

2017年度 第3回シンポジウム

「欧米の最新エネルギー情勢－電力取引市場の設計と意義－」

ノルウェーの“緑のバッテリー”等を巡る 政策的課題と展望

日時: 2018年2月13日(火) 10:00～17:50

場所: 京都大学 吉田キャンパス本部構内

国際科学イノベーション棟 5Fシンポジウムホール

京都大学大学院経済学研究科
再生可能エネルギー経済学講座

特任教授 加藤 修一

欧州委員会のEU実績報告 (2017.2)

欧州対外行動局: EEAS



■ 欧州委員会は本日、欧州連合 (EU) の経済の近代化と低炭素時代への移行が順調に進んでいることを示す、エネルギー同盟 (Energy Union) に関する2度目の報告書を公表。

(1) 温室効果ガス、エネルギー効率および再生可能エネルギーについて、EUは自ら設定した2020年の目標を達成する見込みである。

(2) この動きをさらに推進するべく、欧州委員会は本日、新たな「エネルギー同盟ツアー」(new Energy Union tour) の開始を発表。

(3) EU全体としては、エネルギー同盟の目標、特に2020年のエネルギー・気候に関する目標の達成に向けた進捗状況は良好である。最終エネルギー消費目標は既に達成しており、温室効果ガス排出についても同様である。

(4) 2015年のEUの温室効果排出量は、1990年比で22%少なかった。再生可能エネルギーの分野においても、2014年のデータによれば、EUの総最終エネルギー消費の16%が再生可能エネルギーであった。

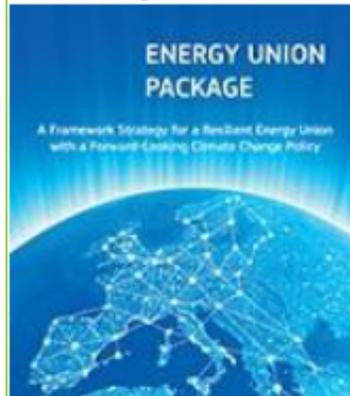
(5) もう一つ重要な傾向として、EUは引き続き、経済成長と温室効果ガス排出削減を切り離すことに成功しつつある。1990年から2015年までの間にEUの合計国民総生産 (GDP) は5割伸び、その間に総排出は22%減少した。

資料: 2017年2月、European External Action Service (EEAS、欧州対外行動局)



Challenges for EU energy and climate policy

European Energy Union with forward-looking climate change policy



Five key priorities for secure, sustainable, competitive and affordable energy:

- **Ensuring security of supply** for Europe
- **Deeper integration** of EU national energy markets
- **Reducing EU energy demand**
- **Reducing carbon emissions** from the energy sector
- **Promoting research and development in energy**

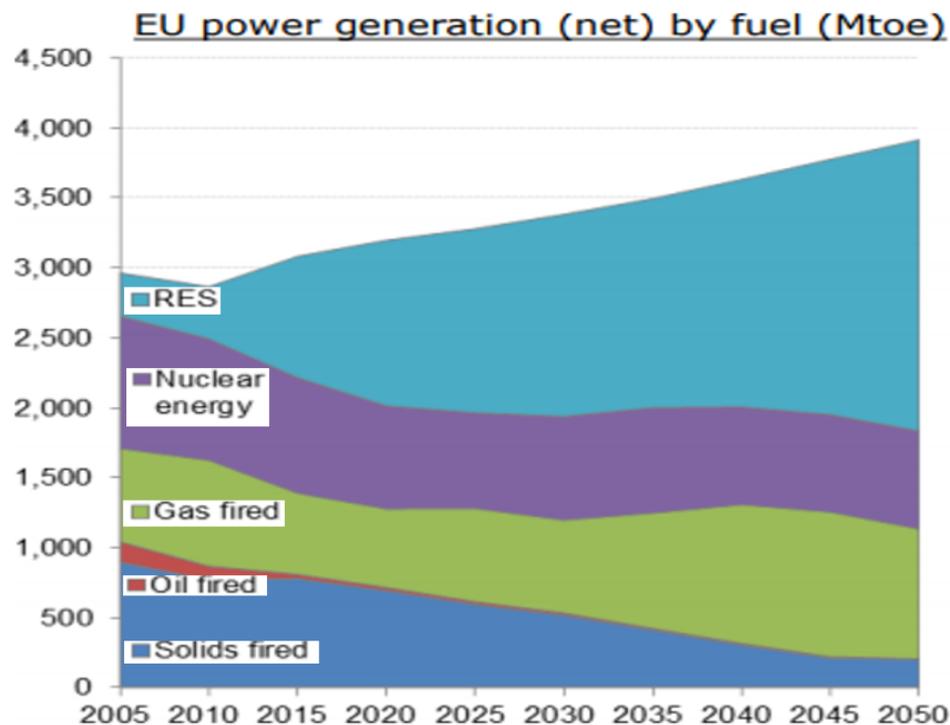
315bn € Investment Package

2030 Framework for Climate and Energy

国際連系線整備率の数値目標

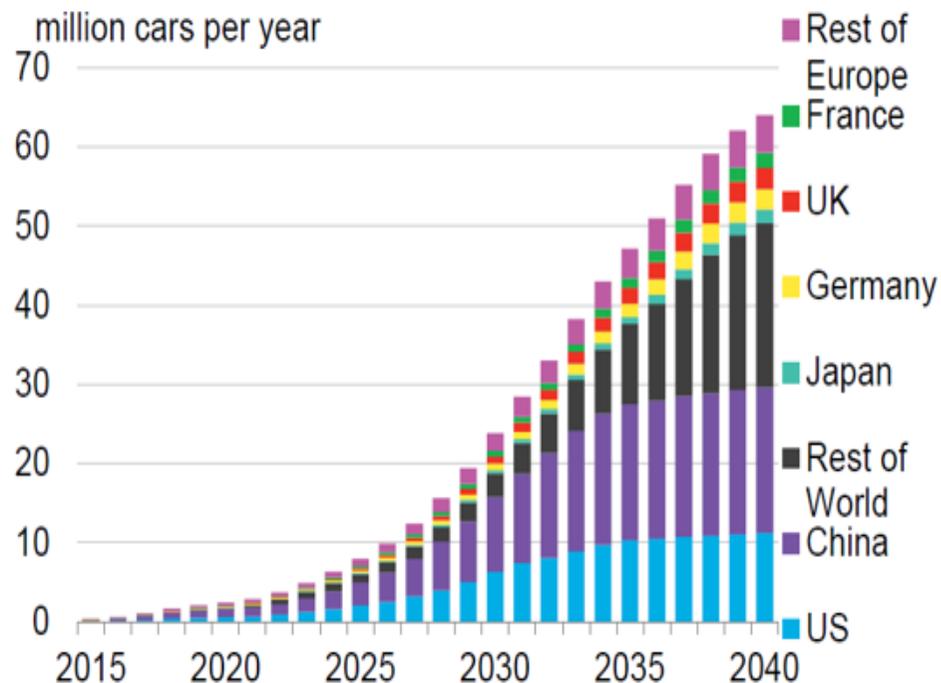


図 EUの発電量の推移—急増する再生可能エネルギー—



Source: PRIMES modelling, NTUA, E3M-Lab

図 2040年全世界7千万台に迫るEVの動き



Source: Bloomberg New Energy Finance. For a detailed description of the 'intelligent mobility' segment, see the methodology.

- EVの拡大 → 再エネ由来電力の増大
- V2X … V2Gなど
- 電動化社会(EDS)

(参考) : IEAのWEO2016報告
2040年までにEVの普及を、
7億数千万台と記述。

※ノルウェー …2025年までに”ゼロエミッションV”

図- 自然変動電源の大量導入と統合化→欧州大のマネジメント

大規模な自然変動電源のヨーロッパ電力市場の統合化に、発電抑制を回避する電カストレージが必要。
蓄電技術の中で水力(PSPP)は、優れる。

EU-27	2010	2020
Wind	85,000MW	230,000MW
Solar(PV)	26,000MW	150,000MW
計	111,000MW	380,000MW
計(再掲)	1億1100KW	3億8000万KW

ドイツ	2010	2020
Wind	27,000MW	46,000MW
Solar(PV)	16,000MW	52,000MW
計	43,000MW	98,000MW
計(再掲)	4300万KW	9800万KW

EU計:380000MW

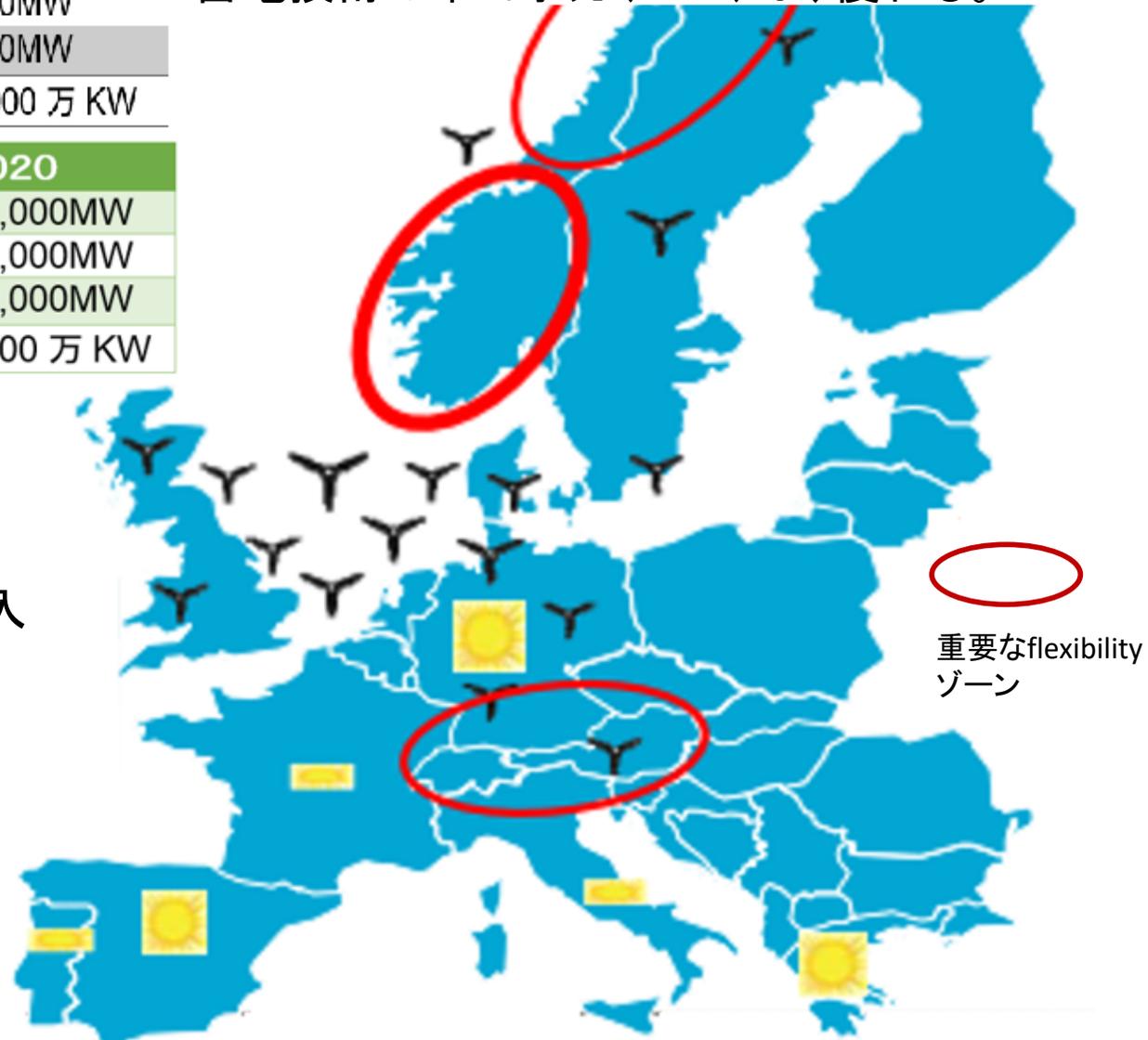


風力、太陽光の大量導入
と統合化



3億8000万KW

約 **4億** KW



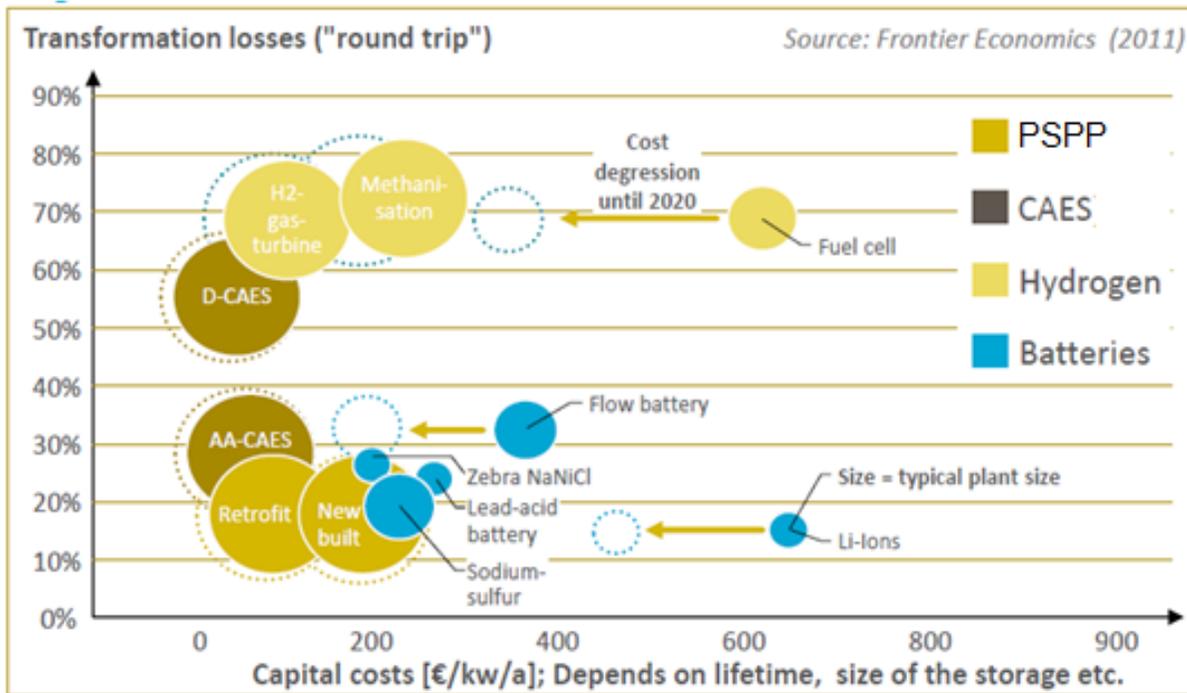


■ 294-Maaliプロジェクト PCIに基づく「TYNDO2016」に掲載された国際連系線

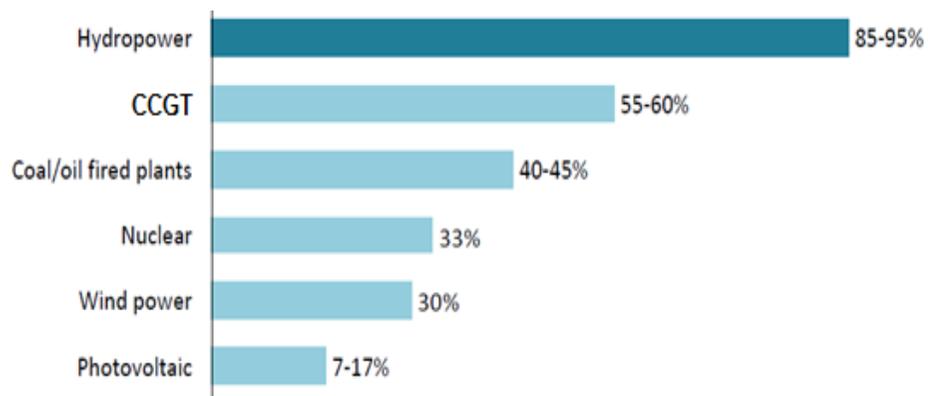
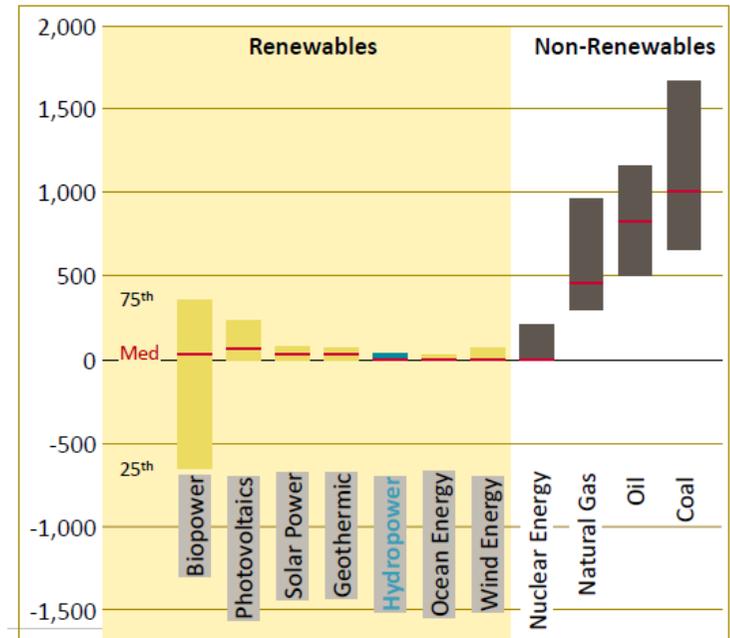
国境間	TYNDP2016 プロジェクト・Index	プロジェクト名	プロジェクトの概要	送電容量	分類	事業者
Shetland - Norway	294 投資ID (1356)	Maali	<ul style="list-style-type: none"> 英国スコットランドのシェットランド島とノルウェー (Hordaland) 間の海底国際連系線+陸上部分 (地下式) 英国National GridとノルウェーのStatnett社間のネットワーク (HVDC) substation1:Kergord(Shetland) substation2:near Bergen-Mongstad, or Karsto-Blafalli 	60万kw	<ul style="list-style-type: none"> Future プロジェクト 2023年運開予定 	<ul style="list-style-type: none"> Element Power社 ※ Viking Windfarm Shetland and HVDC to Scotland

資料: TYNDP 2016 list of projects for assessment - entso-e

水力の一般特性



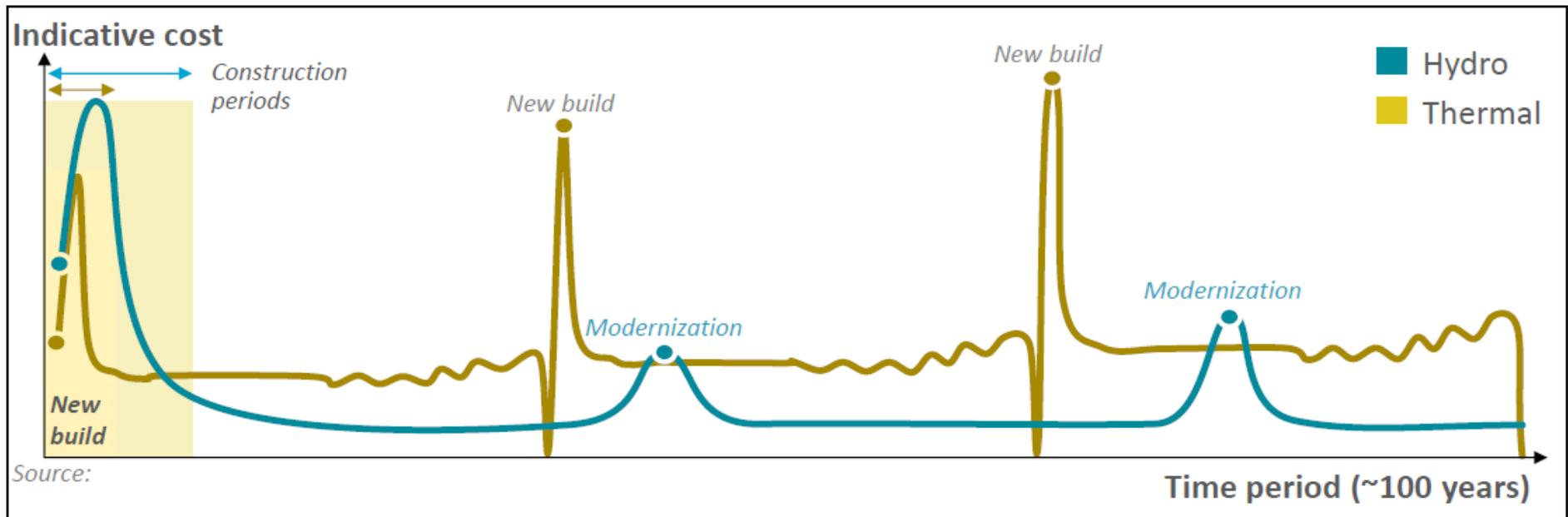
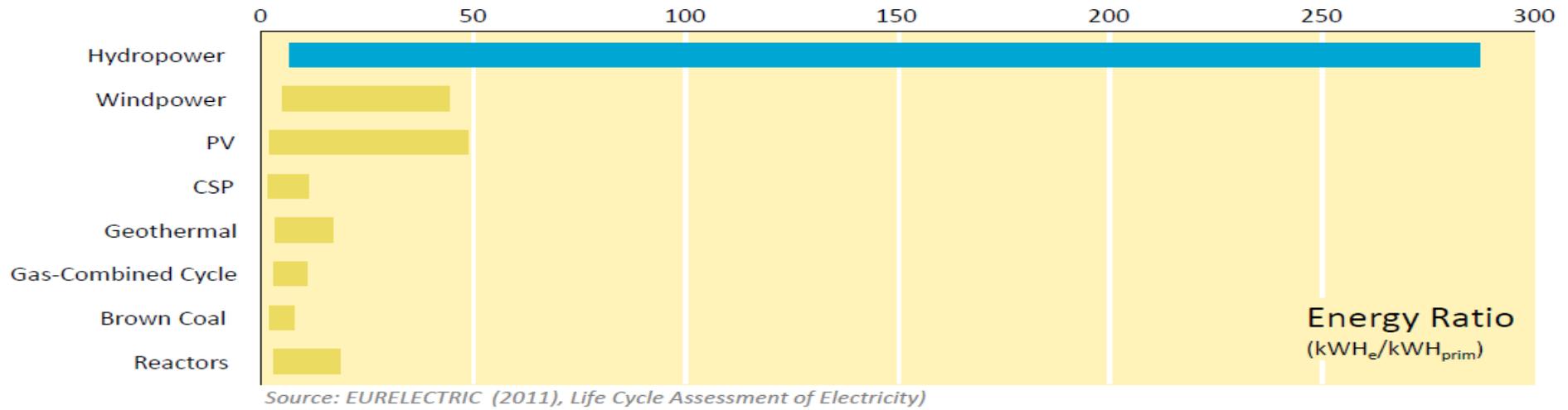
Lifecycle GHG Emissions, g CO₂ eq / kWh



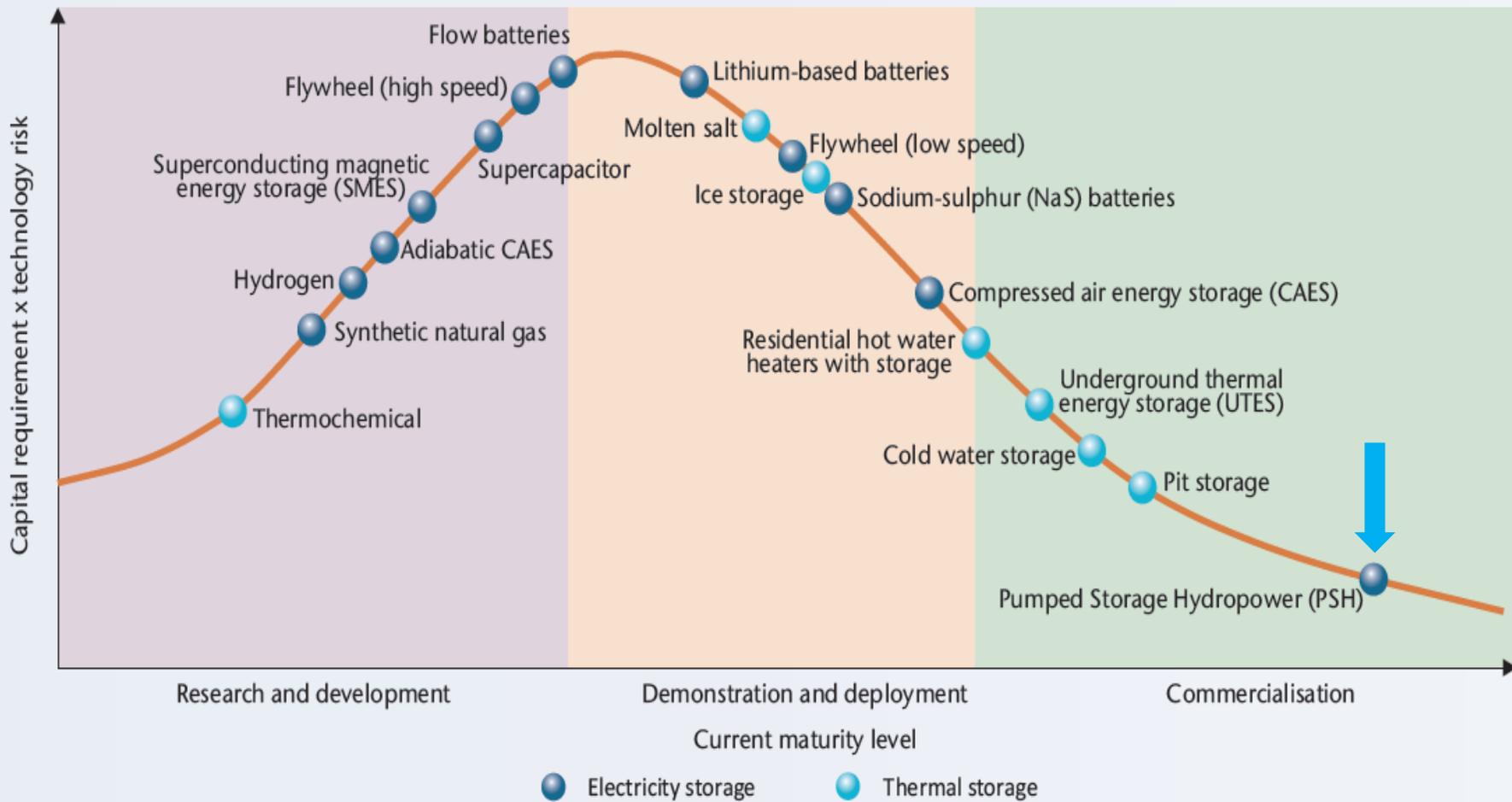
CCGT Combined-cycle gas turbines

資料: Statkraft社関係報告書

Highest energy payback ratio



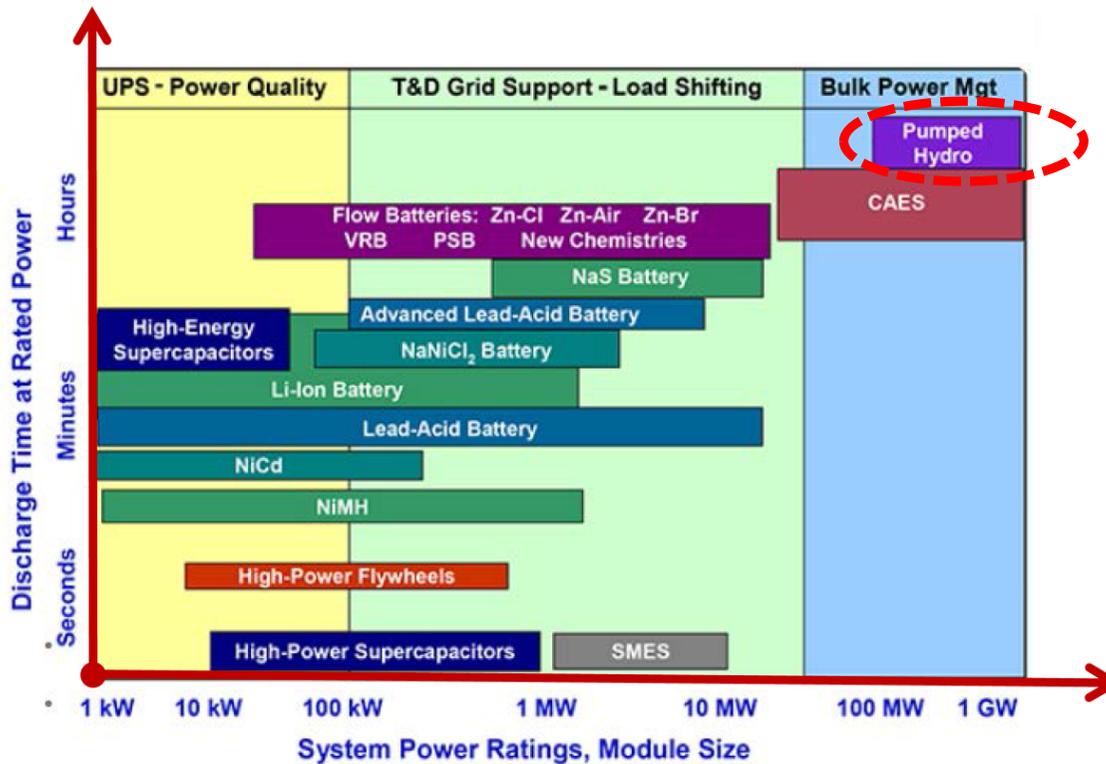
Maturity of energy storage technologies



Source: Decourt, B. and R. Debarre (2013), "Electricity storage", *Factbook*, Schlumberger Business Consulting Energy Institute, Paris, France and Paksoy, H. (2013), "Thermal Energy Storage Today" presented at the IEA Energy Storage Technology Roadmap Stakeholder Engagement Workshop, Paris, France, 14 February.

資料: IEA係報告書

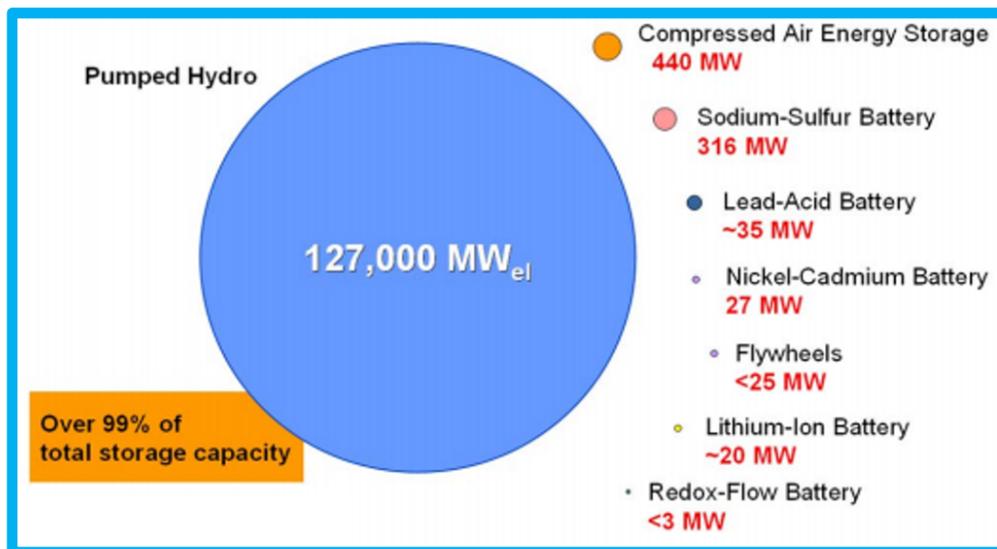
図一 多様な蓄電技術



PSPPが優位

資料: Todd Heinrichs, "Energy and climate", 2013, Sandia National Laboratories

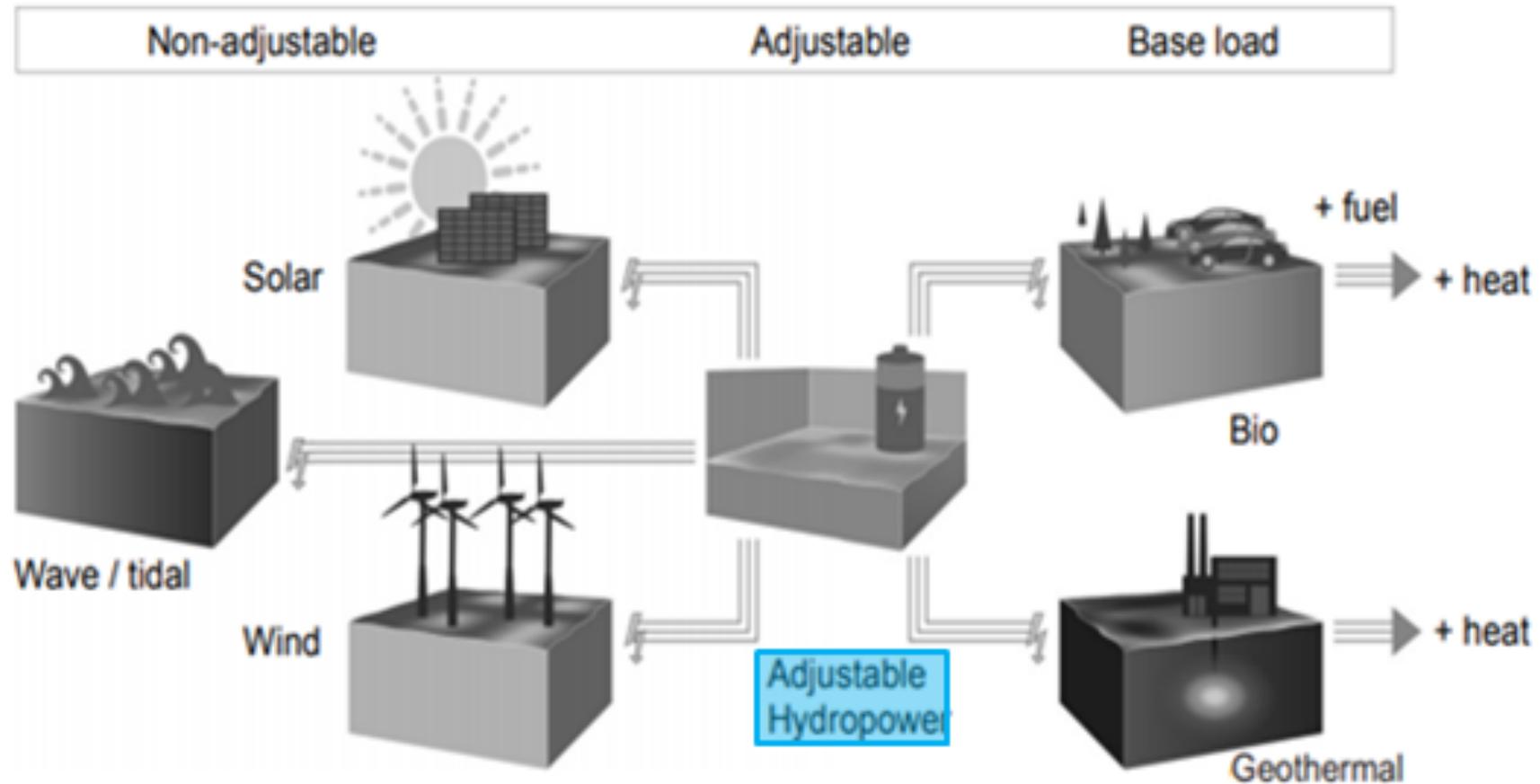
図一 世界の蓄電技術別の蓄電設備容量(MW)



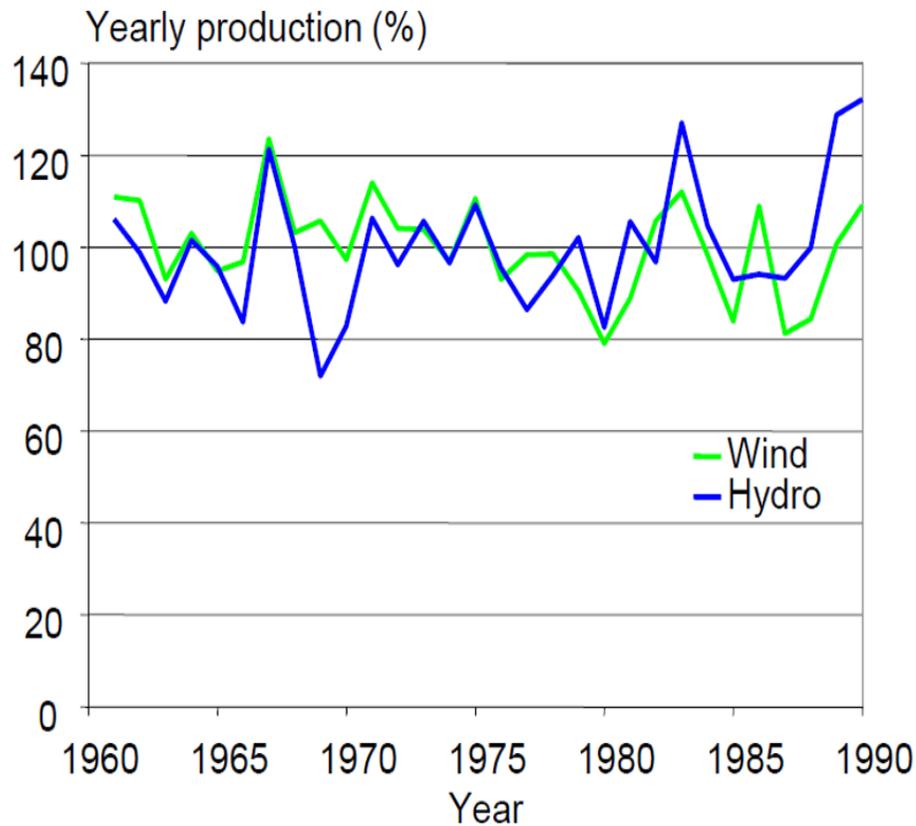
99%超がPSPP

注) PSPP: Pumped Storage Power Plant
資料: Fraunhofer Institute, EPRI

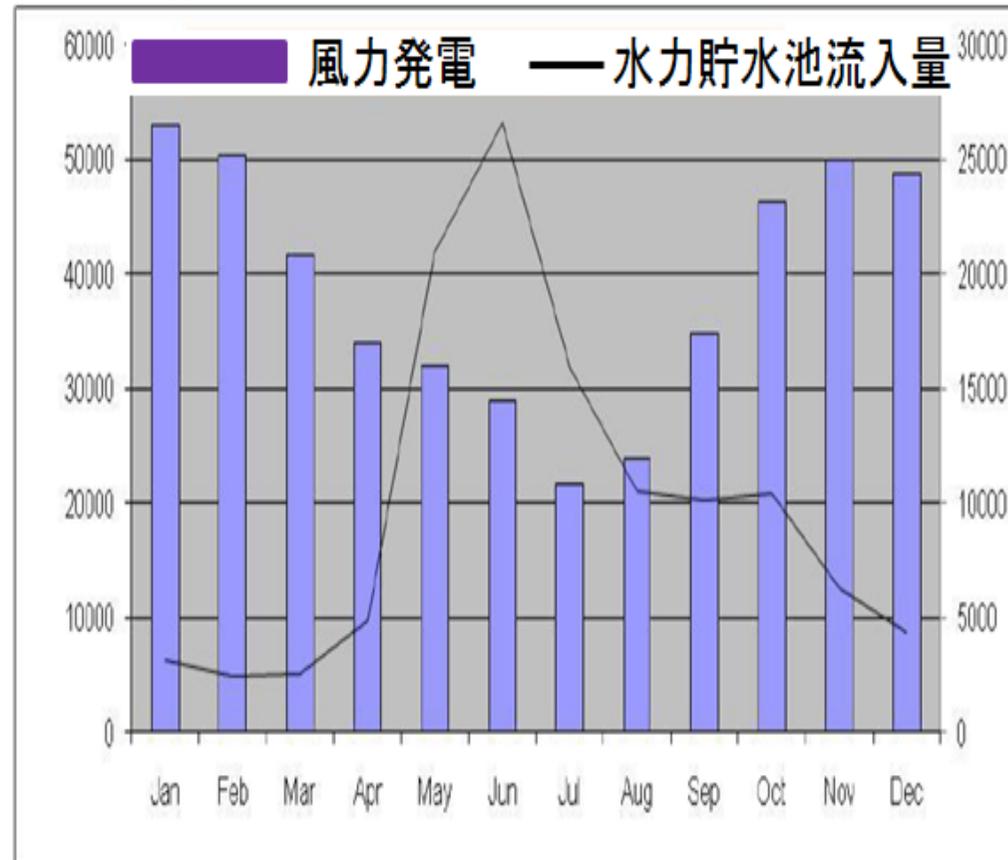
The renewable family



図一 風力と水力とのマッチングが良い(ノルウェー)



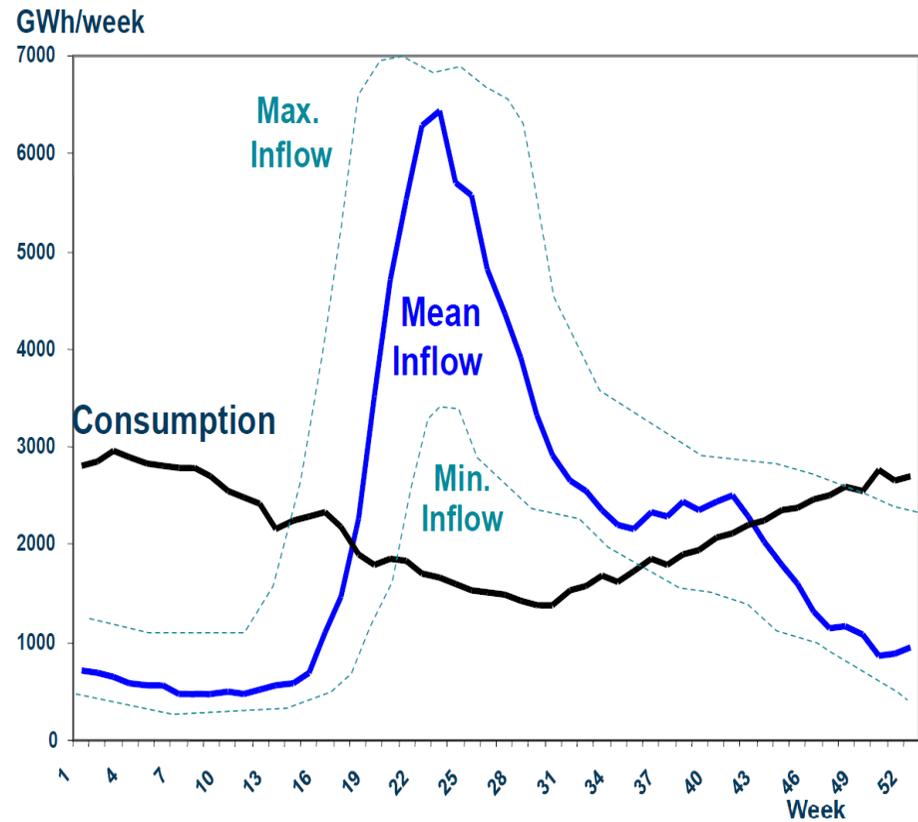
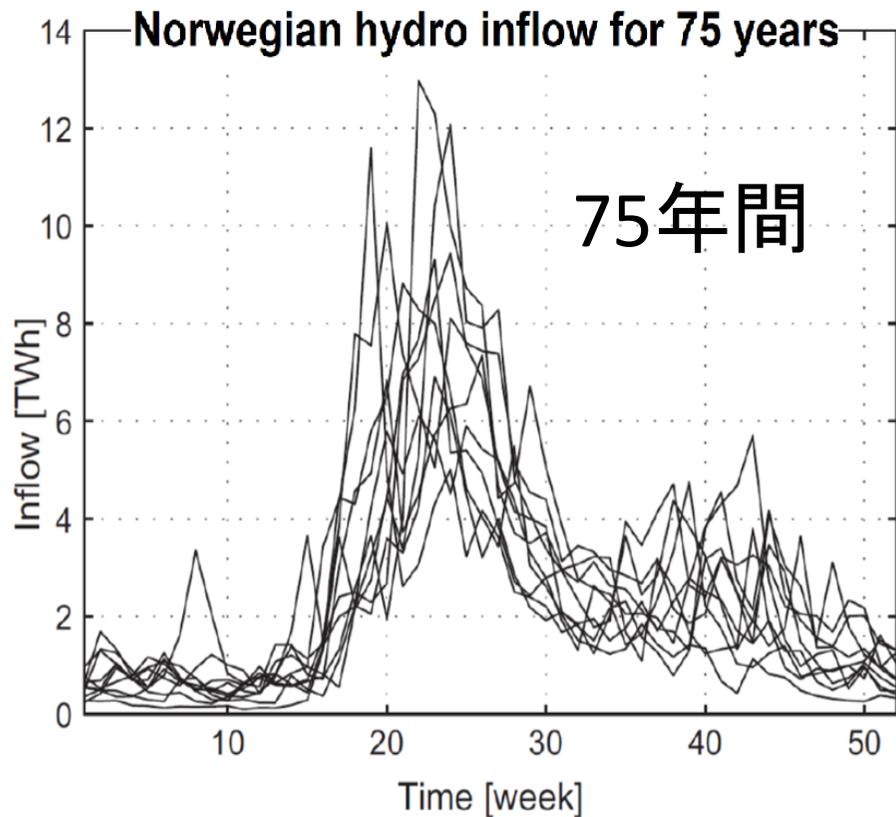
30年間



1年間の変動

資料:ノルウェー政府関係数値表より

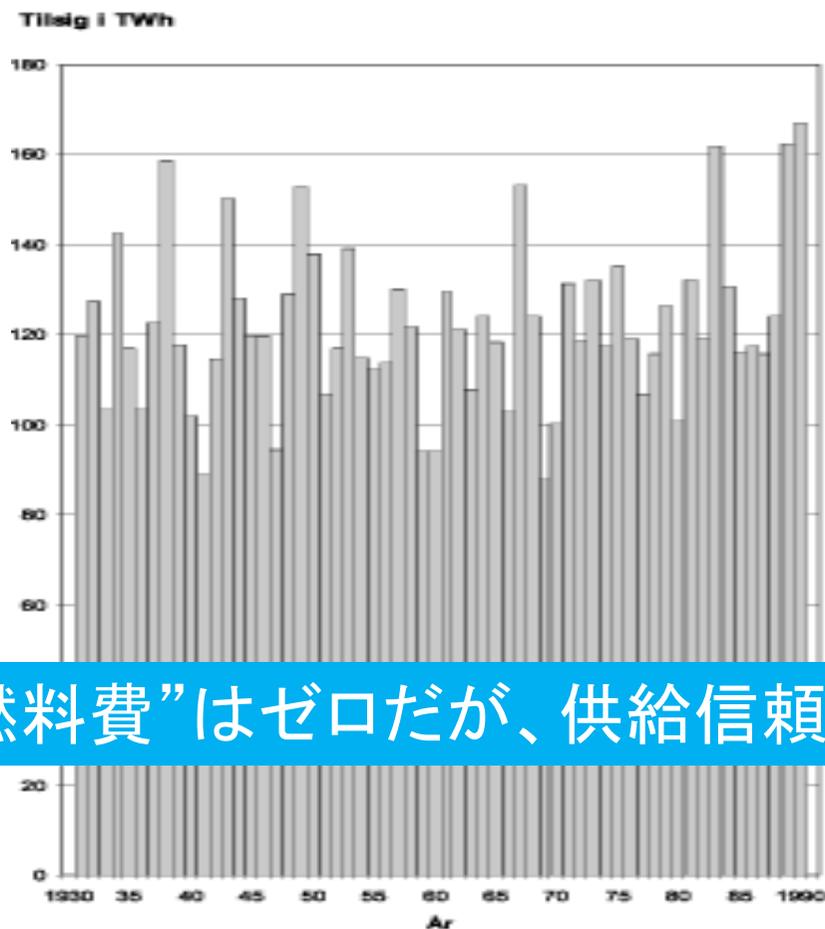
貯水池マネジメントー水力利用の最適化



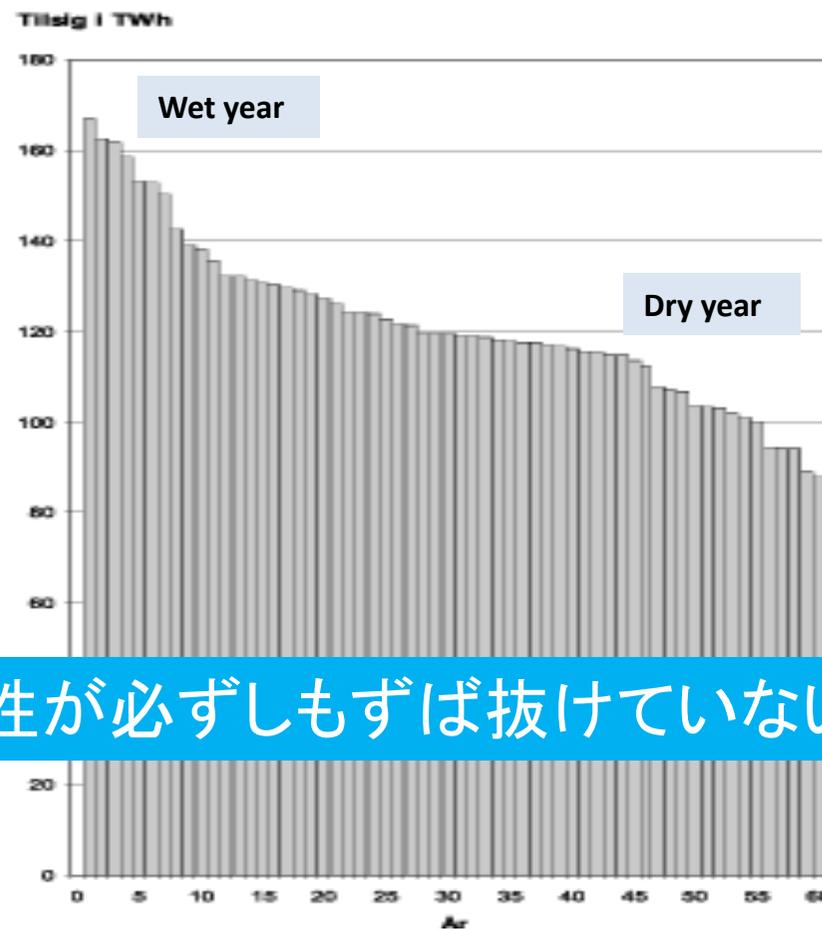
年間変動

資料:ノルウェー政府関係数値表より

水力のインフローの年間変動と発電



chronological – historic 60 years



ordered - wet – dry years

”燃料費”はゼロだが、供給信頼性が必ずしもずば抜けていない

資料:ノルウェー政府関係数値表より



表- 水力発電方式によるノルウェーの発電容量、発電量

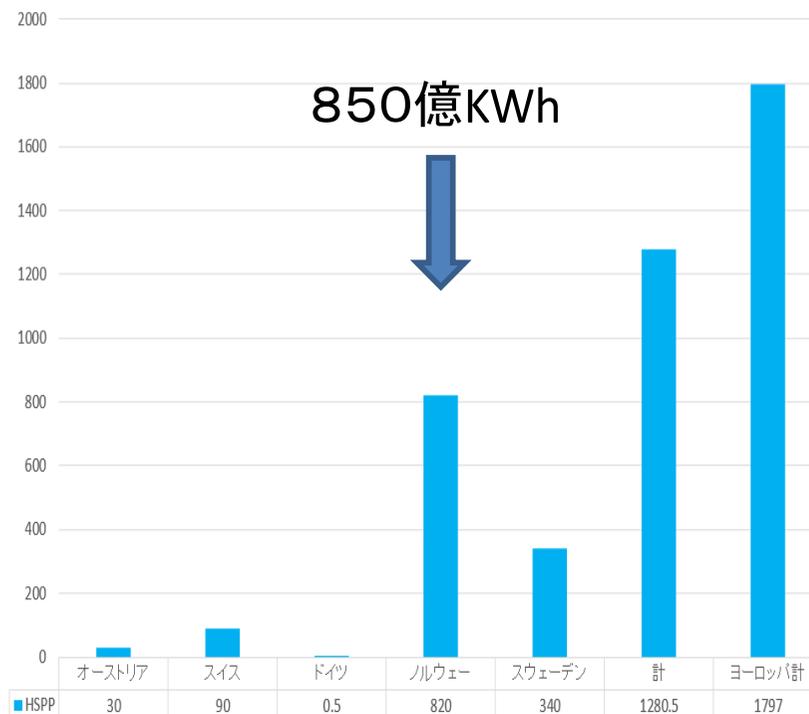
水力発電(タイプ)	発電容量(万KW)	発電量(億KWh)
Run-of-river 型	625.5 (20.2) * *	
HSPP:リザーブ型	2340.5 (75.5) *	850 (72.7) * *
PSPP型(揚水方式)	134.4 (4.3) *	
総合計	<u>3100万KW</u> (100.0)	1169億KWh(100.0) *

注)*はEurostat(2010)、**はSINTEF(2010)より。資料:ノルウェー政府関係資料等より筆者作成

資料:ノルウェー政府関係数値表より

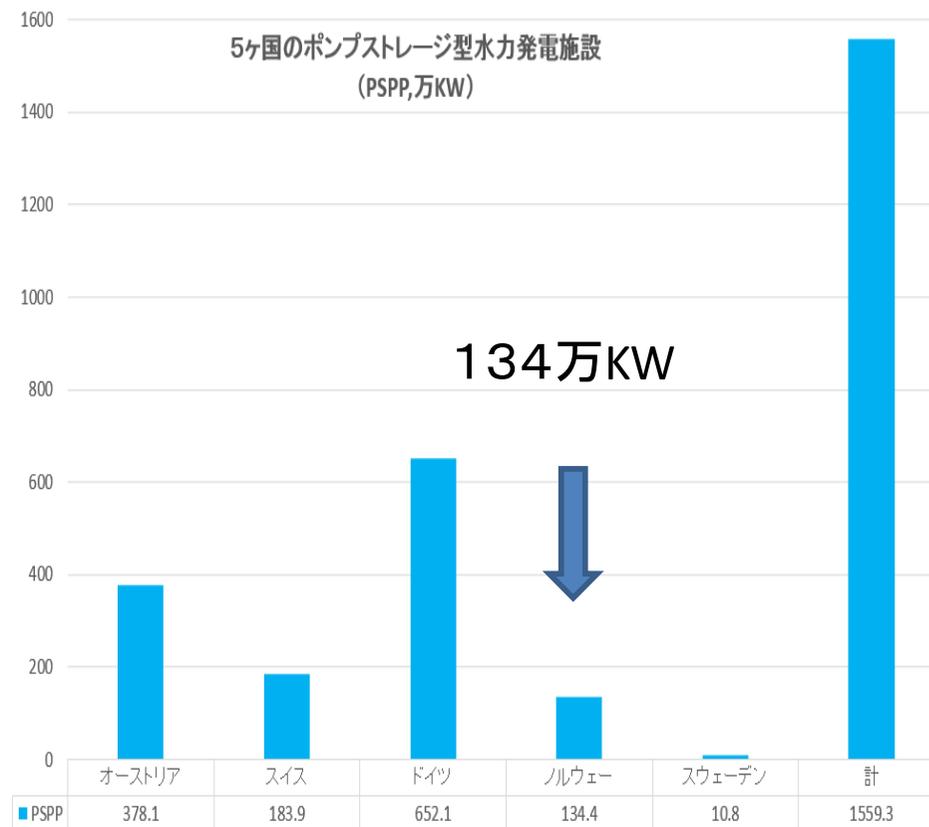
ノルウェーのPSPPの設備容量は134万KWと大きくはない

5ヶ国の貯水池型水力発電施設
(HSPP,億Wh)



ノルウェーのHSPPの発電量(850億KW h)は、ヨーロッパのHSPPの約半分、ノルウェー国内の70%超を占める。

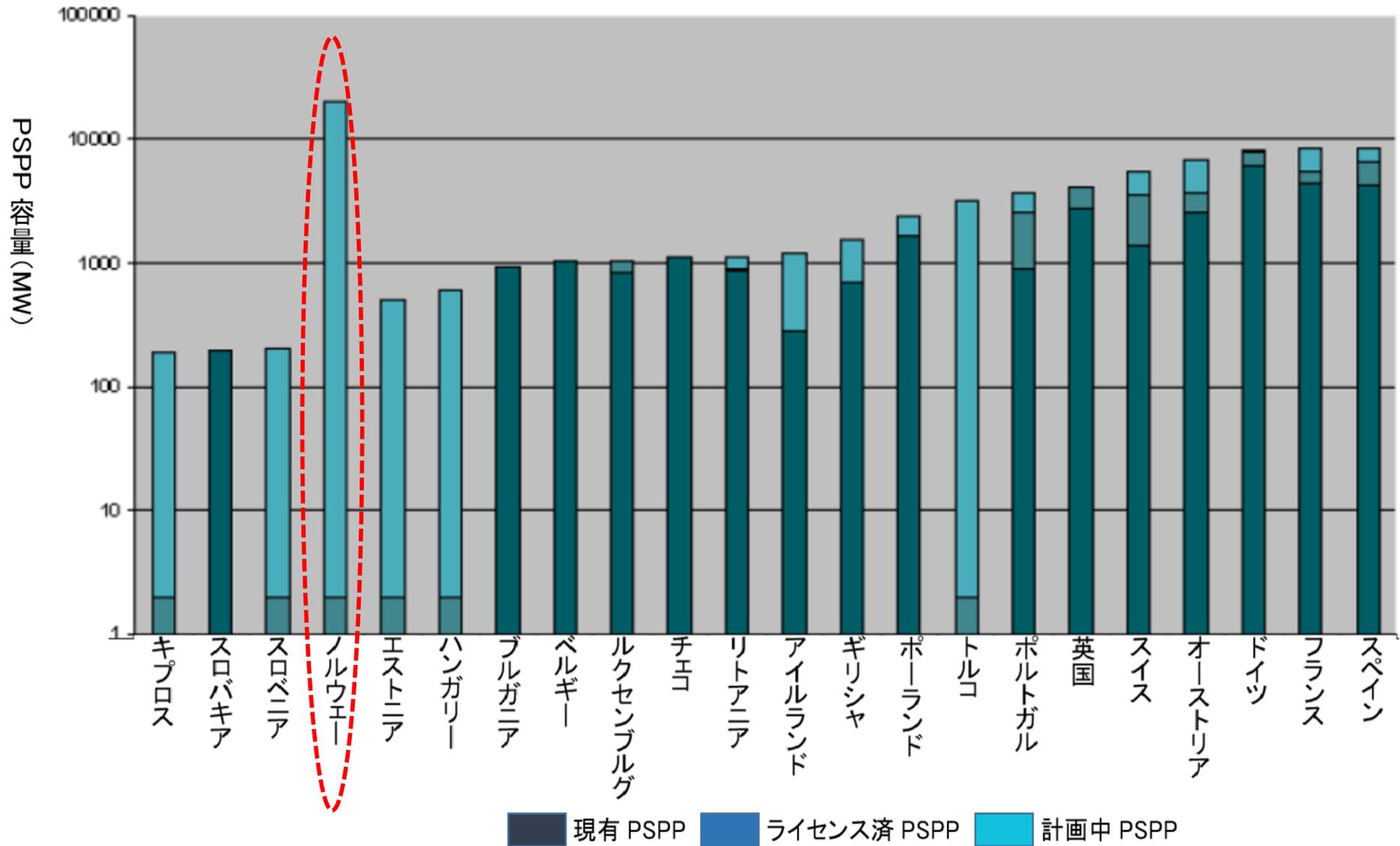
5ヶ国のポンプストレージ型水力発電施設
(PSPP,万KW)



ノルウェーのPSPPの発電容量(134.4万kw)の開発は余り進んでいない。潜在量は膨大である。

資料:最近のノルウェー政府関係省統計数値報告などより

図一 ノルウェーの「計画中PSPP」は”2000万KW超”と大規模



注)縦軸は対数尺度(要注意),ノルウェーは現有PSPPは僅少、水力はRun-of-River、HSPP、PSPPの3型式
 資料: EURELECTRIC(The Union of the Electricity Industry at Pan European level) 等資料より

ノルウェーの水力発電所の特性(現況)

1. 多くの自然の貯水池の存在
 - ・既存の自然湖を以下のものと組み合わせて使用することが多い。
 - ・自然レベルを上回る貯水量を上げるためのダム
 - ・自然レベル以下に下位貯水池を下げる工夫
 - ・1890年以来、600を超えるそのような湖の蛇口を保有
2. (建設時点は)比較的大きくない貯水量
3. 水力発電容量: 3100KW
4. 水力発電量: 1169億KWh
5. 貯水池式水力(HSPP): 2340万KW, 揚水式水力(PSPP):134万KW

典型的なノルウェーの水力発電のレイアウト

1. 発電施設の地下化
2. トンネルで相互接続された貯水池と発電所
3. 多くの自然湖が貯水池に使われている
4. 大きな水頭
5. 比較的低速度の水流
6. 通常使用されている漏水防止処理をしていない素掘りトンネル
 - 圧力シャフトさえ800m以上の漏水防止処理をしていない素掘り
 - ノルウェーの独自工法によるトンネル
8. トンネルサイズは、最大140m²に及ぶ



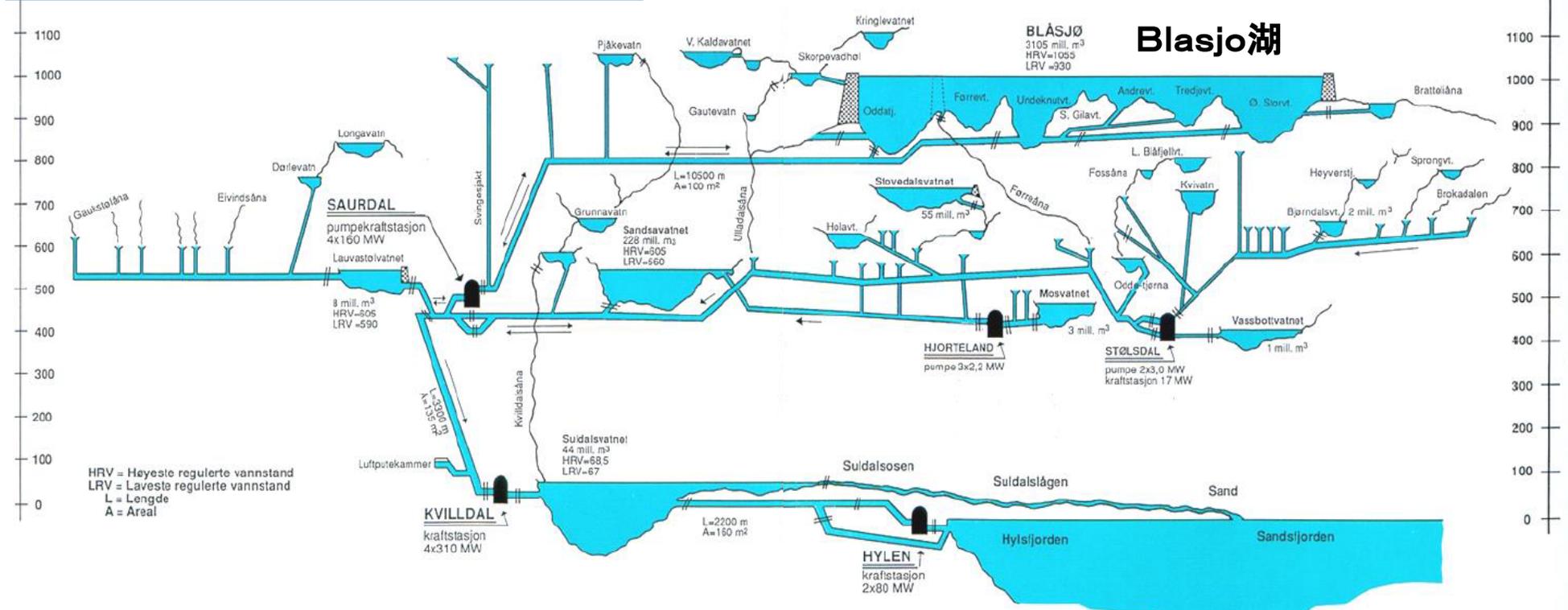
水力発電(タイプ)	発電容量(万KW)	発電量(億KWh)
Run-of-river 型	625.5 (20.2)	
HSPP:リザーブ型	2340.5 (75.5)	850 (72.7)
PSPP型(揚水方式)	134.4 (4.3)	
総合計	<u>3100.4 (100.0)</u>	1169.46 (100.0)



複合的な蓄電スキーム
 主要な1リザーバー(渇水期の多数年発電)
 体系的な水路:34の取入口+24の小規模リザーバー
 主要な3基の発電機(地下方式)、2基はポンプ施設

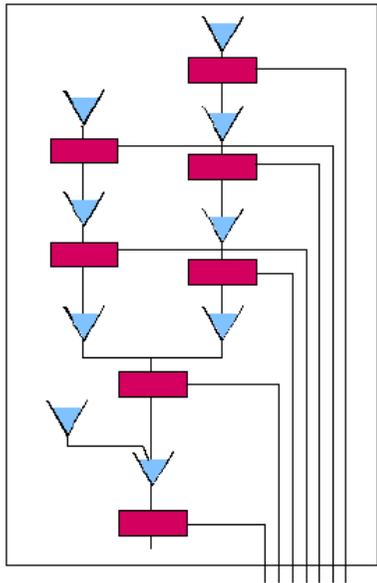
	Blasjo湖	家庭用蓄電池
発電量	78億KWh	10KWh
導入コスト	—	3500 \$
使用寿命	∞	約10年
※78億KWh × 350 \$ /KWh = 2兆7千億 \$		

ポンプ(32KW)、発電(205万KW)、年平均50億KWh,80Km2、標高1055m

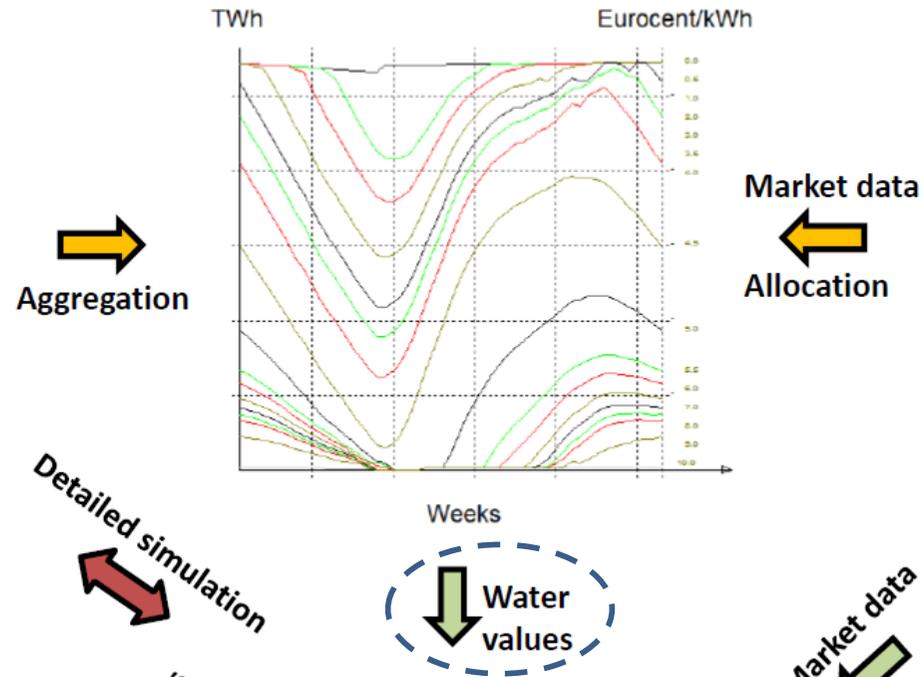


注)ノルウエー・Statkraft社、ノルウエーのBlasjo湖:貯水容量は7.8TWh(78億KWh)はドイツのGoldistahl(PSPP)の約1000倍に相当資料:

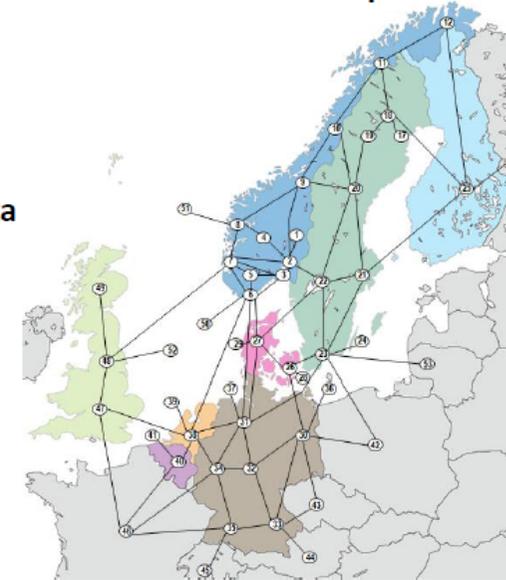
Details for hydropower



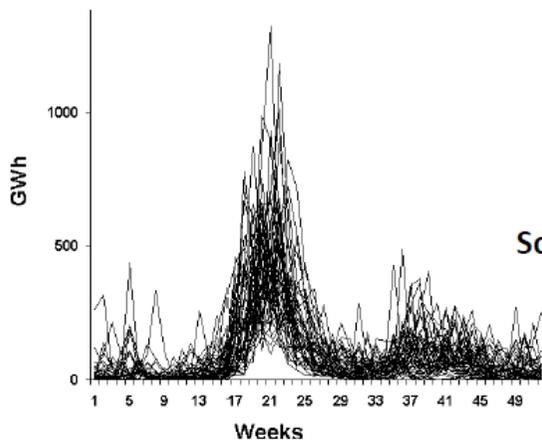
Water-value calculation (SDP)



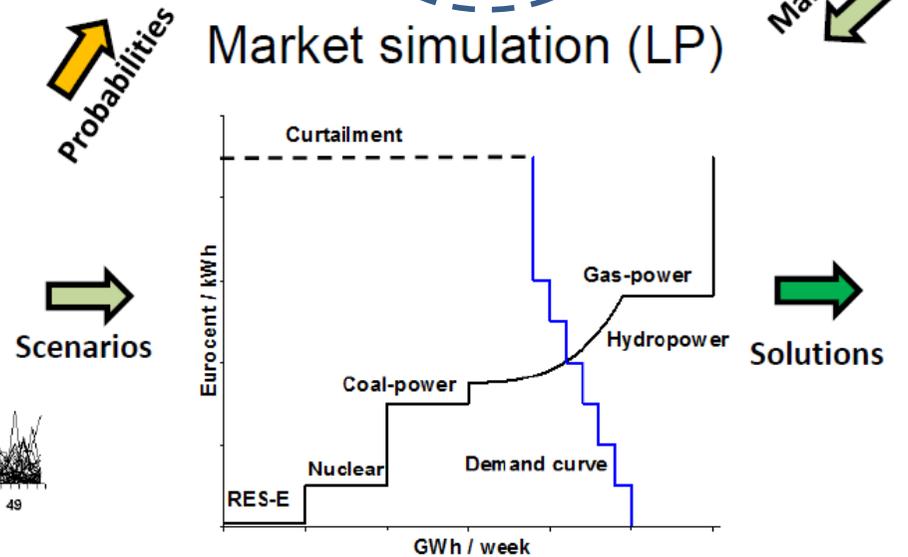
Market description



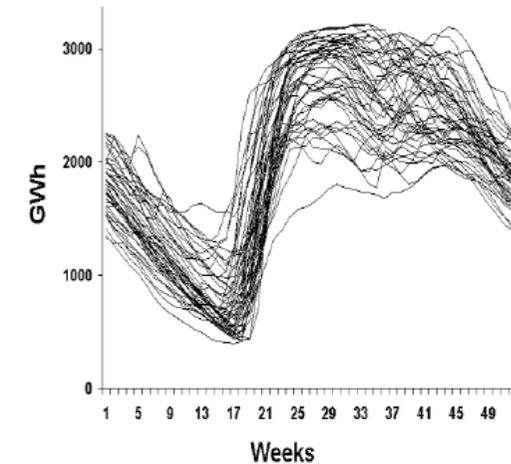
Stochastic weather



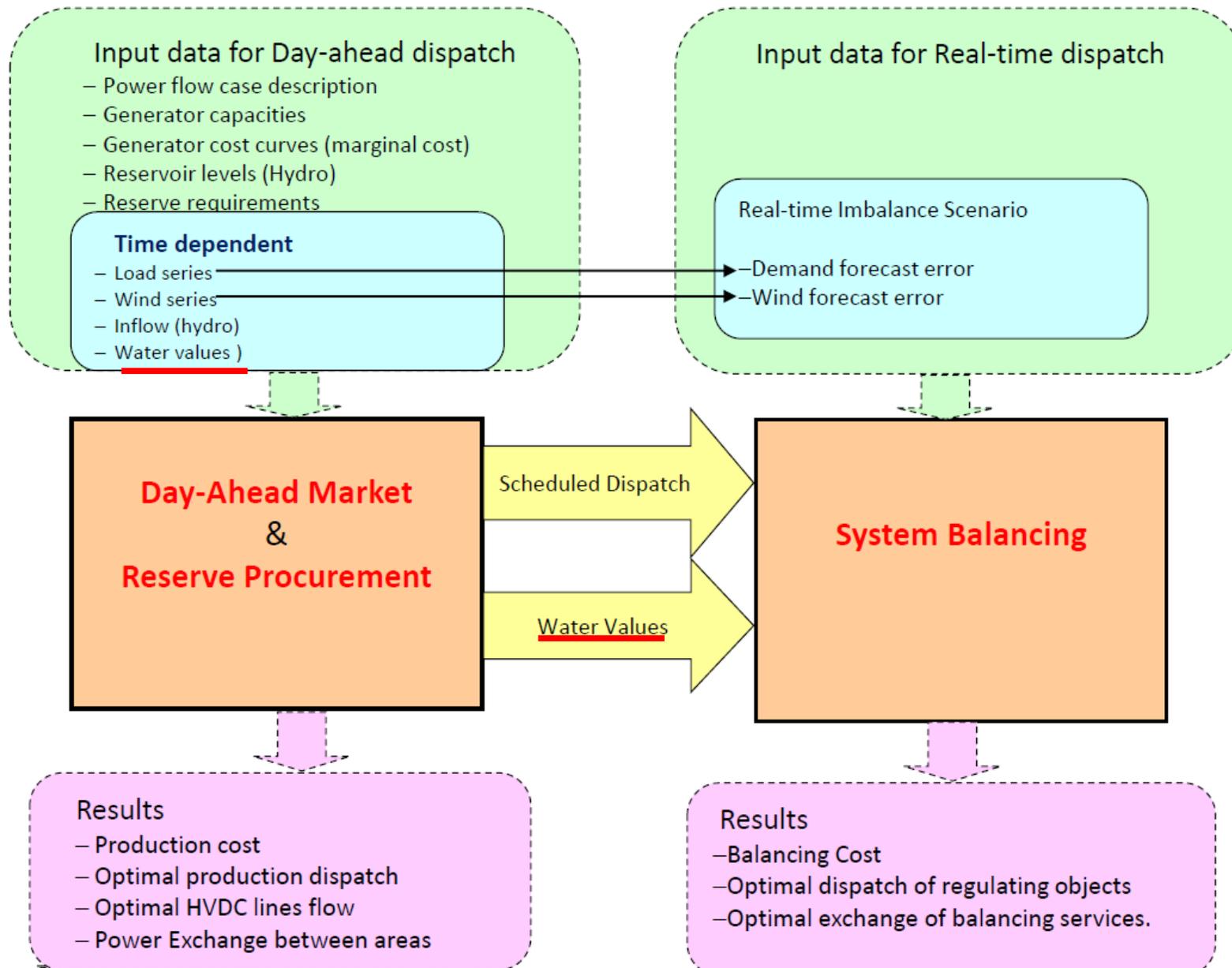
Market simulation (LP)



Results

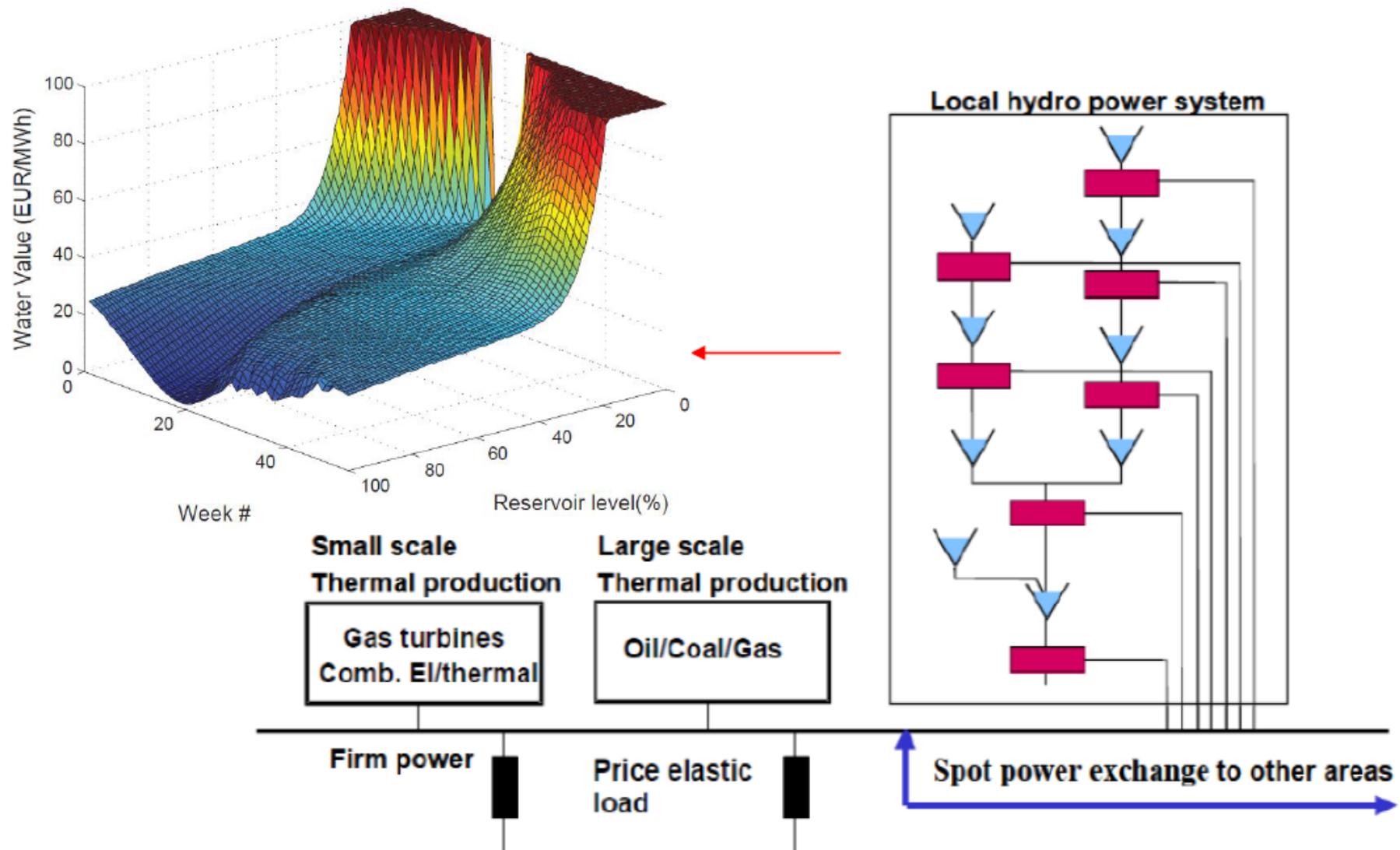


Simulation Procedure 水力資源の最適スケジューリングと信頼性



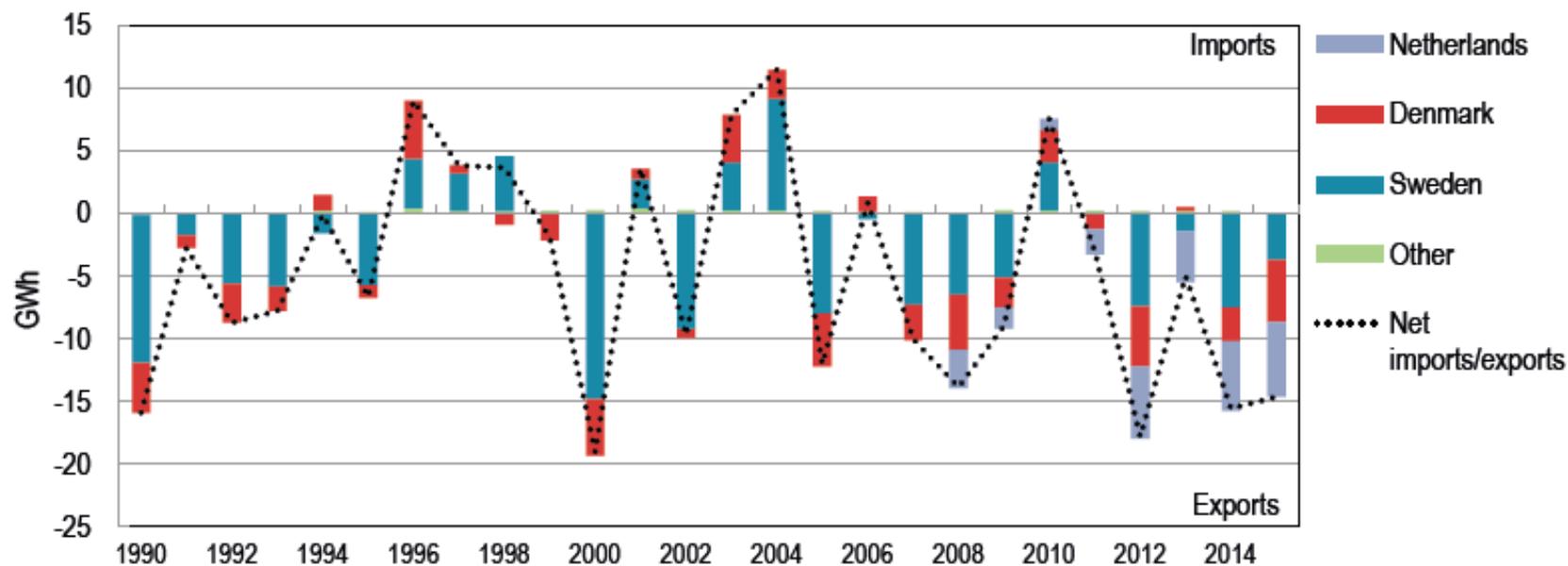
Water value : 全域的な水力の戦略的利用

Strategic Usage of Hydro



電力の純輸出：1990～2015	17年
電力の純輸入：1990～2015	7年
電力の輸出＝輸入(同じ)	2年 26

Figure 6.6 Net imports and exports of electricity by country, 1990-2015



Note: Some countries can both import and export in one year. The chart shows the net imports and exports.

* Others includes Finland and Russia.

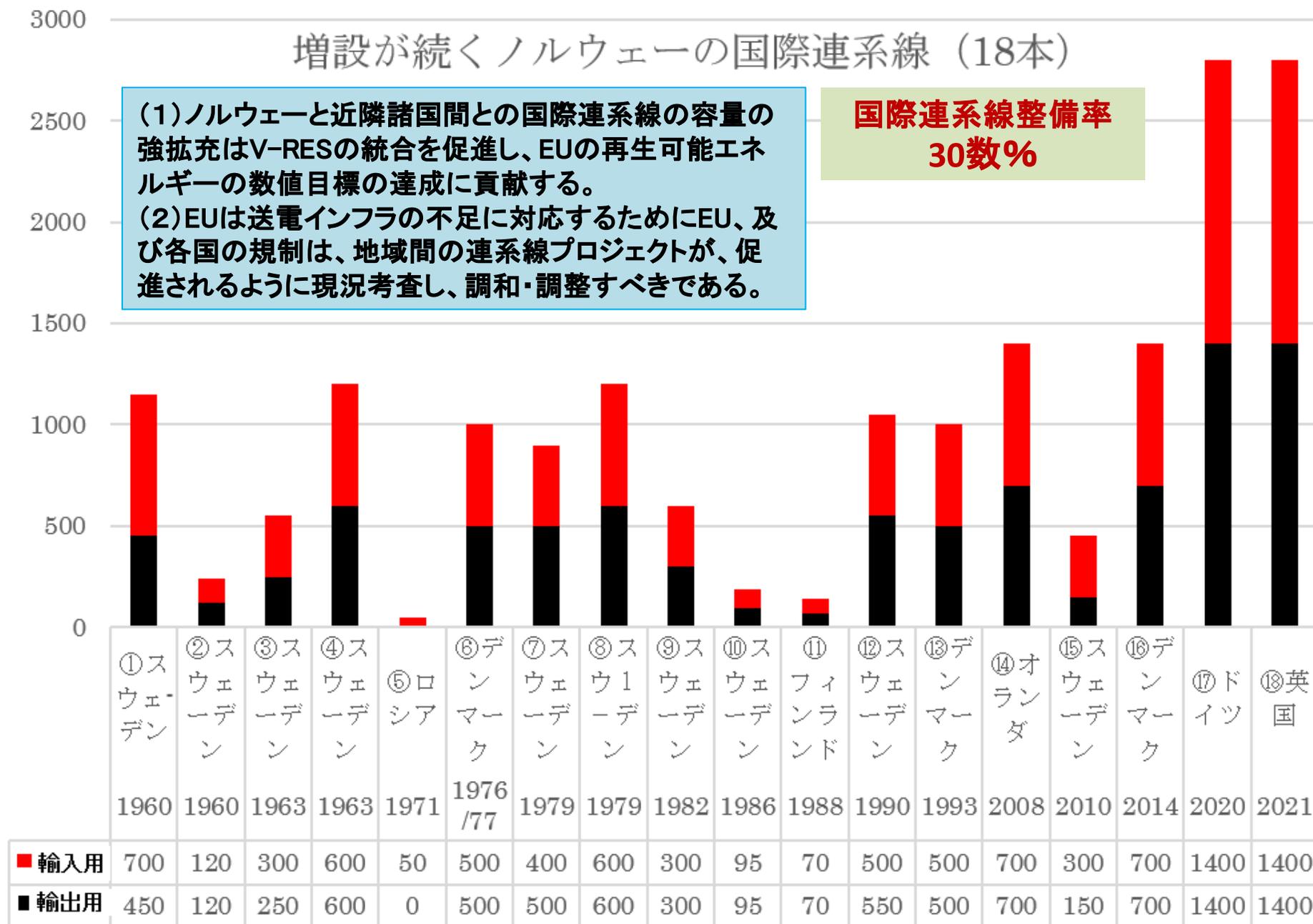
Source: IEA (2016a), *Electricity Information 2016*, www.iea.org/statistics/.

2008年のオランダとの国際連系線の運用開始以降、オランダに輸出。
 2010年：降水量は少なく、比較的寒冷的な冬季 → 電気暖房使用拡大

増設が続くノルウェーの国際連系線（18本）

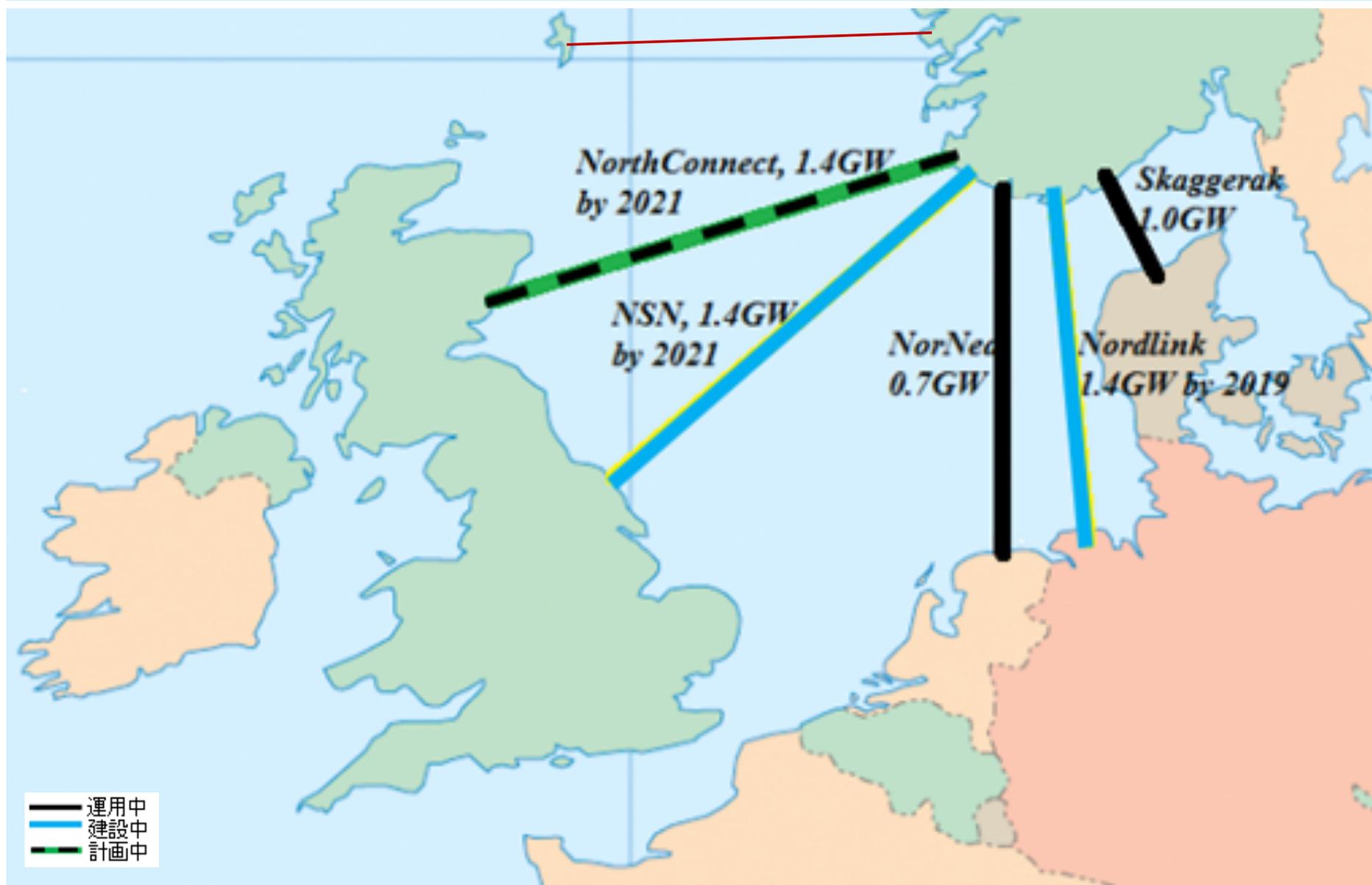
(1)ノルウェーと近隣諸国間との国際連系線の容量の強拡充はV-RESの統合を促進し、EUの再生可能エネルギーの数値目標の達成に貢献する。
 (2)EUは送電インフラの不足に対応するためにEU、及び各国の規制は、地域間の連系線プロジェクトが、促進されるように現況考査し、調和・調整すべきである。

**国際連系線整備率
30数%**

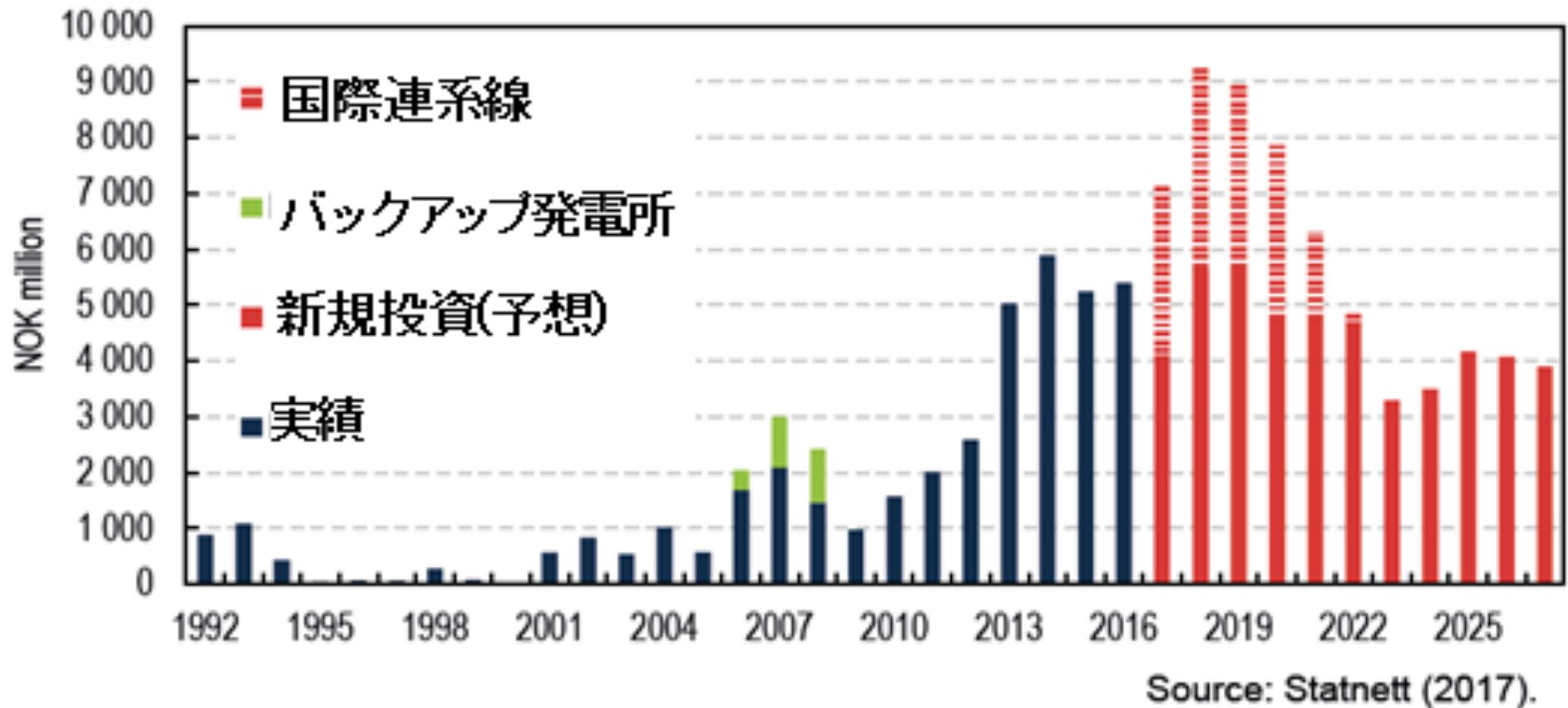


資料: IEAカントリーレポート数値より筆者作成(2017)

ノルウェーと結ぶ国際連系線

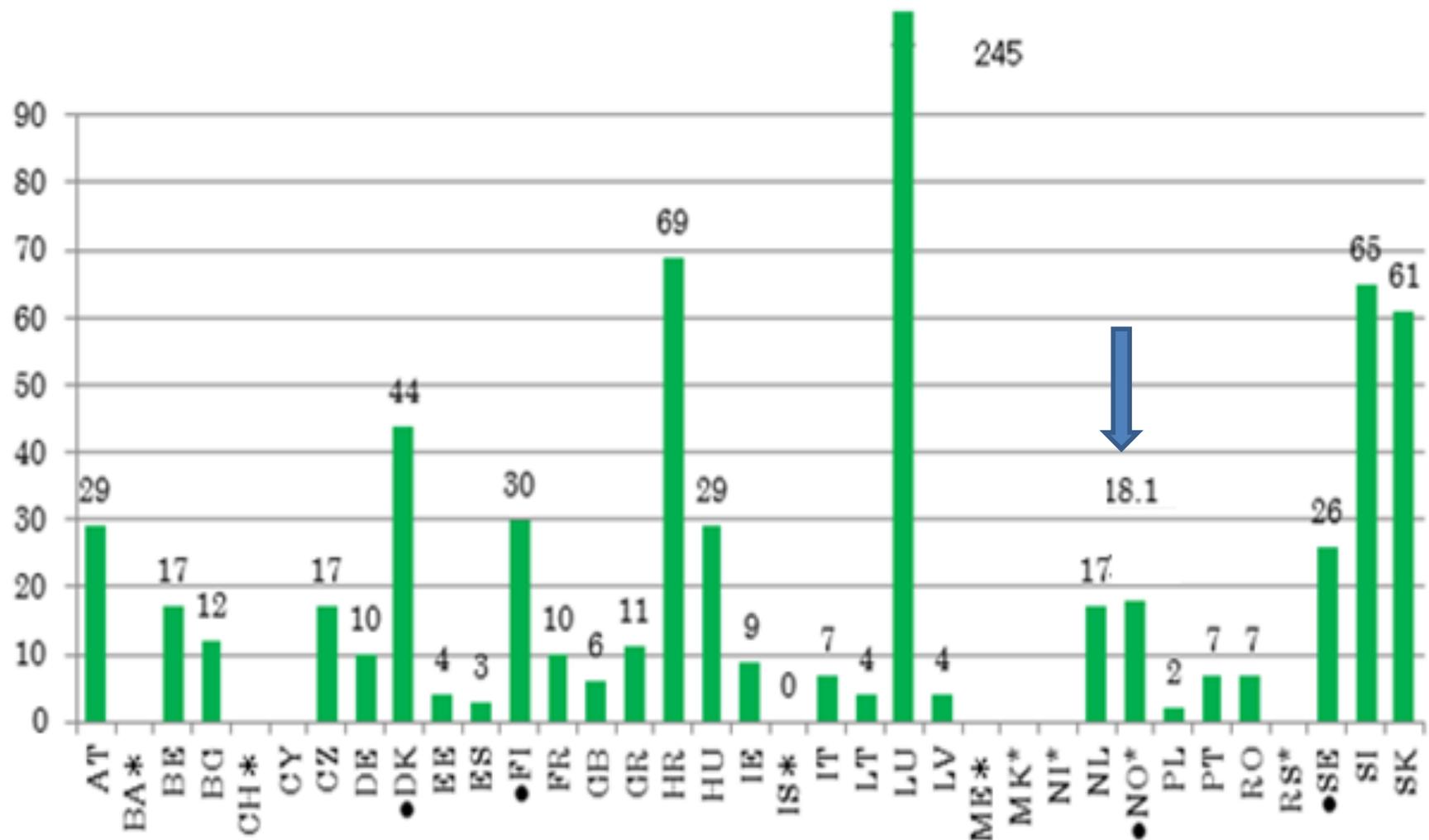


図一 今後も続く送電線関係投資— 1992～2025年(NOK、million)



entso-e加盟国35ヶ国の国際連系線の整備率

— 数値目標10%(2020)、15%(2030) —



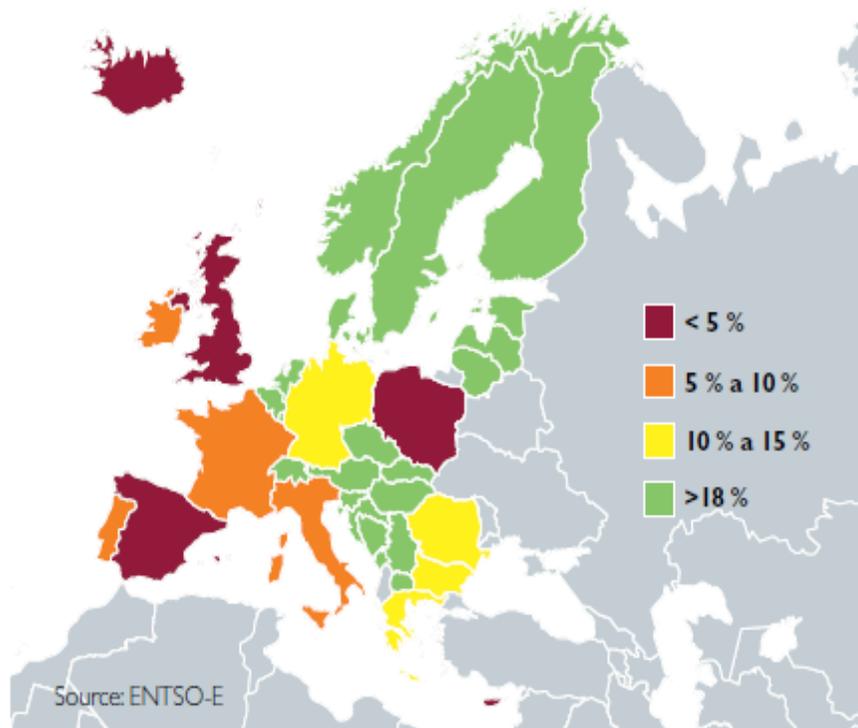
注) * EU 未加盟国、*国のアイスランドは0%、ノルウェーは 18.1%、EU27ヶ国が加盟・マルタは未加盟、●:北歐4ヶ国

資料: EC.COM(2015)82final,ENERGY UNION PACKAGE, Achieving the 10% electricity interconnector target

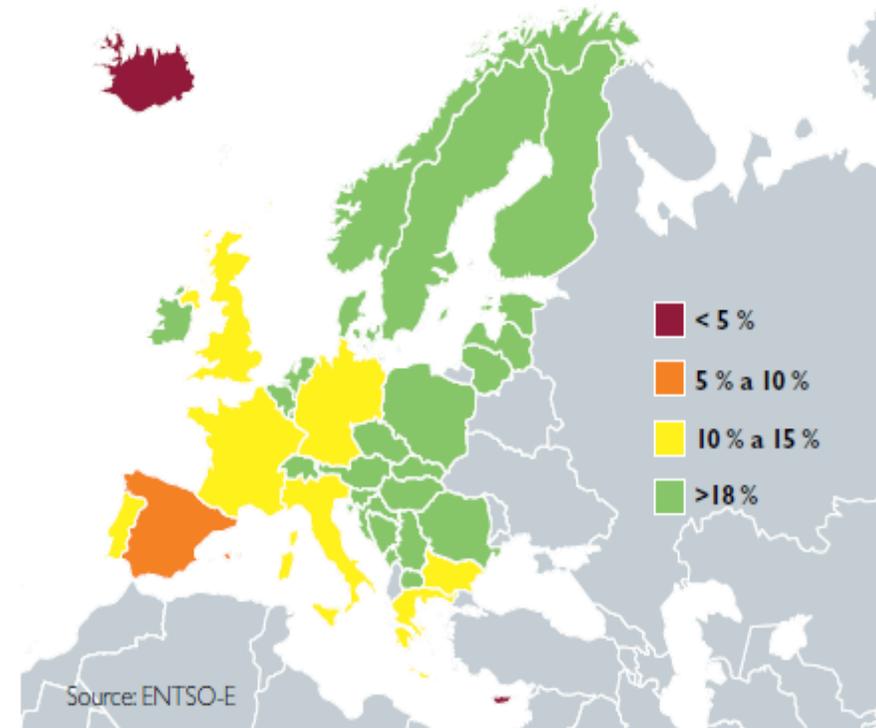
Making Europe's electricity grid fit for 2020 ENTSO=E, Scenario Outlook and Adequacy Forecast 2014 より、筆者作成、2016.

改善される国際連系線接続率

(2011)

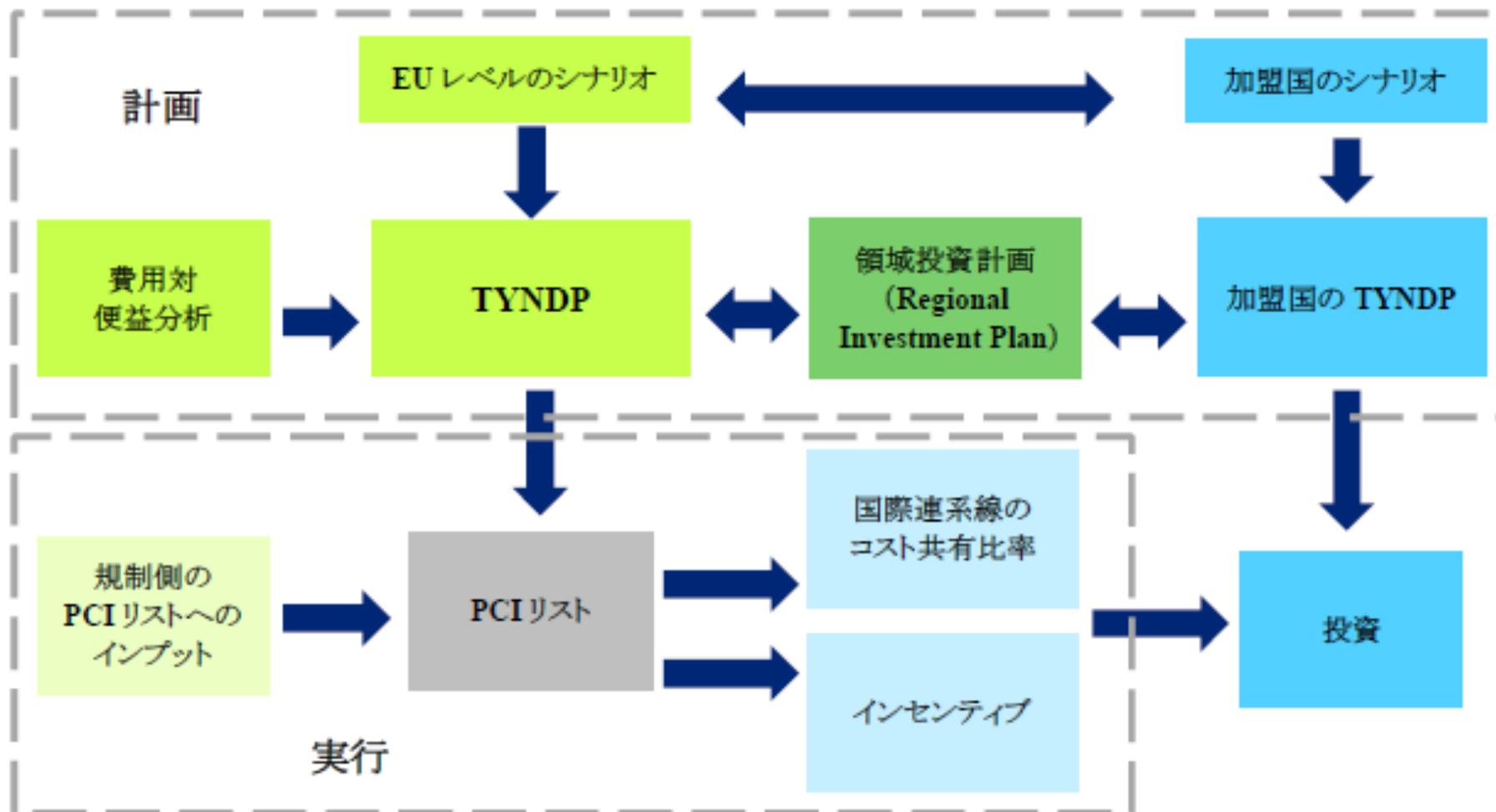


(2020)



資料: RED ELECTRICADEESPANA, Dep. Of Communication and Responsibility (2012)、
Corporate Electricity Interconnections: a step forward towards a single Integrated European Single Marke

図 EUの送電網整備10年計画の策定と実行段階の関係図



凡例

ENTSO-Eの役割 (ACERの意見)	EU/加盟国の役割 (ACEKの意見)	加盟国の規制機関と地域グループの役割	ENTSO-Eと加盟国TSOの役割	加盟国の規制機関とACERの役割	TSO各社 (加盟国規制機関の意見)
----------------------	---------------------	--------------------	-------------------	------------------	--------------------

注)一部筆者修正・加筆、資料:

EU のTEN-E 事業に対する公的な財政支援 (資本金に対する助成金)

プログラム	ターゲット	条件	総額
TEN-E 助成金	資本金 Equityを レバレッジ	<ul style="list-style-type: none"> ● 調査にかかる費用のうち助成の対象になる部分の費用の 50%まで ● 事業費用の 10%まで ● 事業者は残りの費用を協調融資(co-finance)すること 	
EEPR 助成金		<ul style="list-style-type: none"> ● 2009 年から 12 の国際連系線に出資 ● 事業費用の総額の 50%上限 ● 協調融資(co-finance)が要求事項 	総額 40 億 EUR
Marguerite Fund		<ul style="list-style-type: none"> ● 要求する事業リターンが 10-14% 	エネルギー事業へは 3 億 7500 万から 5 億 2500 万 EUR
CEF 助成金		<ul style="list-style-type: none"> ● 対象 PCI の条件は以下の 3 つ <ol style="list-style-type: none"> 1) 助成を受けなければ商業的に事業性がなくなること 2) エネルギー安定供給や独立性、イノベーションに貢献すること 3) すでに二国間の費用の分配が決まっていること ● 必要とされる調査や建設費用の 50%が上限(特別なケースでは 75%まで可能) 	2014 年から 2020 年 までの期間に 58.5 億 EUR

プログラム	ターゲット	条件	総額
EIB による融資(CEF)	借入れ Debtを レバレッジ	<ul style="list-style-type: none"> ● 事業費に対する融資 ● 事業費の 50%を上限(特別なケースでは 75%まで可能) 	
EC-EIB による PBI (CEF)		<ul style="list-style-type: none"> ● 劣後負債のファイナンスでメザニン融資の形を取るものと、資金が出ない債務保証の形の 2 種類 	パイロット期間は 2 億 3000EUR の予算
EBRD による融資		<ul style="list-style-type: none"> ● 1-7%のスプレッドで商業銀行の料率設定に従い、コーポレート・バンクを共同融資者として融資 ● 事業レベルと企業レベルの両方に融資 	非常に小規模

注)一部筆者修正・加筆、資料:

ノルウェーとドイツの共同宣言

サイン団体

JOINT NORWEGIAN-GERMAN DECLARATION

For a long-term collaboration to promote renewables and climate protection

2013

SOLUTIONS

... good collaboration

... long-term perspective ...

... lower risks ...

ADVANTAGES

... renewables and efficiency

... high priority

... growing shares of wind and solar ...

... key to climate protection

RESPONSIBILITY

Motivations

Renewables: the key to climate protection and a necessary investment to the future

Climate change mitigation must be a priority. We must reduce the risk of the disastrous impact on nature and society to a minimum. Many studies confirm that renewables and energy efficiency are essential to decarbonise the power sector in Europe, and to reduce the big risks and environmental damages linked to the use of conventional energy sources. The transition to high shares of renewables reduces Europe's dependency on energy imports, and supports economic development and the creation of jobs, both in manufacturing and at the local level.

Storage: Interconnection can directly contribute to substitute large amounts of fossil fuel-generated electricity (once the necessary connection capacities are built). At the same time, energy efficiency efforts and the planned increase of renewable generation in Norway can also help reduce the high emissions generated by the offshore oil and gas industries, as well as by road transport.

Flexibility: Pumped hydro power systems in heavily populated areas to the impact of the increased fluctuation of water levels in existing storage facilities.

Mutual economic advantages

More interconnection capacities increase Norway's security of supply for 80 years and Germany's security for times with low renewables production. Thus, the stability of the power system in the whole region is strengthened. Average prices for Norwegian consumers will not necessarily increase. But if they do, this will be counterbalanced by increased

is one effective option to source large amounts of variable renewables in Germany and other parts of Europe, and it can contribute to reduce the costs of the Energiewende. This can only be a part of the solution; other flexibility options must be developed and deployed as well.

To enable this cooperation, a gradual growth of interconnection capacities is needed. This can be a good deal for citizens: the recent sub-sea cable between Norway and the Netherlands has paid off in less than three years and is now providing net income to the state-owned companies that operate it. We welcome and support the rapid implementation of the planned cross-border connections, and encourage policymakers to facilitate the realisation of more transmission cables, should they be needed to enable higher shares of renewables in Germany and other countries.

Additional information

The impact of interconnection on the environment must be considered when weighing the unavoidable local impact of renewable-generation facilities, of the increased use of existing storage reservoirs, and of new grid infrastructure. These impacts must be weighed in

and others are being developed, existing hydropower reservoirs can be a relevant part of the answer to the flexibility challenge. Compared to Norway, Germany's natural hydropower reservoir supply is very small.

must be considered when weighing the unavoidable local impact of renewable-generation facilities, of the increased use of existing storage reservoirs, and of new grid infrastructure. These impacts must be weighed in

1

2

風力や太陽光の卓越した発電時には、ノルウェーはドイツから安い電気を輸入でき、その分貯水池の水量（間接蓄電）を節約する。風力の低生産時には、ノルウェーは、その貯水池（貯蔵水）を使い高い価格で電力を輸出する。

自然の恵みと 今までの投資、ノルウェーはヨーロッパの半分の貯水池を持ち、さらに新しいダムを建設せずに容量を増やすことができます。したがって、ノルウェーは他国の大量の風力や太陽光を統合する鍵を握っている。即ち大規模で、費用対効果が高く、排出のない間接的な電力ストレージを供給することによって

- Norway:**
- Energi Norway
 - Future in our hands
 - Greenpeace Norway
 - Natur and Youth
 - Norsk klimanettverk
 - NORWEA
 - Spire
 - WWF Norway
 - YS – Confederation of Vocational Unions
 - ZERO – Zero Emissions Resource Organisation
- Germany:**
- Agora Energiewende
 - Bread for the World – Protestant Development Service
 - German Environmental Aid
 - German Renewable Energy Federation
 - Germanwatch
 - Naturefriends Germany
 - TenneT
 - WWF Germany
 - Young Friends of the Earth Germany
 - 100 Prozent erneuerbar stiftung
 - 50Hertz
- Initiated by SEFEP – Smart Energy for Europe Platform*

調査研究：“HydroBalanceプロジェクト”

1. 調査名：Norwegian hydropower reservoirs offer the possibility for balancing the growing wind power production in Europe
2. 調査の目的：表を参照のこと
3. 調査研究期間：2013～2017年
4. プロジェクト・リーダー（Dr. Michael Martin Belsnes – SINTEF・Energy Systems Dep.）
5. 研究費用：25 million NOK（1NOK=14.2、3億5500万円）
6. 研究体制/協力体制：SINTEF

研究体制	7. 研究目的と内容(WP1～WP5)
CEDREN:	<ul style="list-style-type: none">■ WP1: Roadmap for energy balancing from hydropower■ WP2: Demand for energy balancing and storage■ WP3: Modelling and analyses to develop relevant business models■ WP4: Environmental impacts of new operational regimes■ WP5: Social acceptance and regulatory framework

グリーン・バッテリーの期待(1): PSPP潜在量

新規の揚水式水力発電の開発可能性

1. 既存の大きな上部と下部の貯水池を持つ多くの(> 100)システム
2. 上池と下池を持った水量1億トン以上の20施設以上
3. 高品質の岩石は堅固なトンネルとなり高い費用効果
4. 100万KWから250万KW以上の多くのプロジェクトが可能
5. バルク蓄電容量 …… 50億KWh/cycle

現ヨーロッパは対応できない、現在オーストリアなどのPSPPのPCIリスト提案中であるが、..

5. 新規開発と比較すると(既設利用のアップグレード)小さい環境インパクト

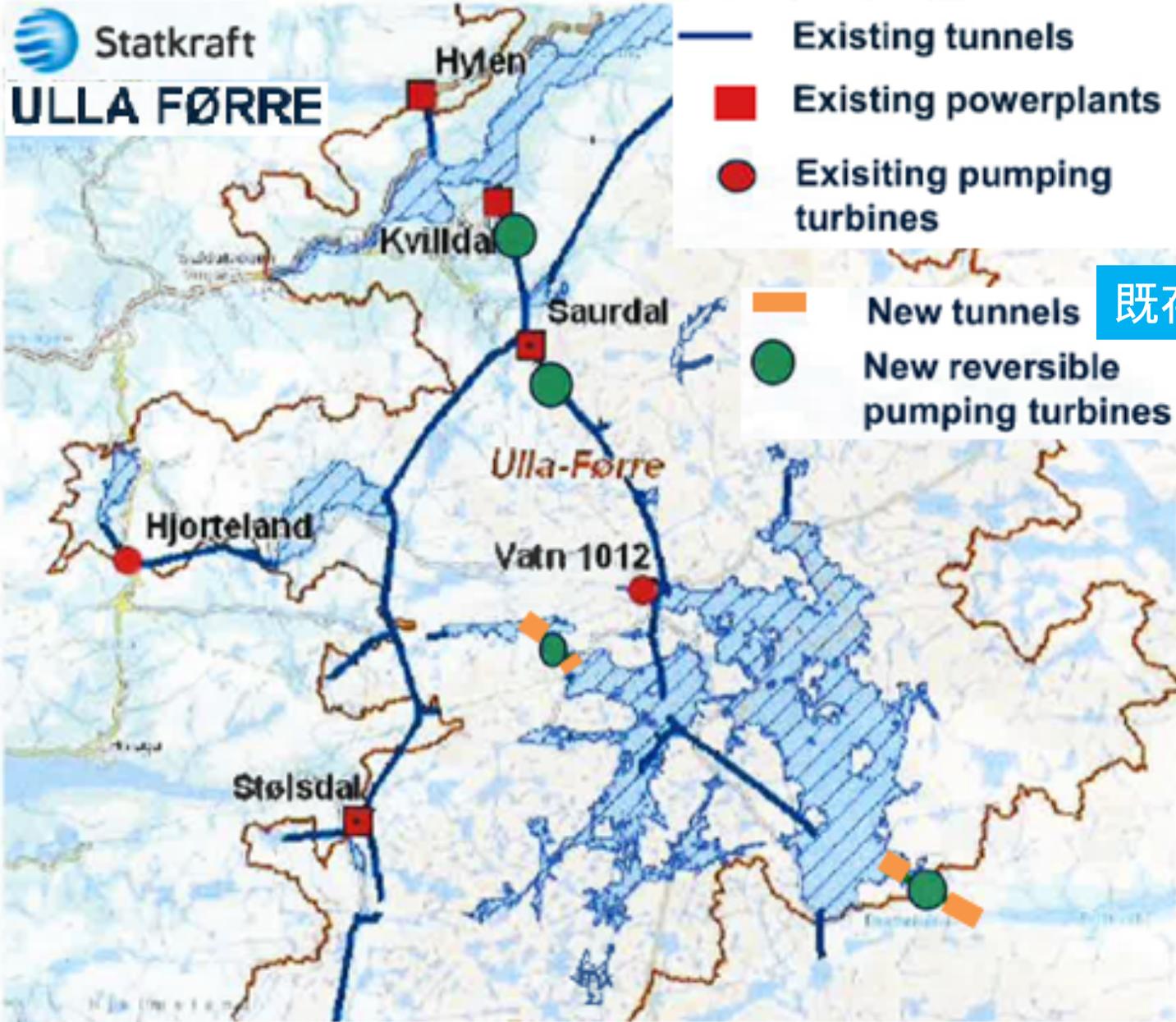
新規の貯水施設は常に論争的5. 小さな距離で高いヘッド差と大きなストレージ容量を持つ貯水池のペアを見つける必要がある

6. 予備調査: 少なくとも2000万kwが開発の可能性 ※北ノルウェーアセス中
7. (PSPPの)12プロジェクトの詳細な調査・研究が進行中。

※南ノルウェーの技術レベルの潜在量一種々の制約に依存

(補足)

- (1)開発計画は、しばしば延長距離の大変長いトンネル(5-50km)使用
- (2)トンネルと地下空間創出の費用は通常、全体の50%超
- (3)主としてトンネルも圧力シャフト水漏れ防止無しの素掘りを使用
- (4)低水速度と低摩擦損失
- (5)運動中の大容量の流量…… 運転中の安定性の問題
- (6)除去岩石など隧道などの大量の土砂処理



既存施設のUpgrade

	現況	Upgrade	Upgrade 増分	倍率
PSPP	30万KW	400万KW	370万KW	13.3倍
発電容量	200万KW	600万KW	400万KW	3.0倍

CEDREN Balancing potential study 2030

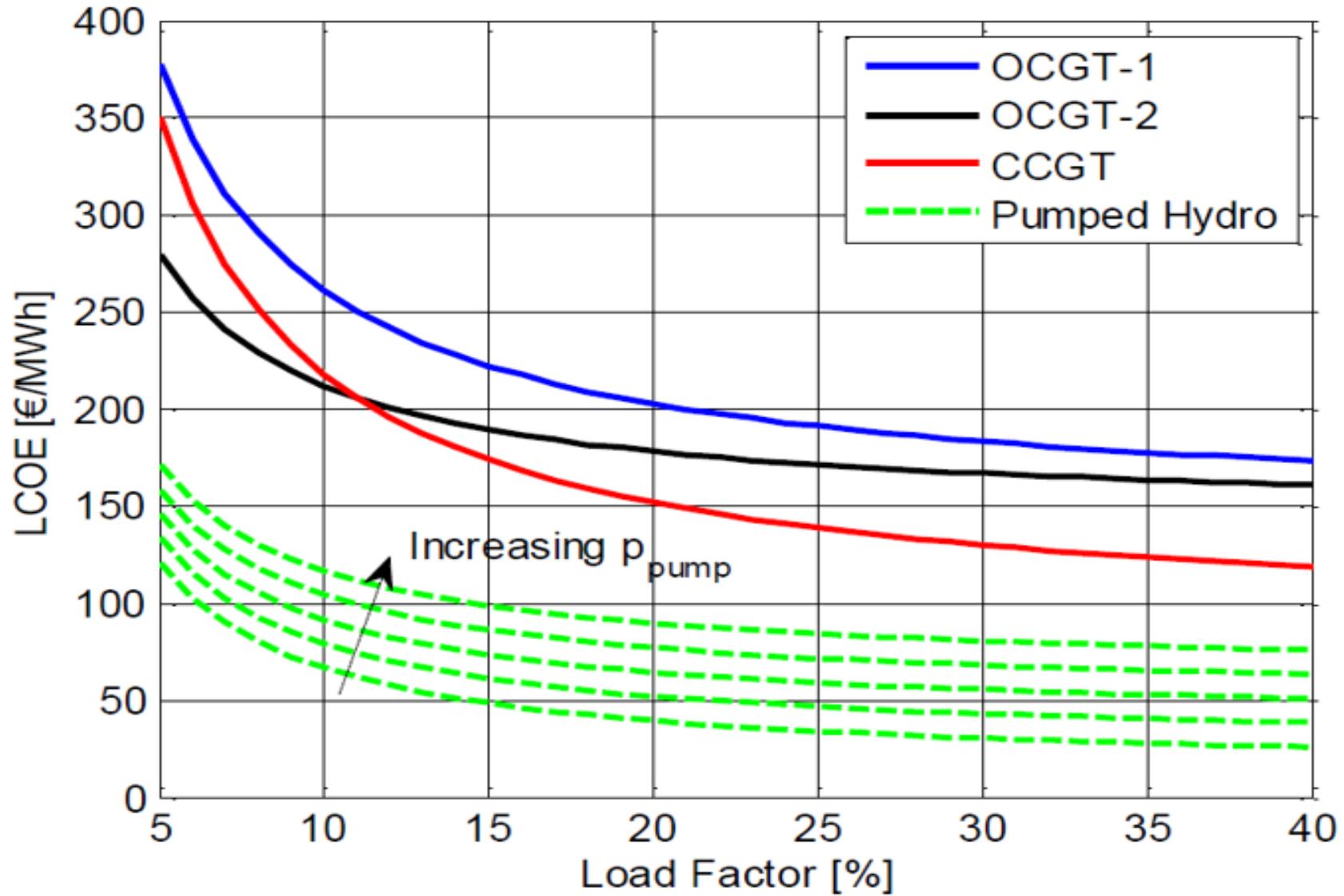


- ・ 南ノルウェーの2000万KW
の新規PSPP容量
- ・ バランシングサービスの輸出
- ・ グリッド、マーケットの統合



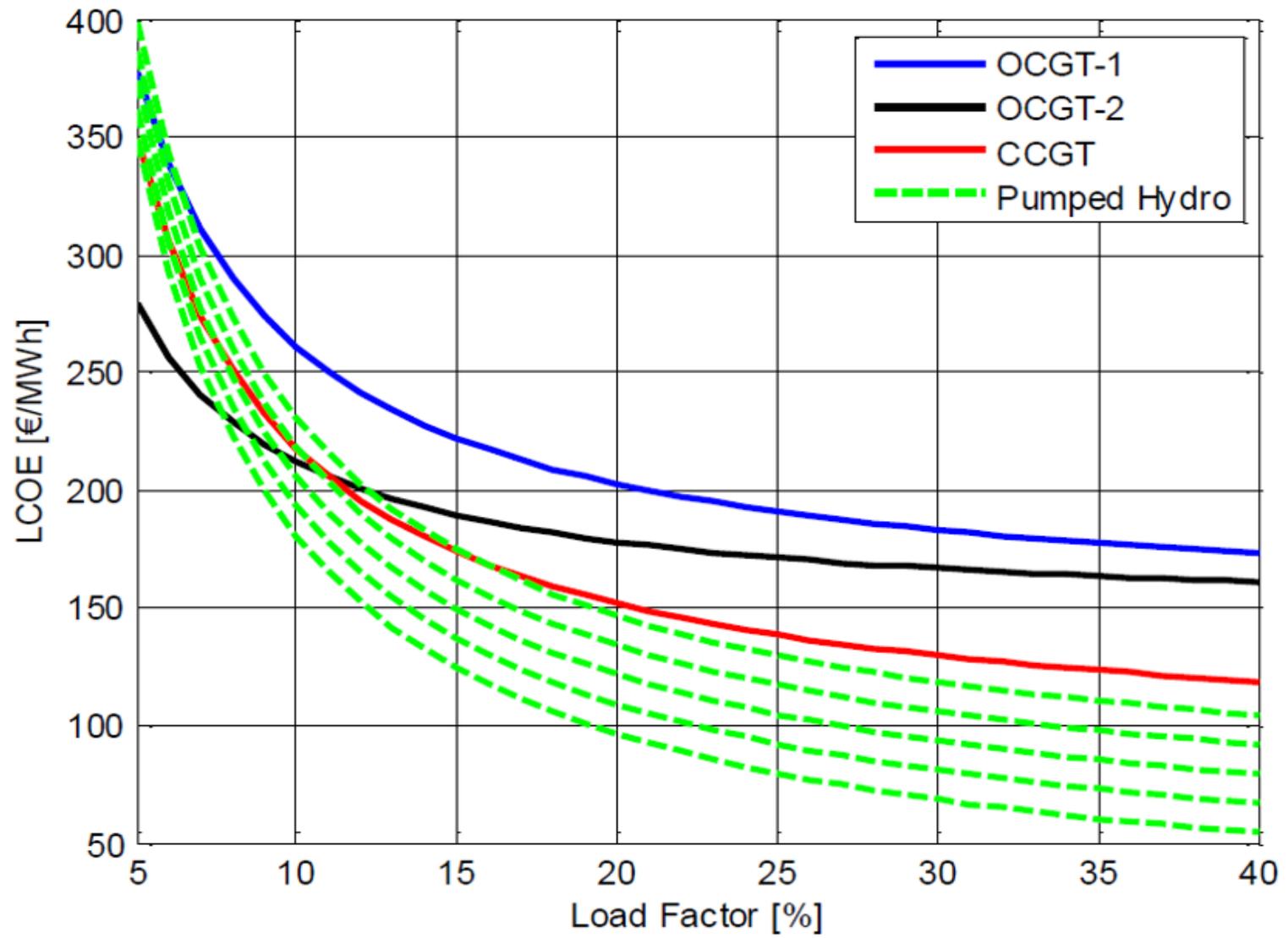
資料: Norwegian University of Science and Technology CEDREN: Centre for Environmental Design of Renewable Energy

ノルウェーのPSPPの均等化発電原価 (Levelized Cost of Electricity : LCOE) 比較的低い



資料: Norwegian University of Science and Technology CEDREN: Centre for Environmental Design of Renewable Energy

グリッド、ケーブル費用が含まれてさえもPSPPは、LCOEは低い



資料: Norwegian University of Science and Technology CEDREN: Centre for Environmental Design of Renewable Energy

グリーン・バッテリーの期待(2): 国際連系線

肯定的な意見が多いが、制約も大きい

- (1) 容量において相当の制約。容量規模を考えるとドイツ対応が現実的なのか
- (2) その場合、ノルウェー内にインフラ、発電施設の投資が必要
更に、HVDCの国際連系線(ノルウェーとドイツ間など)が必要
- (3) またノルウェー国内に環境インパクトが予想され十分な配慮ができるか
- (4) 費用効果の良い別の開発オプションがあるが、CO2排出が非常に大きい
- (5) 既にEU間に国際連系線が展開中、国際連系線の整備率は30%超と大きい

(単純な比較計算) ケーブル:CCGT:PSPP(ドイツ):PSPP(ノルウェー)
但し、ノルウェー国内のグリッドの強化・拡充は無し

●ケーブル費用/MW	8.5	MNOK/MW	
●新規のCCGT費用/MM	6.0	MNOK/MW	
●新規のPSPP(ドイツ)費用/MM	9.6	MNOK/MW	
●新規のPSPP(ノルウェー)費用/MM	5.0	MNOK/MW	一番安く...

資料: Wilhelm Rondeel (Telemark University College)、Hydro Electricity and Storage capabilities in Norway,2012

まとめ

(1)

(2)

(3)



最後まで、ご清聴感謝申し上げます

資料：ノルウエー・Satkraft社、ノルウエーのBlasjo湖：
貯水容量778億KWhはドイツのGoldistahl(PSP)の約1000倍に相当