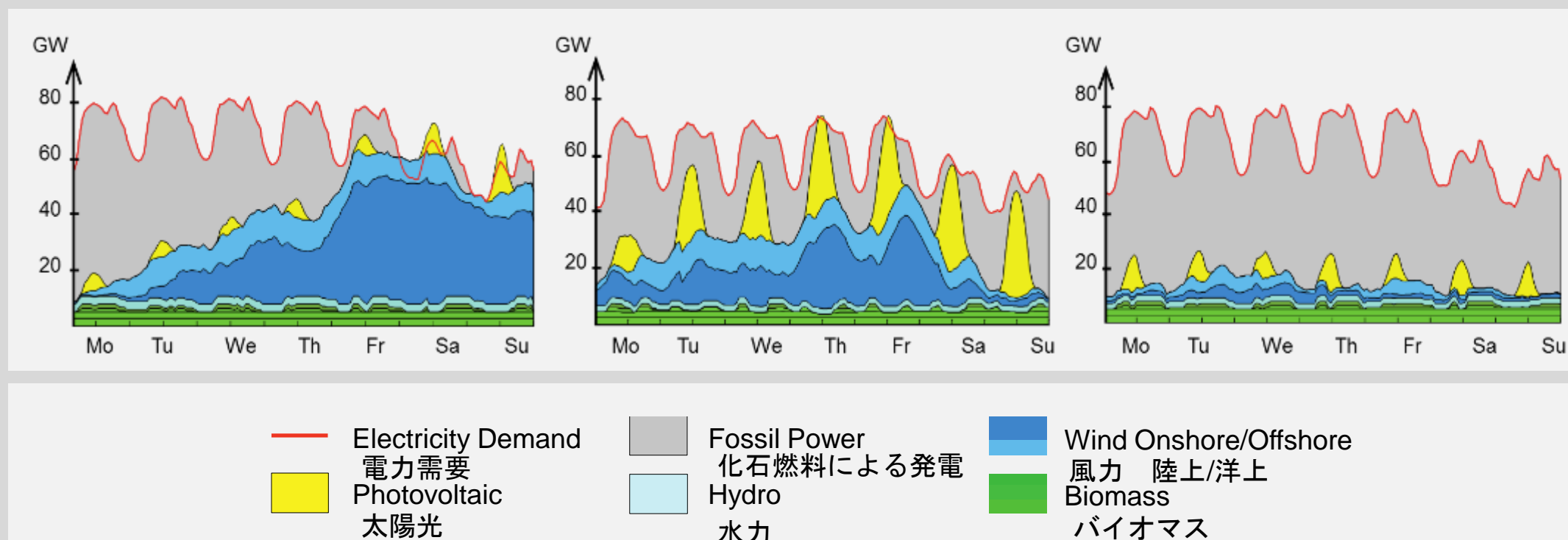


天候に依存
資本集約的
ゼロの限界費用



将来の電力システムには変動する風力と太陽光からの発電を組み合わせる必要がある

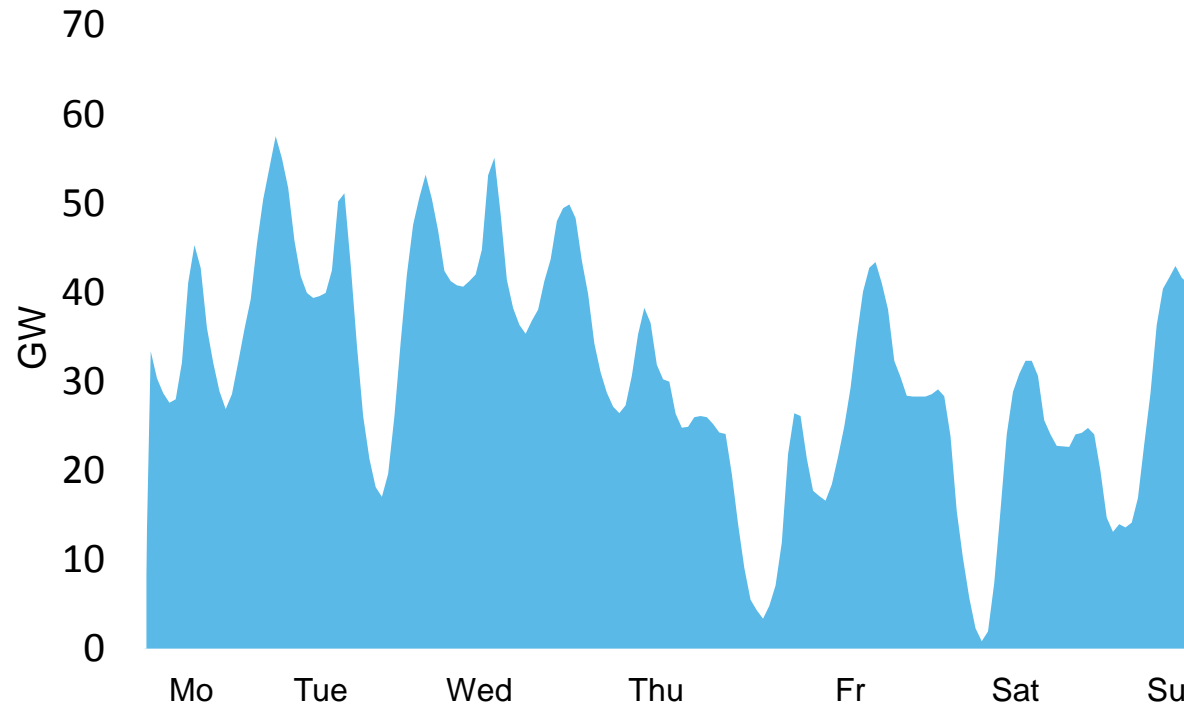
2023年2月,8月,11月 各月における発電と需要のサンプル（週単位）



出典：Agora Energiewende (2013年)

残余需要は重要な変数

2023年2月の残留負荷サンプル（週単位） GW



変動する再生可能エネルギーの割合が増えて、ベースロードの容量がほとんど必要なくなる

その代わりに、柔軟なリソース（需要と供給側の両方）は、残余需要をカバーするために必要とされる

残余需要は、再生可能エネルギー発電量から需要を引いたものと定義される

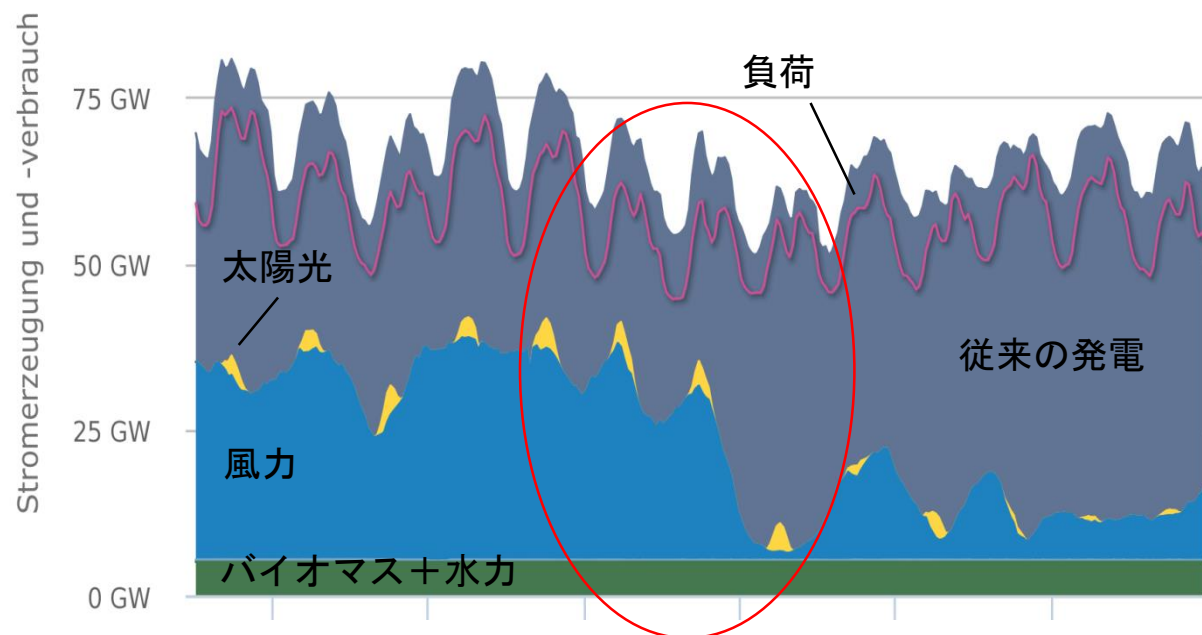
出典：gora Energiewende/RAP (2013年)

ケーススタディ 1

2014年 クリスマスの従来型発電の柔軟性

2014年12月20日から31日のドイツでの発電状況

発電と需要



12月24,25日では、風力の発電が大きい

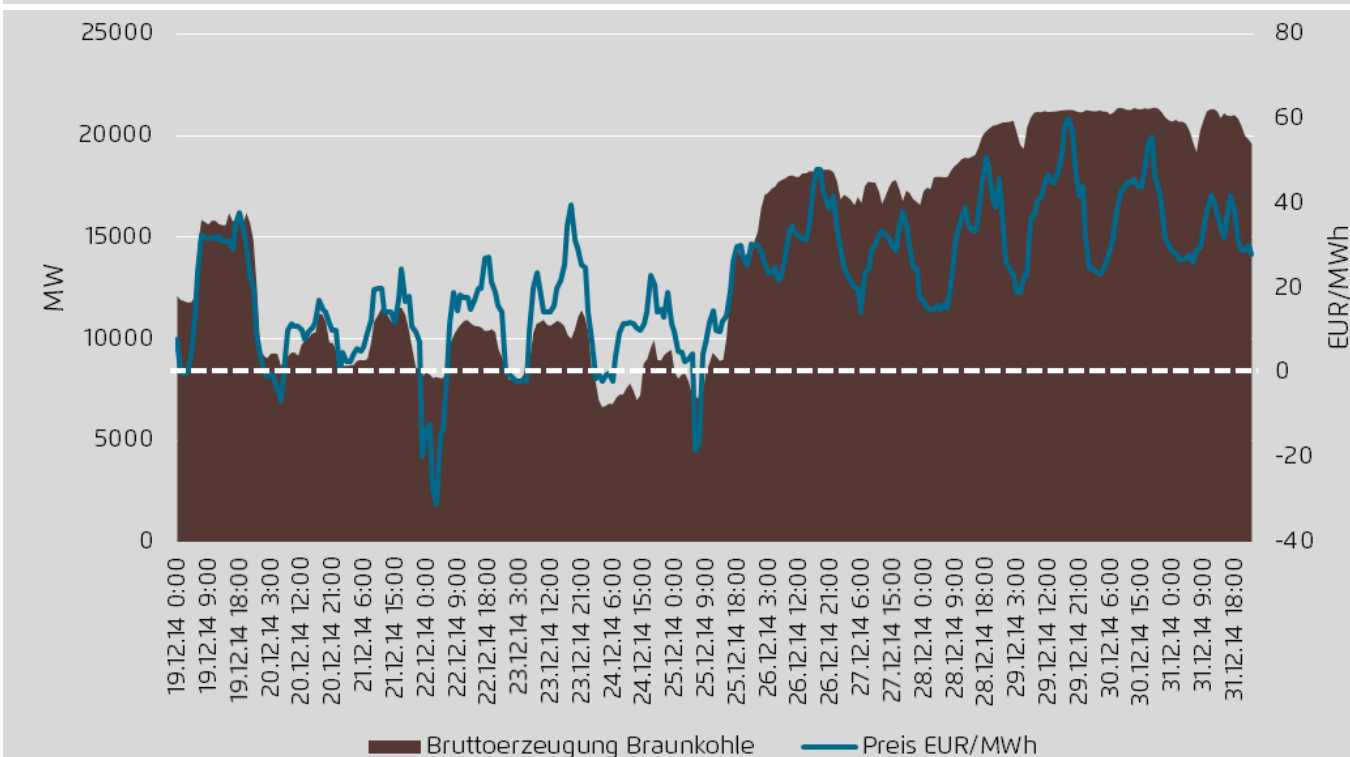
クリスマス休暇の12月24,25日は需要が小さい (44,5 GWで最少)

12月25日夜/26日で劇的な風力の発電の低下

出典 : Agora Energiewende 2015年

従来型発電（褐炭）の変動

褐炭発電所の発電と市場価格（2014年12月19日から31日）



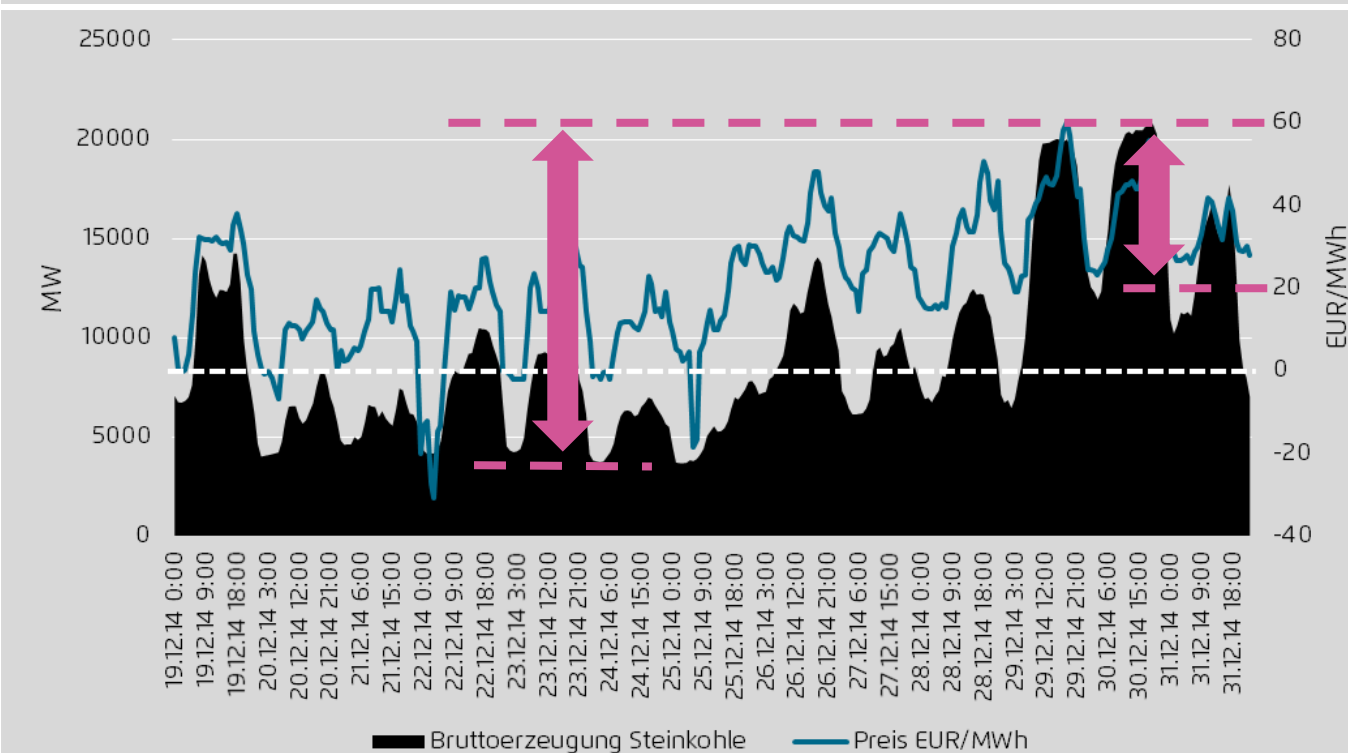
とても稀: 褐炭発電所は比較的柔軟に反応し、発電量を最低レベルであるたった6.2GWまで減らした

26日から先は、褐炭の運転は通常まで戻った (20 GWあたり)

出典：Agorameter 2015年

従来型発電（無煙炭）の変動

無煙炭の発電と市場価格（2014年12月19日から31日）



柔軟性の高いガスプラントがなお高額なため、無煙炭発電所は、システムに柔軟性を提供する必要がある

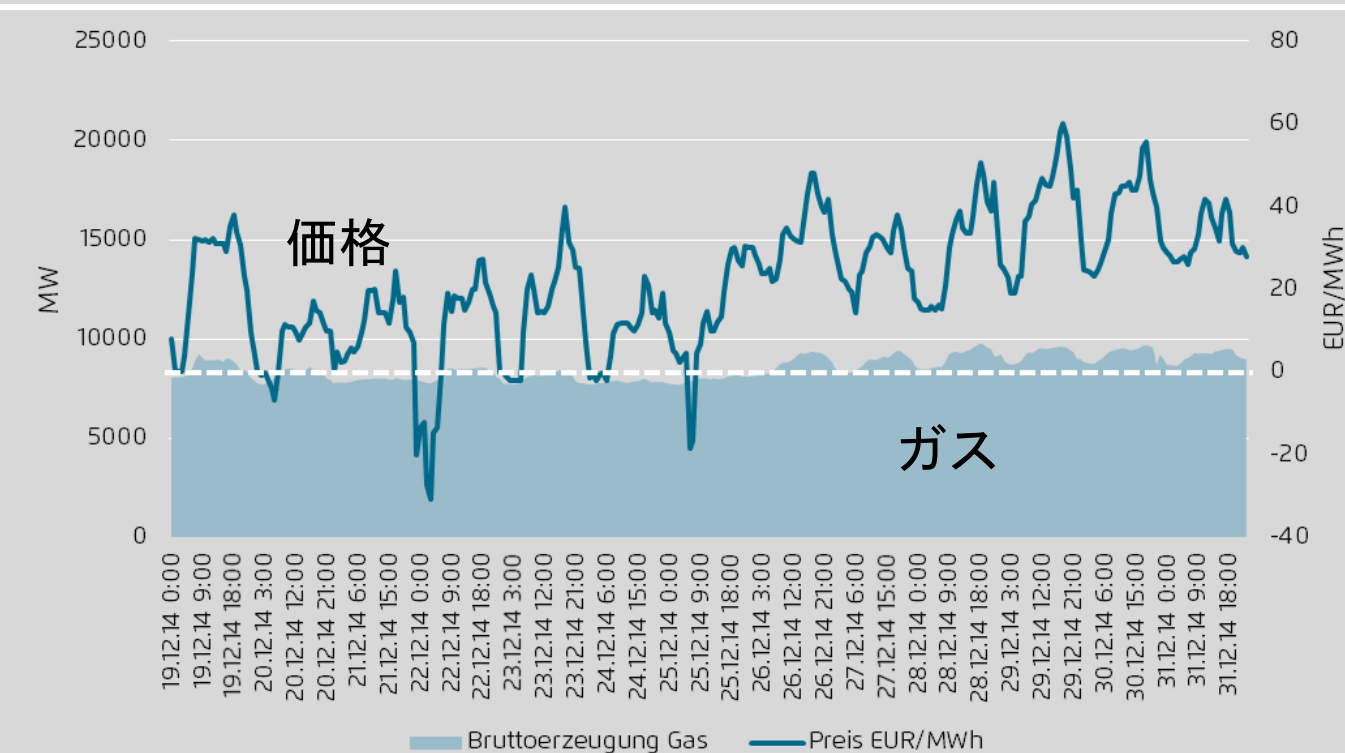
無煙炭発電所は、一週間に15GW、一日に8GWの運転の上下降が出来ることが証拠されている

最低負荷運転容量は比較的低い (5,000 MW以下)

出典：Agorameter 2015年

従来型発電（ガス）の変動

ガスの発電と市場価格（2014年12月19日から31日）



ガス発電所は、従来技術で最も限界費用が高く、必要なかった（約30 GWは利用可能）。

唯一の例外：CCGTの最低負荷運転容量は、7500MWで柔軟ではない。

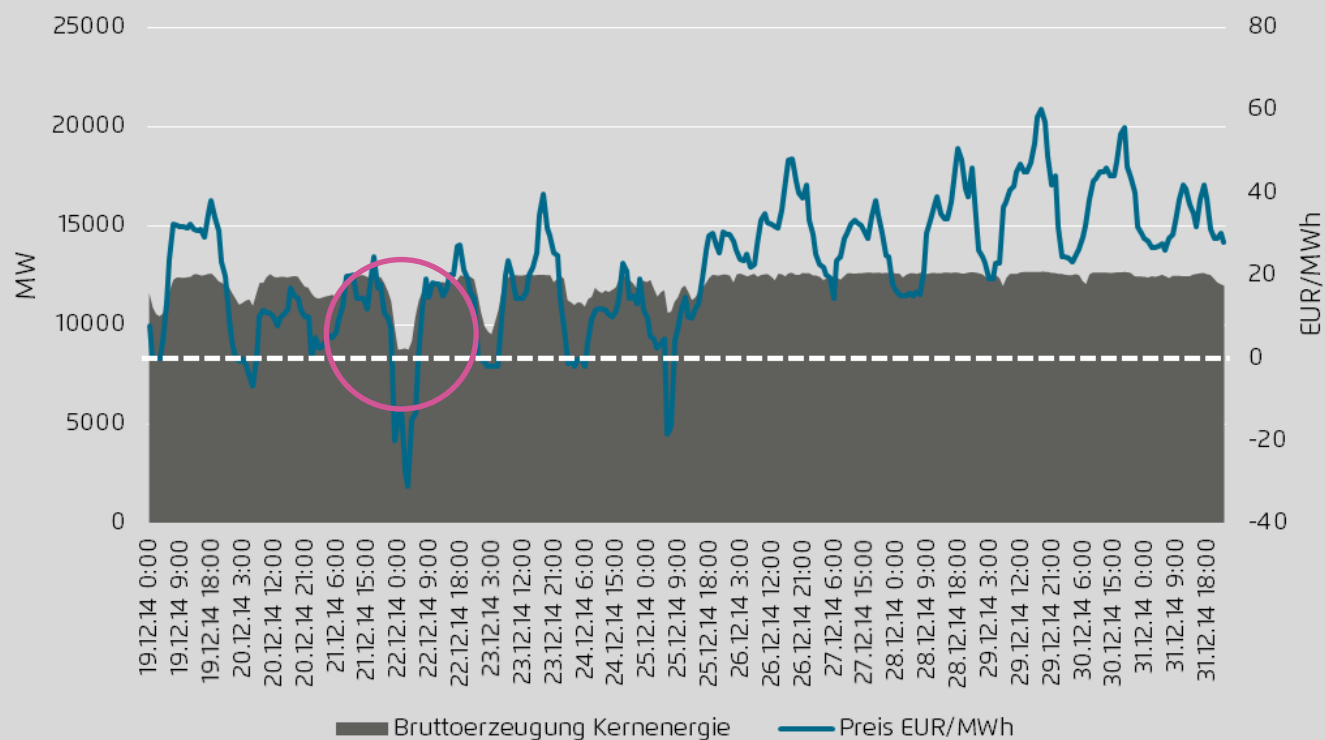
電力価格が高く、再エネが少なくなった時だけ、ガス発電所の発電がわずかに増加（12月26-31日）

市場価格は6日の内、7回は0まで下落し、2回は-20EUR/MWh以下となっています

出典：Agorameter 2015年

従来型発電（原子力）の変動

原子力の発電と市場価格（2014年12月19日から31日）



原子力発電所は、従来の技術で最も限界コストが低いです、相対的に融通が利かない

市場価格がとても低い時のみ原子力発電所は、わずかに発電を減少

市場価格は6日の内、7回は0まで下落し、2回は-20EUR/MWh以下となっている

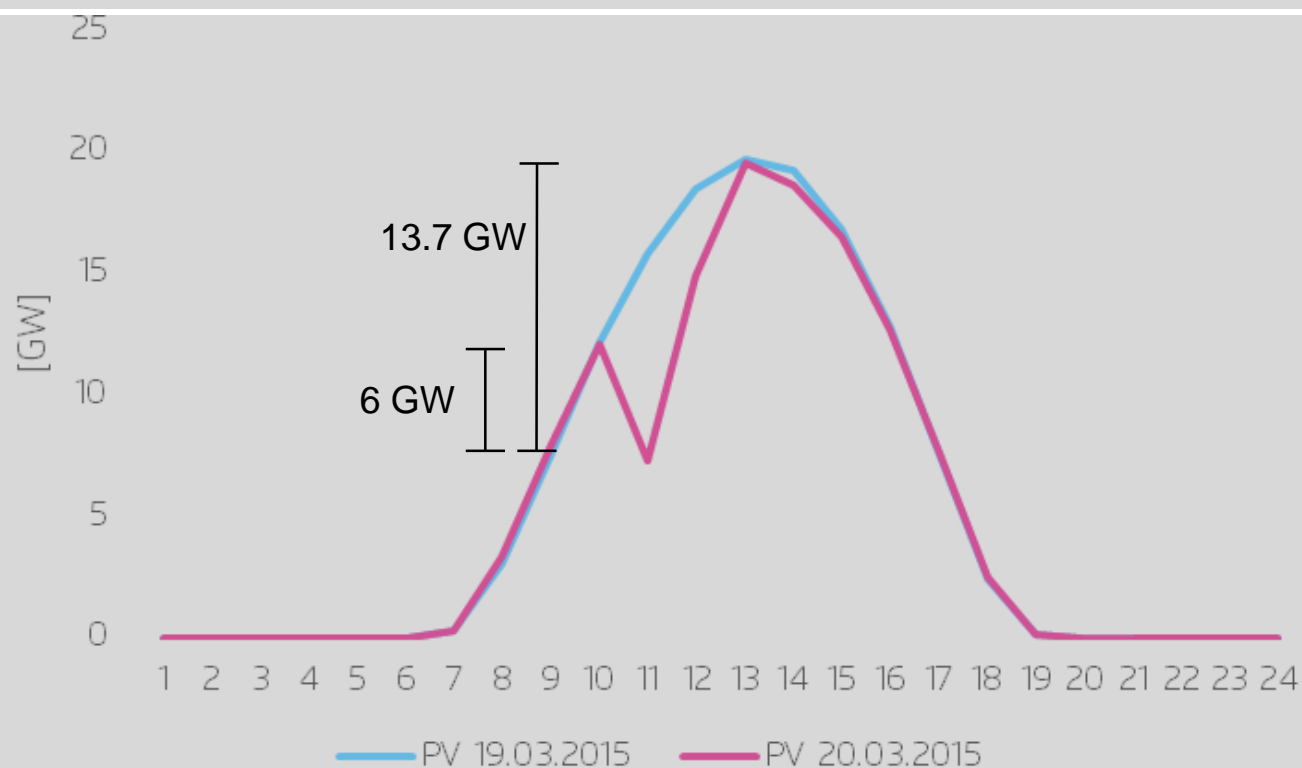
出典：Agorameter 2015年

ケーススタディ 2

2015年3月20日 日食

通常とは異なる変動への対応

太陽光の発電量 2015年3月19-20日



日食のため、太陽光の発電量は65分の内、6GW下降（10時から11時半の間で）、そして75分の内約13.7GW上昇（11時半から1時の間で）

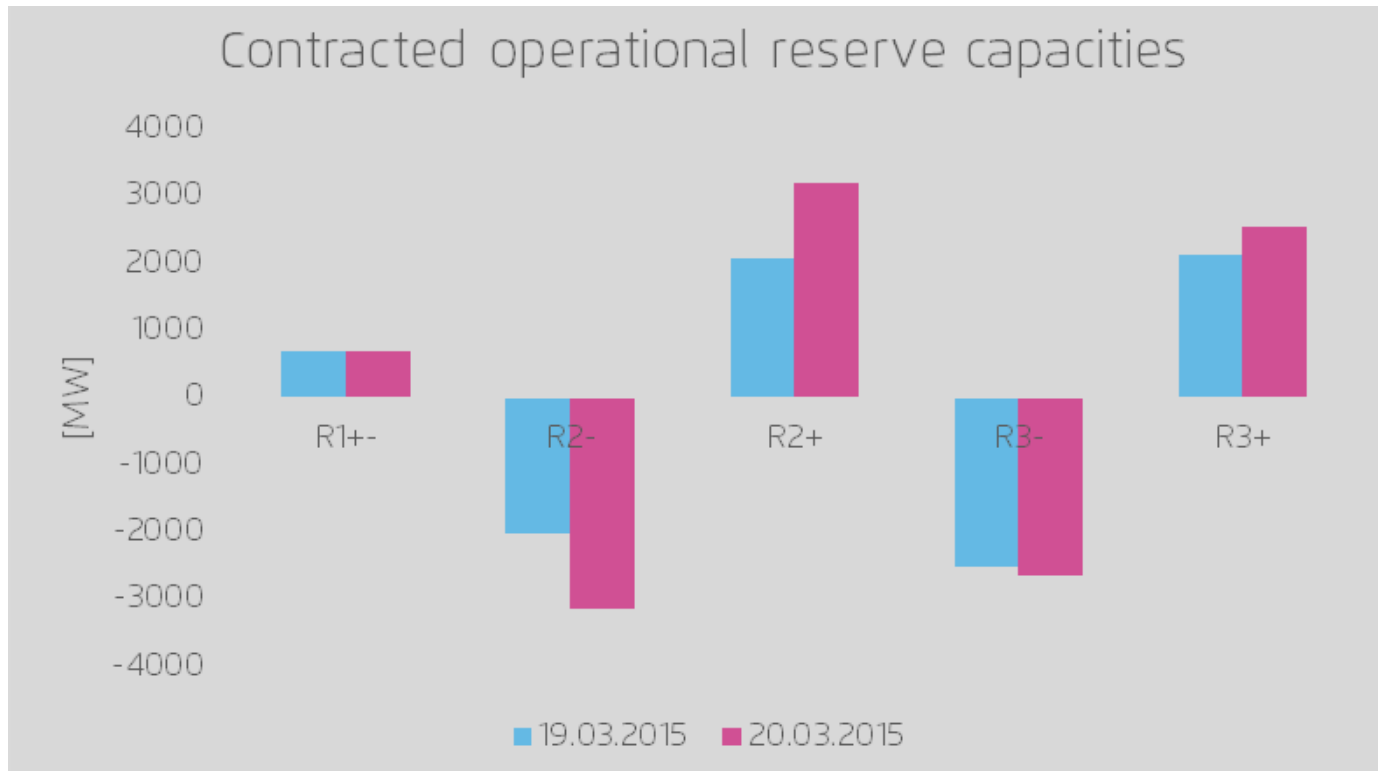
ドイツの電力システムに不足は起きなかった

このような変動は通常ではないが、現在の法律に従って再生可能エネルギーによる発電が50%まで増加する2030年には、このような現象が頻繁に発生すると予期される

出典：Own; data: EEX

調整用のエネルギーはほとんど不要だった

契約した調整用の電力の比較 3月19-20日



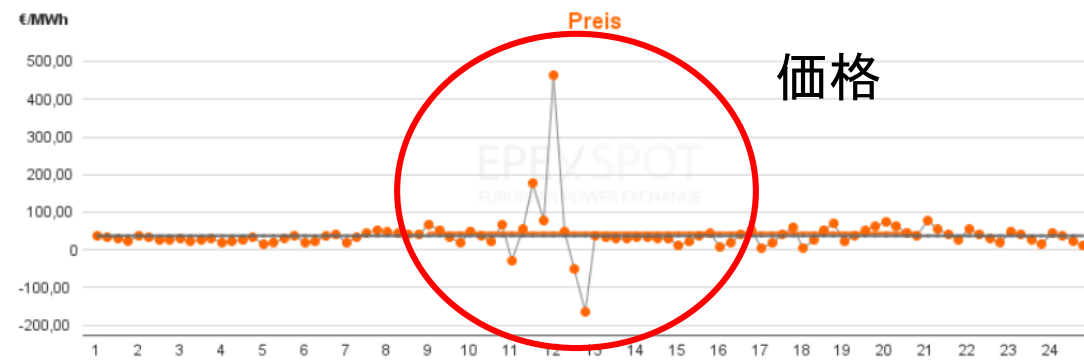
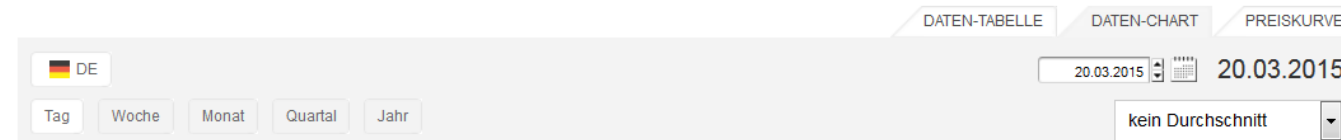
システムのオペレーターは前日よりほんのわずかに多い調整用の予備容量を契約しましたが、その量はわずか1.5GW

データ出所：TSOs

Intra-day市場では価格弾力性が見られた

3月20日のドイツのIntra-day 市場

EPEXSPOTAUCTION



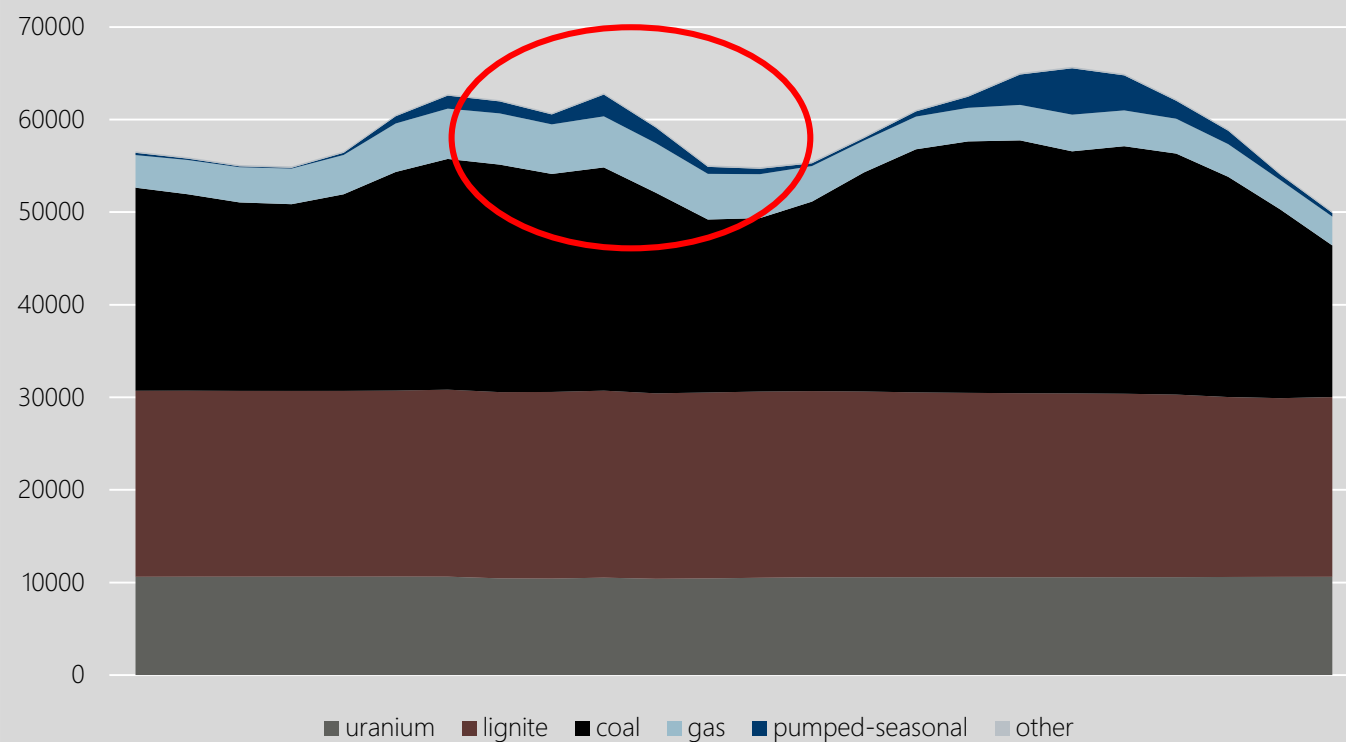
データ出所 : EEX Spot

電力スポット市場では、通常よりもわずかに取引が多く、価格が高くなった

最も大きい影響が、Intra-day市場の15分で見られた。量と価格が通常のレベルと比較し、大きく変動した

化石燃料の発電量の柔軟性

従来のエネルギー源からの発電量



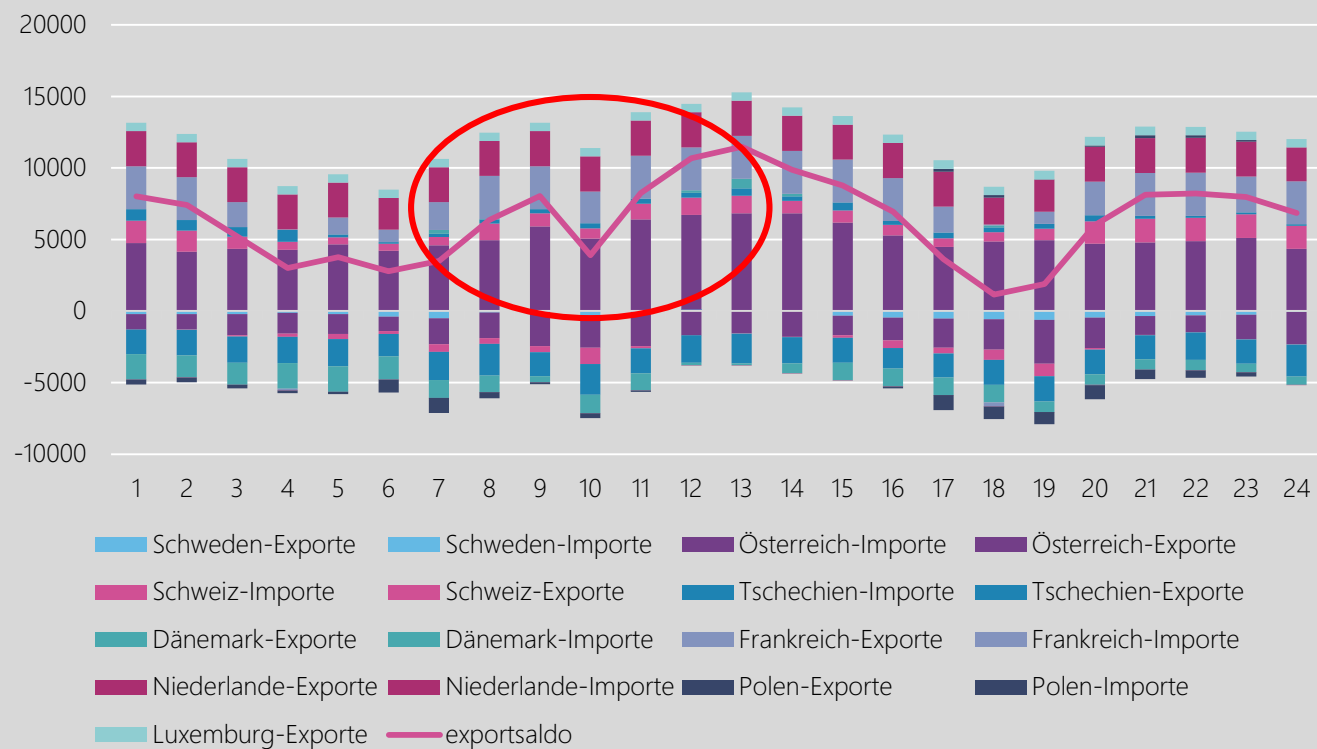
従来の発電所の中で、発電量をわずかに増加させたのは、主に無煙炭だった、多くはないが揚水発電も伸びている

原子力と褐炭はフルロードで運転し続けた

ほとんどのガス発電所で発電量を増やすことができなかった（無煙炭発電所よりも幅広い運転が出来ますが）

電力系統の変動：輸出の減少

ドイツと近隣の国間の電気取引推移

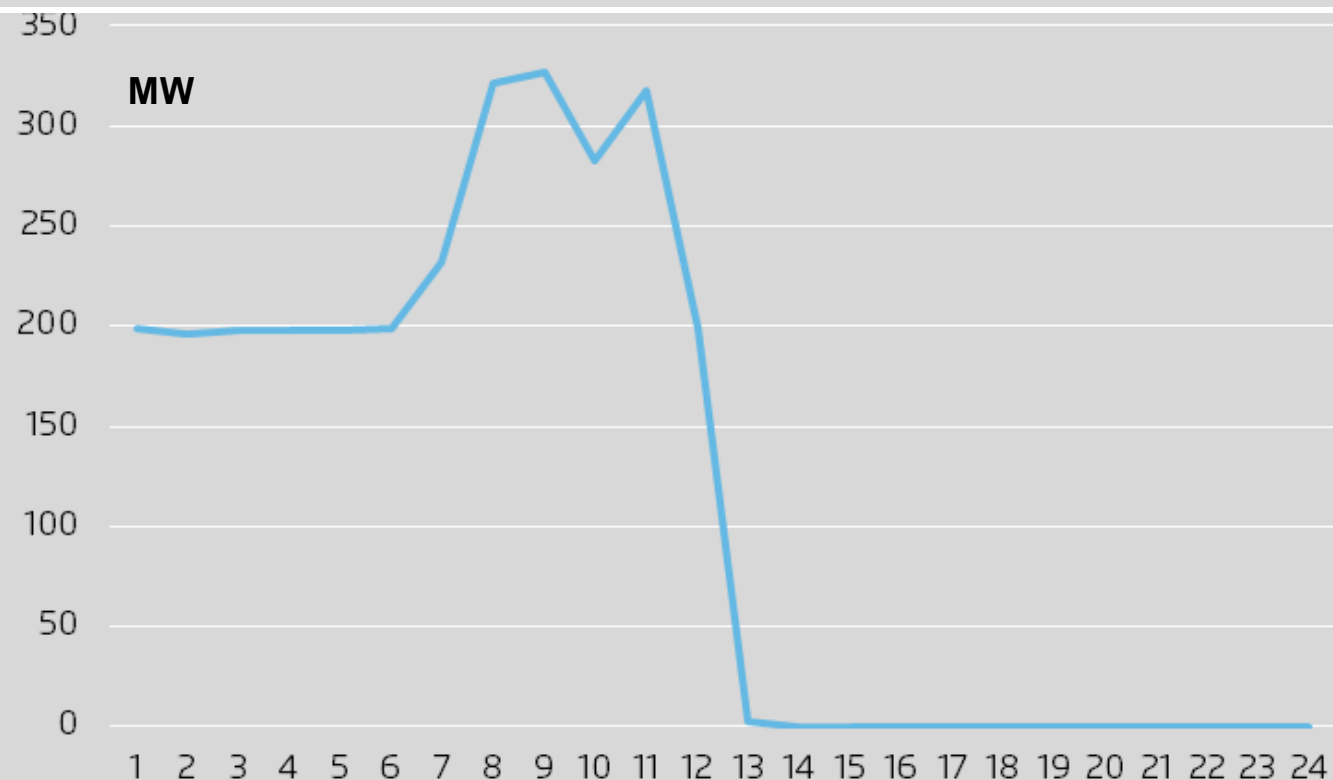


近隣国への輸出は約4GW減少

出典：EEX data

ガス発電所の例

ガス発電所の発電量 KW ドナウシュタット - DO3 (オーストリア)



出典：EEX

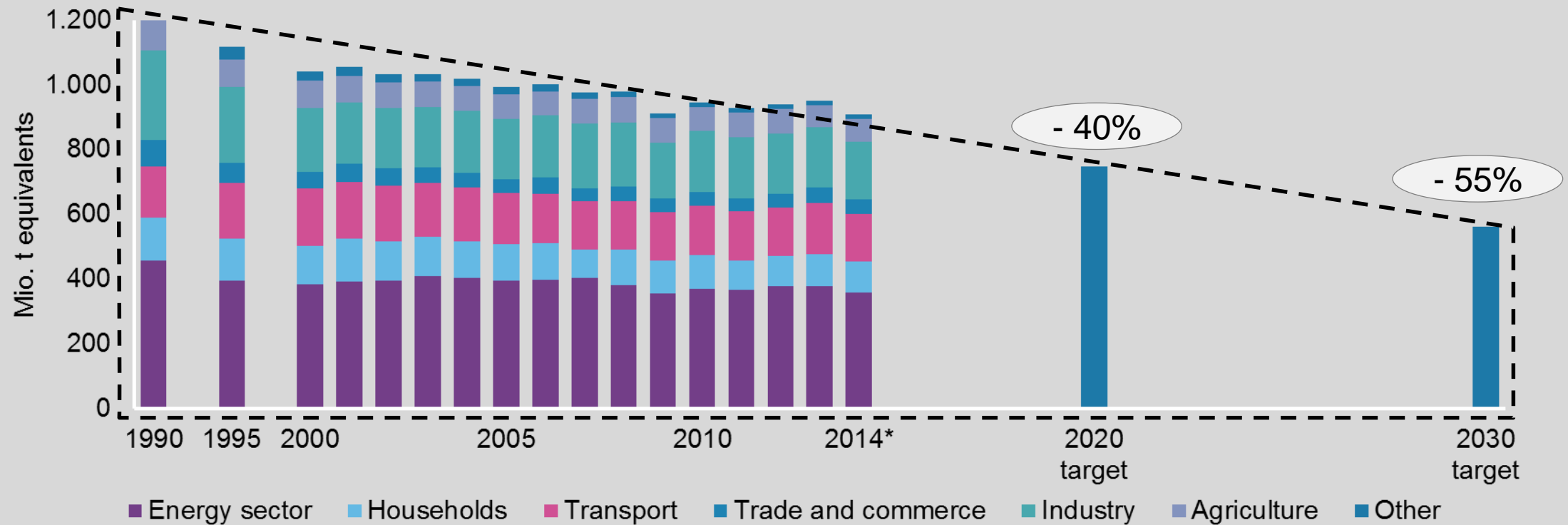
一部のガス発電所は、発電量を増加させた
が、日食の後に完全に停止した

温室効果ガスの排出について



現在の温室効果ガス排出量は1990年比26%減少 - 最大の排出源は電力部門

部門毎の温室効果ガス削減 1990 – 2014年と 2020/2030年の目標

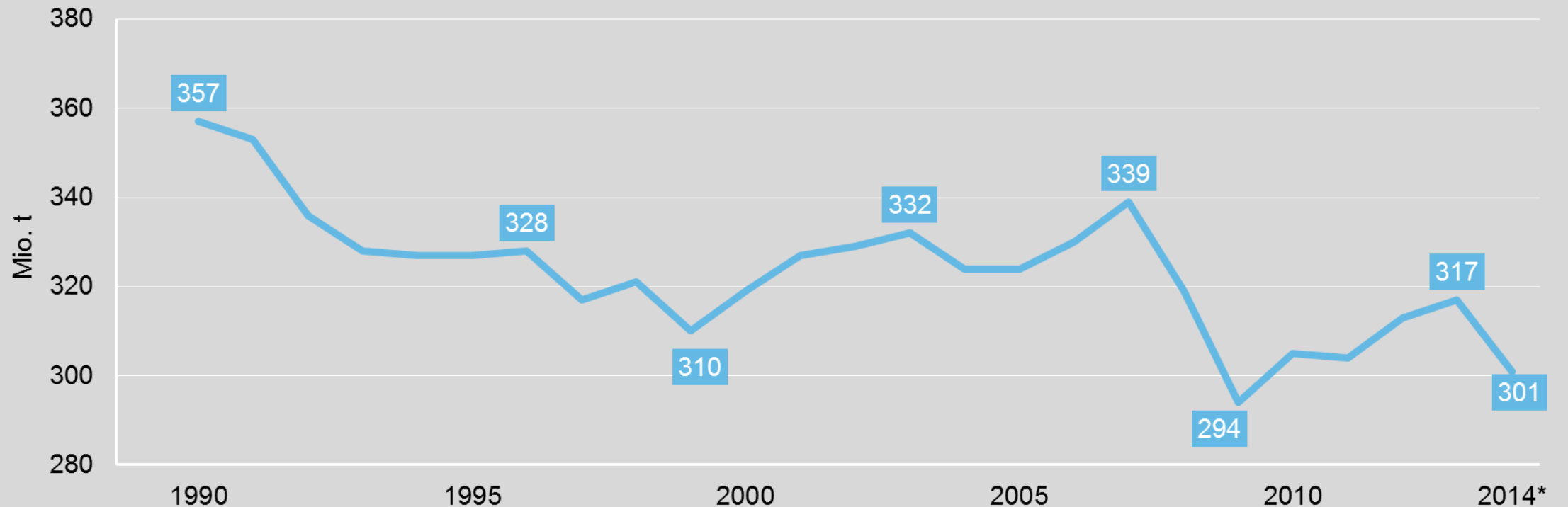


出典 : AG Energiebilanzen (2014年), UBA (2014年)

*2014年の予測値

2年の排出量上昇を経て、需要低下と再エネの増加により2014年の電力部門のCO₂排出は急激に減少

電力部門の温室効果ガス削減 1990 – 2014年



出所：UBA (2014年)より算出

* 予測値

主要な課題:

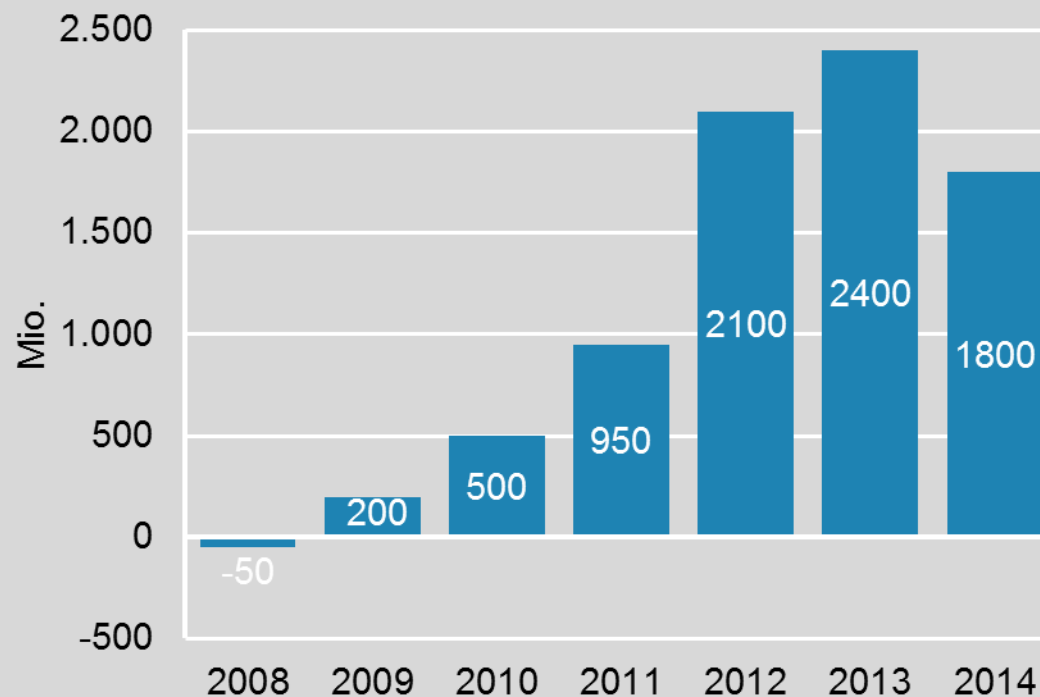
EUの排出量取引制度は大幅な超過割当に直面 CO2価格は、固定しないかぎり、継続的に低迷

CO₂認証排出枠の価格推移 (EUR/t CO₂)



出典：ICE, BMWi (2014年)

CO₂認証排出枠の割り当て超過分の累積 (Mio.)

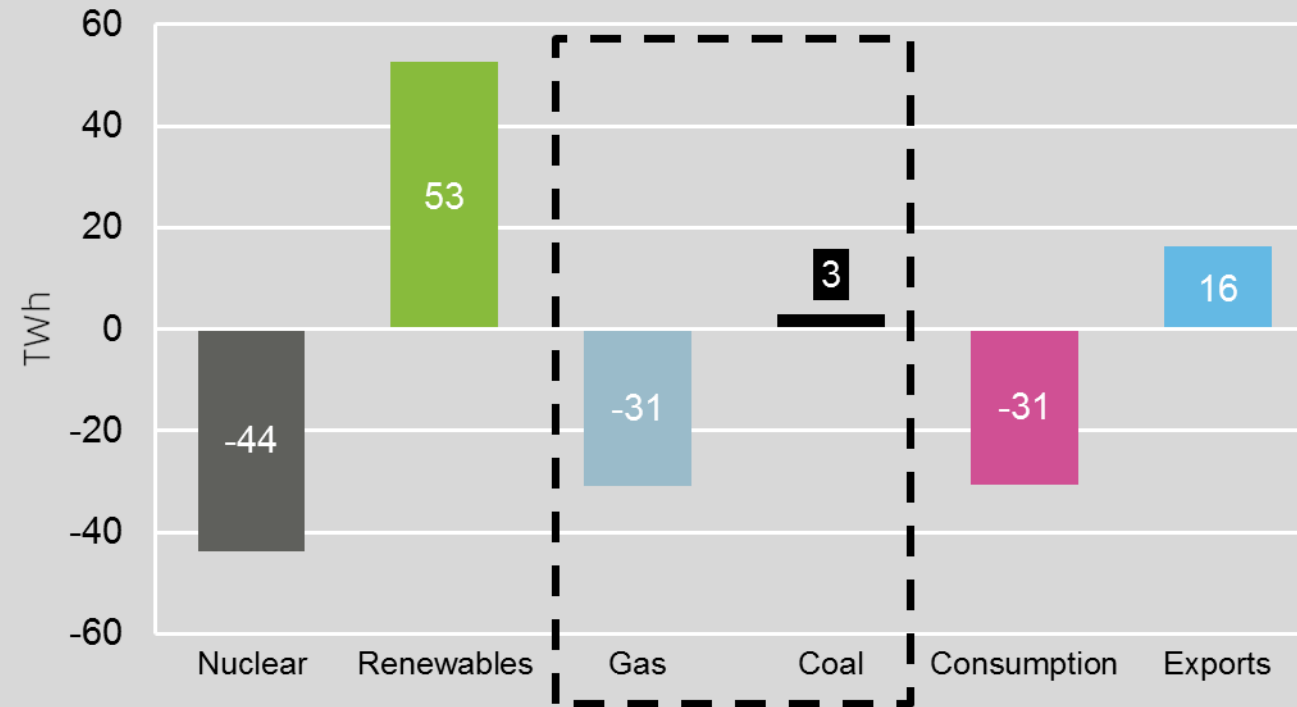


出典：EC, DIW (2014年)

結果：

石炭の使用が継続される一方で、ドイツと（輸出を通じた）近隣諸国のガスの使用を締め出し

発電、消費と輸出余剰の変化 2010 -2014年 (TWh)



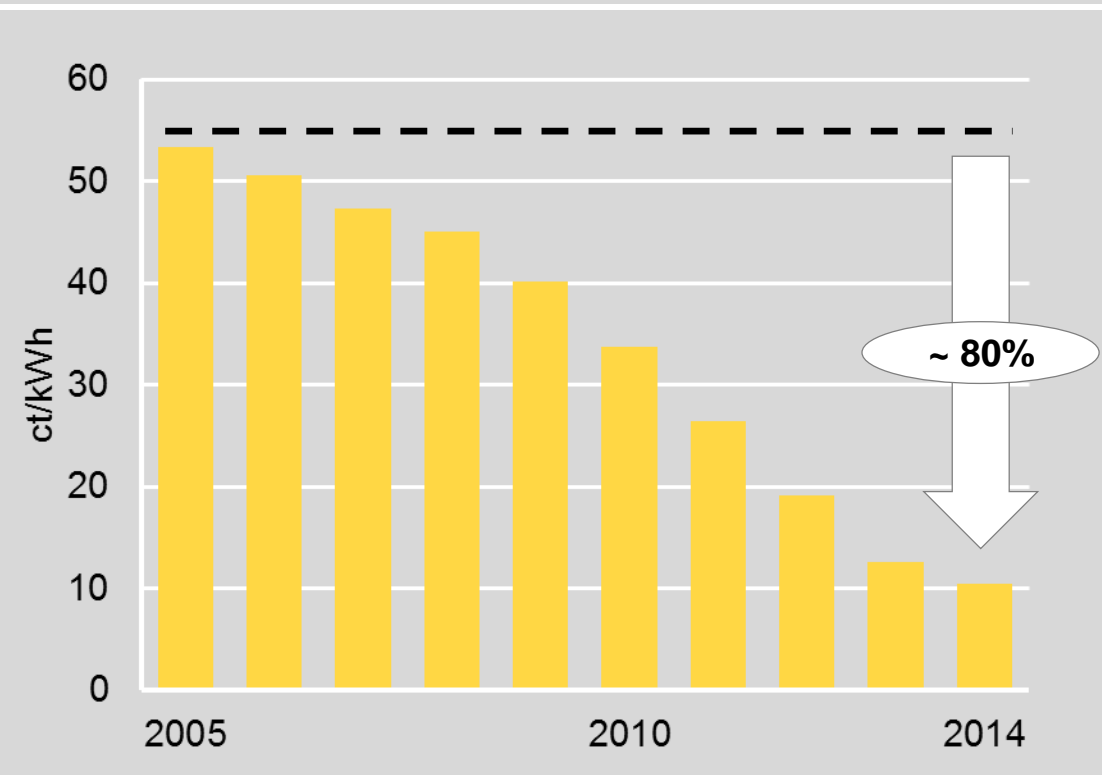
出典：AG Energiebilanzen (2014年)

家庭用電気料金について



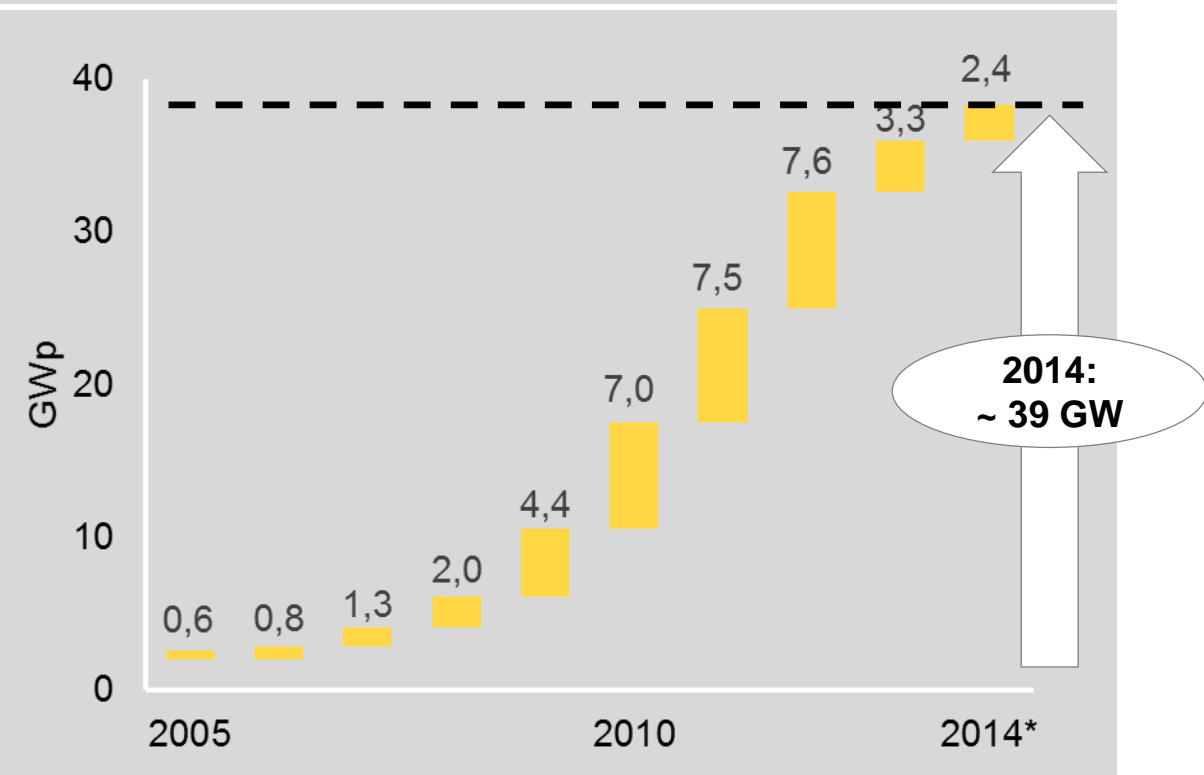
ドイツは高価な時から大量の太陽光発電を電力システムに導入

太陽光発電の平均FIT価格 2005 - 2014年



出典：ZSW/BMWi (2014年)

年間で導入された太陽光発電の容量 2005 - 2014

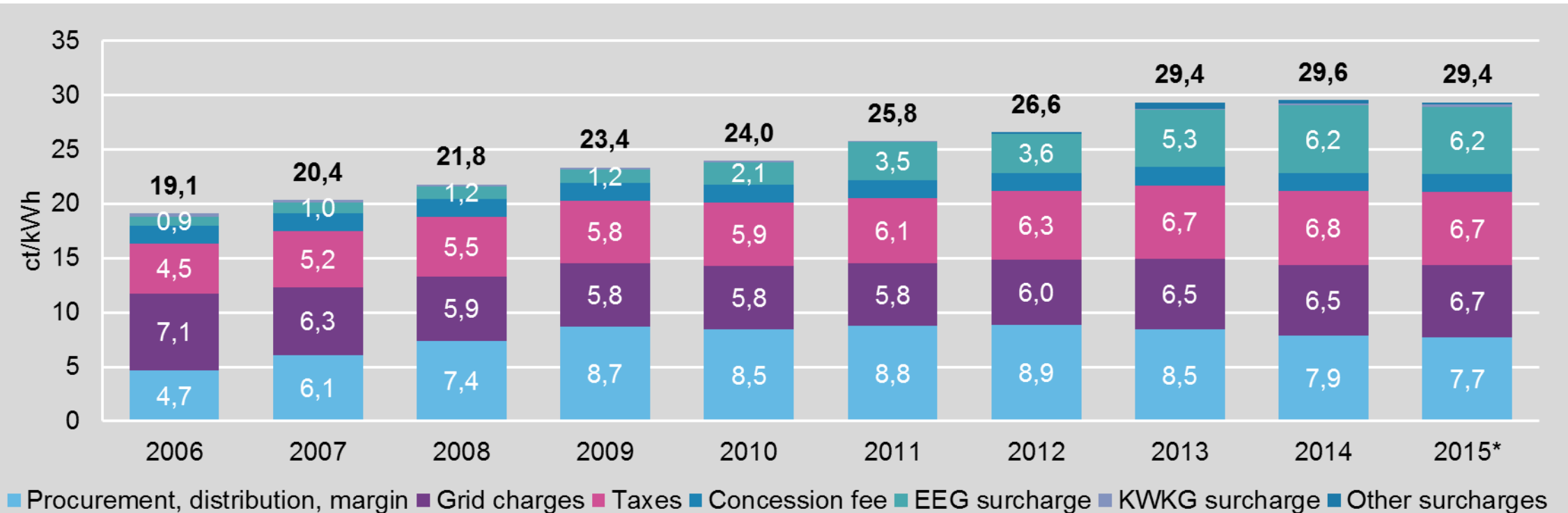


出典：BMWi (2014年)

*推定値

これにより近年の家庭用電気料金が上昇 2014年には料金上昇は頭打ちに

家庭用電気料金の内訳 2006-2015年 (3.500 kWh/a)

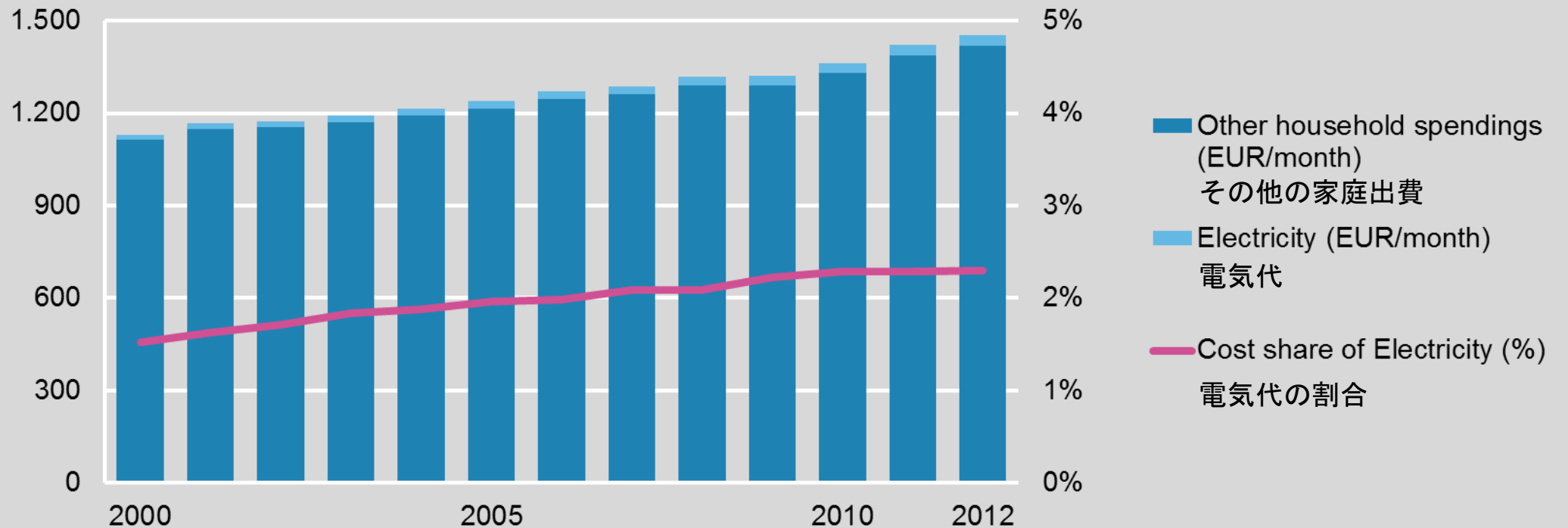


出典：BDEW 2014, BNetzA 2014年より算出

* 2015年 推定値

平均世帯の支出に占める電気代の割合は 過去20年間に1.6~2.4%の間で変化

平均世帯の支出のうちの電気代の割合



出典：Destatis (2014年)

電気消費量が低いため、ドイツ家庭の年間電気料金は他のOECD諸国と同等レベルを維持

世帯での平均電気代 (EUR/year)

	消費量 Consumption (kWh)	単価 Price (Ct/kWh)	電気代 Bill (EUR)
Denmark	4,000	30	1,200
US	11,800	9	1,060
Germany	3,500	30	1,050
Japan	5,600	18	1,010
Spain	4,400	23	1,010
Canada	10,800	8	850
UK	4,200	19	800
France	5,000	16	800
Italy	2,700	25	680

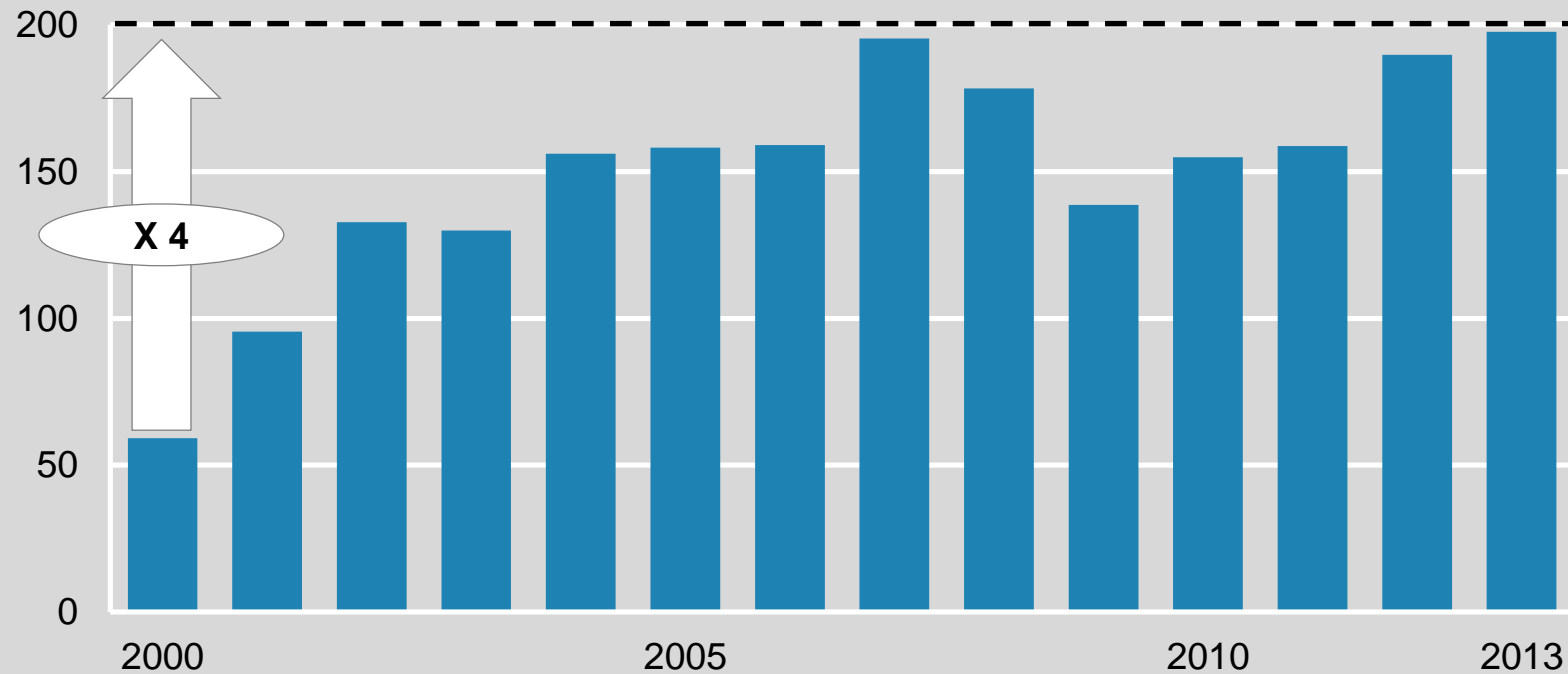
出典 : World Energy Council, EIA, Eurostat, Energy Intelligence, New Energyより算出

産業用電気料金について



エネルギーヴェンデによる ドイツ経済の競争力への悪影響はなし

輸出超過 (Bln. EUR)



出典 : Destatis

産業界全体のエネルギーコスト平均は 総生産額の約2%

ドイツ製造産業の総生産値* in Bln. EUR

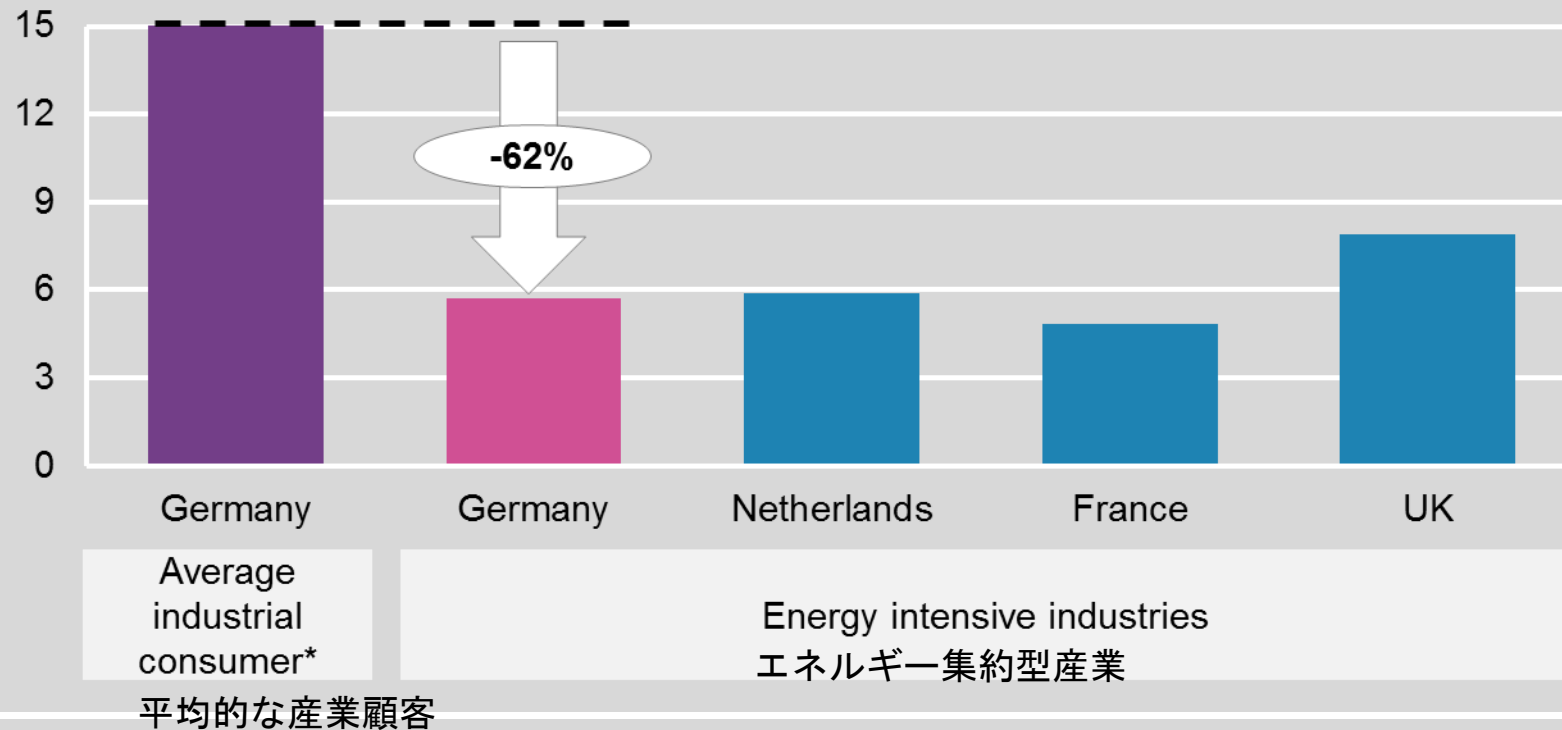


出典 : Destatis

*エネルギー集約部門を含む

競争力維持のため、エネルギー集約型産業は税金や課徴金の多くを免除されている

エネルギー集約産業の顧客の平均的な電気価格 2013年, ct/kWh



出典 : BMWi (2014年)

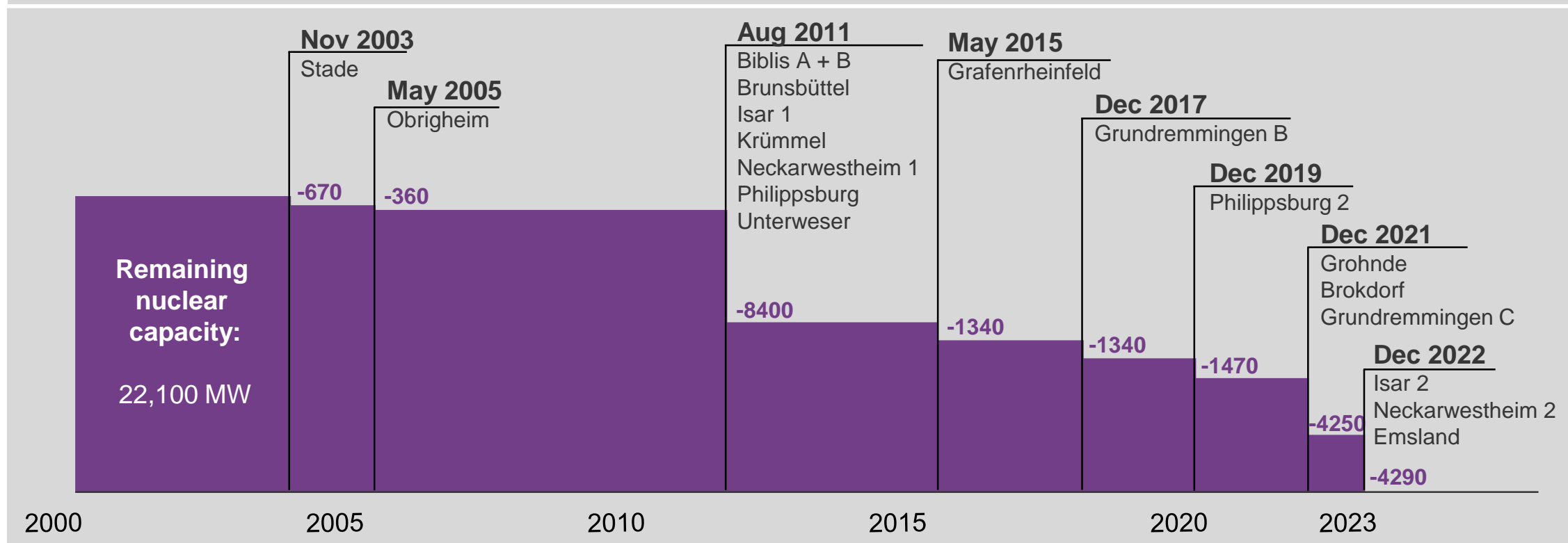
* <20 MWhの年間消費量で、部分的に課税が免除と仮定

補足 2.



今後20年間の原子力の削減案（フェーズアウト）

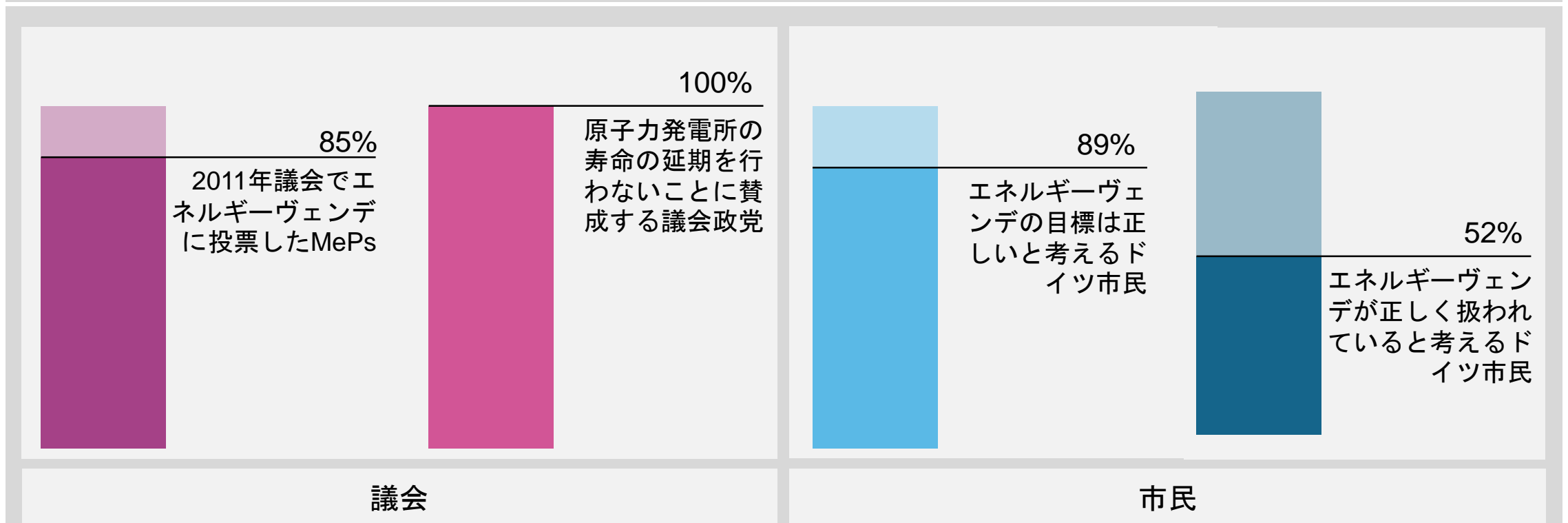
2022年までの原子力発電所の削減案



出典 : BMWi, energytransition.org

エネルギーヴェンデの目標には幅広い政治的なコンセンサスがある — 議論の中心は主に実施方法

エネルギーヴェンデに関する政治的な決定と市民の意見



出典 : BDEW, Forsa

LCOE(均等化発電原価) – 推定コスト

均等化発電原価(LCOE) の範囲, 2015年 (EUR/MWh) – 推定

	投資 (min./max.)	WACC (%)	耐用年数	最大負荷時間 (min./max.)	CO2 証書 (min./max.)	効率 (min./max.)
	EUR/kW	%	a	h	EUR	%
風力	1250/1500	7%	20	2000/2500		
太陽光	800/900	7%	30	1000		
褐炭	1850	12%	50	3000/6000	10/20	35%/45%
CCGT	900	12%	30	2000/4000	10/20	60%
石炭	1500/2250	12%	50	3000/6000	10/20	46%/50%
原子力	6000	12%	60	6000/7500		33%

出典 : Agora Energiewende

エネルギーヴェンデを遵守する 新しい市場の設計が必要

将来の市場設計の構造例

Synchronize
supply and
demand
需要と供給の同期

Energy-Only Market エネルギー単独市場

Ensuring
system
reliability
and climate
protection
システムの信頼性と
気候保護の確保

Investment Market 投資市場

Flexible Capacity
柔軟な容量

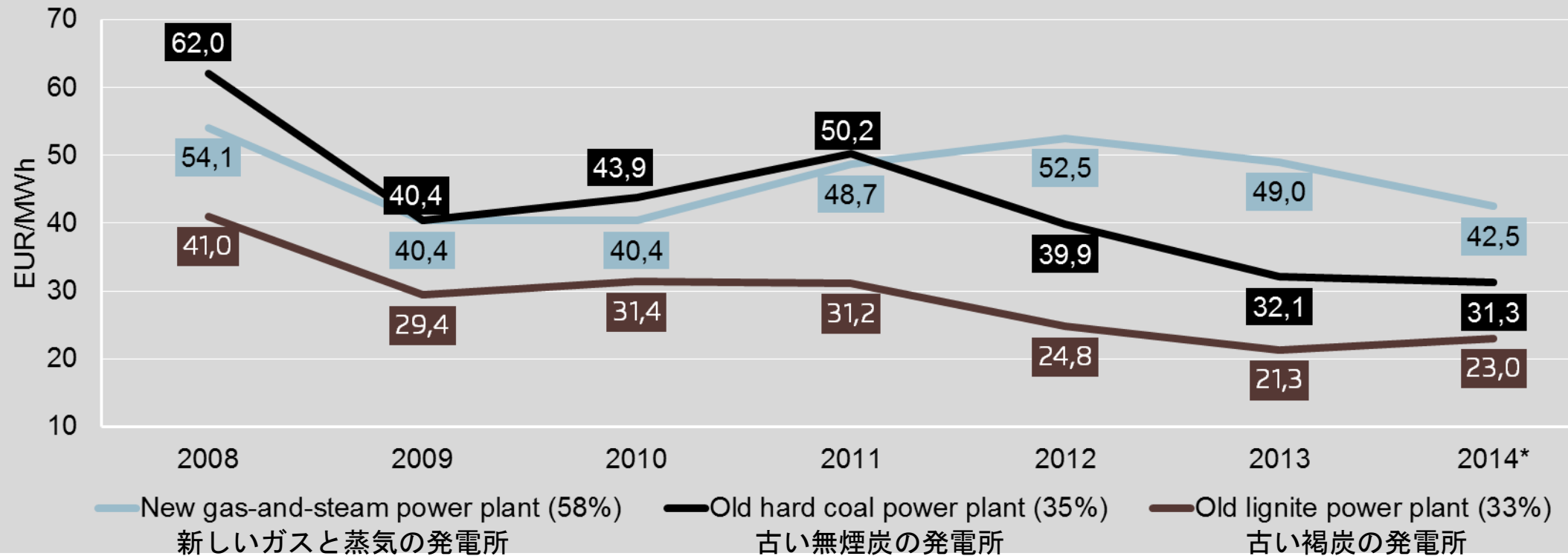
Carbon-neutral Capacity
カーボンニュートラル容量

Safeguarding
system
stability
システムの安定性の保護

Market for ancillary services
付帯的サービスの市場

石炭とガスの燃料価格差が 石炭とガス発電所の発電費用の変動幅を拡大

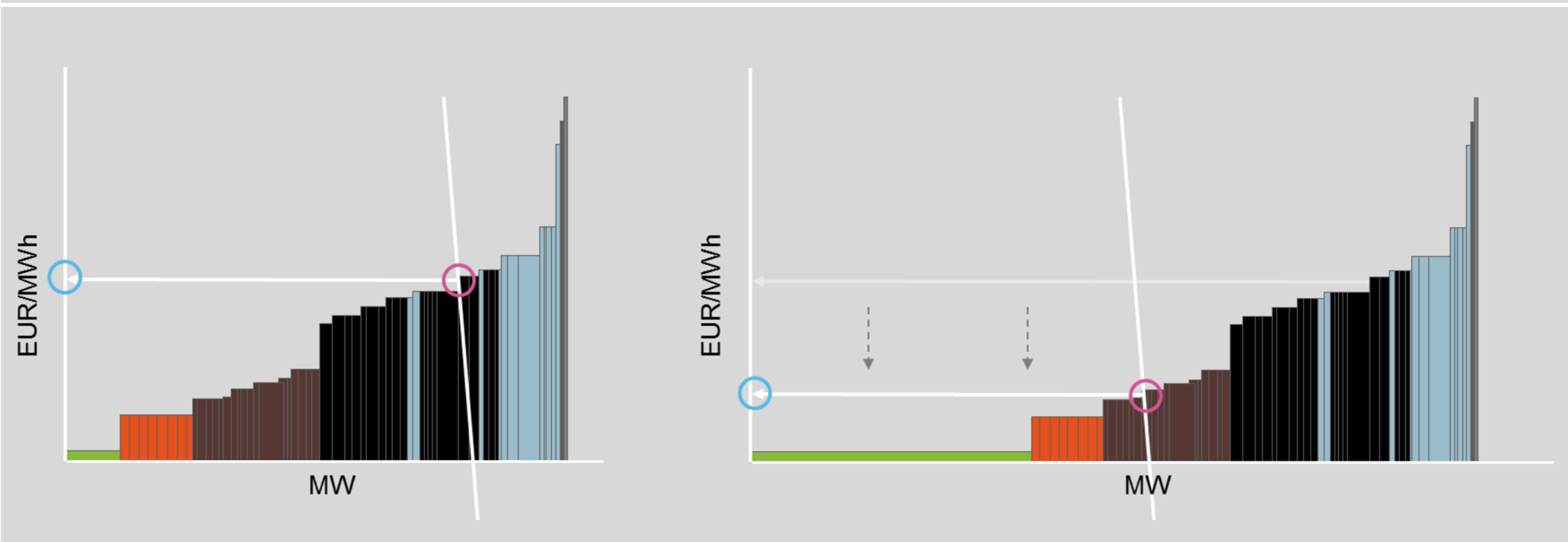
発電所の限界発電費用 (EUR/MWh)



出典 : BAFA, BMWi, EEX, own calculations

再生可能エネルギーの割合が増大すれば、取引時の卸売価格は低額化

優先順位による効果の例



出典 : Agora Energiewende