

エネルギー問題に発言する会 講演

カーボンニュートラル時代の最適発電方式

---日本の火力発電技術が世界を救う---

2024年1月29日

東京大学生産技術研究所

研究顧問

金子祥三

目次

1. 日本の現状と問題点
2. 変動性再エネVREの欠点
3. ヨーロッパの現状と日本への教訓
4. 交流電力網の特徴
5. 周波数制御の重要性
6. 柔軟な火力発電：Flex-Power
7. 余剰再エネの再利用方法
8. 最適な発電システムとは
9. まとめ

1. 日本の現状と問題点

1. 日本のエネルギー政策は(S+3E)をベースに進められている。
2. 現在は第6次エネルギー基本計画に基づき、大幅なCO₂削減を目指して、再生可能エネルギー大幅に増加させる方針である。
3. これは現基本計画が“CO₂ 46%削減”という政治スローガンに無理に合わせているためである。
4. 再エネ増加も、太陽光・風力といった不安定な変動型再生エネルギーVREに偏重しており、電力の安定供給に大きな問題が起りつつある。
5. 一方、大幅な投資による経済効果を狙ってGXが進められているが、具体的な内容は必ずしも伴っていない。
6. 一日も早く、科学的根拠に基づいた正しいエネルギー基本計画の策定と、実行のための具体策をまとめ、経済支援と一体化して進めるべきである。

● (S+3E)の同時実現

S+3E

- 確実で安価なエネルギー源の確保

Energy Security
エネルギーの安定供給

- 安全(Safety)を前提として3Eの**同時**実現を図ることが大切
- 共存解は非常に狭い

共存解

Economy
経済効率性

Environment
環境への適合

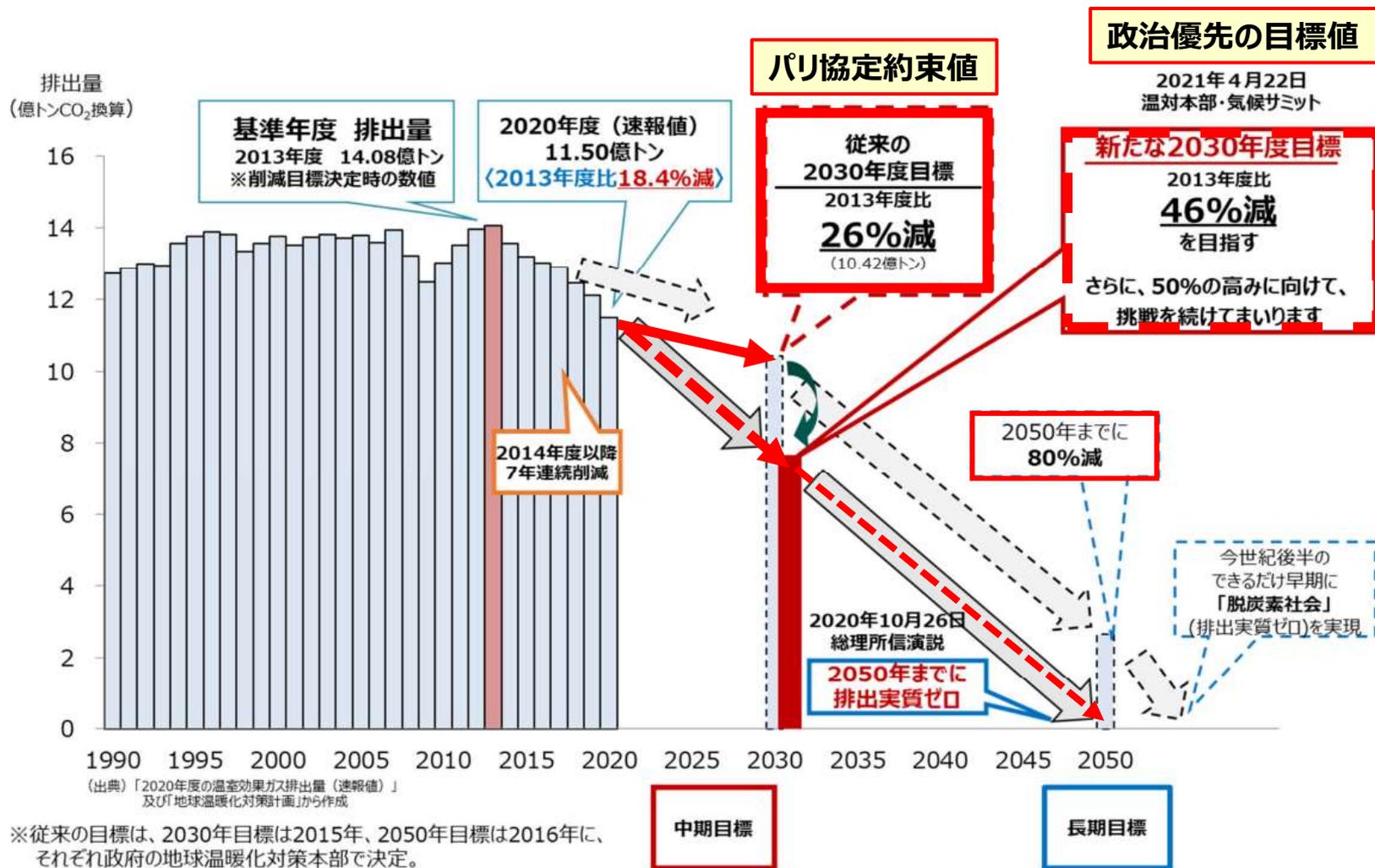
- 温暖化防止
- 環境維持

- 安い電力料金

- 理想論を言うのは易しい。
- 解決策は共存解という妥協点を見出すことである

● エネルギー基本計画と日本の現状

我が国の温室効果ガス削減の中期目標と長期目標の推移



出典：環境省資料を基に経済産業省作成

● 第6次エネルギー基本計画（2021年10月策定）

● 2030年度の発電電力量構成

化石燃料 = 41%

天然ガス
と石炭が
半々

アンモニア・水素

1%

2%

石油

19%

石炭

37%

再生可能エネルギー

20%

天然ガス

21%

原子力

● 非化石 = 59%

- 再生可能エネルギー
- 原子力
- 石油
- 天然ガス
- 石炭

再生可能エネルギーの内訳	%
太陽光*	15
風力*	6
地熱	1
水力	10
バイオマス	5
合計	37

[注] *印：変動性再生可能エネルギー（VRE）

● 再生可能エネルギーの増加率

	2021年 度実績 単位%	2030年度 目標値 単位%	2030年度 目標値 単位%	[備考] 増加倍率
		(2015/2018版 基本計画)	(2021版 基本計画)	
太陽光*	変動 再エネ VRE	8.3	8	15* 6*
風力*		0.9	1.7	
地熱	安定 再エネ SRE	0.3	1	1/1=1.0
水力		7.5	9	10/9=1.1
バイオマス		3.2	4	10/9=1.1
合計		20.2	23	37 37/23 = 1.6
(参考)対応 CO2削減率 (2005年比)			26	46 46/26 = 1.8
		パリ協定約束値 (2015)	COP26表明値 (2021)	

大幅増

VRE

SRE

(備考) *印は変動性再生可能エネルギーVRE(Variable Renewable Energy)を示す。

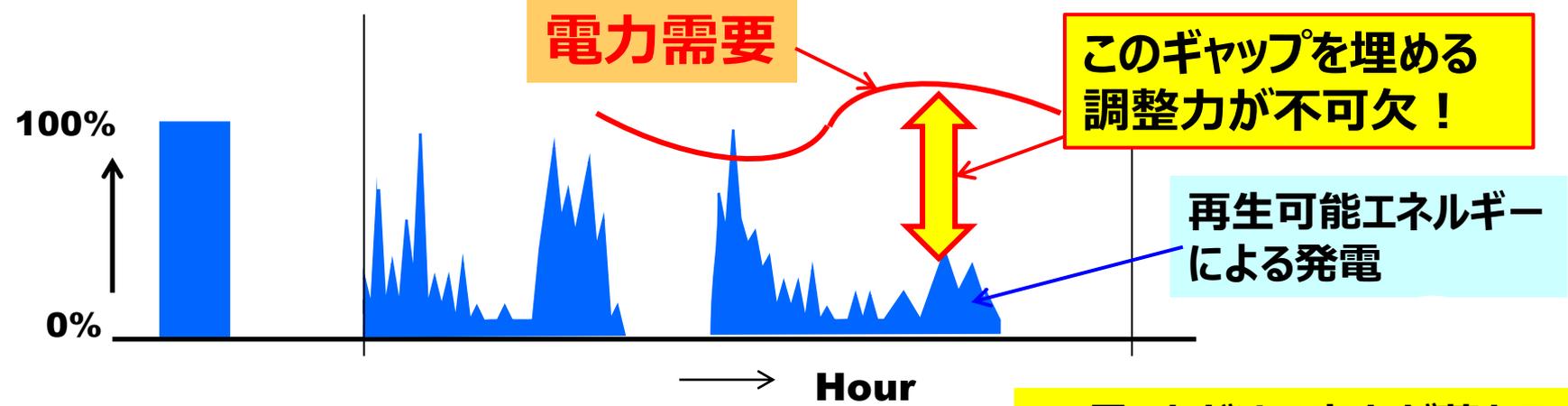
2. 変動性再生エネVREの欠点

1. 再生可能エネルギーの長所：
 - ① 国産エネルギーでありエネルギー自給率向上に貢献
 - ② CO2排出が少ない
2. 再生可能エネルギーの種類：
 - ① **変動型VRE**(Variable Renewable Energy)
 - ② **安定型SRE**(Stable Renewable Energy)
3. **太陽光・風力**といった変動性再生エネVREは、出力が**お天気任せ**という欠点があり、その**断続性・予見不能性**のため安定電源と見做すことが出来ない。
4. 欧州と異なり、**水力が少なくかつ電力システムの弱い日本**では、**VREの増加は大きな問題を起こす懸念**がある。
5. 最も危惧されるのは**慣性力の低下による周波数制御の困難さ**であり、**停電の頻発が懸念**される。
6. 早急に問題点を明確にして、対策を確立し、次期エネルギー基本計画に反映しなければならない。

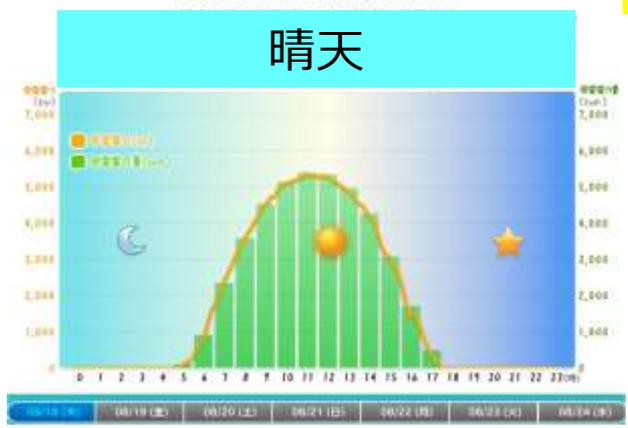
変動再生可能エネルギーには補完するバックアップが要る！

問題点：

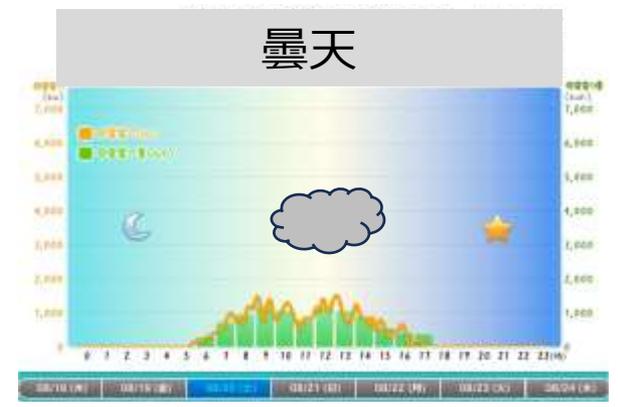
- ① 変動型再生可能エネルギーの出力は自然まかせ
- ② 従って電力需要と基本的に無関係に発電
- ③ 従って常に需要と供給のギャップが存在する



太陽光発電



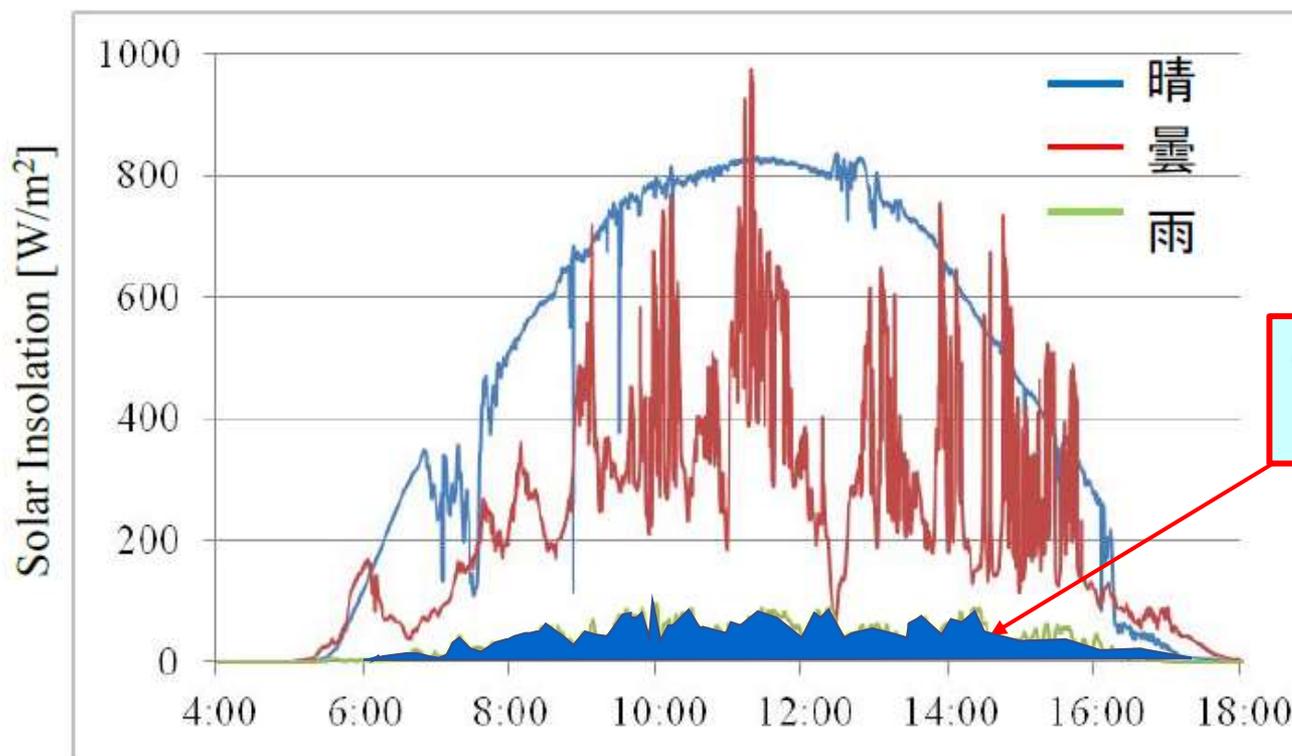
● 曇っただけで出力が落ちる！





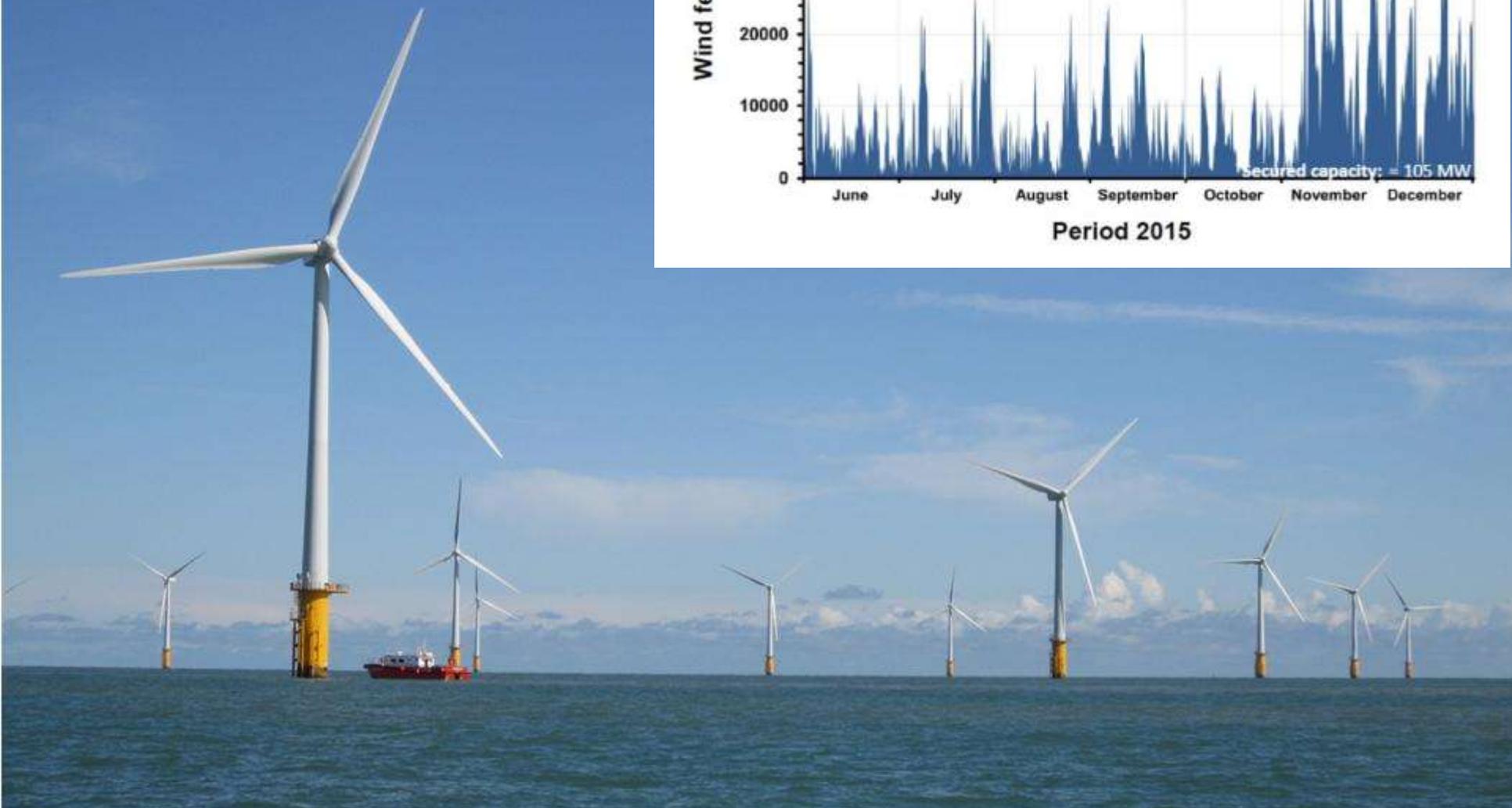
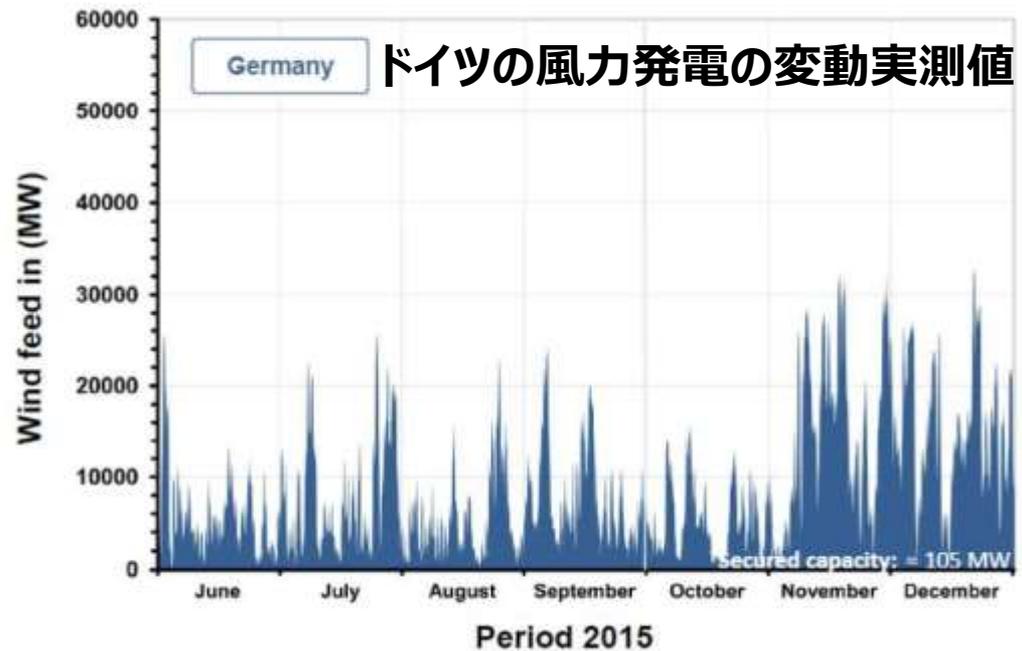
太陽光の出力変動

- 雨の日は晴天時の10分の1の出力
- 曇りの日は日中でも激しく出力が変動！



- 雨の日は晴れの日の10分の1

風力は風が吹けば発電し
吹かなければ発電しない！



● 変動性再生エネVREと安定性再生エネSREの比較

● 変動性再生可能エネルギー-VRE

Variable Renewable Energy

発電信頼性

× (予見不能性・間欠性)

Secured Capacity

× (安定電源と見做すことは出来ない)

代表例

太陽光

風力

・夜間は発電無
・雨の日は1/10
(年間利用率:12~14%)

・風が吹かなければ
発電せず
(年間利用率:22~30%)



● 安定性再生可能エネルギー-SRE

Stable Renewable Energy

○

○ (必要な時に必要な電力を確実に供給できる)

水力

地熱

バイオマス

・最も安定した再生エネ
・慣性力あり
・高速負荷変化可能

・火力並みの負荷調整能力
(利用率:90%可能)

・火力並みの負荷調整能力(利用率:90%可能)

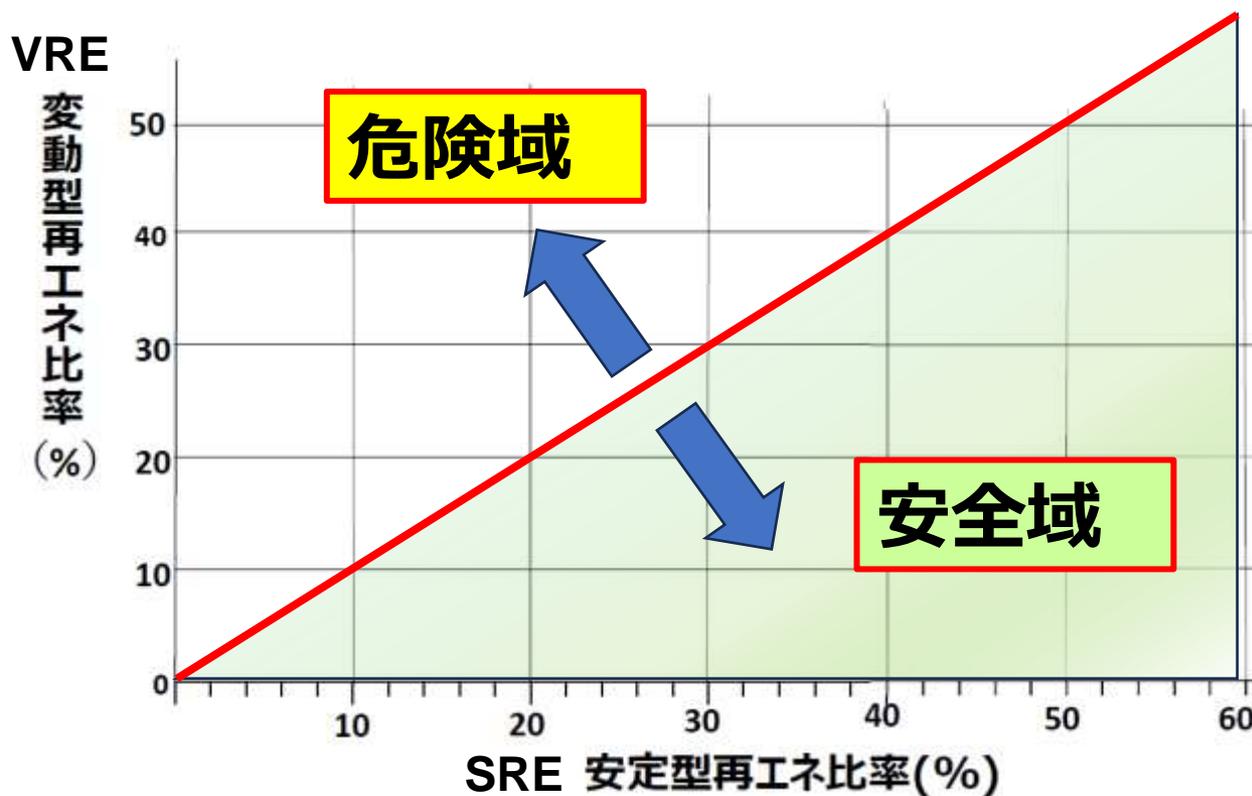


● 変動型再エネVREはどこまで許容できるか？

変動型再エネVREの許容範囲判定条件

● 変動性再エネVREが安定性再エネSREよりも小さいこと！

$$\text{変動性再エネVRE} \leq \text{安定性再エネSRE} \dots \textcircled{1}$$



● まずはグリーンに乗せることが必要



● グリーンに乗せられれば一次試験合格…

3. ヨーロッパの現状と日本への教訓

1. ドイツは現在再エネ比率が50%近くになったが、電力系統が欧州ネットワークENTSO-e(ドイツ国内の6倍の電源容量)に連系されているので救われている。
2. ドイツの変動再エネVREは32%と危険域であるが、これを救っているのが連系されているノルウエーの水力である。
3. 欧州全体では再エネ比率が約40%となっている(2021年)。再エネのうち最大のものは水力で全体の約半分である。
4. 現在の欧州の電源構成比率は再エネ40%、原子力25%、火力35%とバランスの取れたものになっている(ほぼ天下三分の計)。
5. しかしドイツが再エネ至上主義で80%を目指して突っ走ると、欧州の連系線でも救済できなくなり、逆に欧州全体が危険域に入ることになる。
6. ロシアのウクライナ侵攻以降、ドイツのエネルギー事情は非常に深刻な状況になっており、方針変更は時間の問題と考えられる。
7. ドイツの過度の再エネ重視政策により、ドイツの重工業(特に発電業界)は崩壊寸前である。
8. このドイツの失敗を正しく分析して、日本が誤った道を進むことが無いよう注意が必要である。

● 欧州送電系統運用者ネットワーク：ENTSO-e

ENTSO-e: 欧州送電系統運用者ネットワーク

(European Network of Transmission System Operators for Electricity)

設立：2009年7月1日

加盟国：37か国 人口：6億5千200万人

本部：ベルギー・ブルッセル

Exchange Balance per area¹

	Sum of imports	Sum of exports	Balance (imp - exp)
AT*	21,084	2,827	8,257
BA	1,275	6,023	-4,748
BE	12,429	3,018	-7,589
BG	1,263	9,877	-8,614
CH	25,855	2,282	3,573
CZ	11,823	3,009	-11,186
DE	35,327	4,612	-19,285
DK	16,625	3,815	4,710
EE	7,171	4,519	2,652
ES	14,808	14,017	791
FI	24,255	6,728	17,527
FR	20,275	63,087	-42,812
GB ^a	28,318	2,648	25,670
GR	7,482	3,813	3,669
HR	8,970	4,619	4,351
HU	18,790	5,938	12,852
IE	1,028	531	497
IT	45,496	2,043	43,453
LT	11,589	2,393	9,196
LU	4,000	54	3,946
LV	3,966	2,218	1,748
ME	4,706	4,895	-189
MK	4,505	2,046	2,459
MT	542	31	511
NL	15,778	15,424	354
NO	6,283	23,348	-17,065
PL	14,602	13,569	1,033
PT	8,083	3,304	4,779
RO	5,280	3,153	2,127
RS	6,281	5,582	699
SE	8,424	33,651	-25,227
SI	7,131	7,405	-274
SK	13,697	12,961	736
TR	1,065	3,110	-2,045
UA	5,235	7,359	-2,124
XK ^a	3,004	2,333	671
ENTSO-E	430,426	415,860	14,566



● 全欧州は送電線で網の目状に相互に密接に連絡されている

(参考) EUが欧州のすべてではない。EU加盟国は27か国で、ENTSOの約80%である

出典：ENTSO-e Factsheet 2021

Europe

- ヨーロッパは日本と異なり網目状の電力網



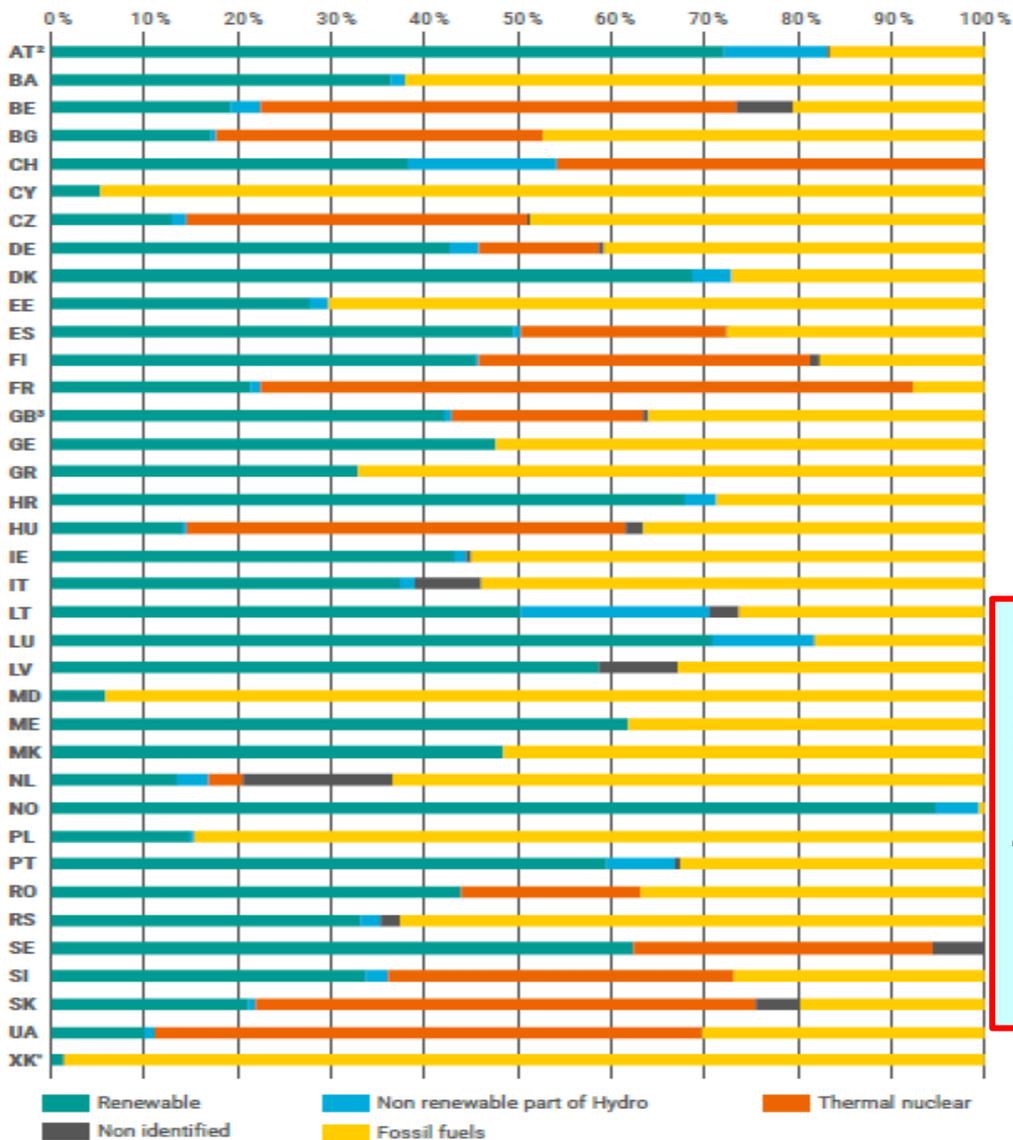
● 欧州全体の電力構成

出典：Statistical Fact Sheet 2021-ENTSO-E

		発電電力量(TWh)	比率(%)
再生可能エネルギー	太陽光	141.3	4.7
	風力	407.1	13.6
	変動性再エネVRE小計	548.4	18.3
	水力	494.3	16.5
	バイオマス	90.0	3.0
	地熱		0.2
	その他	6.1	0.2
	安定性再エネSRE小計	596.2	19.9
	再エネ合計	1144.5	38.2
火力	石炭	214.1	7.1
	褐炭	243.7	8.1
	天然ガス	479.6	16.0
	石油	22.1	0.7
	その他	4.2	0.1
	火力合計	963.7	32.1
原子力	原子力合計	766.1	25.5
その他		124.6	4.2
総計		2998.4	100.0

● 欧州の再エネ率の高い国ランキング

Share of energy produced of each member TSOs' country 2021 in %¹



順位	国名	再エネ比率 %
1	NO	95
2	DK	69
3	SE	62
4	PT	59
5	ES	49
6	DE	43

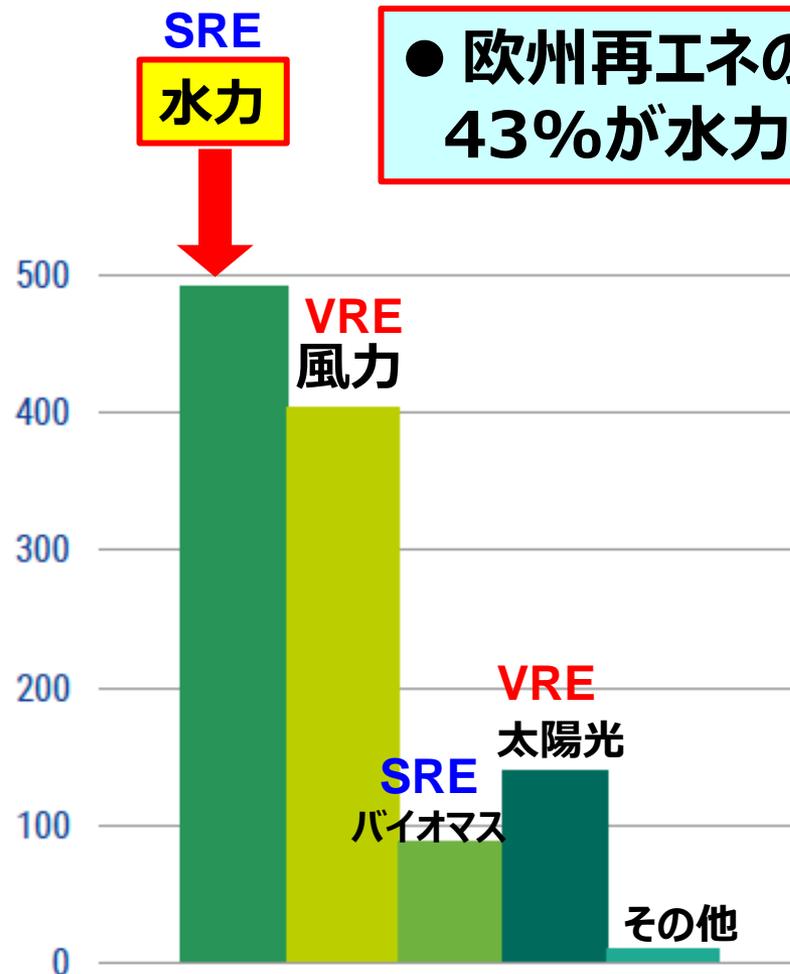
(注) 1. 発電量 20TWh以上の国
 2. ノルウェーが再エネ率95%で断トツの1位。
 3. ノルウェーの再エネのうち93%が水力で7%が風力(すべて陸上で洋上風力は0)
 4. ノルウェーは水力が有り余っており、高コストの洋上風力などやる必要は無いが、他国の洋上風力向け港湾・支援基地、メンテナンス業務その他で新ビジネスを狙っている

出典 : Statistical Fact Sheet 2021-ENTSO-E

● 欧州の再エネ：実は水力が最大!

ENTSO-E renewable generation¹

	TWh	%
Renewable net generation 2021	1 144.5	
of which hydro	494.3	43
of which wind	407.1	36
of which biomass	90.0	8
of which solar	141.3	12
of which other renewable	11.9	1



● 欧州再エネの43%が水力!

● 変動性再エネVRE : 36 + 12 = 48%

● 安定性再エネSRE : 43 + 8 = 51%

● VRE : SRE = 48% : 51%
VRE < SRE

出典 : Statistical Fact Sheet 2021-ENTSO-E

● 欧州各国の水力発電の状況

順位	国名	発電電力量 (TWh) (2021年)	比率(%)
1	ノルウェー	143.0	26.4
2	スウェーデン	74.2	13.7
3	フランス	60.9	11.2
4	イタリア	45.2	8.3
5	オーストリア	36.7	6.8
6	スペイン	32.6	6.0
1~6	以上6か国合計	392.6	72.5
	その他の国合計	223.4	27.5
	総計	541.8	100.0

ノルウェー・スウェーデン
の2国で欧州の40%

出典：Statistical Fact Sheet 2021-ENTSO-E

● ノルウェーの水力

- 1960年代にいち早く水力を建設し、これを活用した金属精錬業が工業の基礎になり豊かな国造りに貢献



● ドイツとノルウェーの再エネの状況

		ドイツ実績D (単位:%)	ノルウェー実績N (単位:%)	ノルウェーN + ドイツD (単位:%)	欧州実績 (単位:%)
		2021年	2021年	2021年	2021年
再生可能エネルギー	太陽光	9.7	0	7.1	4.7
	風力	22.4	6.9	18.8	13.6
	・VRE合計	32.1	6.9	25.9	18.3
	水力	4.6	92.2	25.2	18.1
	地熱	0.0	0	0.0	0.2
	バイオマス	8.1	0	6.0	3.2
	・SRE合計	12.7	92.2	31.2	21.5
	再エネ合計	44.8	99.1	57.1	39.8

- (備考) 1. ドイツのVRE過多はノルウェーの水力でしっかりとカバーされている
 2. 欧州全体ではVRE18.3%、SRE21.5%ときれいにバランスしている

出典 : Statistical Fact Sheet 2021-ENTSO-E

● ドイツのノルウェーへの依存

各国の発電量(2021) TWh

	ドイツ	ノルウェー	スウェーデン
太陽光	46.6	0	0
洋上風力	24.0	0	0
陸上風力	89.4	10.7	
VRE小計	160.0	10.7	0
水力(流れ込み)	13.2	12.7	0
水力(貯水式)	1.2	123.2	74.2
水力小計	14.4	135.9	74.2

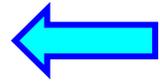


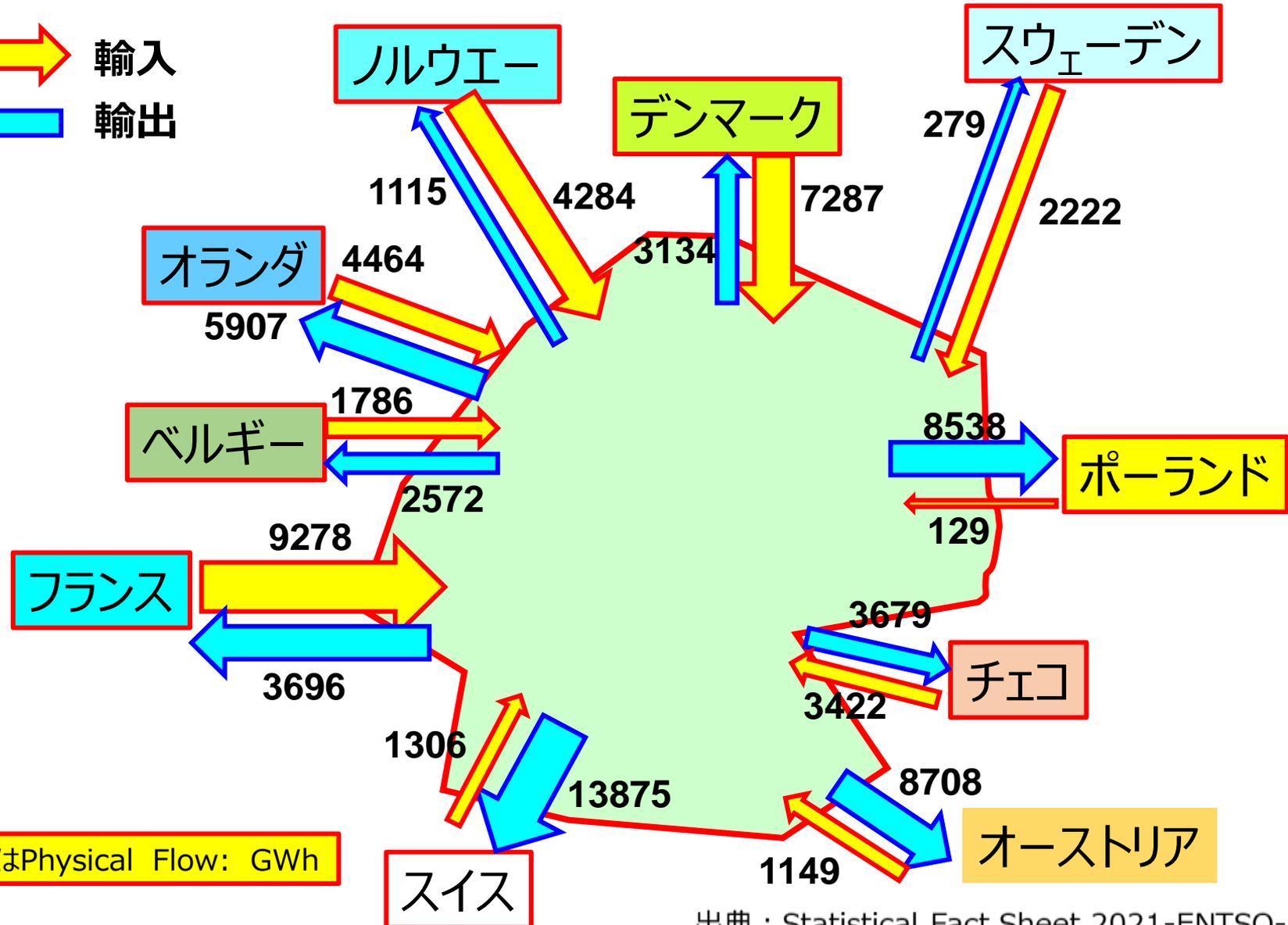
ドイツの代表的電力輸入国 (2021) Physical flow(GWh)

相手国	輸入量	輸出量	差し引き
ノルウェー	4284	1115	3169
スウェーデン	2222	279	1943
デンマーク	7287	3134	4153
フランス	9278	3696	5582

出典 : Statistical Fact Sheet 2021-ENTSO-E

● ドイツと周辺国の電力の輸出入

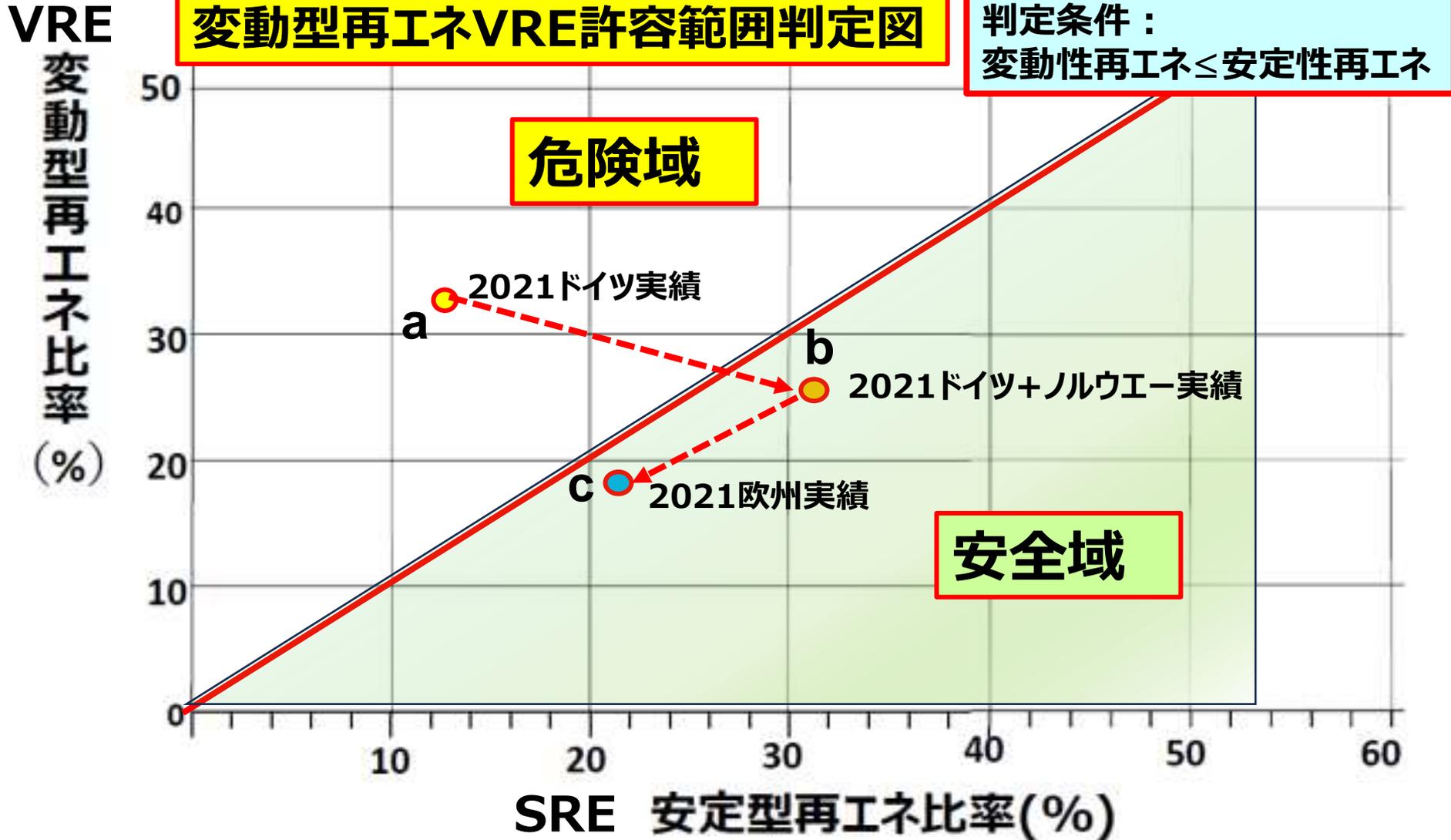
 輸入
 輸出



数値はPhysical Flow: GWh

出典：Statistical Fact Sheet 2021-ENTSO-E

● ドイツと欧州の安定性判定図（2021年）



● ノルウェーの水力のおかげで何とか安全域に留まっている！

● 各エネルギー源の特徴

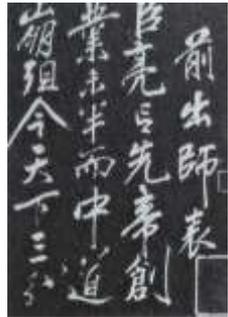
➤ 主なエネルギー源: ①再生可能エネルギー ②火力発電 ③原子力



- 単独で100点満点のものは存在しない。
- すべて長所と短所がある。
- 上手に組み合わせて使うことが重要→エネルギーのベストミックス

	再生可能エネルギー	原子力	火力
特長	・国産エネルギーでCO2排出少	・安定した安価な電源でCO2排出少	・柔軟運用による電力の調整運用可能
課題	・希薄な自然エネルギー源 ・変動性のものVREは出力がお天気まかせで貯蔵は不可欠	・安全性への懸念	・化石燃料使用によるCO2排出 ・燃料輸入の経済負担と供給リスク
			

最適解：天下三分の計



1/3



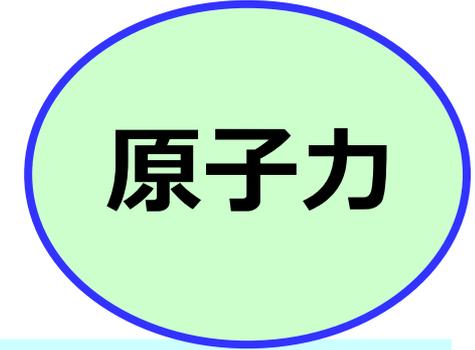
再生可能
エネルギー

1/3



火力

1/3

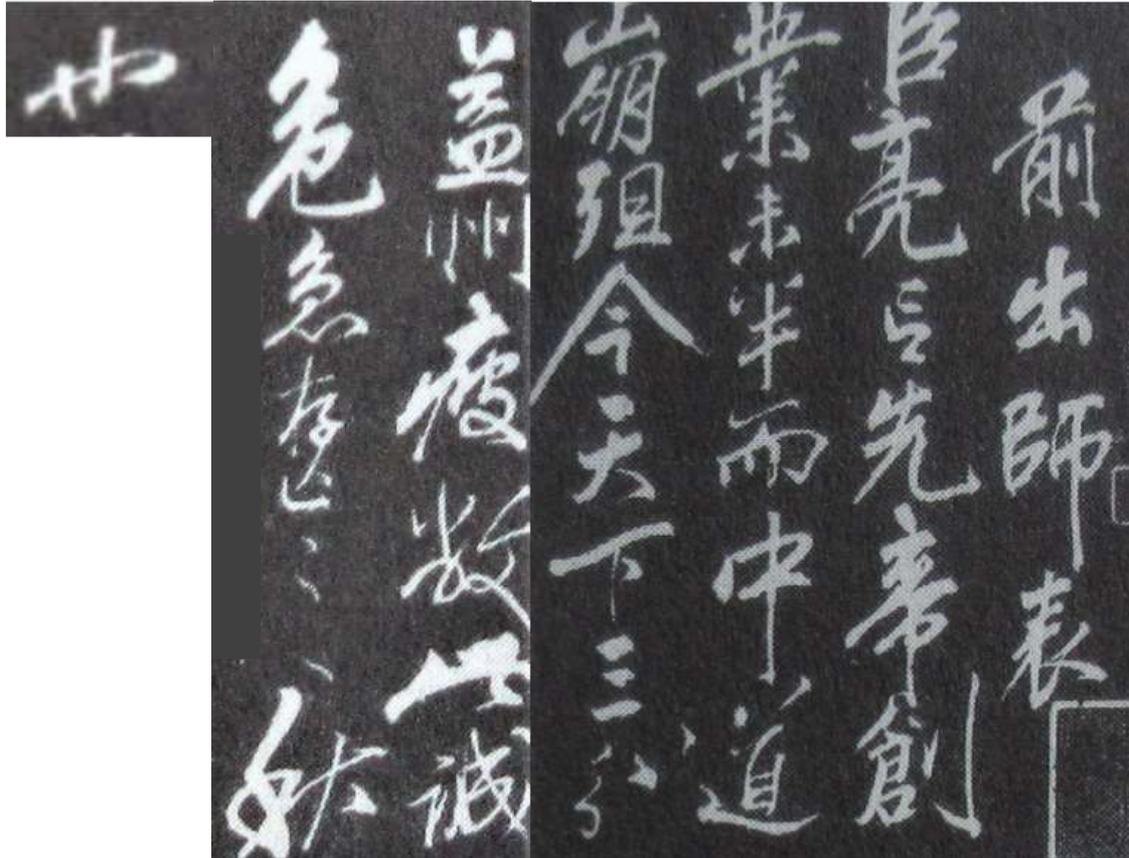


原子力

	再生可能エネルギー	火力	原子力
長所	・自然エネルギーの利用	・柔軟で自由な対応力	・圧倒的な濃縮度 ・安定した発電
短所	・超希薄なエネルギー源 ・変動性・予見不可能性 (お天気まかせ)	・化石燃料依存 ・CO2発生量	・安全性の要求

- 単独で百点満点のエネルギー源は存在しない!
- 長所・短所を補い合うことが重要
- 各1/3がベストと言われている!

● 天下三分の計

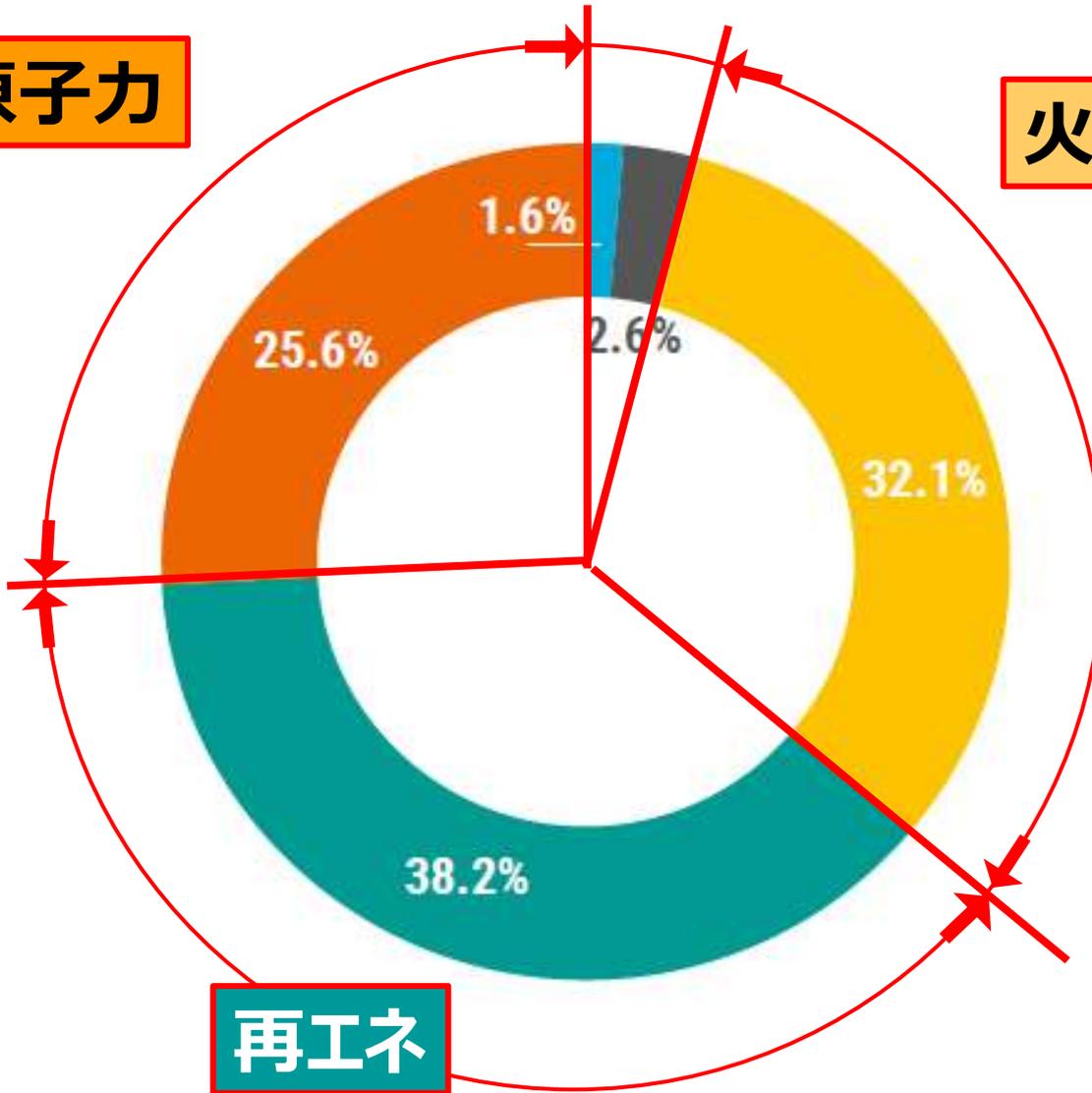


今、天下三分、益州疲弊し、危急存亡の秋なり

● 欧州の電源構成：ほぼ天下三分の計

原子力

火力



欧州の比率(2021)

	比率 (%)
再エネ	38
火力	32
原子力	26
その他	4

出典：Statistical Fact Sheet 2021-ENTSO-E

● ドイツの野心的な目標

- 2030年までに再エネを80%に増加
- 残りの20%は再エネで製造した合成燃料(P to G)

本当にうまく行くのか？

● 変動再エネVRE>>安定性再エネSRE



● 欧州全体が不安定に…システムの制御が困難



● ドイツの再エネ80%政策は必ず破綻する!

● 欧州の今後の予想

ドイツの現在の方針

- 政権与党であるドイツの緑の党は2030年までに再エネ(太陽光・風力)を80%に増やすとしている

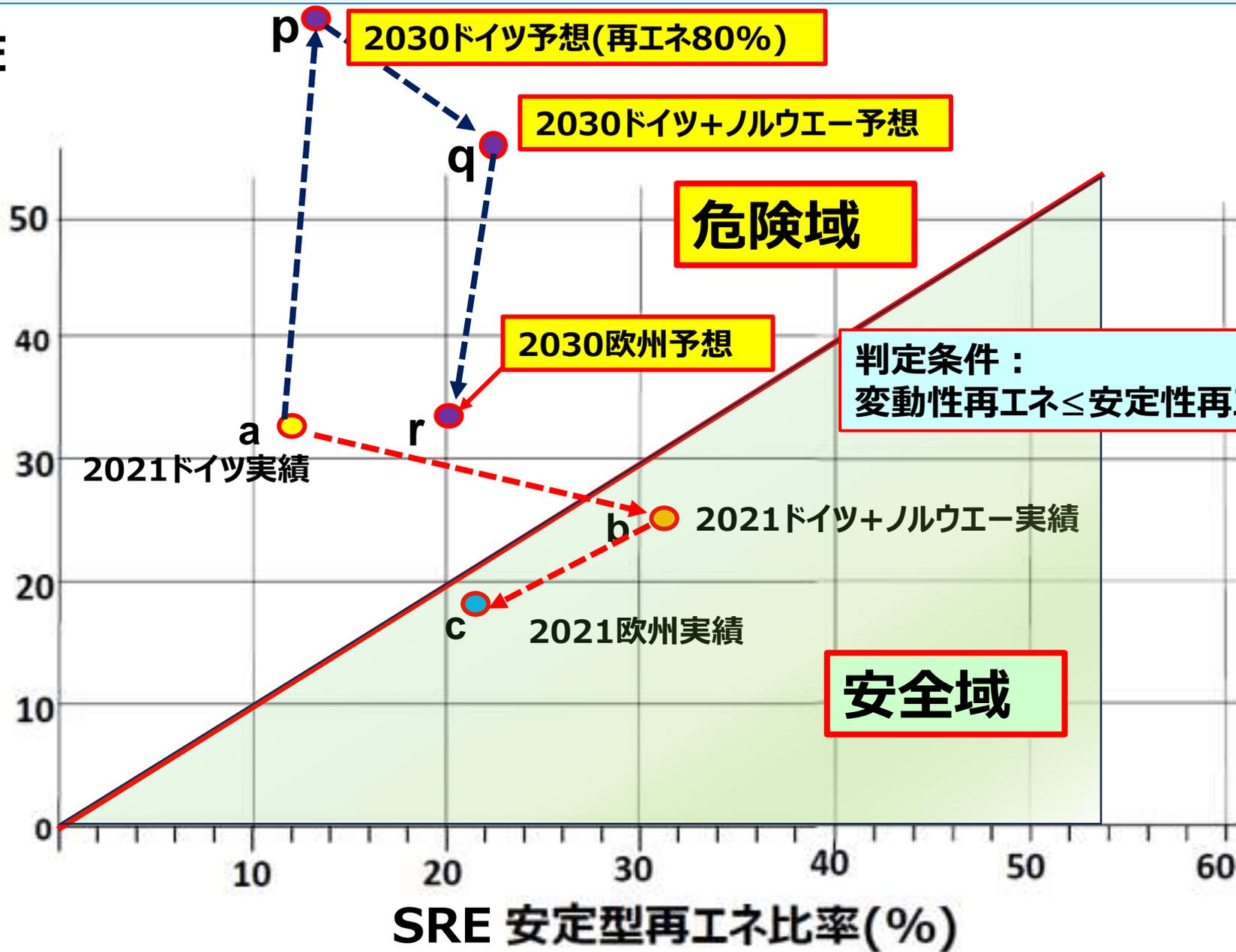
シミュレーション結果

- 結果はドイツ単独では全く需給調整が出来ず、ノルウェーと連系しても救えず、危険域に入る。
- さらに、欧州全域も危険域に入り、ドイツの政策が欧州全体を危険に晒すことになる。
- 従って、ドイツの再エネ80%策は成り立たず、早急に修正を余儀なくされると考えられる。

● 欧州の2030年予想（ドイツ再エネ80%時）

VRE

変動型再エネ比率 (%)



● 沈没寸前なのに突き進むドイツの愚!



欧州はドイツに道連れにされるのか?

冷静に科学的考察を…ドイツの危機..



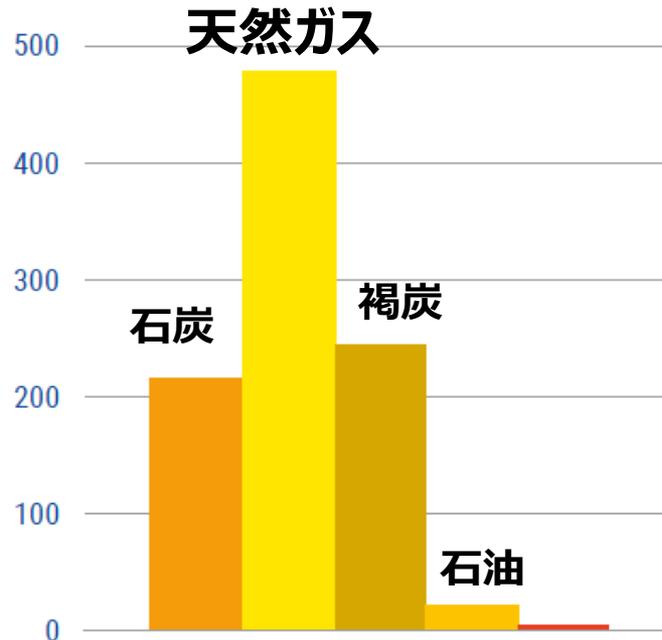
● 熊が出て来たのにそのままゴルフを続けますか？

(参考) 欧州の火力の現状:天然ガス : 石炭=50:47

- 欧州の現実には日本の考え方が正しいことを示している!
- 天然ガス : 石炭(石炭+褐炭) \approx 50:50

ENTSO-E fossil fuels generation¹

	TWh	%
Fossil fuels net generation 2021	963.7	
of which hard coal	214.1	22
of which gas	479.6	50
of which lignite	243.7	25
of which oil	22.1	2
of which other fuels	4.2	0.4



出典 : Statistical Fact Sheet 2021-ENTSO-E

一つのバスケットに卵を全部入れてはいけない

Don't put all your eggs in one basket!



- リスクヘッジ
- 危険分散
- 交渉カオプション

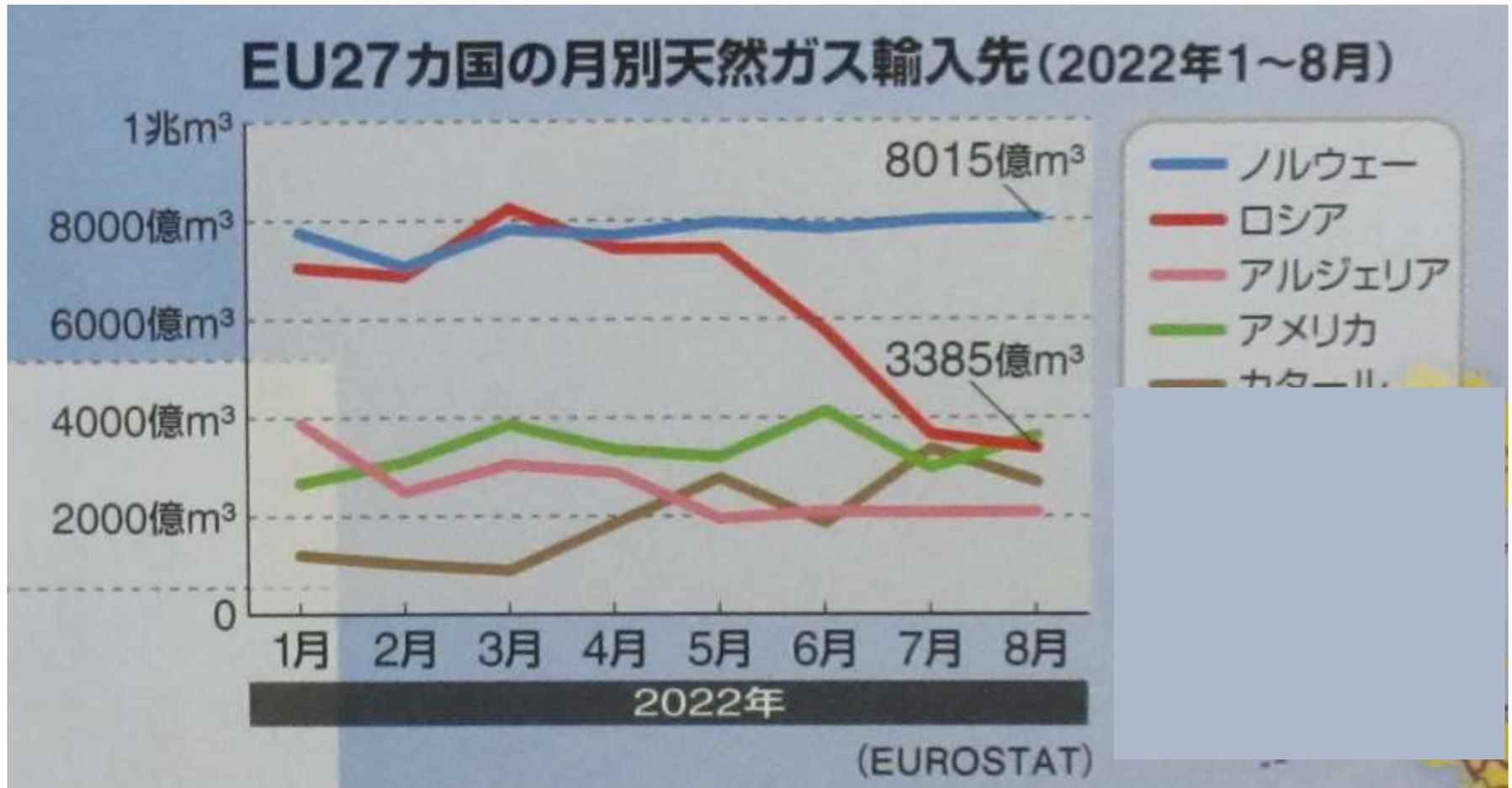
● エネルギー資源に乏しい日本では特に重要！

● 複数の選択肢がないと危険！

● ウクライナ危機も欧州の失敗の結果！

● なぜノルウェーはEUに加盟しないのか？

● EUの天然ガスの最大の輸入元はノルウェー



● EUへの天然ガス輸出でノルウェーは莫大な利益

● 各国の1人当たりGDP (2021)

国名	万ドル/人	ノルウエーを100とした時の数値	備考
スイス	9.3	104	・金融資産が主
ノルウエー	8.9	100	・豊富な天然ガス、電力（水力）をEUに輸出
デンマーク	6.78	76	
スウェーデン	6.02	68	
ドイツ	5.08	57	
フランス	4.4	49	
日本	3.9	44	
イタリア	3.56	40	
中国	1.26	14	

出典：世界銀行

● **今やノルウエーは世界の最富裕国に!**

● 日本は大丈夫か？

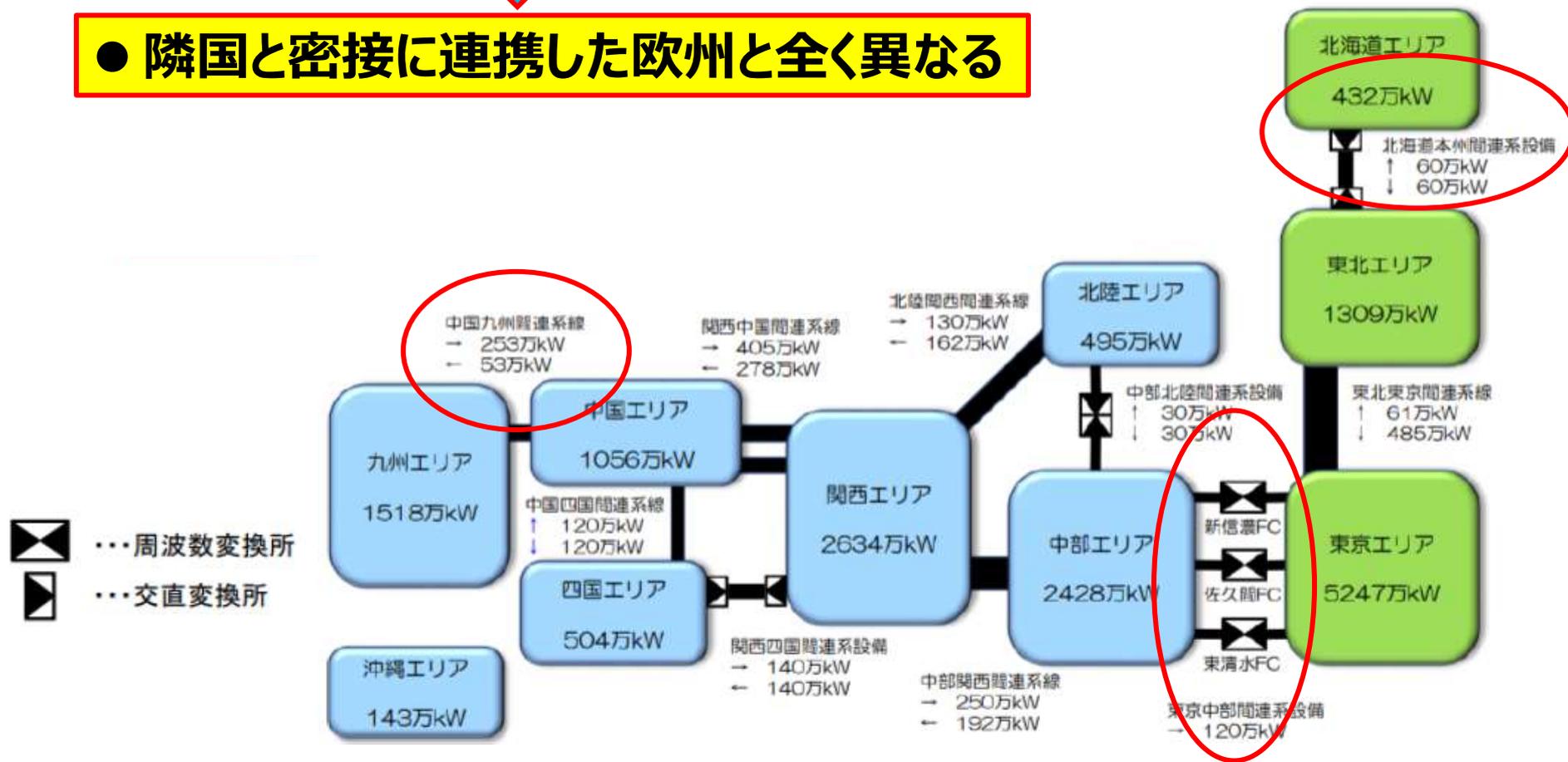
1. 日本はEU一辺倒のCO2 46%削減案で、これをエネルギー政策で具体化しようとしている。
2. 最大の問題は**太陽光・風力といった変動型再エネVRE偏重**であり欧州と異なり、**水力が少なく電力システムの弱い日本**では大きな問題を起こす懸念がある。
3. 最も危惧されるのは**慣性力の低下による周波数制御の困難さ**であり、停電の頻発が懸念される。
4. 問題点を明確にして、早急に対策を確立し、次期エネルギー基本計画に反映しなければならない。

● 日本の電力網

● 細々と串状に連系



● 隣国と密接に連携した欧州と全く異なる



日本の電力網



日本の電力網

串刺し状

● 再生可能エネルギーの増加比率

		2021年 度実績 単位%	2030年度目標値 (2015/2018版 基本計画) 単位%	2030年度目標値 (2021版 基本計画) 単位%	[備考] 増加倍率
VRE	太陽光*	8.3	8	15*	15/8= 1.9*
	風力*	0.9	1.7	6*	6/1.7= 3.5*
SRE	地熱	0.3	1	1	1/1=1.0
	水力	7.5	9	10	10/9=1.1
	バイオマス	3.2	4	5	10/9=1.1
合計		20.2	23	37	37/23= 1.6
(参考)対応CO2削減率(2005年比)			26	46	46/26= 1.8
			パリ協定約束値 (2015)	COP26表明値 (2021)	

(備考)

1. *印は変動性再生可能エネルギーVRE(Variable Renewable Energy)を示す。
2. COP26で政治的に従来の倍近いCO2削減を約束したため、再エネ目標値を大幅に引き上げた。問題は内訳が太陽光、風力に偏っていること。

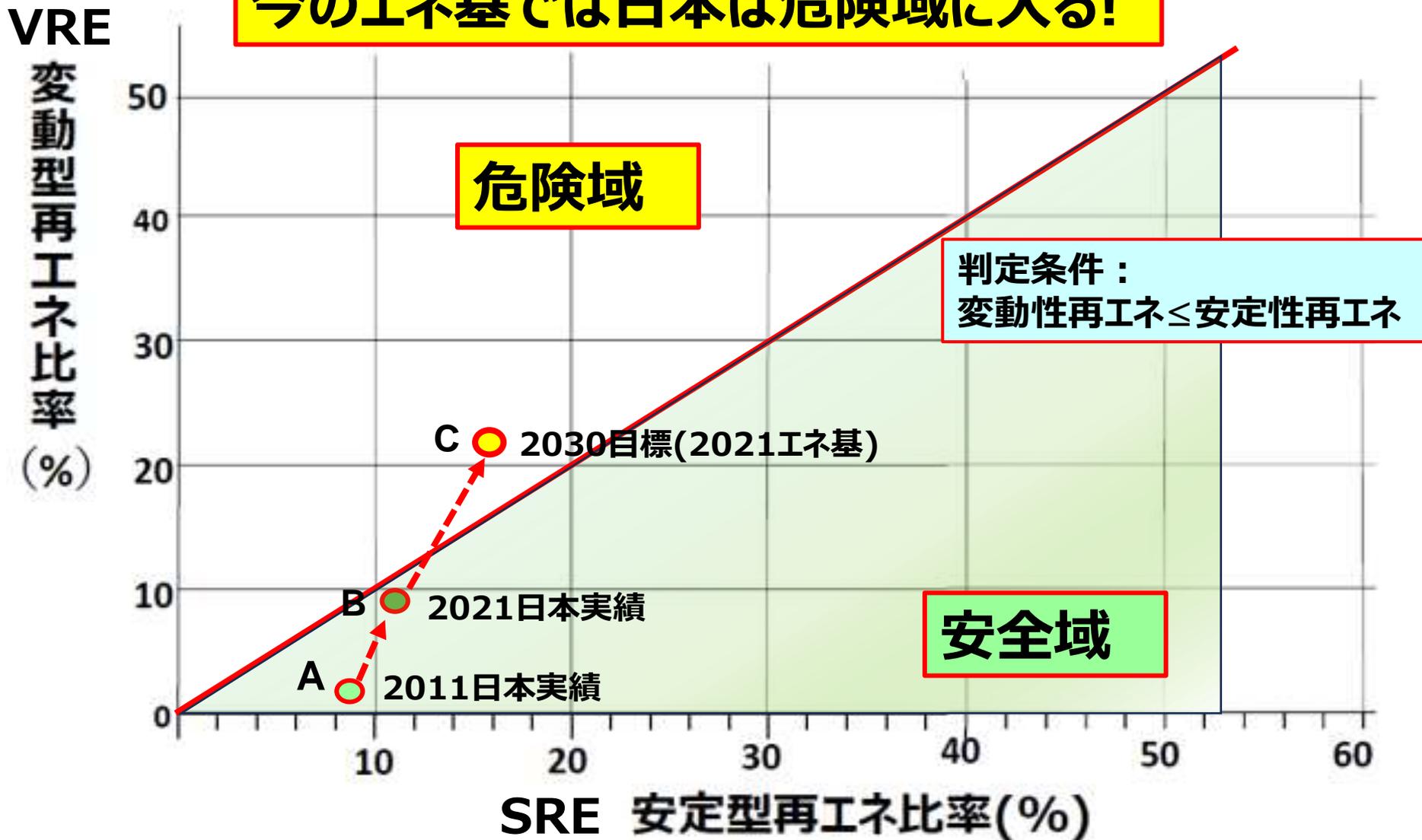
● 日本と欧州の再エネの比較

		2011 日本実績 (単位：%)	2021 日本実績 (単位：%)	2030エネ基 日本目標値 (単位：%)	2021 欧州実績 (単位：%)
再生可能エネルギー	太陽光*	0.8	9.2	21	18.3
	風力*	0.4	0.9	6	13.6
	水力	7.8	7.5	10	18.1
	地熱	0.2	0.3	1	0.2
	バイオマス	1.5	3.2	5	3.2
	合計	10.3	20.2	37	39.8
火力	石炭	37.7	31.0	19	15.6
	天然ガス	28.0	34.4	20	15.8
	石油	14.5	7.4	2	3.3
	合計	80.2	72.8	41	34.7
原子力	9.3	6.9	21	25.5	
合計	100.0	100.0	100.0	100	

(備考) 1. データは2023年度版エネルギー白書およびENTSO-e Factsheet 2021による。
 2. 欧州の定義はENTSO-e 加盟37か国 (英国およびノルウェーを含む)
 3. 日本の2030年エネ基では変動性が水力の2倍になっているが、欧州は両者が均衡している

● 日本の変動型再エネVREの状況

今のエネ基では日本は危険域に入る!



4. 交流電力網の特徴

- 我々が使っている電気は交流である
- しかしほとんどの人がこのことを忘れてている!

- 交流は1秒間に50または60回変動する正弦波である。
- 需要に対し供給が不足すると周波数が低下する
- 周波数が**限界値**に達すると、一部の需要を電力系統から切り離す(**UFLS**)
- さらに周波数が低下を続け限界値(**UFR**)に達すると、すべての発電設備を停止させる。これが**全電源喪失(Black out)**である



- 電力網はMobileのようなもの
- 一度乱れるとなかなか整定しない

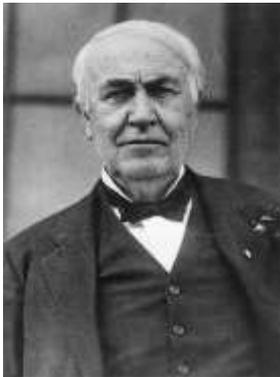
供給



需要

- 周波数がずれる($\pm 0.2\text{Hz}$)と一部の需要家に影響が出る
- 数Hzずれるとタービンの振動や発電機の軸振動など深刻な影響が出る
- ⇒**1.5Hz**ずれると**UFLS**が働き部分停電
- ⇒**2.5Hz**ずれると**UFR**が働きブラックアウトに

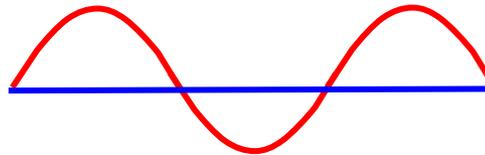
● 直流か交流かの論争と歴史



Thomas Alva Edison
(1847-1931)

● 直流を主張

- 1883年
- New York市
- Pearl Street発電所
- 送電: 1km



● 直流か交流かの論争

交流

- 自由に電圧を調整可能
- 電力網の形成に有利

● 最終的に電力網は同期発電機の交流の世界となった！

● しかし常に周波数を一定に保つ宿命を負った！



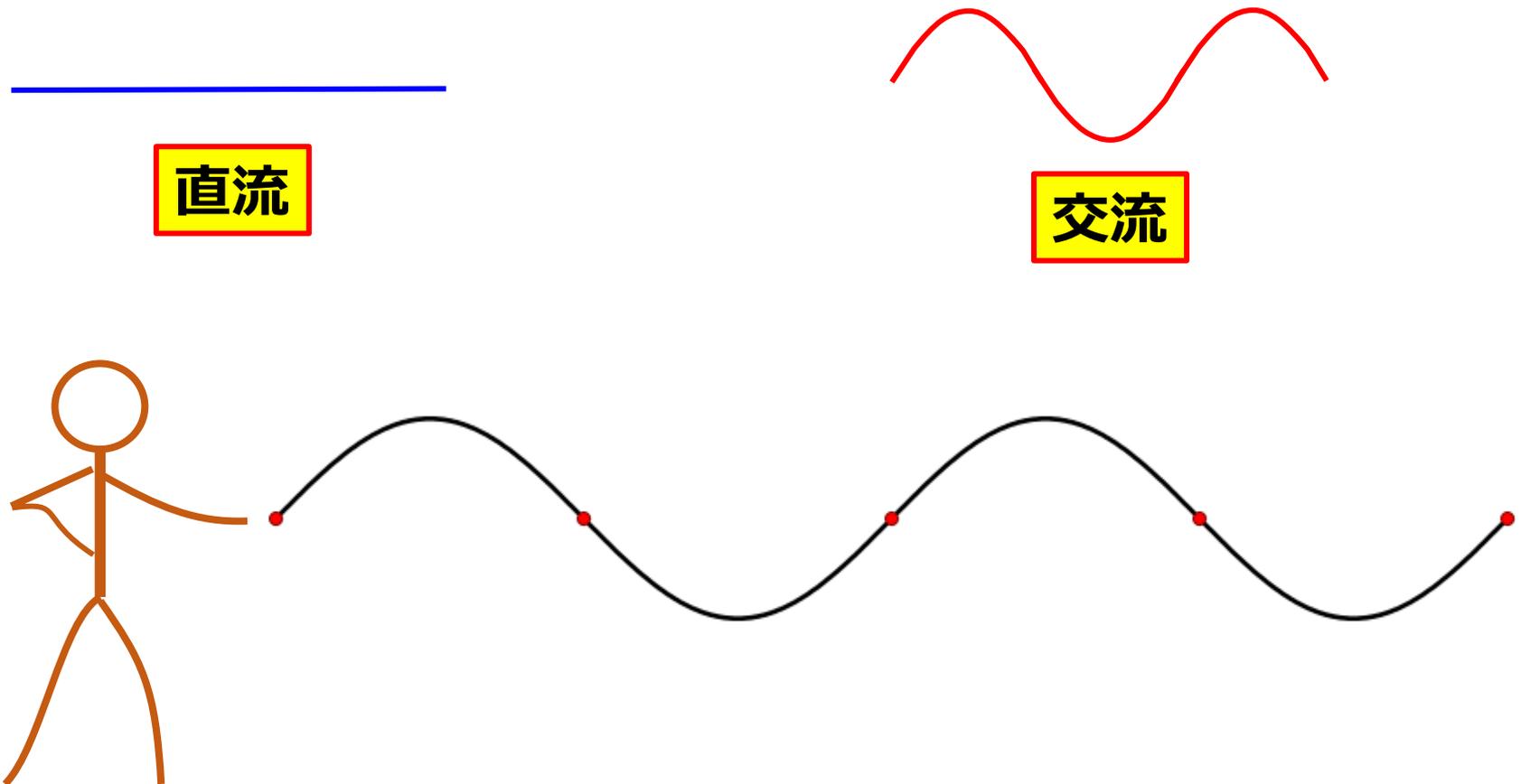
Nicola Tesla
(1856-1943)

● 交流を主張

- 1895年
- Niagara滝水力発電所
- Buffaloまで40km送電

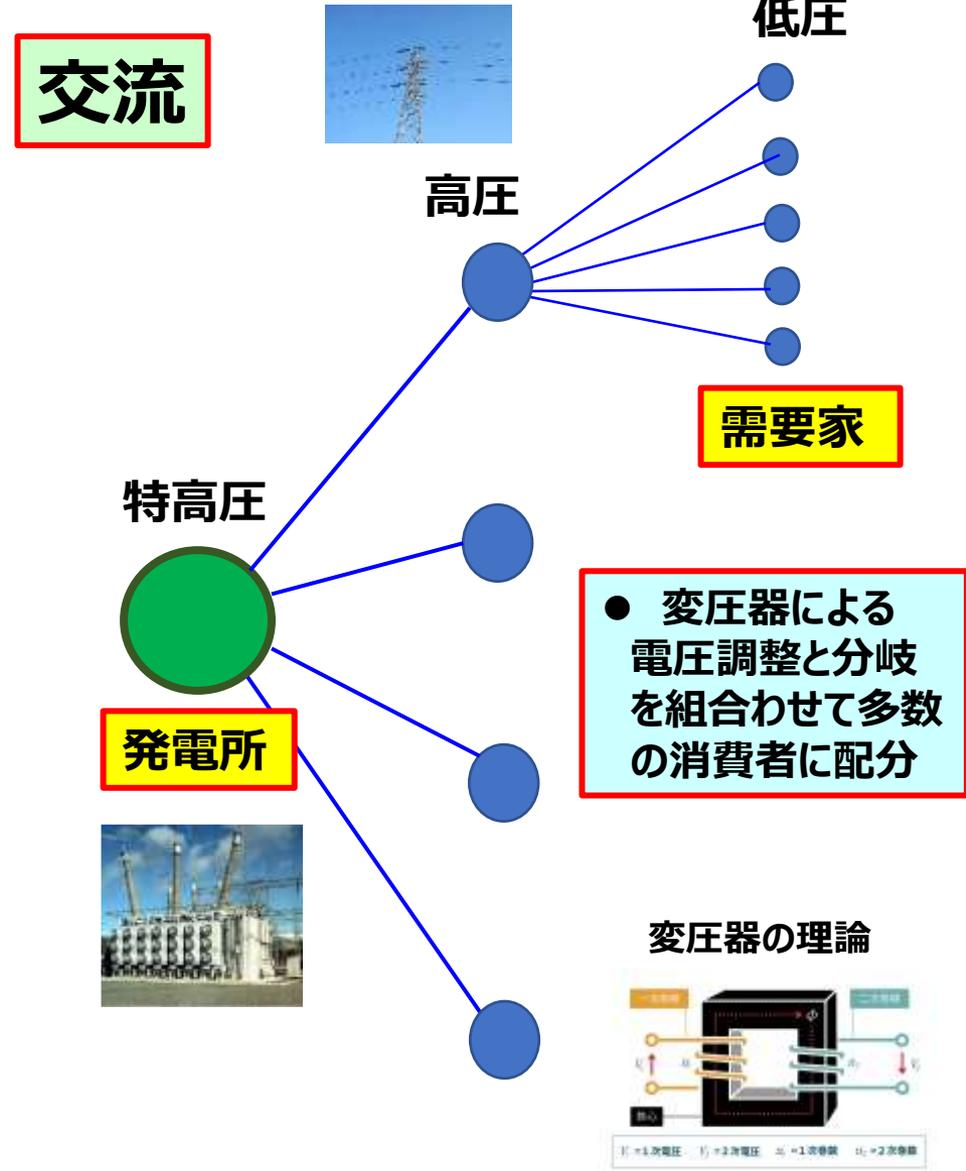
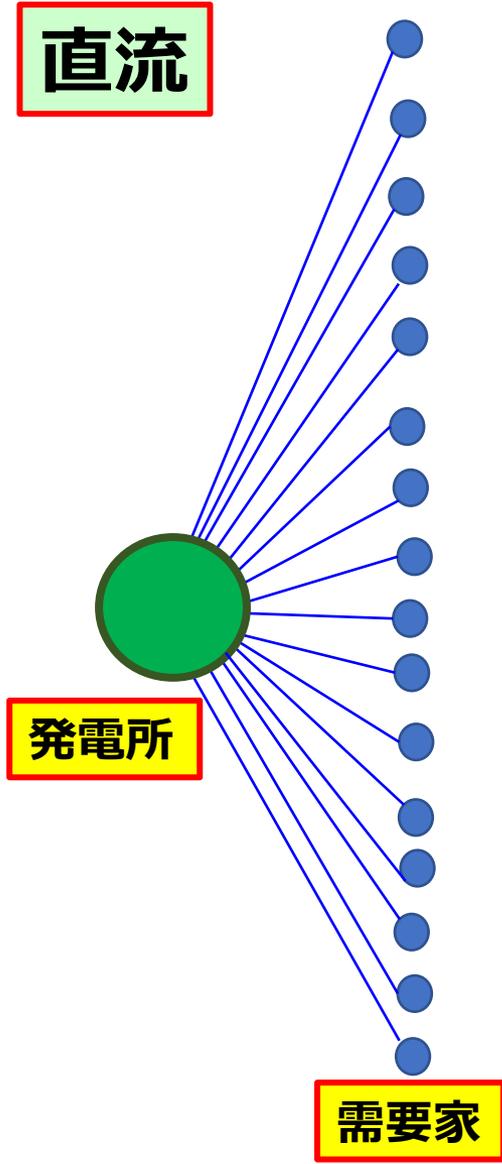


交流---波にすると遠くまで電気が運べる！

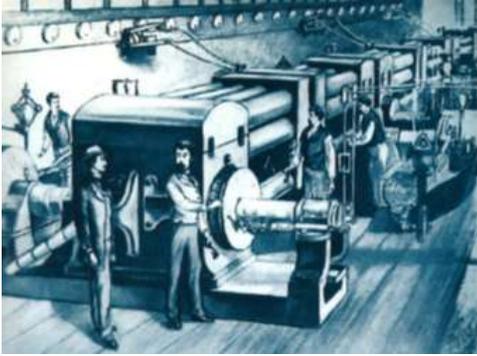


50Hz(50ヘルツ) ---1秒間に50回の波

交流の最大のメリット:変圧器による自由な電圧調整



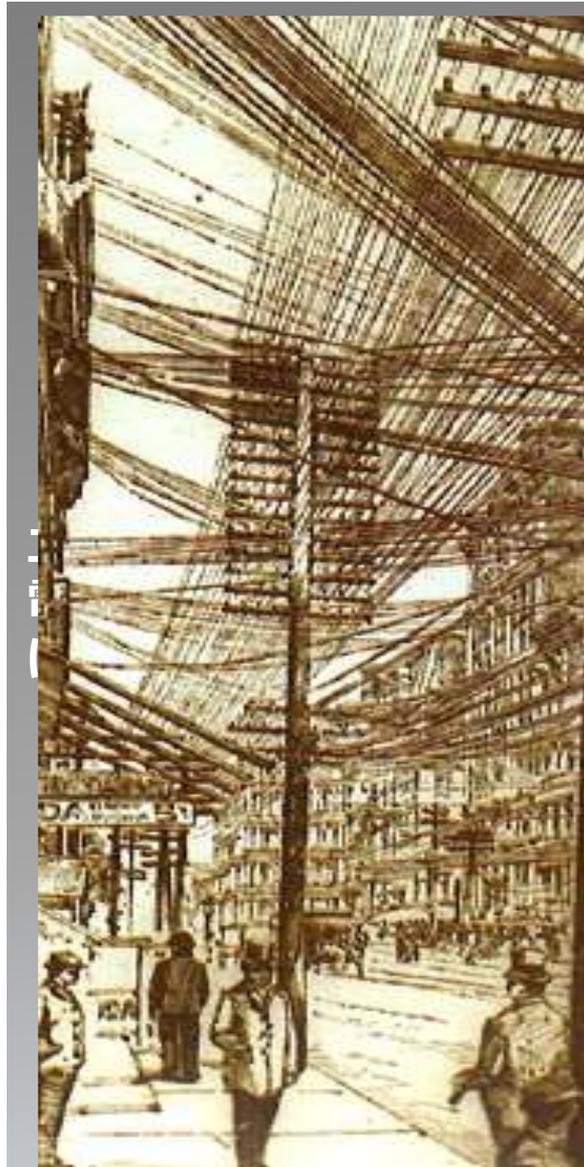
● 直流発電所の泣き所



直流発電機



エジソンのパールストリート発電所の跡

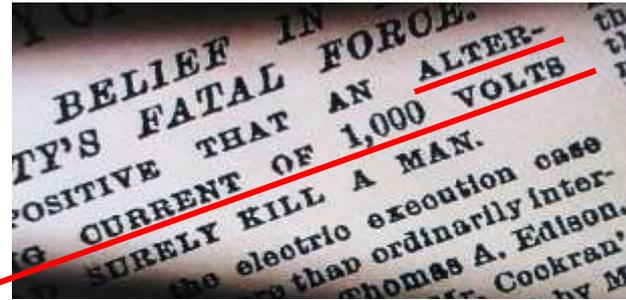
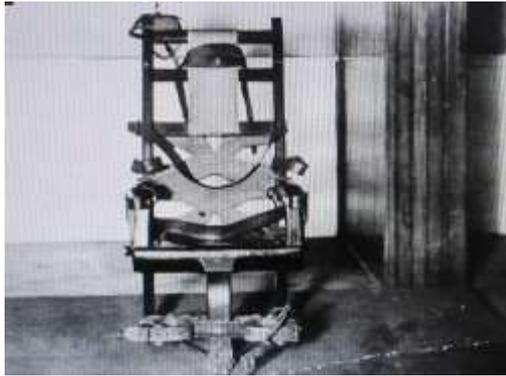


実際に直流で
送電してみると…



ニューヨークの空は
電線だらけで真っ黒
になった

● エジソンの執拗な交流排斥運動

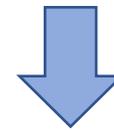


● エジソン最大の汚点

- “1000ボルトの交流で人は死ぬ”と宣伝
- 米国の死刑執行に交流の電気椅子を採用させる



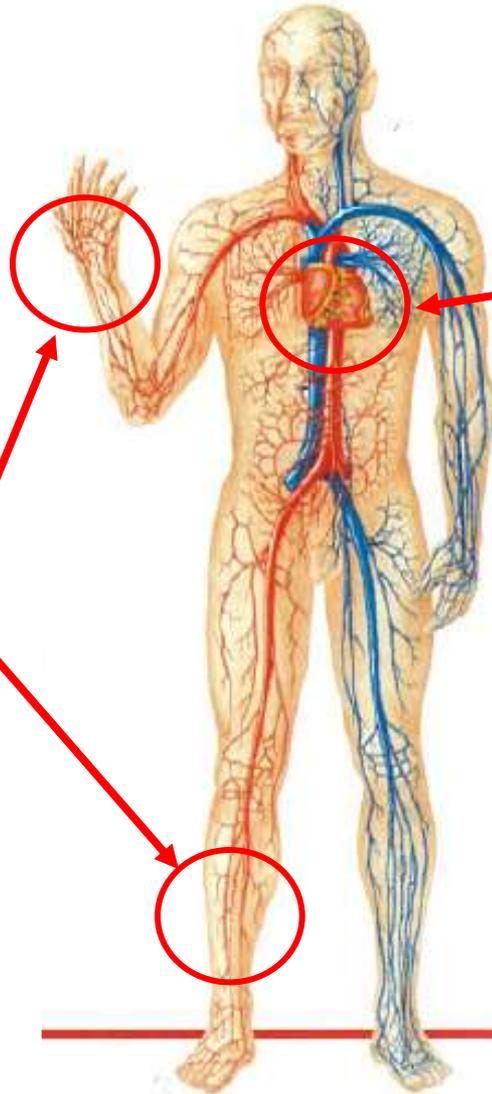
● しかし電気の普及には交流が不可欠



● 結局、世界中が交流電力網に

● 人体の血液循環も交流と同じ

- 発電所から特高圧→高圧→低圧とどんどん枝分かれして細くなって行くのと同様に、心臓→大動脈→動脈→毛細血管と細くなって行く



中央発電所

心臓に相当

末端の消費者

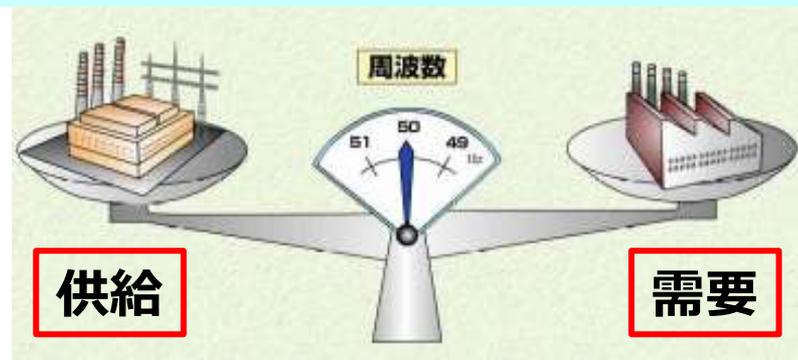
毛細血管
に相当

人体の血液循環と交流電力網の比較

	人体	交流電力網
供給源	心臓	中央発電所
通路	大動脈	特高圧 (156kV)
	動脈	高圧 (6600V)
消費	毛細血管	低圧 (440V)

5. 周波数制御の重要性

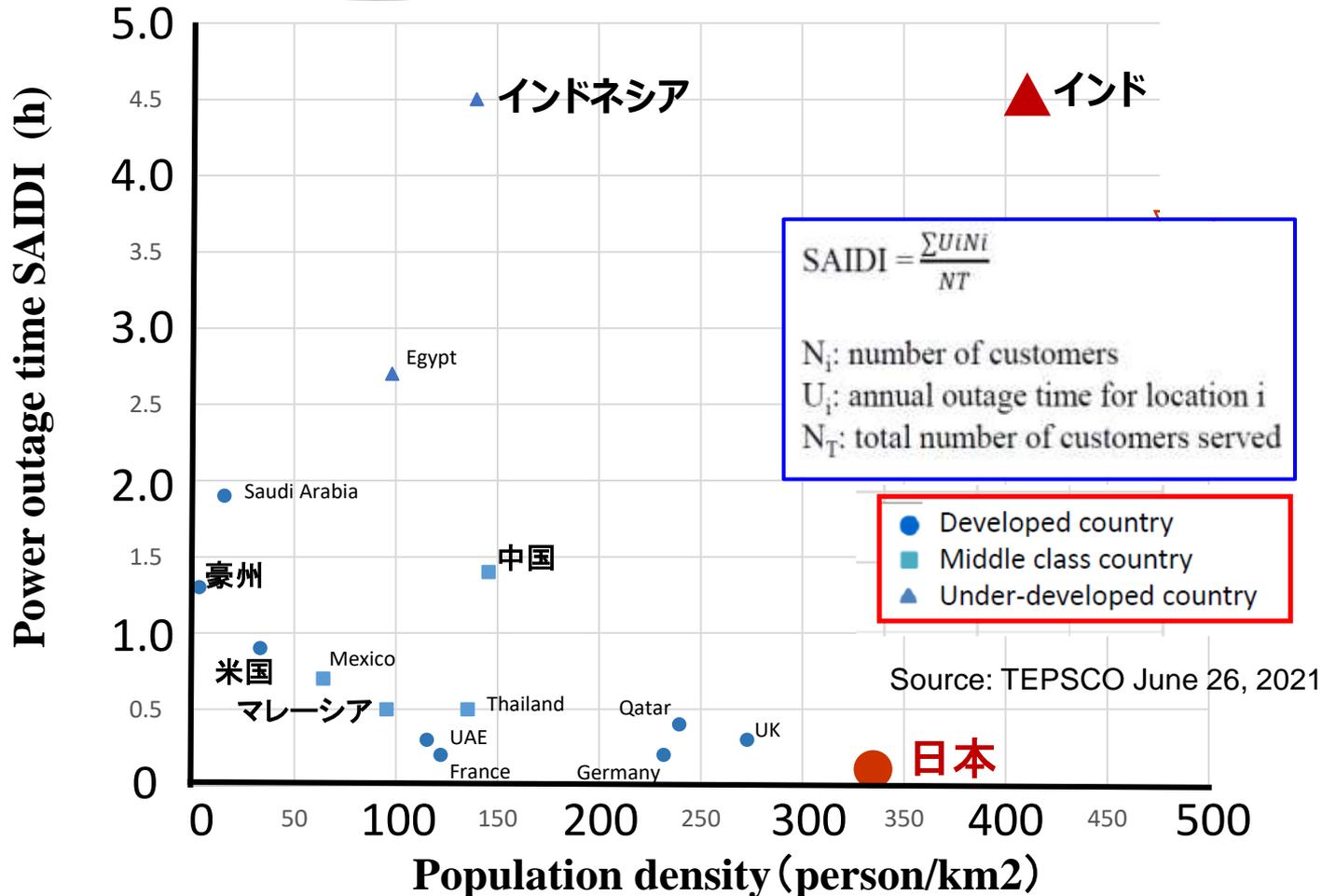
- 電力の**発生(発電)**と**消費**は常に**バランス**している必要がある
- これがずれると周波数や電圧が変動する
- **需要に対し供給が不足すると周波数が低下する**
- 周波数を一定に保つ制御は秒単位で精密なコントロールが必要!
- 何らかの理由で周波数が低下した場合、まず一部の**需要側を切り**、**周波数の回復をはかる**
(**UFLS : Under Frequency Load Shedding : 周波数低下による負荷遮断**)
- それでも周波数低下が止まらない時は、すべての発電設備が停止する
(**UFR: Under Frequency Relay周波数低下遮断器作動**)
- このようにして**全電源喪失(Black out)**が発生する



● 世界の停電率

モンゴル 54.0
南アフリカ 44.0
ブラジル 12.6

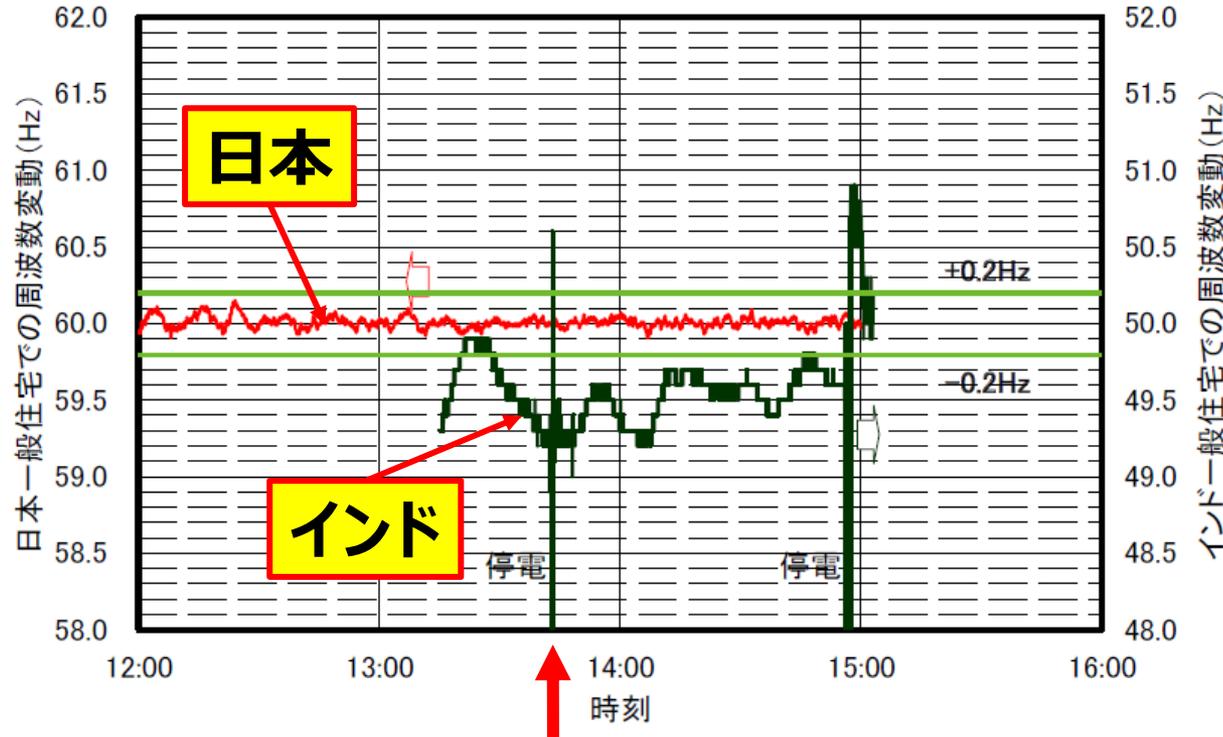
バングラデシュ 64.5 ▲



● 世界の停電の大半は周波数変動による

デリーと日本の一般家庭比較
(2012)

計測日・計測場所
デリー近郊: 6月26日/Gurgaon地区
日本: 6月23日/長崎市



日本(長崎市)
±0.1Hz

インド(デリー)
±1.5Hz

UFR

停電

- インドでは1時間に1回の停電は日常茶飯事!
- 発展途上国の停電の大半は周波数低による停電!

出典: 周波数データは2012.8.3 AECE講演資料より

交流では需要と供給は**瞬時も**バランスが必要!

日本の周波数制御 : $\pm 0.2\text{Hz}$

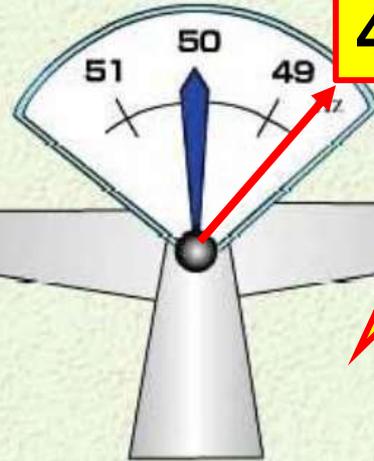
高精度の製造業の基本!

供給(発電)

周波数

需要(消費)

①



②



- ① 何らかの理由で供給が低下し、周波数が 48.5Hz を切る
- ② **UFLS**(**U**nder **F**requency **L**oad **S**hedding)(周波数低負荷遮断)が作動し、需要の一部を強制的に切り捨てる!
- ③ さらに周波数が低下し 47.5Hz を切ると、全発電設備が停止し、**ブラックアウト**(全地域停電)を引き起こす!

● 慣性力

慣性定数 = $1/2J\omega^2$ /MVA

慣性モーメント $J = GD^2$

ω : 角速度 (rad/s)
G : 重量 (ton)
D : 代表直径 (m)

- 運転中の蒸気タービン・発電機はその慣性力により自動的に周波数を一定に調整する



慣性力 = 機械慣性力 + 蒸気慣性力

5~10s

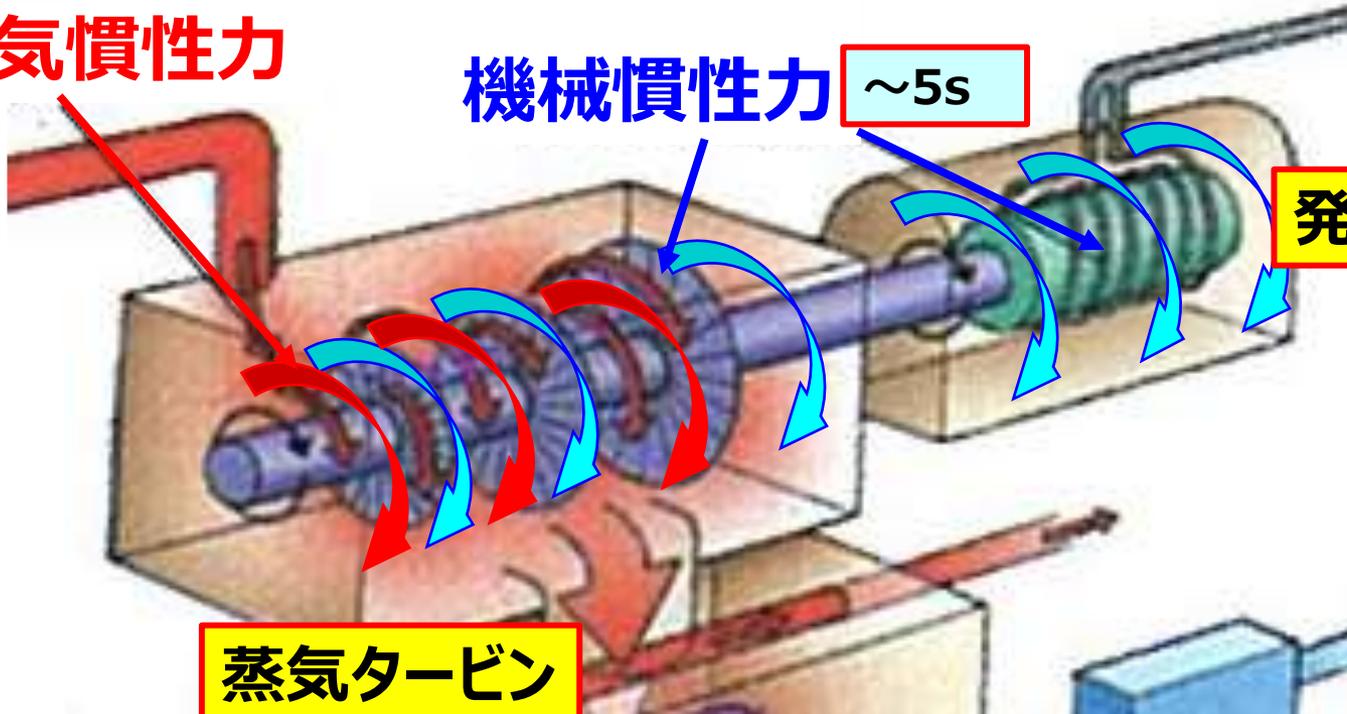
- 機械慣性力に加え蒸気慣性力も重要

蒸気慣性力

機械慣性力 ~5s

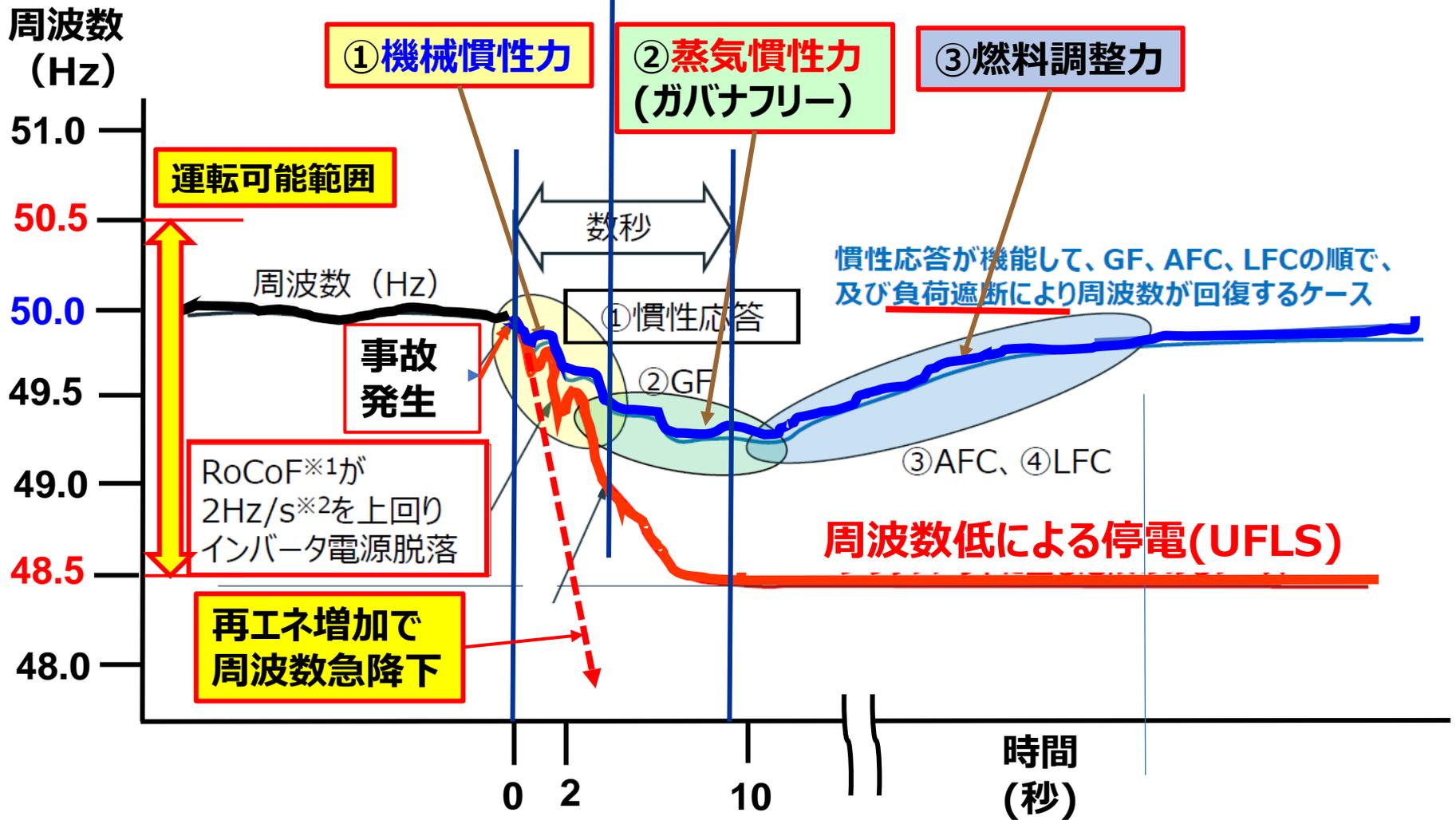
発電機

蒸気タービン



$$\text{慣性力 } E = E_m + E_s = \frac{1}{2} GD_2 + (E_{GV} + E_{ICP})$$
$$E_m: \text{ 機械慣性力 } = \frac{1}{2} GD_2$$
$$E_s: \text{ 蒸気慣性力 } = \text{ 主蒸気慣性力 } E_{GV} + \text{ 再熱蒸気慣性力 } E_{ICP}$$

● 周波数制御は秒単位の戦い！



● 秒単位で需要と供給のバランスを取らねばならない！

● 慣性力低下による周波数低下速度の増加

RoCoF : Rate of Change of Frequency : 周波数低下率

● 600MW機の1台停止により慣性力が低下し、周波数低下速度が0.5→1.0Hz/sと2倍になっている!

TA2号機脱落

TA4号機脱落

周波数低下の開始点

RoCoF = 0.5 Hz/sec

RoCoF = 1.0 Hz/sec

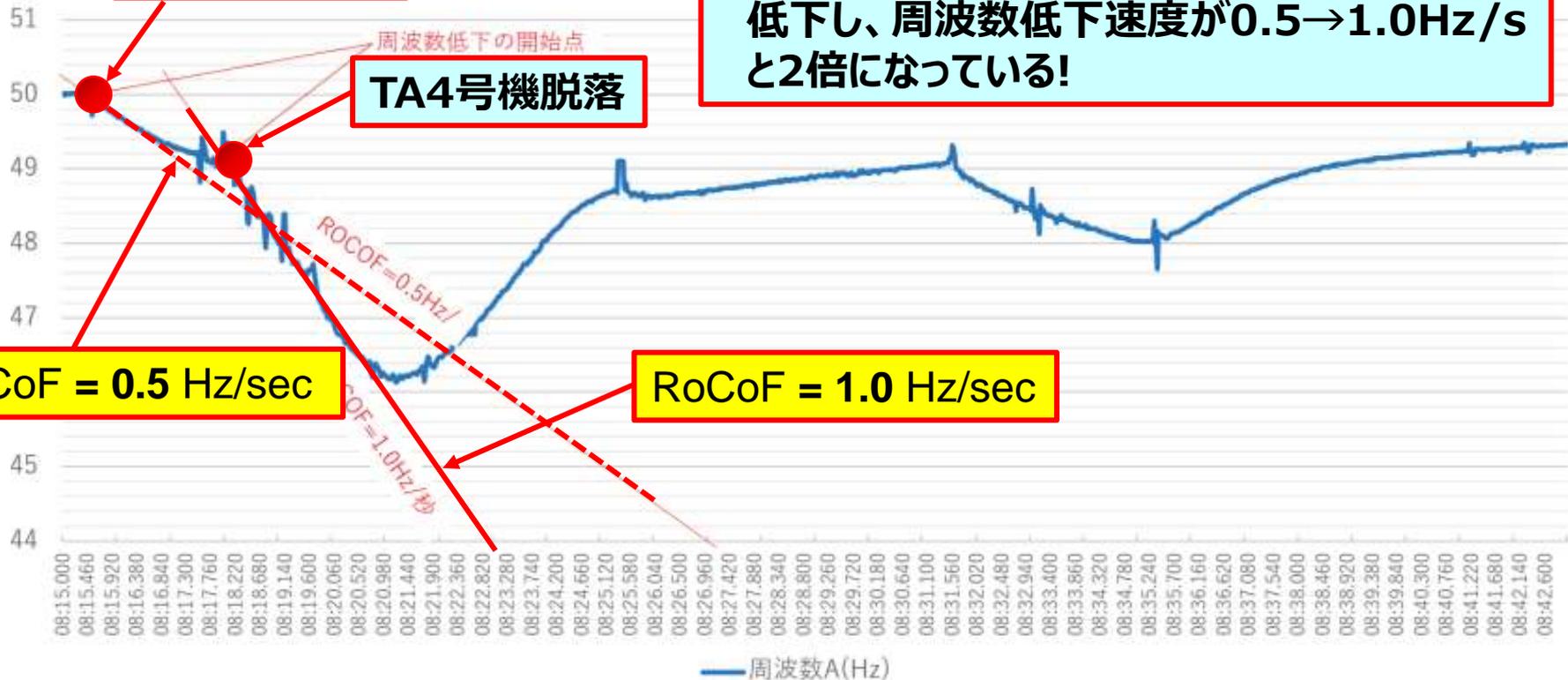
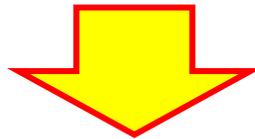


図2 平成30年北海道胆振東部地震直後の周波数変化 (3時 8分15秒~42秒)

出典：立花慶治、“慣性力と同期化力について、”火力原子力発電協会誌 2022年4月号より

VREは周波数変動の耐力を奪う!

- ① VRE(インバータ電源)には慣性力が無い
- ② RoCoF(周波数低下速度)が大きい(2Hz/秒)時には自分を守るために瞬時にシステムを離脱
- ③ 変動による需給バランスを乱す



- ① 太陽光・風力が毎年増加するという事は、周波数低下に対する耐力が年々低下していることを意味する
- ② 周波数低下の制限値(UFLS、UFR)の設定値は従来通り
→周波数低下による停電やブラックアウトの危険性が年々増加
- ③ 地震・津波・台風が頻発する日本では、周波数低下の引き金となるきっかけは常に存在する(ヨーロッパ、米国とは異なる)
- ④ 停電の頻発は精密な制御を必要とする製造業に最大の打撃を与える

◆ UFLSが現実に東京で発生！ (2022.3.16)

2022.3.16の東北地方地震発生時の状況

東京電力パワーグリッド

- 地震発生：2022年3月16日(水) 23:36
- 地震直前の需要：約2860万kW
- 地震発生後の脱落電源：約150万kW



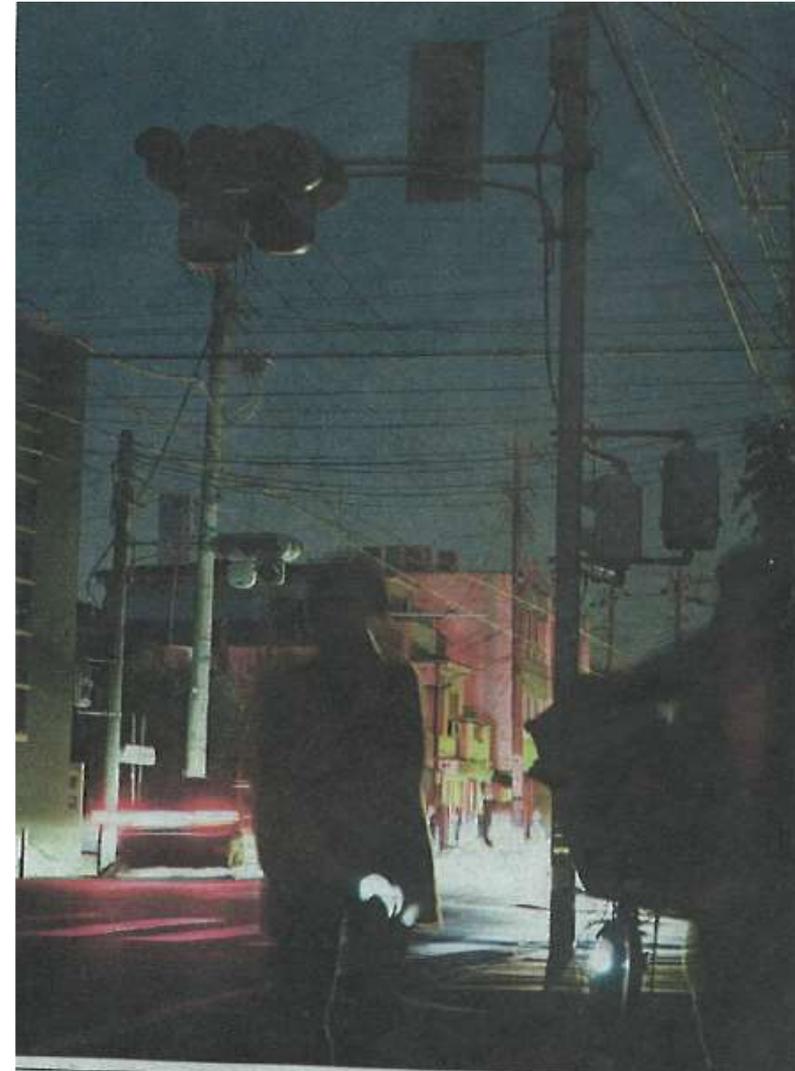
- 周波数低下：48.4Hz



● UFLS発生

- 停電世帯：209万世帯
- 3.17 午前2:52すべての停電が解消

出典：電気新聞

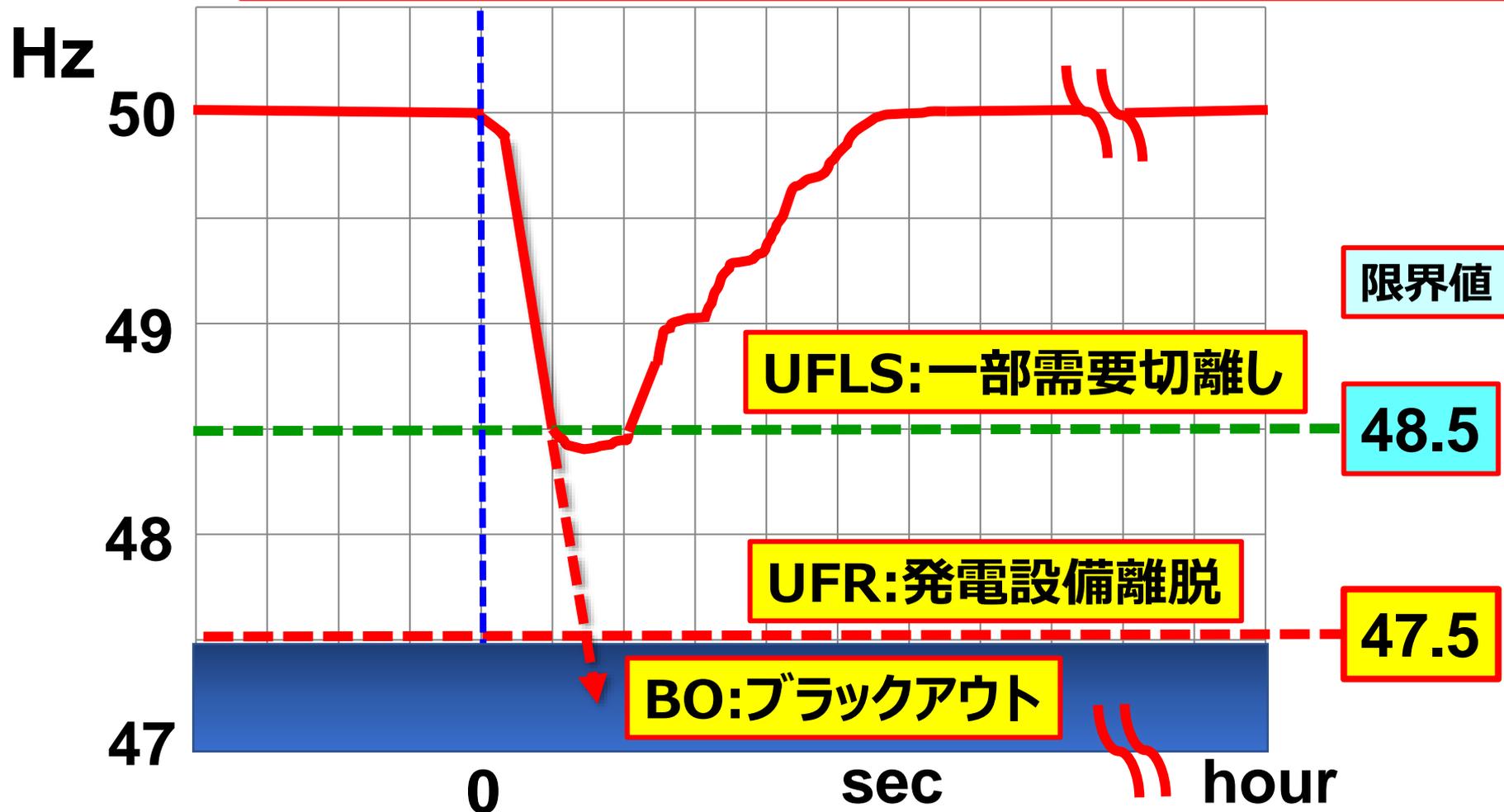


◆ 周波数低下問題：今や大問題に！

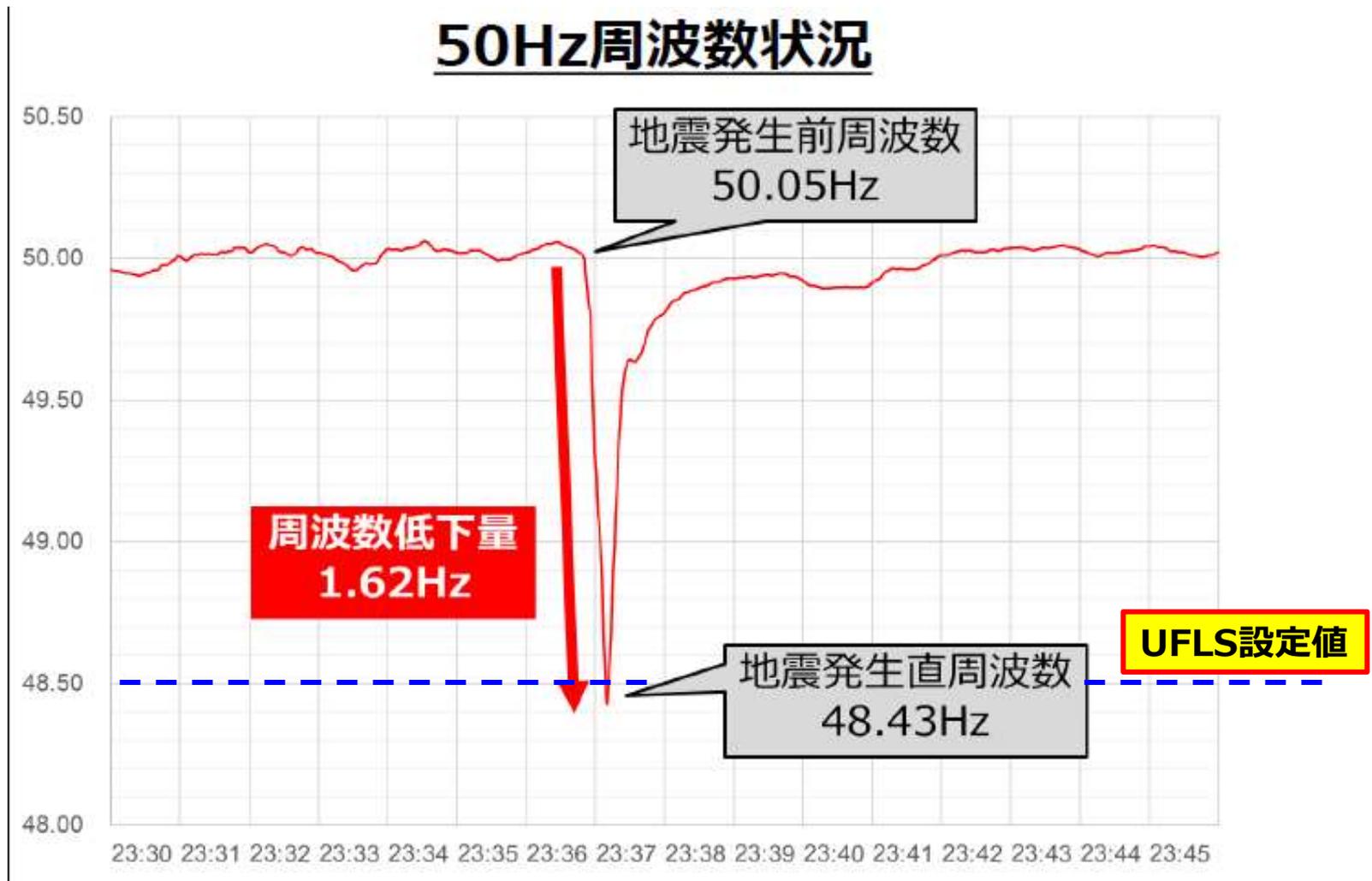
停電の発生

UFLS : Under Frequency Load Shedding: **需要側**: 負荷強制切離し

UFR : Under Frequency Relay: **発電側**: 発電設備離脱



2022.3.16 東京地区周波数変動状況



勝負は僅か30秒!

出典：東京電力パワーグリッドHPより

UFLS作動時の経緯 (2022.3.16) [1]

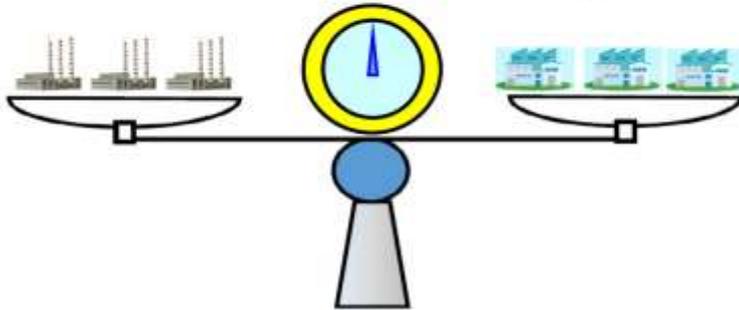
① 平常時

① 発電-需要バランス時

発電 = 需要



50Hz



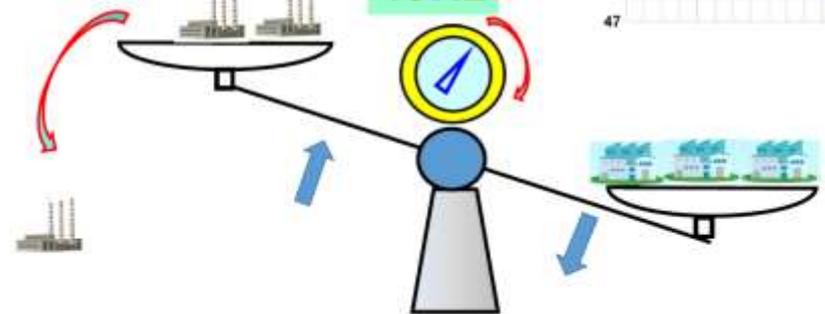
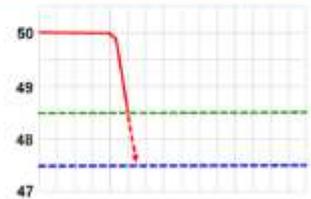
② 一部電源脱落

② 一部電源脱落時---その1

発電 < 需要

周波数低下

49Hz



● 一部電源の脱落で周波数低下!

UFLS作動時の経緯 (2022.3.16) [2]

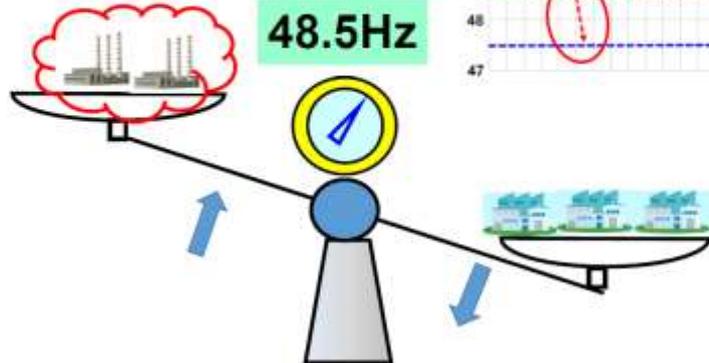
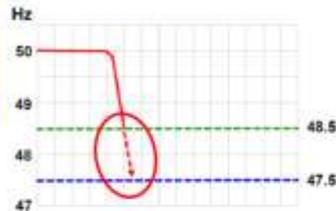
③ 周波数低下続行

③ 一部電源脱落時---その1

もう少し頑張れ!
無理だ! 壊れる!

周波数低下
続行

48.5Hz



● 周波数低下の傾向止まらず!

- 周波数低下を食い止めるために一部需要家を強制的に切離す→**UFLS**(**U**nder **F**requency **L**oad **S**hedding)

④ UFLS動作-負荷一部遮断

④ 一部電源脱落時---その2

需要を減らして周波数低下を防止

UFLS作動!



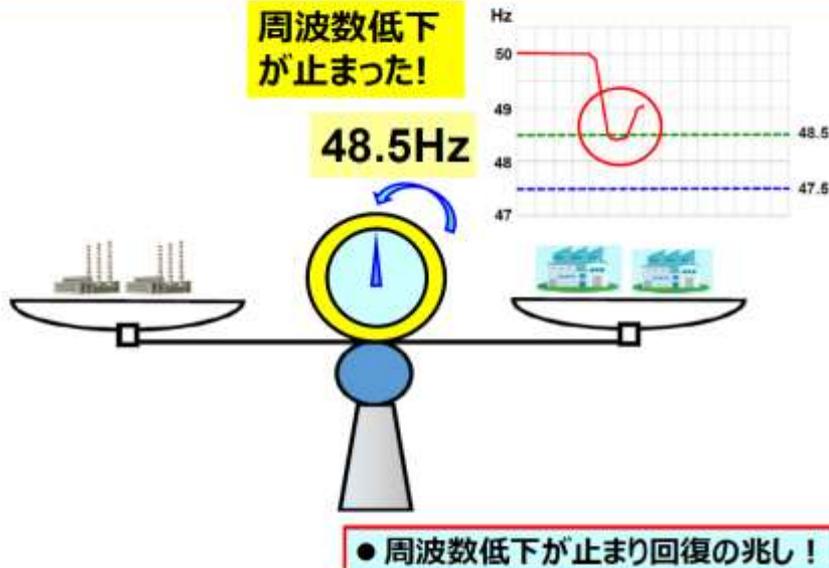
● 一部需要家切離し

● 需要の強制低下やむなし!

UFLS作動時の経緯 (2022.3.16) [3]

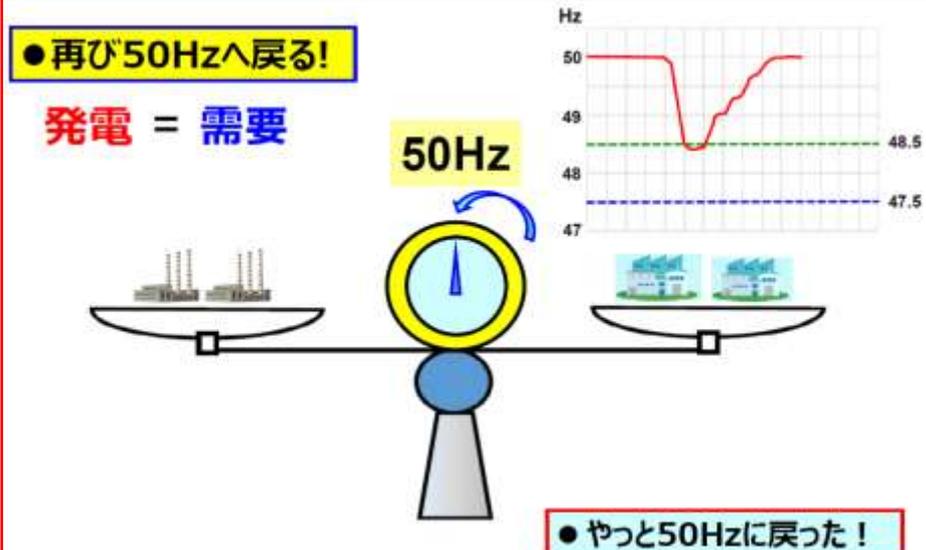
⑤ 周波数低下止まる

⑤ 発電-需要バランス回復時



⑥ 50Hzに回復

⑥ 発電-需要バランス時

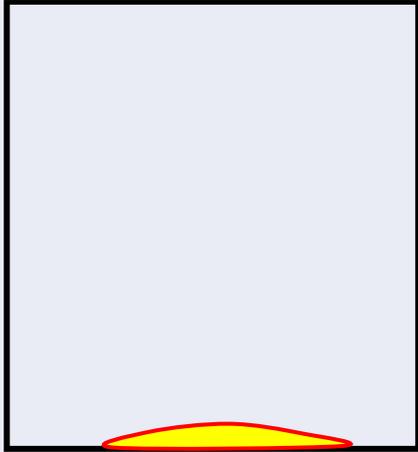
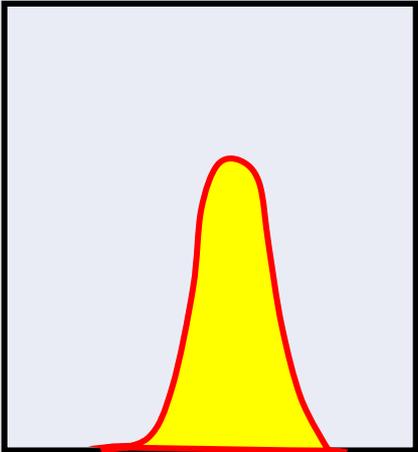
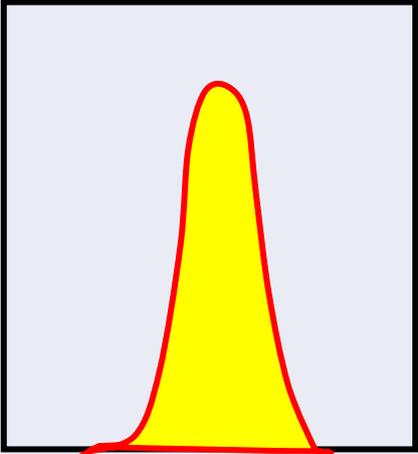


● 近年の大幅な周波数低下実績

No.	名称	発生年月日	低下周波数	低下幅	電源脱落量	負荷遮断量
			Hz	Hz	万kW	万kW
1	北海道胆振東部地震	2018.9.6	46.13	3.87	≈150	ブラックアウト
2	東日本大震災	2011.3.11	48.44	1.56	≈2100	573
3	新潟県中越沖地震	2007.7.16	49.17	0.83	341	-
4	送電線N-2故障	1976.5.5	48.70	1.30	確認できず	69
5	地震 (愛知・岐阜県境)	1975.3.14	59.14	0.86	確認できず	-
6	遮断器N-1故障	1971.7.19	48.60	1.40	確認できず	11

- 日本の周波数低下事故----50年で6件しか発生していない
- 日本ではこれまで周波数低下事故は少なかった---良好な需給バランスのおかげ!
- これがVRE再エネ増加で危うくなっている! →**停電頻発の危険性**

東京地区の太陽光は1000万kWも振れる!

天気	雨	晴時々うす曇り	晴
太陽光発電量	150万kW	1200万kW	1524万kW
			
太陽光比率	3%	37%	60%
日付	2022年3月22日(木) 11:30	2022年3月23日(金) 10:40	2022年5月4日(水) 11:30

出典：データは東京電力でんき予報より

※東京エリアとは東京電力パワーグリッドがサービスを行う関東圏（東京都、神奈川県、埼玉県、千葉県、栃木県、群馬県、茨城県、山梨県、静岡県（富士川以東））を指します。

東京地区の太陽光出力変動具体例

	晴天時	雨天時	差
日時	2022.11.11(金) 11:30	2022.11.23(水) 11:30	
需要実績(万kW)	3,330	3,427	
太陽光発電量(万kW)	1,153	96	1,057
太陽光割合(%)	34	2	

出力カーブ



[出典：東京電力でんき予報]

雲の状況



東京地区の需給バランスは綱渡り!

- 東京地区最大電力需要： 5000万kW

- 予備率3%=150万kW

→予備率3%を確保したから大丈夫といえるのか?

- 太陽光：晴天時 1200万kW

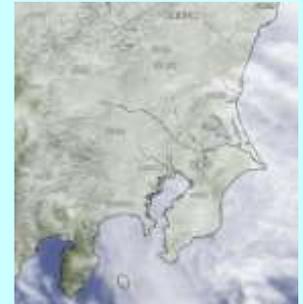
- 太陽光：雨天時 200万kW

- 晴れか雨かで 1000万kWも違うのに、150万kWの予備など気休めに過ぎない!

晴れ



雨



- 実際は700万kWの揚水の運用で何とか凌いでいる---毎日が綱渡り!

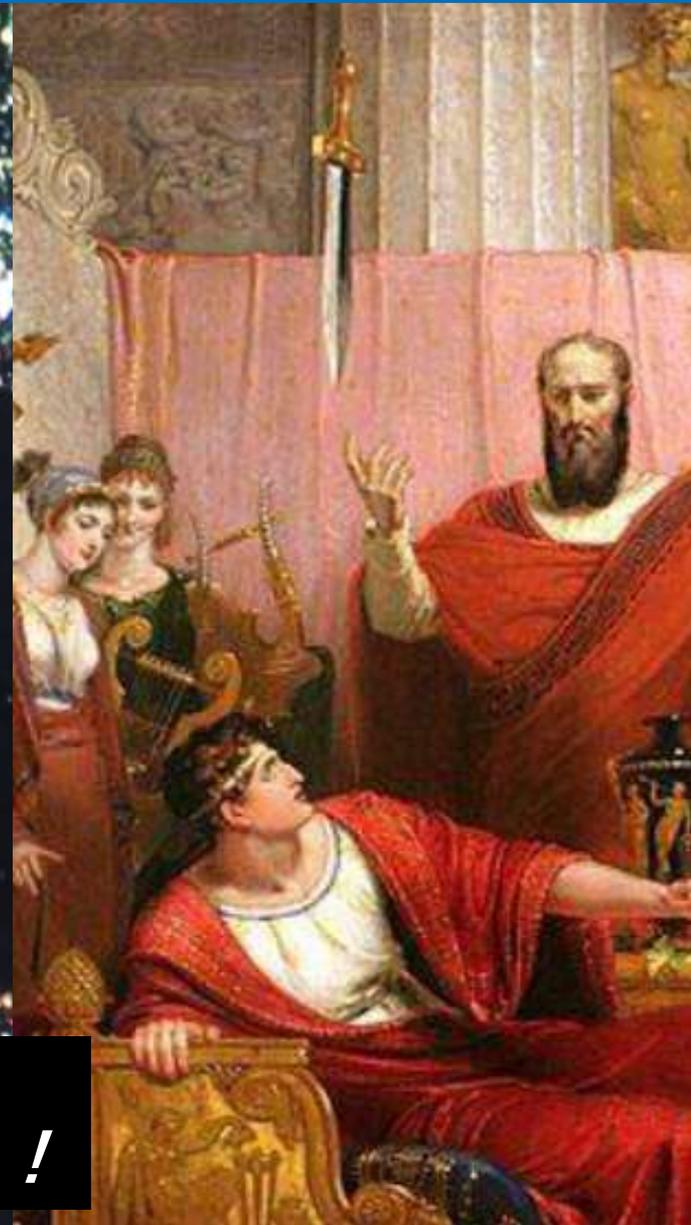


ダモクレスの剣



東京では栄華の夢をむさぼっているが...

目を覚ませ
---科学的事実を直視せよ！



● UFR作動→ブラックアウト発生の恐怖

1. UFR作動(47.5Hz)により全発電設備が停止
2. 全電源喪失のため再起動には、まず種火の確保が必要
3. 種火には温存していた水力を使用
4. 種火の発生電力を利用して火力を少しずつ再起動
5. 再起動電力に見合う需要を少しずつ復活させる
6. この場合でも周波数制御は必要。
少しでもずれると再停止となり、最初からやり直しとなる。
7. このようにして発電増→消費増をバランスを取りながら繰り返し、
徐々に出力を上げて行く
8. ブラックアウトからの完全復帰には一般に48時間程度かかると
いわれている

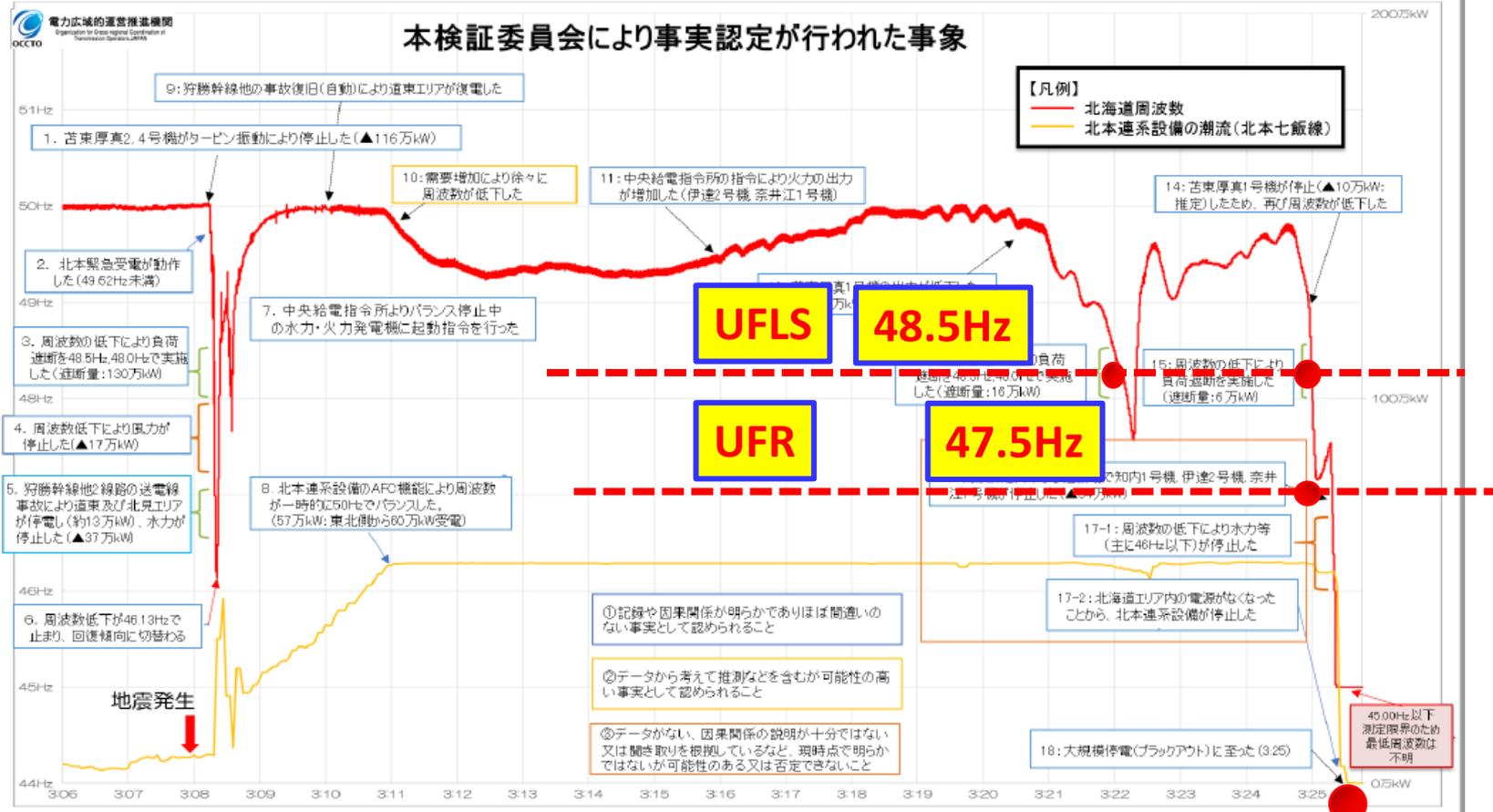
日本で唯一のブラックアウト事故：2018.9.6

Ⅱ. 地震発生からブラックアウトに至る経緯について

北海道胆振東部地震

6

- 地震発生からブラックアウトに至るまでの間に発生した事象を明らかにし、周波数変動を説明。
- 一部に推測を含むが概ね全ての事象はほぼ間違いのない事実として確認。一連の事象は需要と供給のバランスで生じる周波数変動で説明できる。

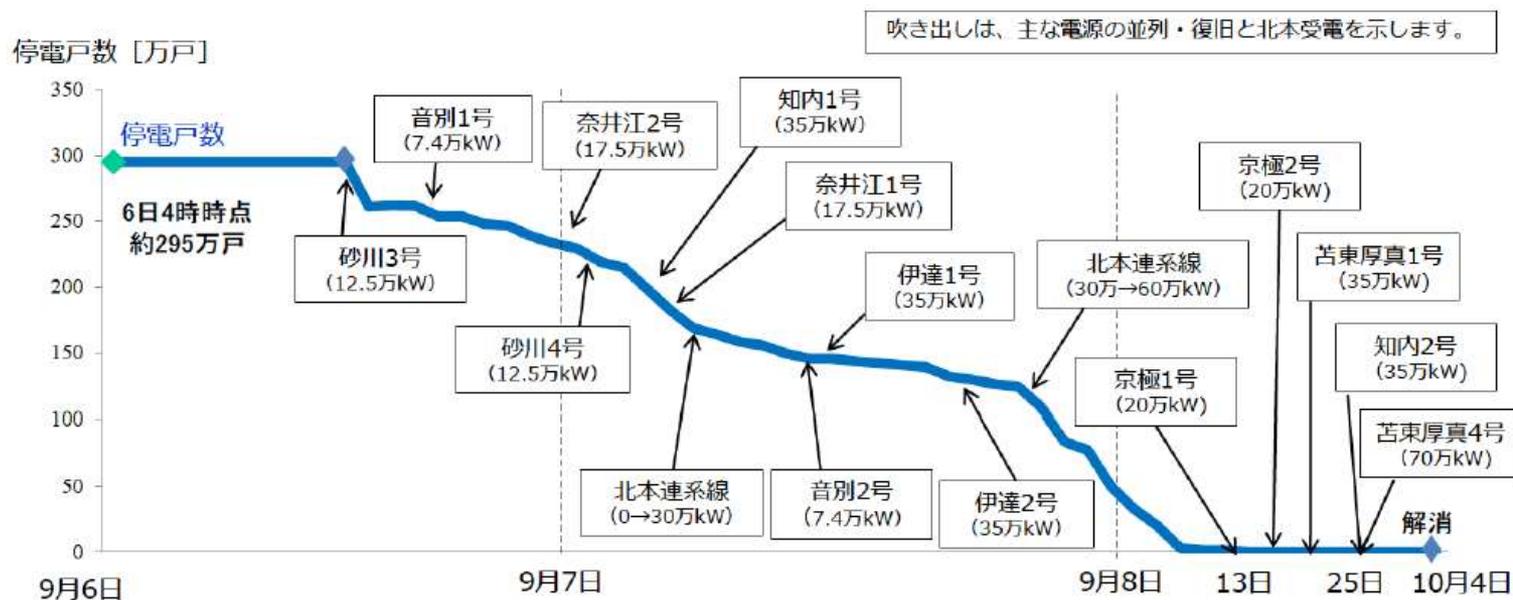


ブラックアウト後の復旧には2日かかっている

1.2 停電と復旧の状況

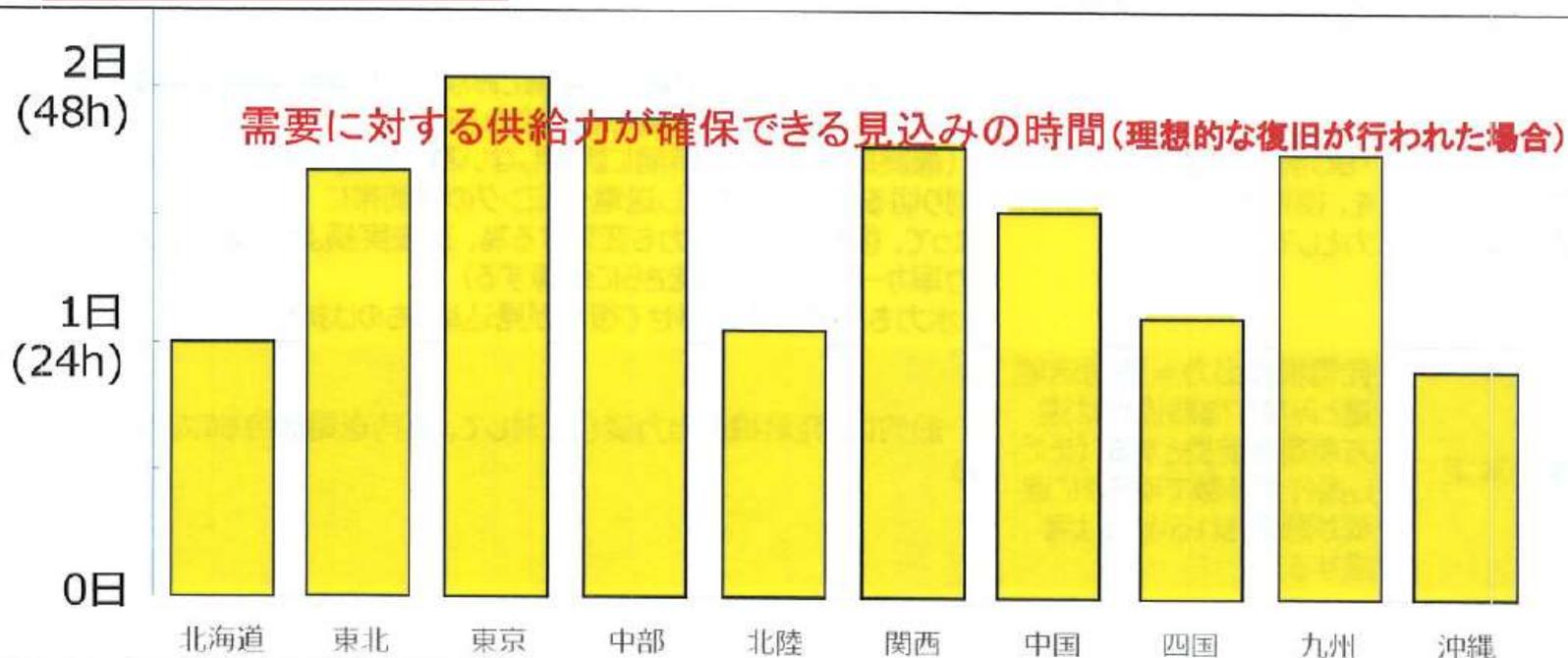
2

- 地震により、主力電源である**苫東厚真発電所をはじめとした北海道内全ての発電所が緊急停止し、北海道全域の約295万戸のお客さまが停電（ブラックアウト）**しました。
- 地震による被害のなかった水力・火力発電所を順次再稼働させ、自家発電設備をお持ちのお客さまのご協力をいただいた他、道民の皆様には節電のご協力を得ながら、復旧を進めました。
- 停電戸数は9月8日18時に約4,000戸**、9日20時に約400戸（厚真町・安平町）となり、震源地に近い同地域は、土砂崩れにより道路が寸断され、道路の啓開作業が完了した箇所から順次復旧作業を行ったことから、解消は10月4日となりました。



●ブラックアウト時の停電復旧までの予想時間

- 各一般送配電事業者において、現在までに検討が完了した系統復旧方策を適用したうえで、ブラックアウトからの停電復旧に必要な供給力の確保できるまでの状況（需要に対する供給力が確保できる見込みの時間）を試算した結果は以下の通り。
- 設備被害やトラブルがなく、復旧操作等が想定通り実施されることを前提とした理想的な復旧が行われた場合、概ね2日間以内に完了する見込み



- 今後は、上記の時間を基準として、復旧時間の短縮方策の効果を検討し、採否の判断を実施していく。

●ブラックアウトの怖さ→完全復旧には48時間かかる….

● ブラックアウト防止に貢献する発電方式

発電方式	火力	Flex火力	変動再エネ VRE	安定再エネ SRE		原子力
			太陽光・風力	水力	地熱・バイオマス	
・必要な時に発電する能力	○	○	×	○	○	○
・慣性力	○	○	×	○	○	○
・高速負荷変化	○	◎	×	◎	○	△
・極低最低負荷	○	◎	×	◎	○	△
・持続力 (エネルギー貯蔵)	○	○	×	○	○	○
総合判定	○	◎	×	◎	○	○

➤ 太陽光・風力などのVREは欠陥再エネではないのか？

● 本当に日本は水力を増やせないのか？

- 本当に水力は増やせないのか？
- 既存のダム有能力増強(ダムのかさ上げ)
- 治水用(国交省所管)、農業用(農水省所管)の総合運用
これと発電用との連携
- 上池追加による揚水化は意外と簡単ではないのか？

日本のダム

	ハイブリッド	治水用	発電用
総数	1,480	106	98
	(うち多目的 573) (利水 910)		(うち電力管理79)

日本の水力発電設備

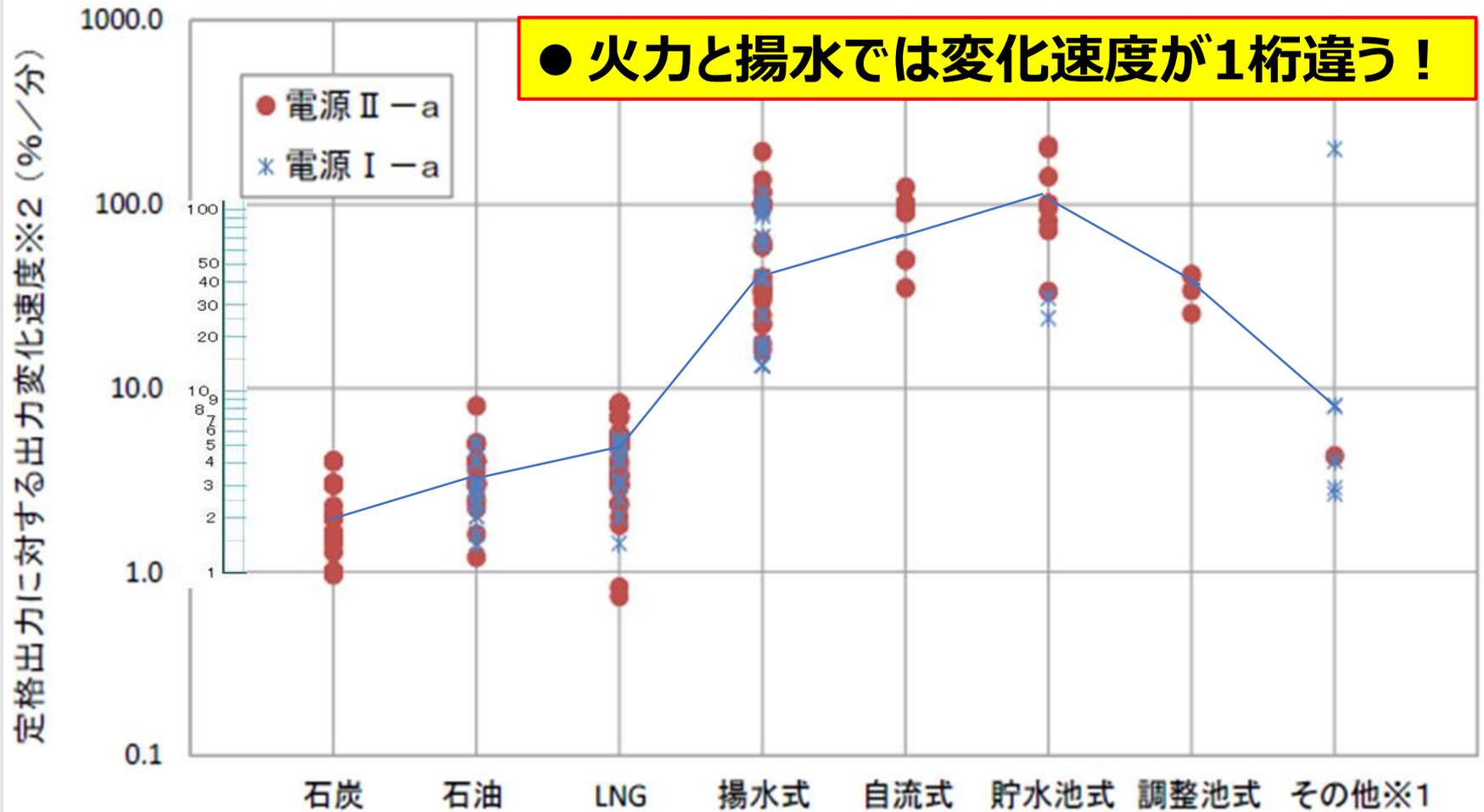
出典：OCCTO

	2022年度
一般水力	2,180 万kW
揚水	2,739 万kW
合計	4,919 万kW



● 水力は高速出力変化が可能!

電源 I -a、II -aの出力変化速度の分布



[備考] ※1: コークスガス/LNGやLNG/重原油等の混焼発電設備等
 ※2: LFC(AFC)変化速度。出力帯等により出力変化速度が異なる場合は最大の出力変化速度。

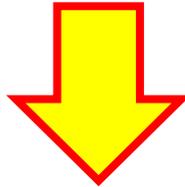
出典: OCCTO資料より

6. 柔軟な火力発電: Flex-Power

1. 火力発電は**2050年にカーボンニュートラル**になっても依然として**重要な基幹技術**である。再生可能エネルギーの進展は**火力発電の補完が無い**と進まない。
2. 太陽光・風力といった変動性再生可能エネルギーVREの増加は交流電力網における電力の供給を不安定にし、特に周波数低下による停電やブラックアウトの危険性が増す。これを防ぐにはVREの増加に見合った安定性再エネSRE(水力など)の増加がベストである。
3. 的確なSRE再エネ(水力など)の増加が出来ないのであれば、VREの変動電力を補償する調整力の確保が必須である。
4. これには**水力並みの高速負荷変化能力を有する新しい火力**---**“柔軟な火力発電(Flexible Power)”**が最適である(Flex-USC, Flex-GTCC)。
5. これから世界の人口、エネルギー消費、電力消費増加の中心は発展途上国(非OECD諸国)となる。日本の製造業維持の基本は、“①プロトタイプ開発は国内プロジェクト、②基幹部品の量産は国内、③市場は海外の発展途上国”となる。
6. この意味でJBICやJICAの役割は極めて重要である。途上国支援はFlex-1を中心とし、日本など先進国ではFlex-2を中心として、大きく世界に輸出することにより日本の製造業を維持・発展させることができる。

➤ 今、世の中の最大の誤解

- カーボンニュートラルになればすべて再生可能エネルギーとなり、火力発電は無くなる！
- 世の中は再エネと蓄電池ですべて賄える！



➤ 科学的な考証

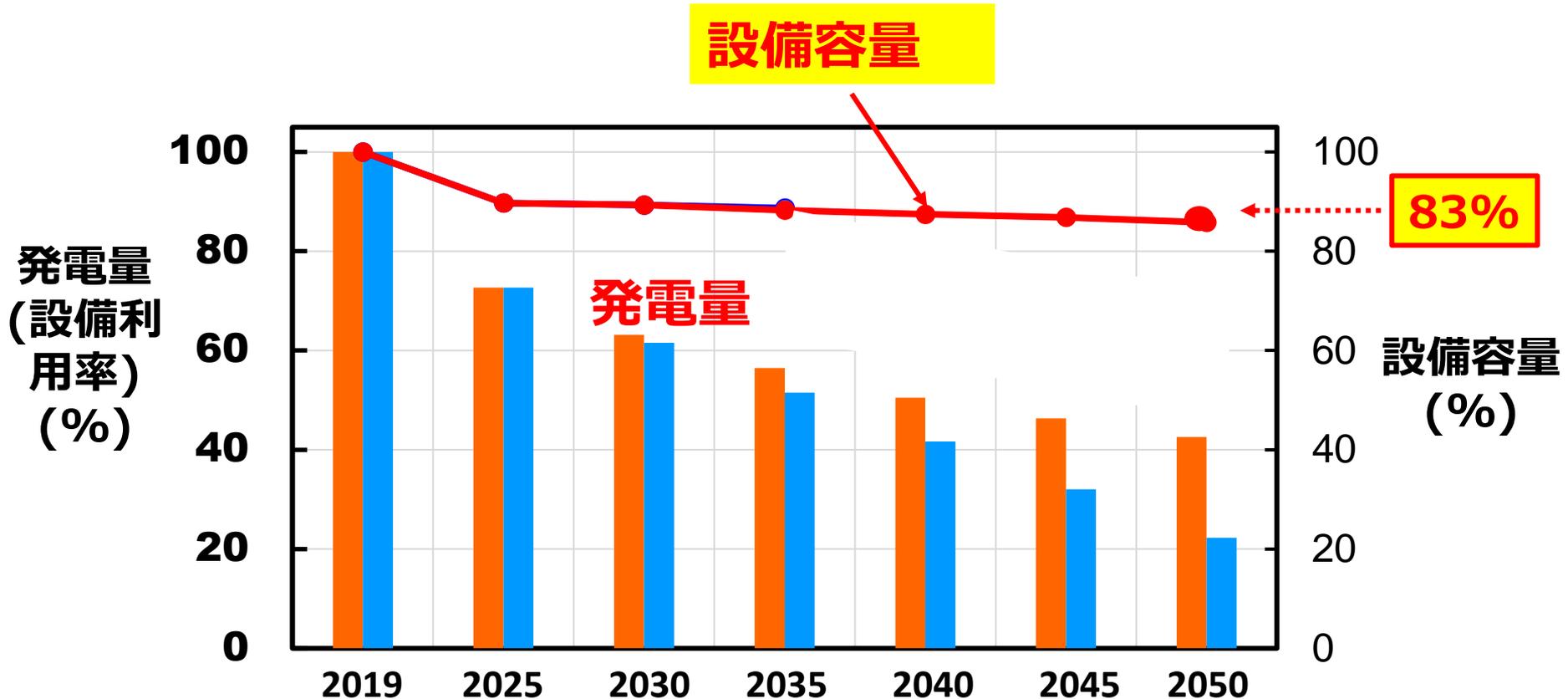
結論

- **変動性再エネVRE**の増加には**火力による調整力**が必要
- 調整力の鍵は①**高速負荷変化** ②**低い最低負荷**
- 2050年になっても火力発電設備は80%残る！
→設備は残るが稼働率は落ちる→経済性低下のため新規投資ができない
- CO2排出規制も原単位基準から排出絶対量基準へ
- 化石燃料から合成燃料へのシフトが進む

➤ **結論：高効率火力発電技術はいつの世でも最重要**

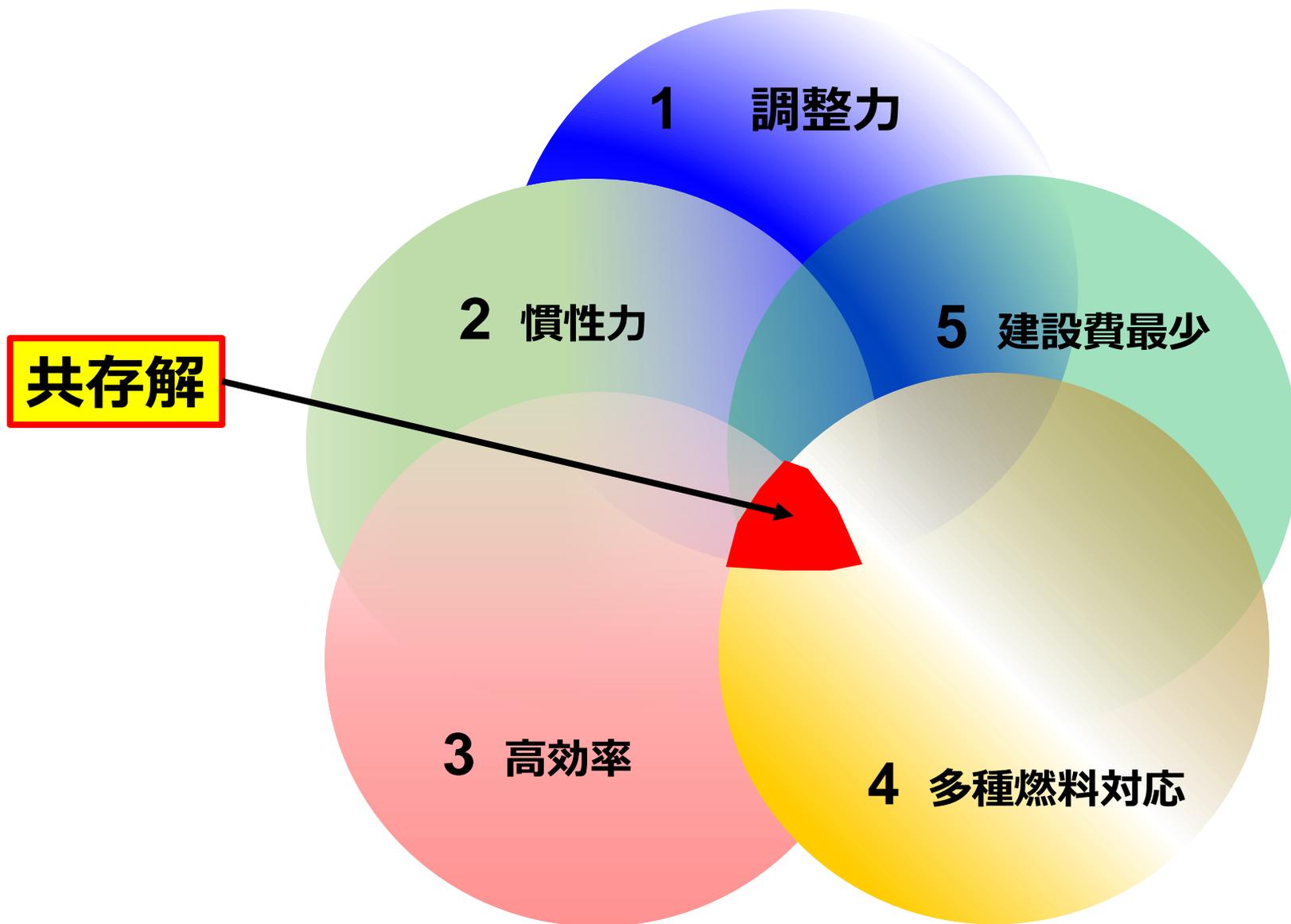
➤ 2050年の火力発電の必要量

- 2050年になっても火力発電の**設備容量**は減らせない！



出典：船橋 信之，火力原子力発電 2020, No.765, Vol.71 p20の図5より金子作成

● これからの火力発電の5つの要件



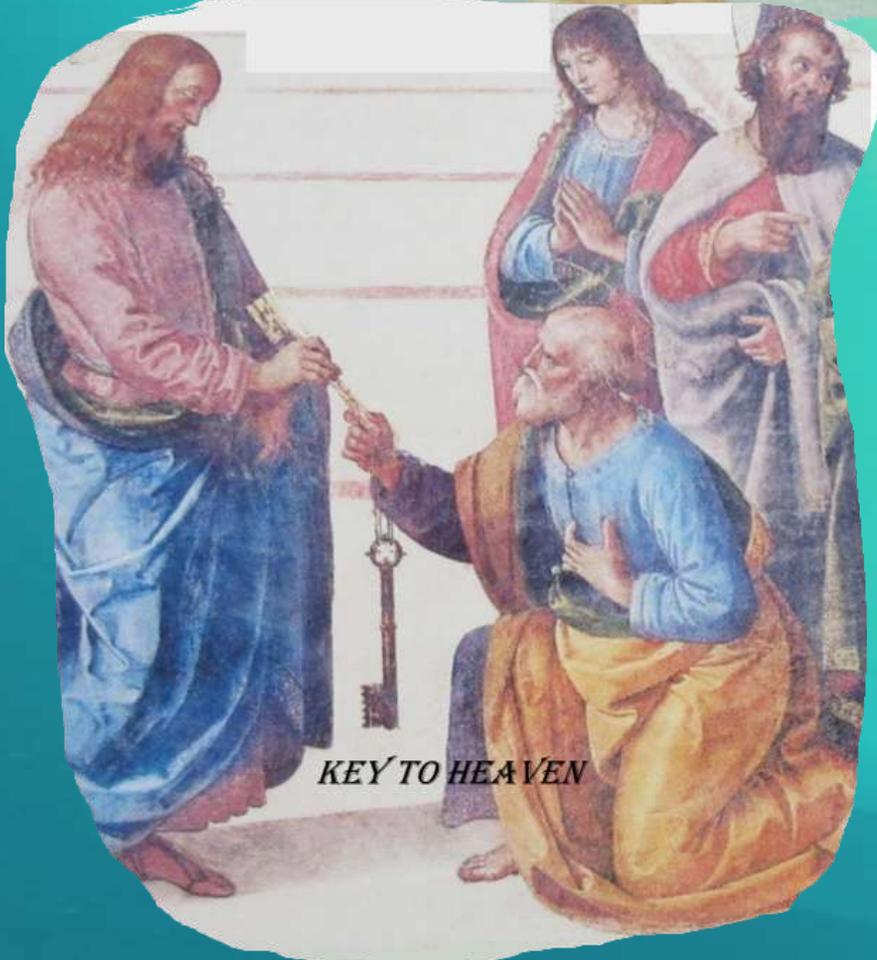
● Flex-USC・Flex-GTCCの概要

		Flex-USC		Flex-GTCC	
システム構成		B-ST-G		GT-HRSG-ST-G	
使用可能燃料	化石燃料	石炭・天然ガス・油・残渣油		天然ガス・軽質油	
	CN燃料	水素・アンモニア・バイオマス		水素・アンモニア・e-methane	
建設工法		モジュール工法		モジュール工法	
高効率化		ST : 650℃		GT:1650℃ ST:650℃	
		Step1	Step2	Step1	Step2
負荷変化率(%/分)		5	15	5	15
最低負荷(%)		15	5 (または所内単独)	15	5 (または所内単独)
蓄熱装置		-	有	-	有

(備考)

1. Step2の初号機は国家プロジェクトとして国内で実施(GX予算活用)
2. 発展途上国への支援は、まずStep1を実施し、将来Step2に改造

*Flex*火力が世界を救う!



- 供給力の確保
- 停電の防止
- 予期せぬ変化への耐力
(世界情勢、自然災害)

各国の発電機器製造能力

	日本	韓国	中国	ロシア	米国	英国	仏	独
蒸気タービン	◎	×	○	○	△	×	×	○→△
ガスタービン	◎	×	△	△	○	×	×	○
ボイラ	◎	○	○	○	×	×	×	△→×
原子炉	◎	○	○	○	△	×	△	△→×
建設	△	◎	◎	◎	△	△	△	△

- ・ドイツはGT以外は作れなくなりつつある→あと3年で火力・原子力製造業崩壊か
- ・インド、バングラデシュはロシア製原子炉建設中でロシアに反対できない
- ・東南アジアなど日本が石炭火力から撤退後は韓国、中国、ロシアが穴を埋める
- ・G7での日本の石炭の国際協力からの撤退。多くの発展途上国が嘆いている。

➤ **日本が助けなくてどうする！**

7. 余剰再生エネの再利用方法

1. 2040年を過ぎて、さらに再生可能エネルギーを伸ばそうとすると余剰再生可能エネルギーの貯蔵が不可欠である。このような大量かつ長期の電力貯蔵には燃料転換(Power to Gas)が最有力であり、その場合電力への再転換は火力発電に頼ることになる。
2. このように火力発電の高効率化は燃料が化石燃料であれ、再生可能エネルギー由来の合成燃料であれ絶対に必要である。
(またどのような形態になろうとも経済性が評価される場合は高効率化が必須である)

➤ 全需要を太陽光で賄うにはどうする？

実測値からの計算例

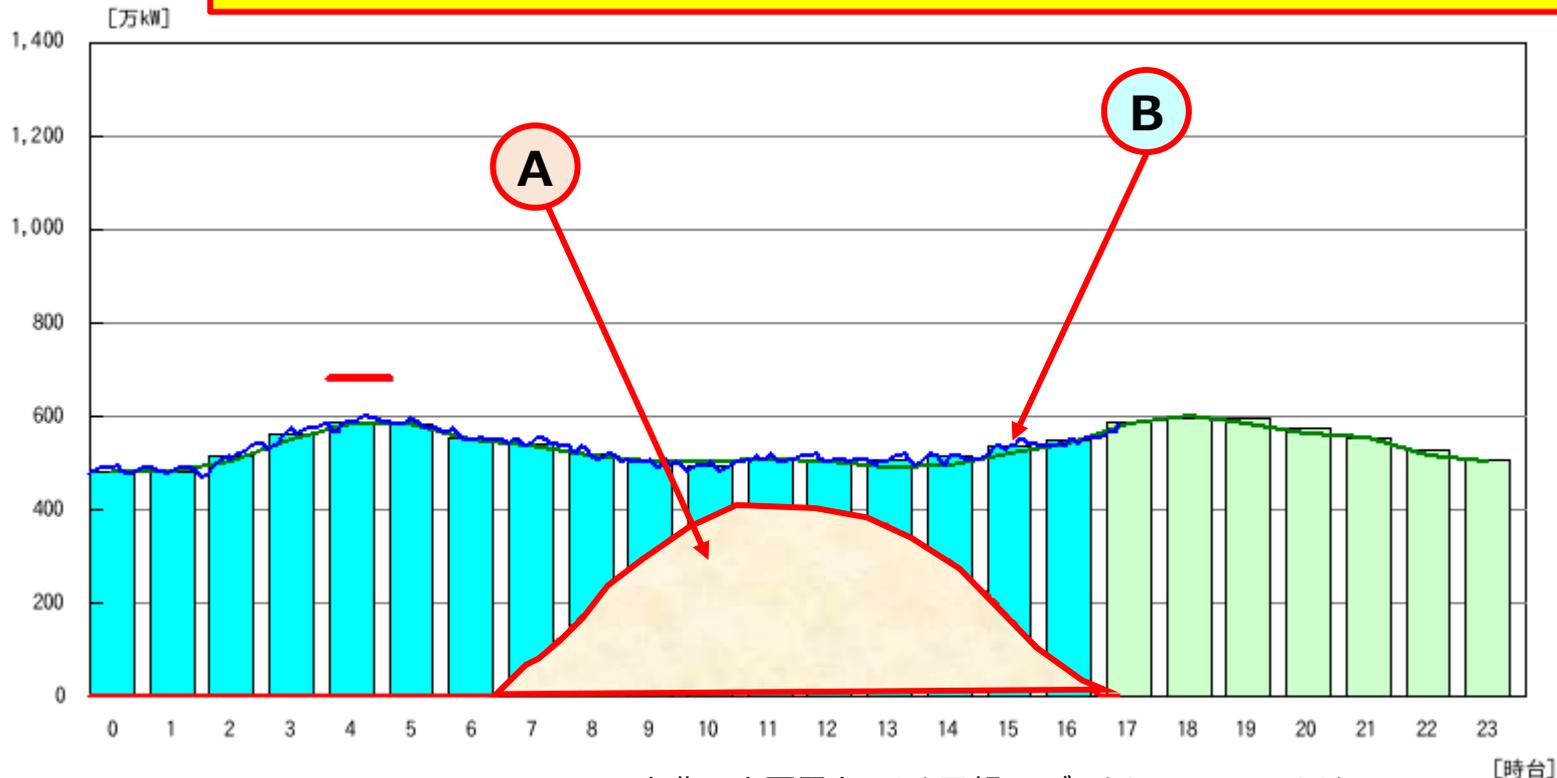
- 電力需要全面積：122
- 太陽光発電面積：25
- 需要全面積/太陽光出力=122/25=4.9
- ピークを合わせると…4.9×0.8=3.9



全必要電力量B/太陽光発電量A=4

残念ながら晴天でも4分の1しか供給できない!

➤ 1日の全需要を昼間の太陽光のみで賄うには4倍の容量が必要!



出典：中国電力でんき予報HPデータ(2022.11.6)より

全需要を太陽光と蓄電池で賄うにはどうする？

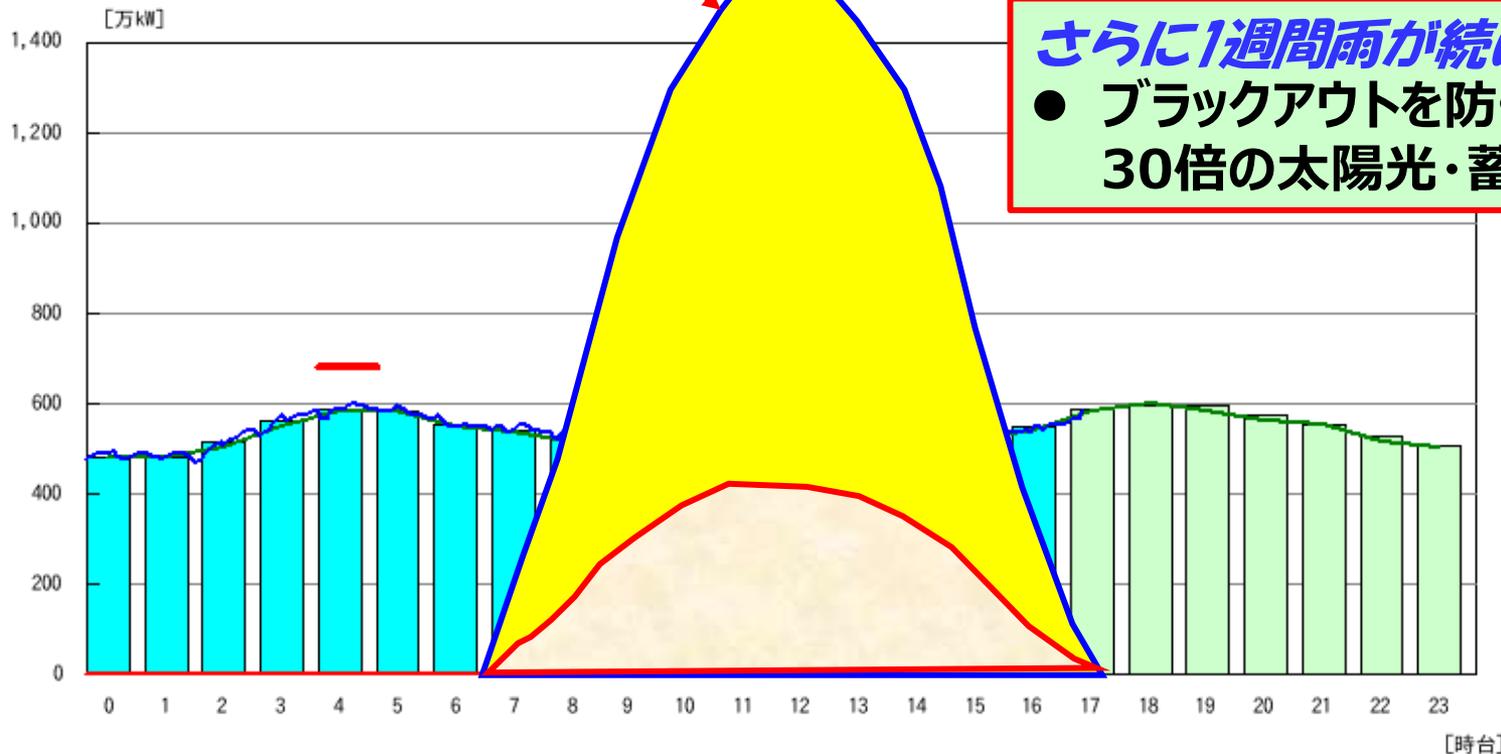
➤ 全需要を太陽光のみで賄うには
4倍の容量が必要

以上は晴天の時の話…

- 実際は曇りも雨もある…年間設備利用率14%
として7倍の太陽光・蓄電池が必用

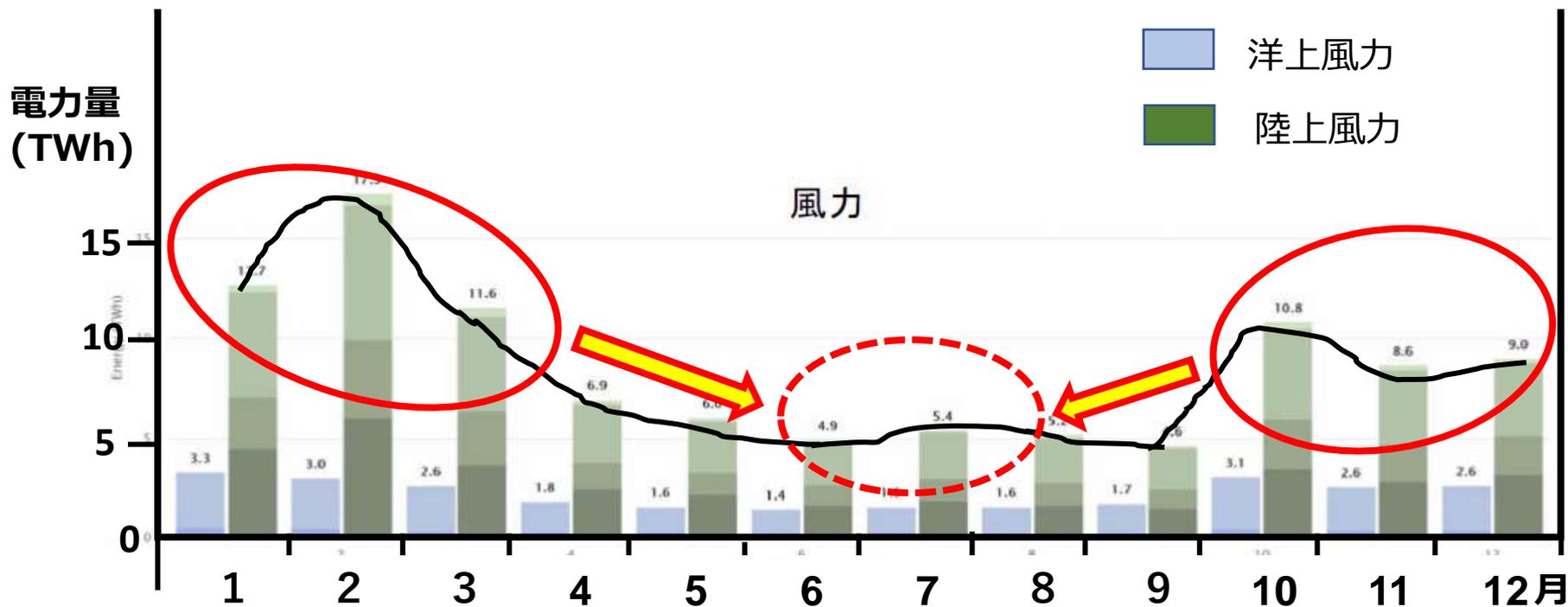
さらに1週間雨が続いたら…

- ブラックアウトを防ぐには
30倍の太陽光・蓄電池が必用



● 季節間エネルギーシフトの必要性

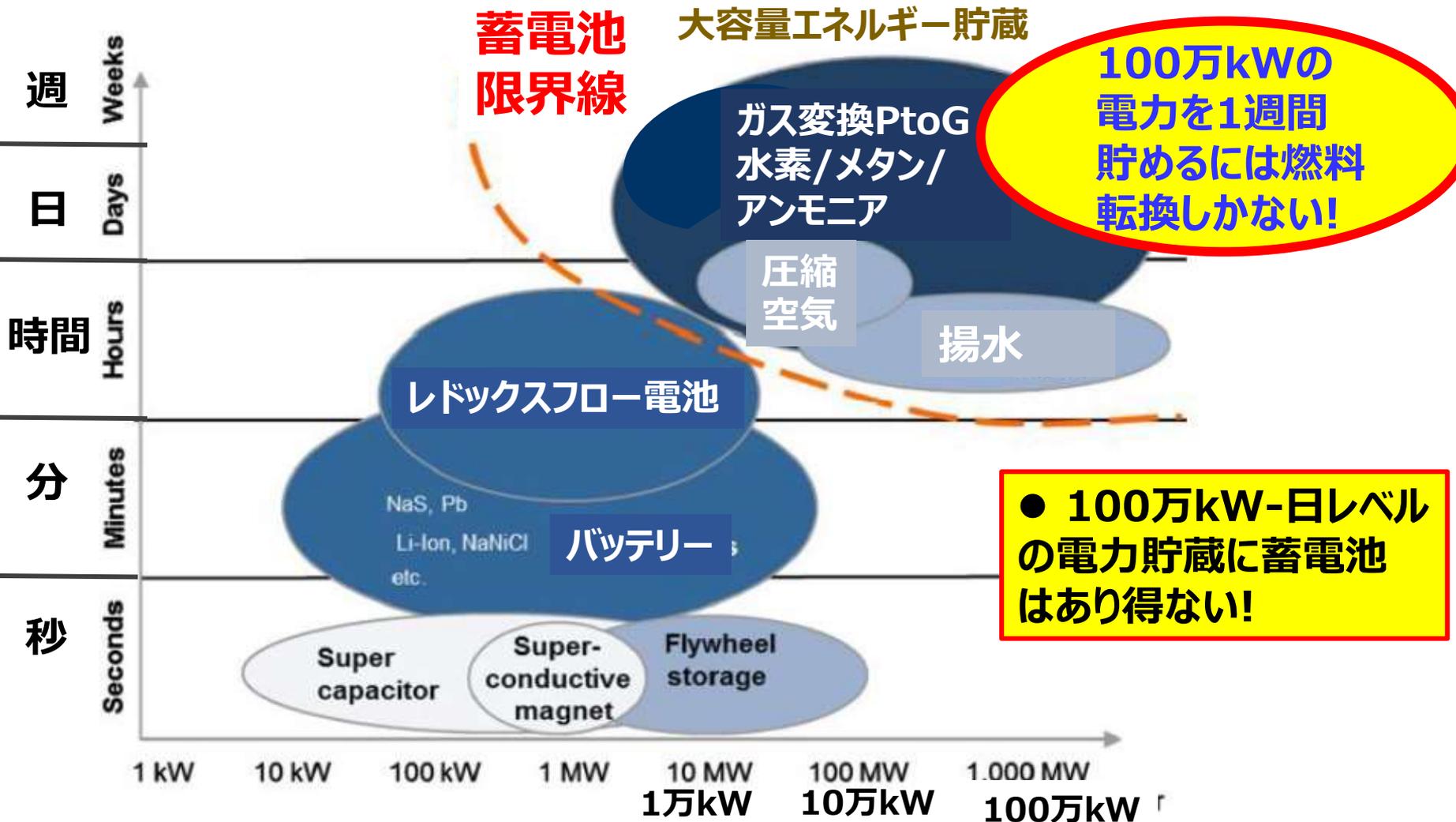
- 風力発電は季節など時間による出力変動が大きい！
→再生可能エネルギーだけなら季節間のエネルギー移動が不可欠！



2020年ドイツの風力発電の月間発電量

出典 : Net Public Electricity Generation in Germany in 2020, Fraunhofer

● エネルギー貯蔵技術の位置付け

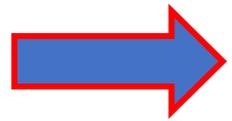


[出典] "Development and applications for MW-scale electrolyzer systems" (SIEMENS, 2016)

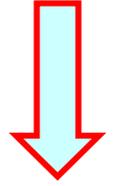
水素・燃料電池戦略協議会CO2フリー水素ワーキンググループ資料に金子加筆

● 余剰再エネの再利用方法 →最終的には燃料転換

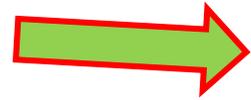
● 電力需要上回る余剰再エネ電力をどうするか？



- ①捨てる
- ②出力抑制する
- ③利用する



● 完全再エネ市場では negative priceも!



● 結局、合成燃料化しかない!

合成燃料

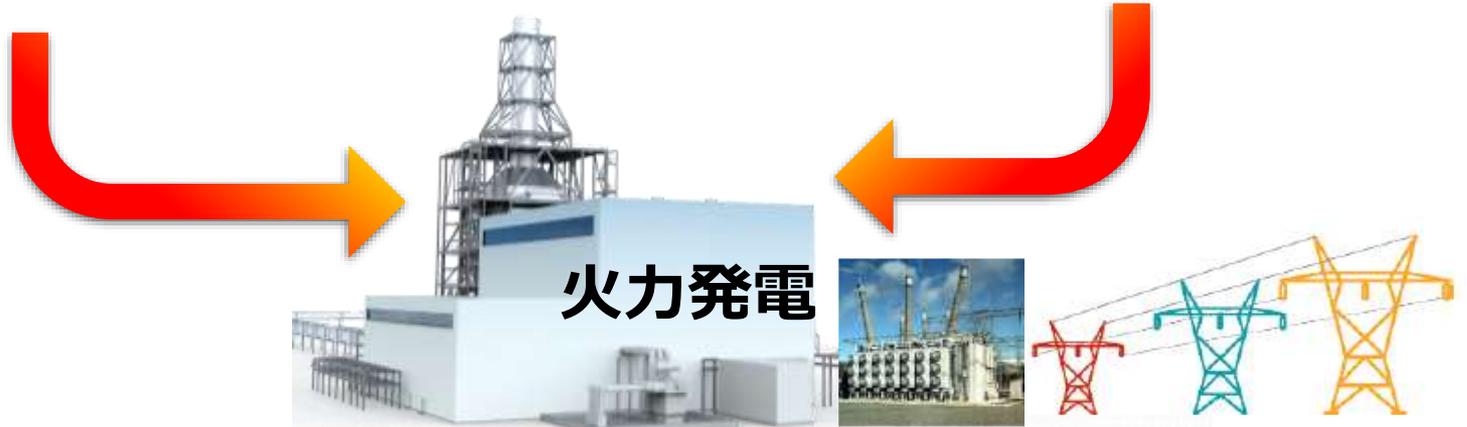
(水素・アンモニア・メタン)

● 余剰再生可能エネルギーを再度電力に

- 余った膨大な再生可能エネルギーは燃料に転換して貯蔵するしかない!

化石燃料
(石炭・天然ガス)

合成燃料
(水素・アンモニア・メタン)



2020

2030

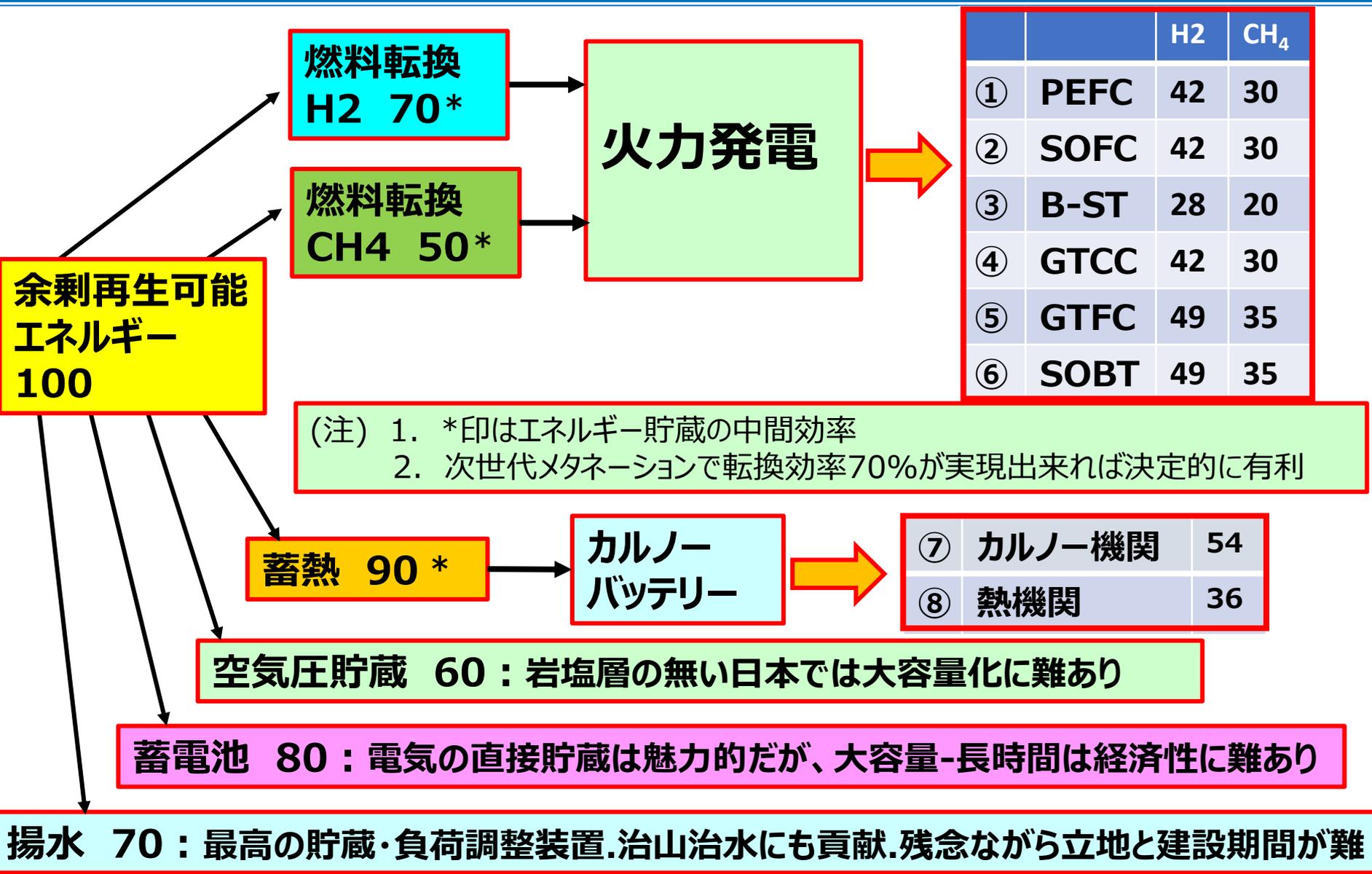
2040

2050

8. 最適な発電方式とは

1. 大量の余剰再エネは一旦、合成燃料に転換し、再度、発電に使用するのが究極の姿となる(PtG, Power to Gas)。
2. その場合、水素、メタン、アンモニア、DMEなど考えられるが、大量に使用するととなると水素かメタンであろう。それぞれ一長一短あり。
3. 水素は転換効率が70%と高くシンプルだが大量の貯蔵、輸送、使い易さに難あり。
4. メタンは転換効率が50%だが、安全で既存インフラがそのまま利用できるため、特にガス業界では必須である(e-methane)。
5. 交流電力網では瞬時の需給バランスが必須のため、**PtGの最大の目的は電力の需給バランス**となるであろう。
6. その場合、発電所構内に置いて、**発電所構内で水電解装置で水素に転換**し、一時貯蔵し、発電用燃料として使用するのが最も妥当と考えられる。(構外、あるいは外国からの大量輸送や貯蔵が不要)。
7. 水素利用の場合、同時に製造される膨大な酸素の有効利用も重要である。→**酸素富化燃焼は重要な利用技術**となる。

● 余剰再生可能エネルギーの利用法と転換効率

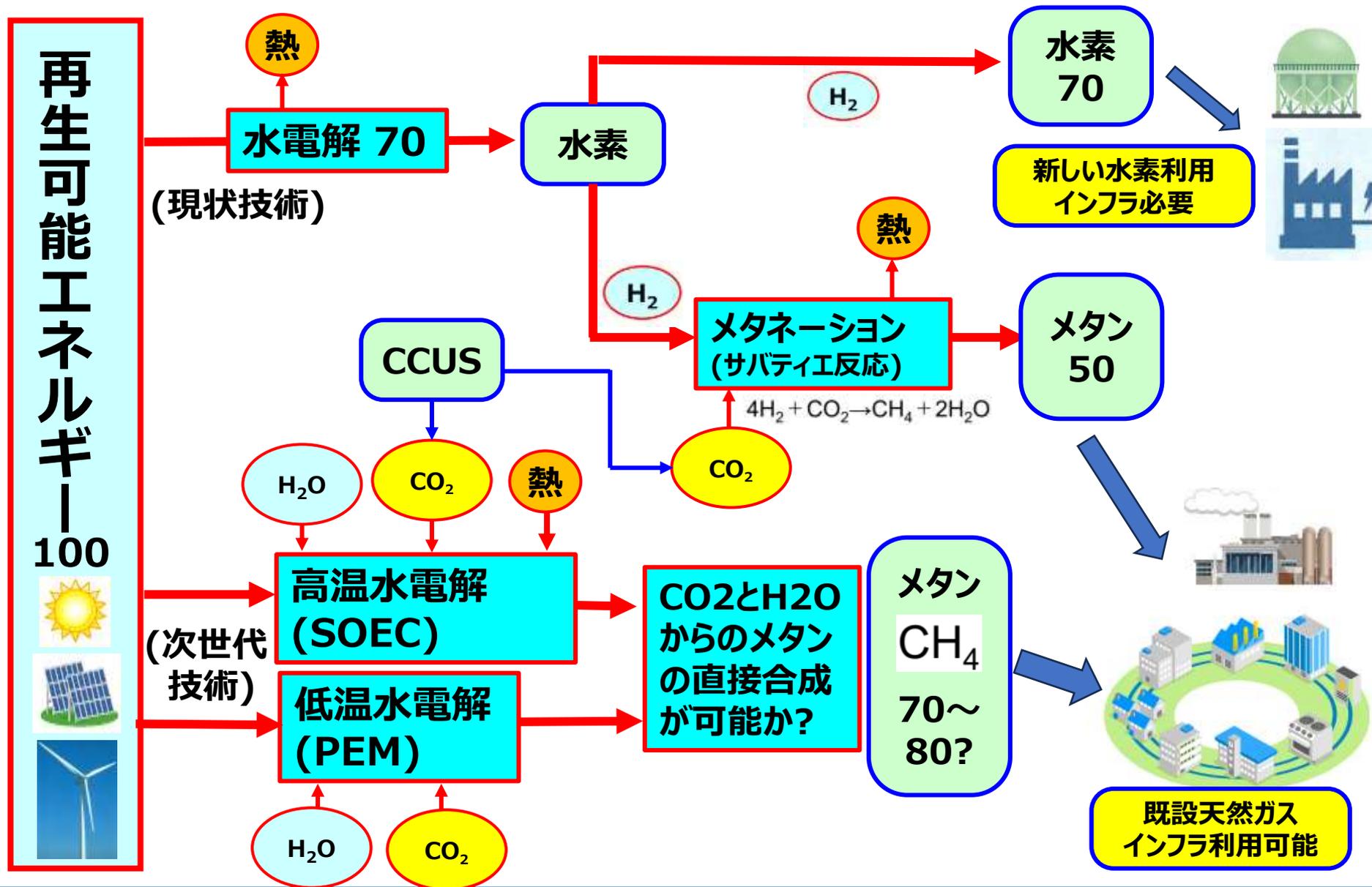


(注) 1. *印はエネルギー貯蔵の中間効率
 2. 次世代メタネーションで転換効率70%が実現出来れば決定的に有利

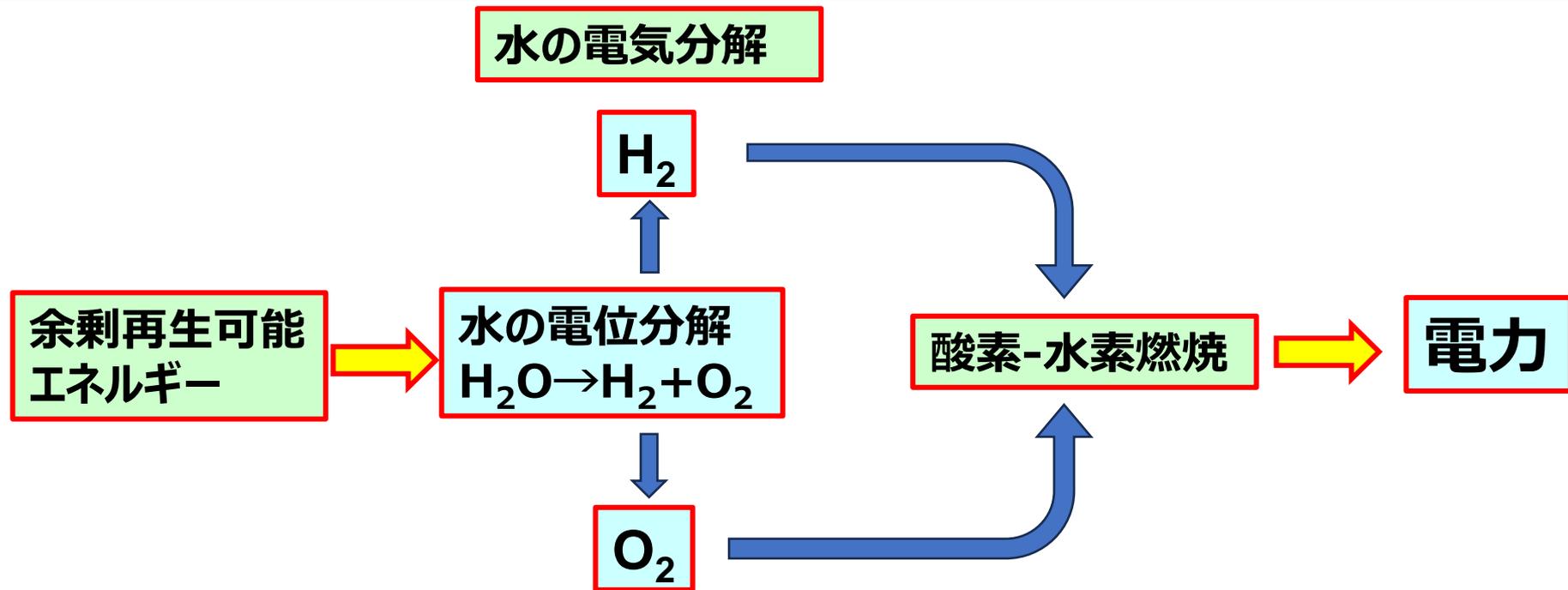
		H2	CH ₄
①	PEFC	42	30
②	SOFC	42	30
③	B-ST	28	20
④	GTCC	42	30
⑤	GTFC	49	35
⑥	SOBT	49	35

⑦	カルノー機関	54
⑧	熱機関	36

● 水素利用かメタン利用か？



● 余剰再生エネの電力への再転換



● 水の電気分解では水素と酸素が同時に発生

● 水素だけではなく酸素の有効利用も必要

優等生！

1位

空気燃焼

2位

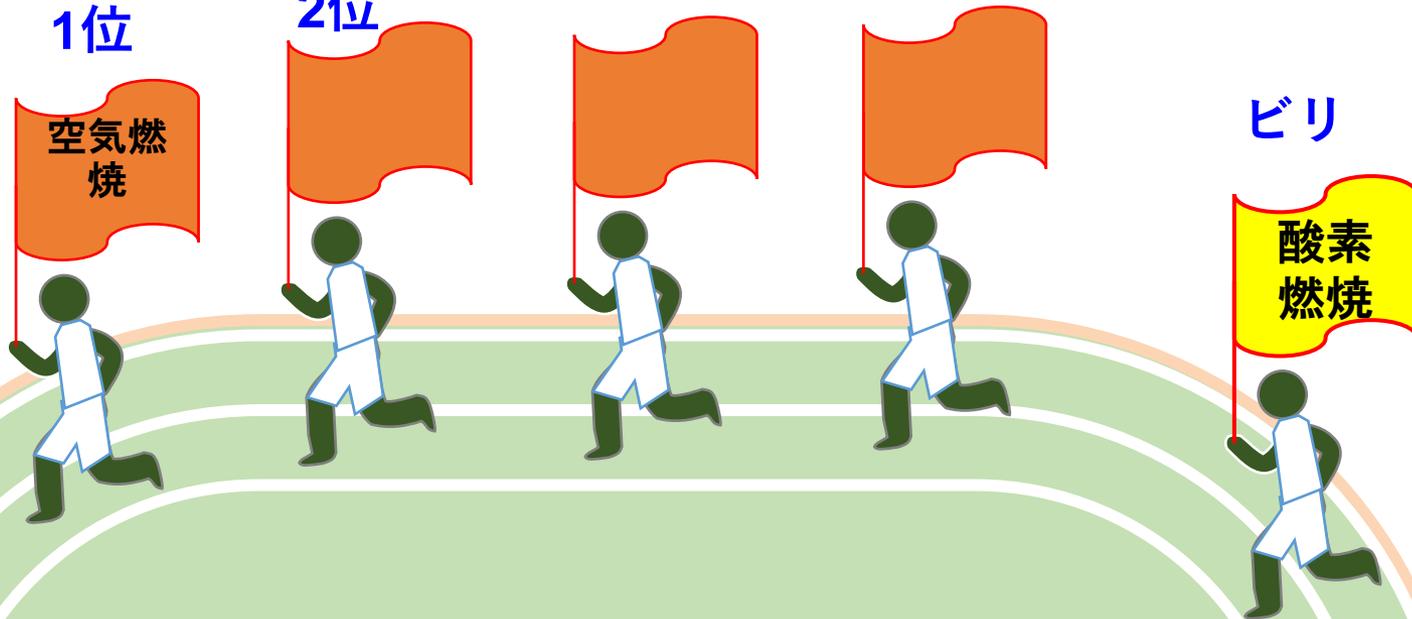
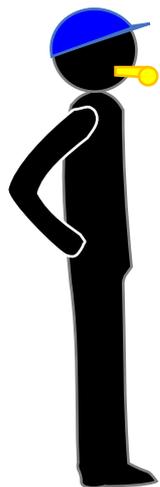
ビリ

酸素燃焼

高い送電端効率

所内動力の少ないものを！

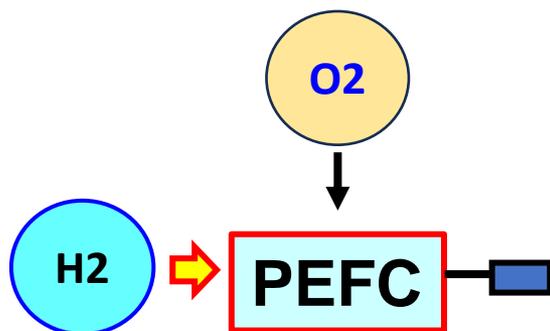
高価な酸素を燃焼に使うという愚か者！



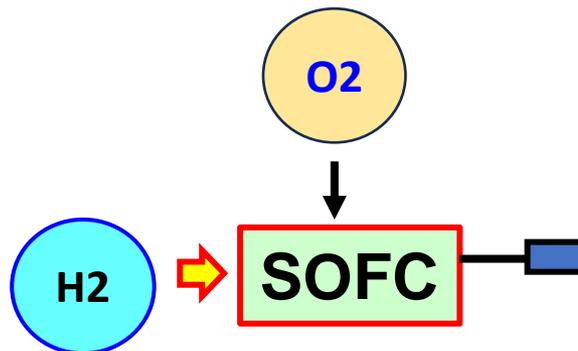


Those who are last will be first, and first will be last. (Matthew 20.16)

● 電力への再変換における酸素の活用

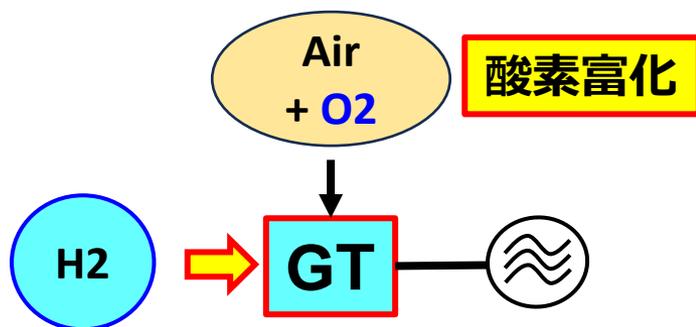


① 燃料電池(PEFC)

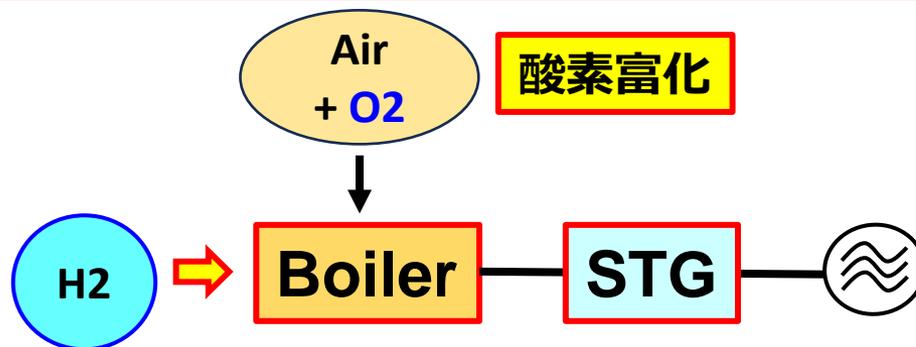


② 燃料電池(SOFC)

● 現実の適用は酸素富化(Oxygen-enriched Combustion: OEC)となろう



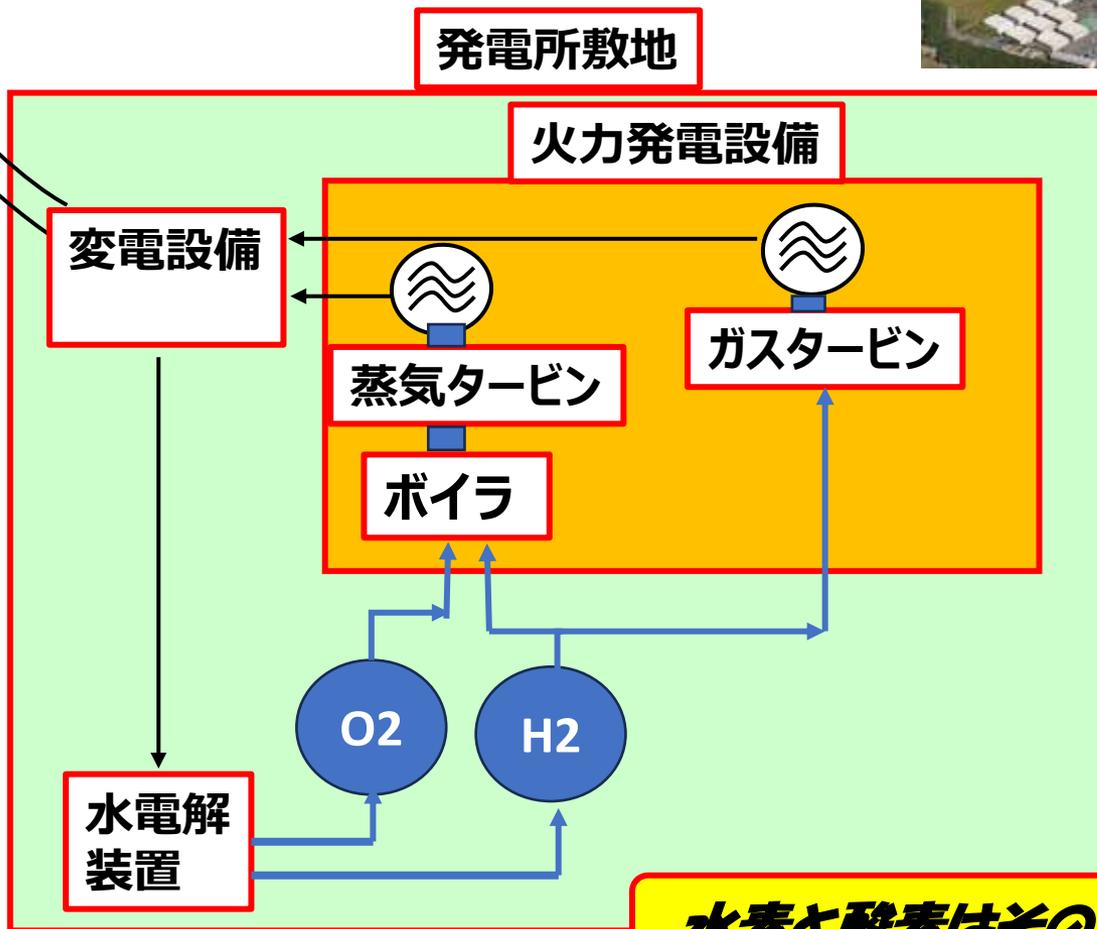
③ ガスタービン



④ ボイラ-蒸気タービン

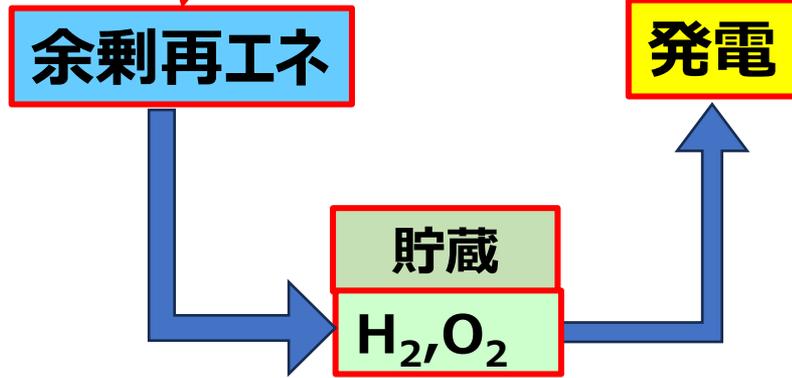
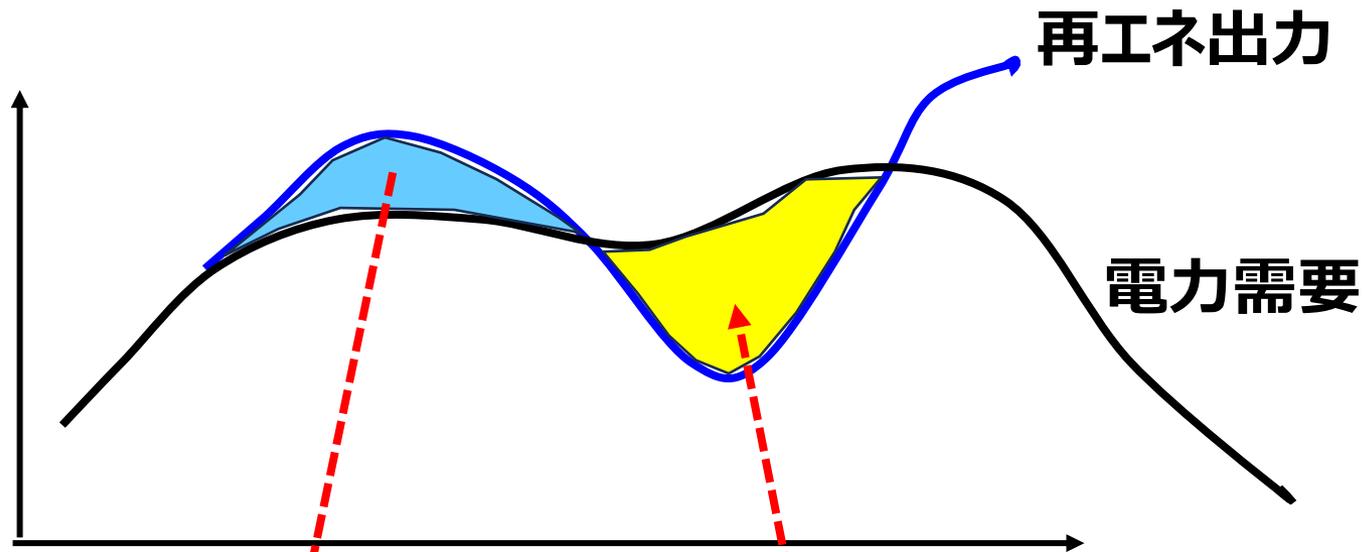
● カーボンニュートラル時代の最適発電方式

究極の需給バランスシステム!



水素と酸素はその場で使え!

発電所構内で実施するのが最適!

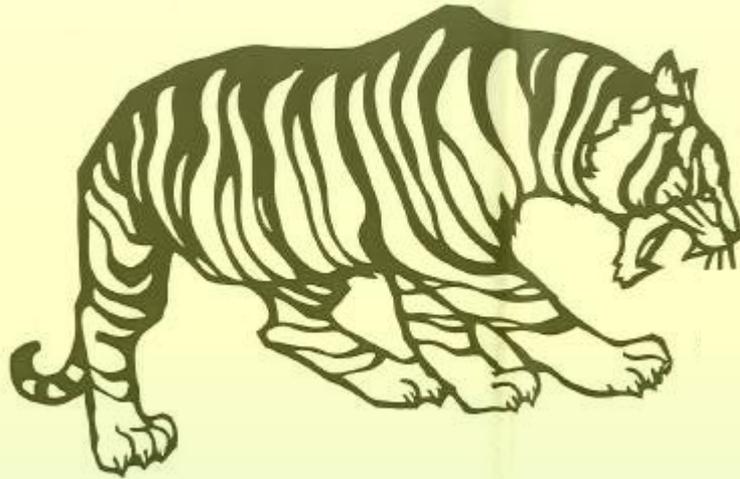


メリット

1. 輸送のコスト・時間不要
2. 送受電の設備あり
3. 燃料配管最短で構内のみ
4. 運転・管理共用化可能

➤ お互いがみ合っても仕方が無い！

再生可能エネルギー



火力



原子力



➤ 協力し補完して最適解の実現を!



9. まとめ

1. 変動再エネVREの増加は交流電力網の安定供給に支障を来す恐れが大きい。
2. 特に周波数低下による停電の増加やブラックアウトの発生が懸念される。
3. この対策としては、まずVREと同量の安定性再エネSREを確保するのが第一。
4. 安定性再エネで最も優れたものは水力である。特に揚水は調整力としては抜群の性能を発揮する。水力の増加が出来ない場合は、新しい柔軟な火力(Flex-Power)で対応することが出来る。
5. 変動再エネVREをどこまで増やせるかは、調整力をどこまで確保できるかで決まる。
6. ドイツが現状VREが50%可能なのは、欧州にはこれを補完する水力があるからである。しかしドイツが将来VREを80%まで増加すると、もはや安定供給は保証されない(つまりドイツの再エネ80%目標が破綻するのは時間の問題である)。
7. いろんな試算結果から(S+3E)の実現には天下三分の計が適している。つまり①再エネ ②火力 ③原子力を1/3ずつにすることである。
8. 技術が無ければこれらはすべて絵にかいた餅である。製造技術が無ければ保守技術も維持できない。
9. Flex-Powerのような世界に貢献できる技術は、国プロ(GX利用)で開発し国内で基幹部品を量産し、発展途上国の膨大な市場に輸出すべきである。日本が輸出しなければ、それらの国は結局、中国、韓国、ロシアに頼ることになる。

The future is bright...

The End