

日本原子力学会シニアネットワーク第22回シンポジウム

基調講演

2050年における『調和電源ミックス』の提案

2022年9月16日

日本原子力学会シニアネットワーク会員
エネルギー問題に発言する会会員
牧 英夫

本講演は、下記提言内容による

**【提言】2050年に於ける電力安全保障と脱炭素社会を目指して
『再生可能エネルギー・原子力・火力 調和電源ミックス』**

SNW/発言する会会員有志

牧 英夫、新田目倅造、金氏 顯、川西康平、後藤 廣、早瀬佑一

(<<http://www.aesj.or.jp/~snw/>>または<<http://www.engy-sqr.com/>> 参照)

【目次】

- I. 電源ミックス検討の狙い**
- II. 需給シミュレーション**
- III. 経済性評価**
- IV. 再生可能エネルギー資源および
変動再生可能エネルギー導入適正量**
- V. 調和電源ミックス**
- VI. 課題とまとめ**

【目次】

- I. 電源ミックス検討の狙い
- II. 需給シミュレーション
- III. 経済性評価
- IV. 再生可能エネルギー資源および
変動再生可能エネルギー導入適正量
- V. 調和電源ミックス
- VI. 課題 とまとめ

2050年に於ける電源ミックス検討の狙い

■ 第6次エネルギー基本計画（2021年10月閣議決定）（1）

- ・ 『**再生可能エネルギーを主力電源として最優先の原則の下で最大限の導入に取り組む**』方針の下に策定された。
- ・ 2050年に於ける参考値：
再生可能エネルギー 約50～60%、
水素・燃料アンモニア発電 約10%
原子力・CO2回収前提の火力発電 約30～40%

■ 『**再生可能エネルギーを主力電源にするとどうなるか？**』

この疑問を見極めるために、下記事項の定量化を試みた。

- ・ 電力安定供給の方策：**「需給シミュレーション」**
 - ・ 産業力確保の視点：**「発電コスト」**
 - ・ 自然条件・社会制約からの限界：**「我が国の再エネ資源」**
- 上記の検討結果を基に、国益確保と「S+3E」（Safety 安全, Energy Security 安定供給、Economic Efficiency 経済効率性、Environment 環境への適合）の視点から、
『2050年の脱炭素社会を目指す電源構成』は如何にあるべきかを検討

【目次】

- I. 電源ミックス検討の狙い
- II. 需給シミュレーション
- III. 経済性評価
- IV. 再生可能エネルギー資源および
変動再生可能エネルギー導入適正量
- V. 調和電源ミックス
- VI. 課題 とまとめ

需給シミュレーションの解析条件

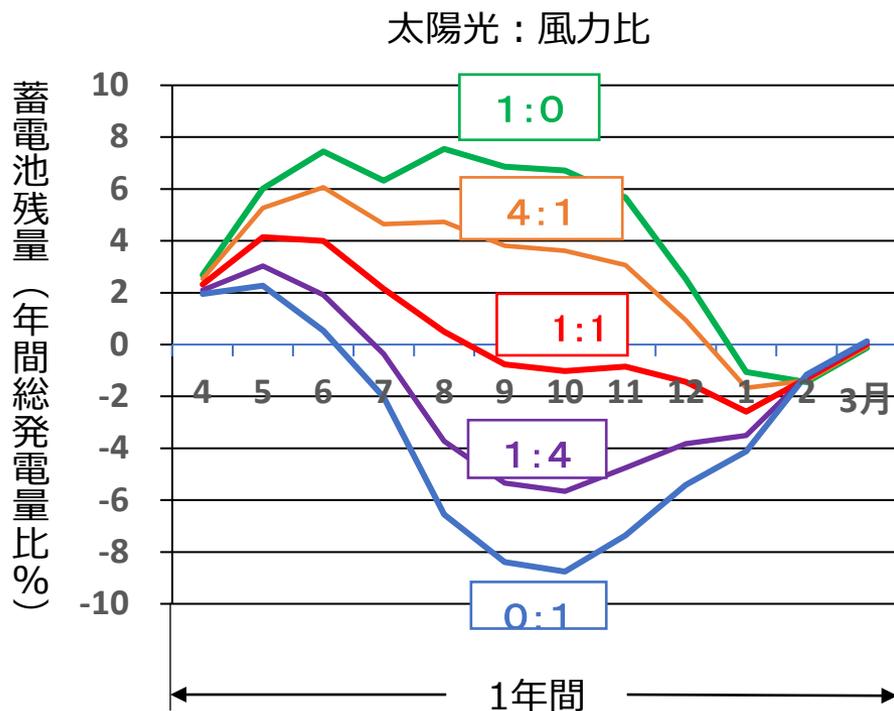
- 2050年の年間総発電量：**1400TWh**⁽²⁾ (1TWh=10億kWh)
- 2020年度の全国電力需要、再エネ発電電力の実績データ (ISEPの公開データ⁽³⁾) 活用
 - ・ 1年間8760時間1時間毎の需給シミュレーション解析
 - ・ 2020年の年間総発電量867TWh ⇒ 2050年年間総発電量1400TWhに比例拡大

電源		導入率 (%)						
変動再エネ		0	20	30	40	50	60	88
変動 再エネ	太陽光	0	10	15	20	25	30	44
	陸上風力	0	5	7.5	10	12.5	15	22
	洋上風力	0	5	7.5	10	12.5	15	22
安定再エネ (定格出力一定運転)		12% (水力7.5%、バイオ3.5%、地熱1%) 揚水を活用						
原子力 (定格出力一定運転)		44	34	29	24	19	14	0
LNG火力 (CCUS) ^(※) (20⇔100%運転)		44	34	29	24	19	14	0
蓄電設備		揚水発電設備・蓄電設備を一括蓄電池として扱う						
設備利用率		太陽光14%、陸上風力25.4%、洋上風力33.2% 水力 (一般+揚水) 23%、バイオ87%、地熱83% 原子力90%、LNG火力 (CCUS) 70%						

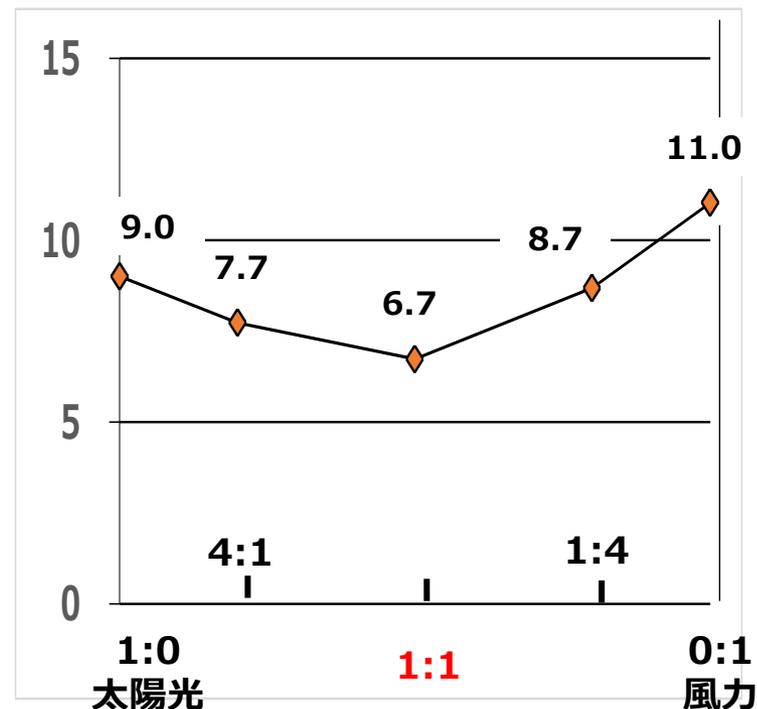
(※) CCUS : Carbon dioxide Capture , Utilization & Storage 二酸化炭素回収・利用・貯留
 LNG火力 (CCUS) : CCUS付LNG火力発電

太陽光と風力の最適導入率比率 = 1:1

解析条件 : 再エネ100% (変動再エネ88%、安定再エネ12%)



必要な蓄電池容量(年間総発電量比%)

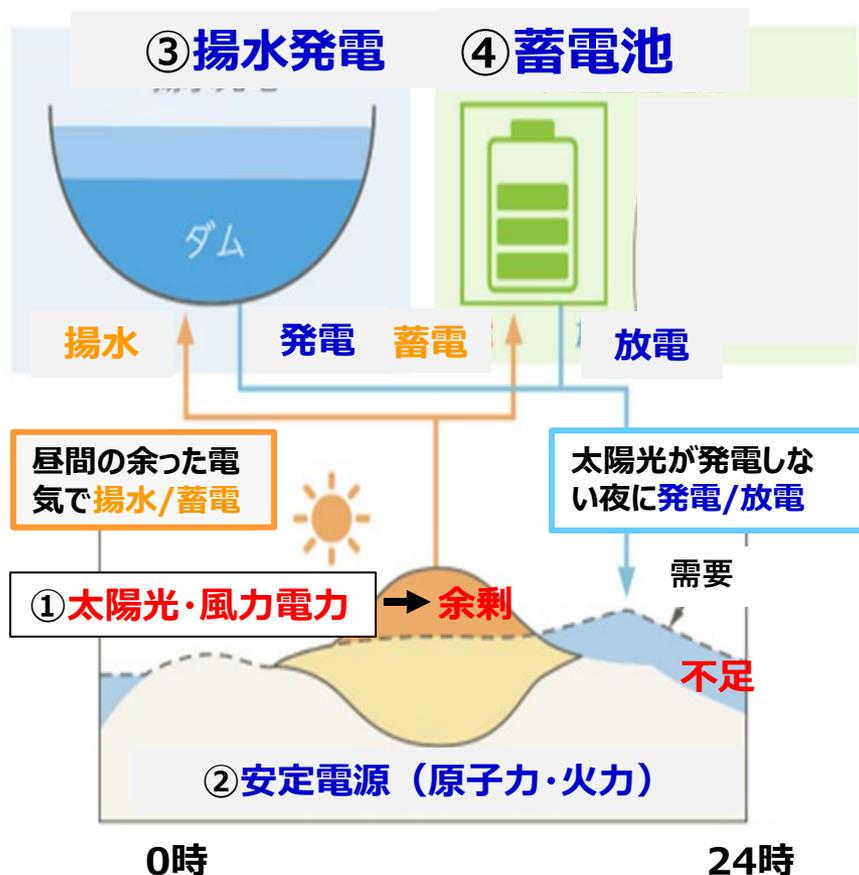


- **我が国の2020年変動再エネ導入率 = 9.8% (太陽光 : 風力 = 9:1) (3)**
 - ・ **現状 : 太陽光偏重**
 - ・ **課題 : 風力拡大 (洋上風力)**

太陽光・風力発電導入に伴う安定供給の検討

〈蓄電池方式〉

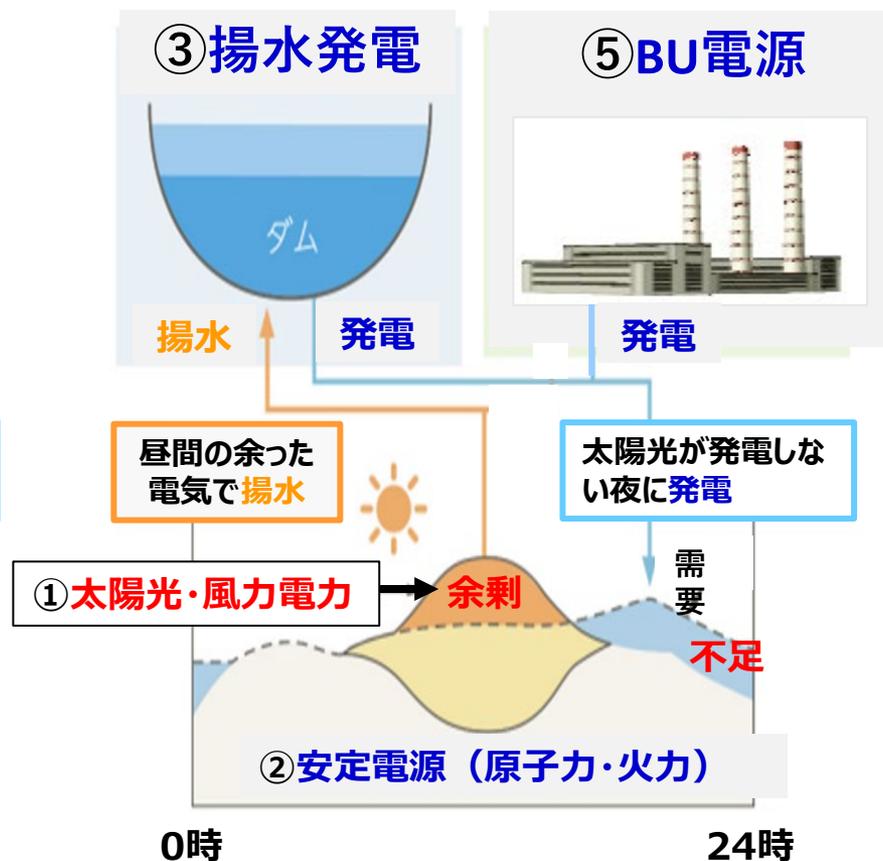
- ・ 余剰電力を揚水・蓄電池で蓄電
- ・ 電力不足時に発電・放電する



〈出力抑制+BU電源※方式〉

(※BU電源 : Back up火力電源)

- ・ 揚水で蓄電し切れない余剰電力は出力抑制
- ・ 電力不足時にはBU電源発電



余剰電力および不足電力発生防止の様相

再エネ32% (安定12%+変動20%)

〈蓄電池方式〉

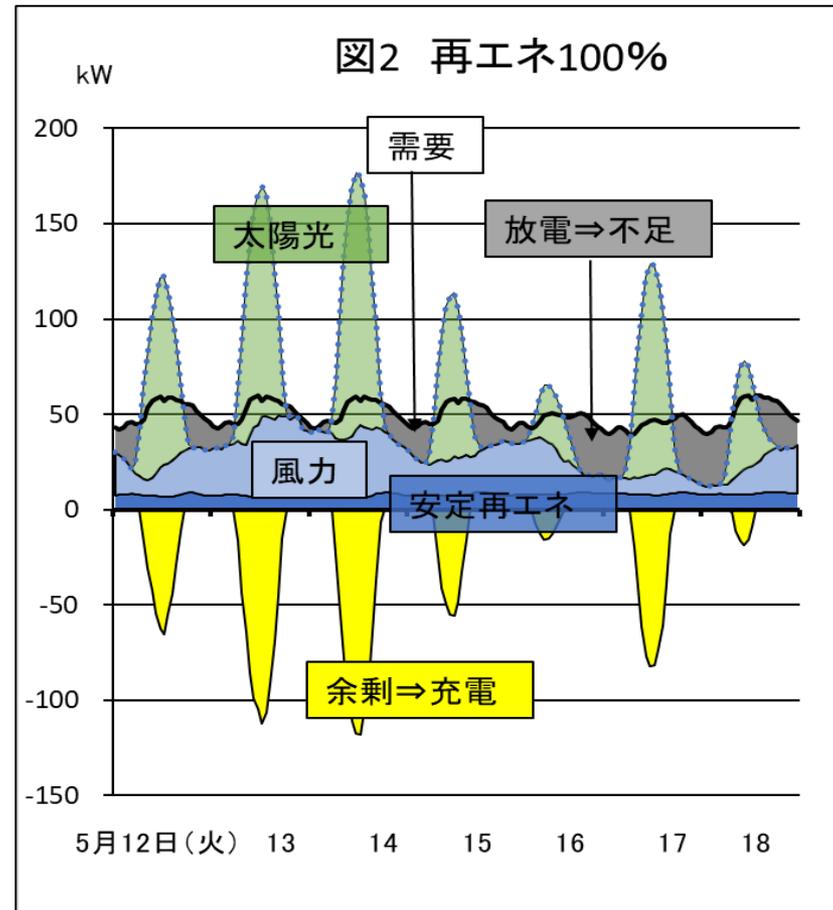
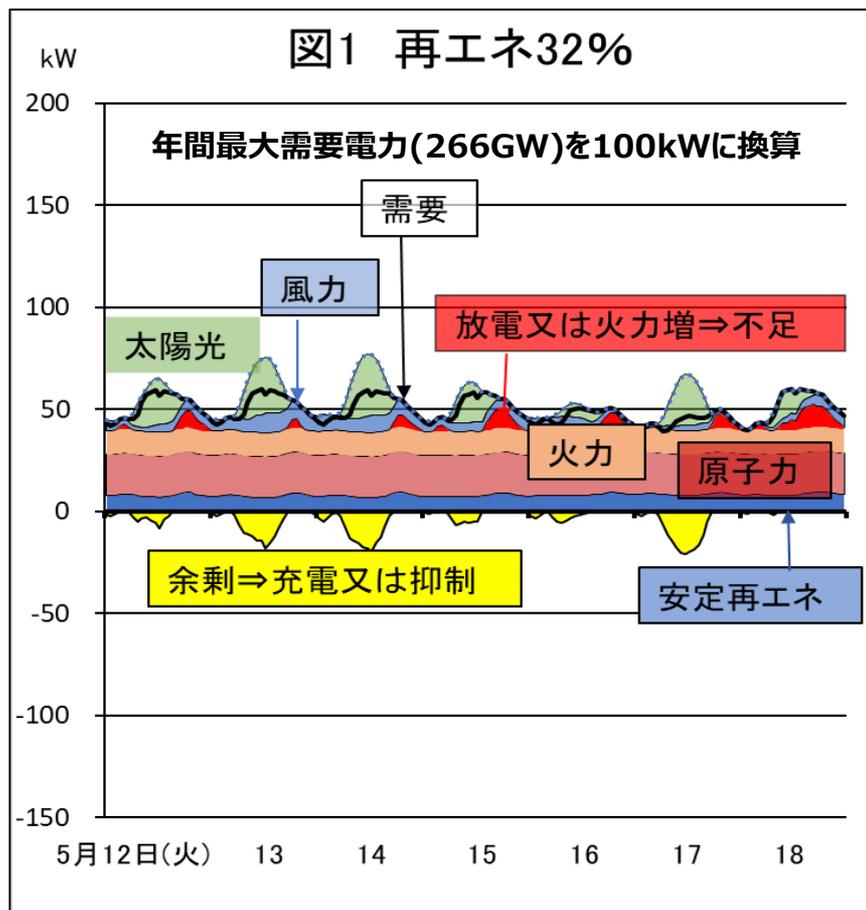
または

〈出力抑制+BU電源方式〉

再エネ100% (安定12%+変動88%)

〈蓄電池方式〉

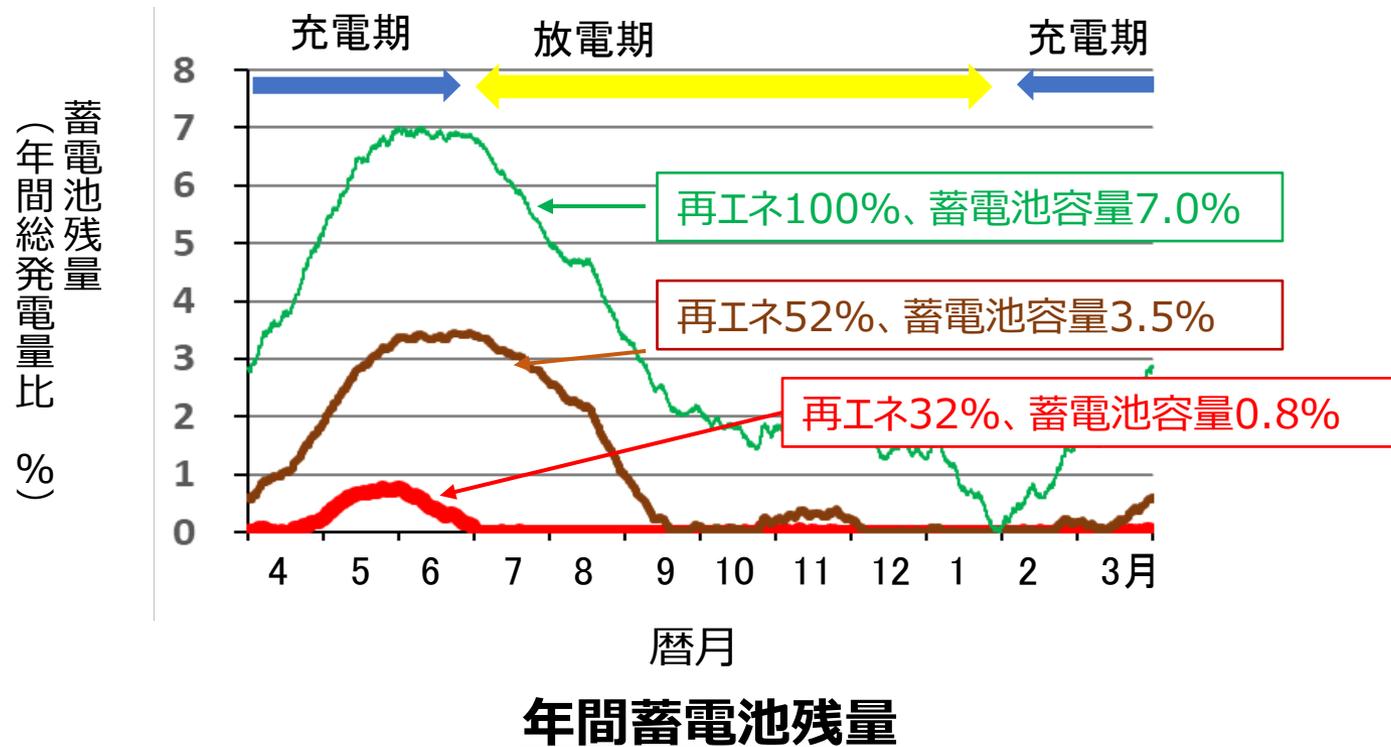
(BU電源がないため出力抑制不可)



〈蓄電池方式〉における必要な蓄電池容量

- ・ 揚水発電施設、蓄電施設を一括して蓄電池施設とする
- ・ 春から夏に充電、晩夏から冬に掛けて放電、1年でバランス
- ・ **必要な蓄電池容量 = 最大蓄電池残量**

(年間総発電量 1400TWh)



需給シミュレーション解析結果のまとめ

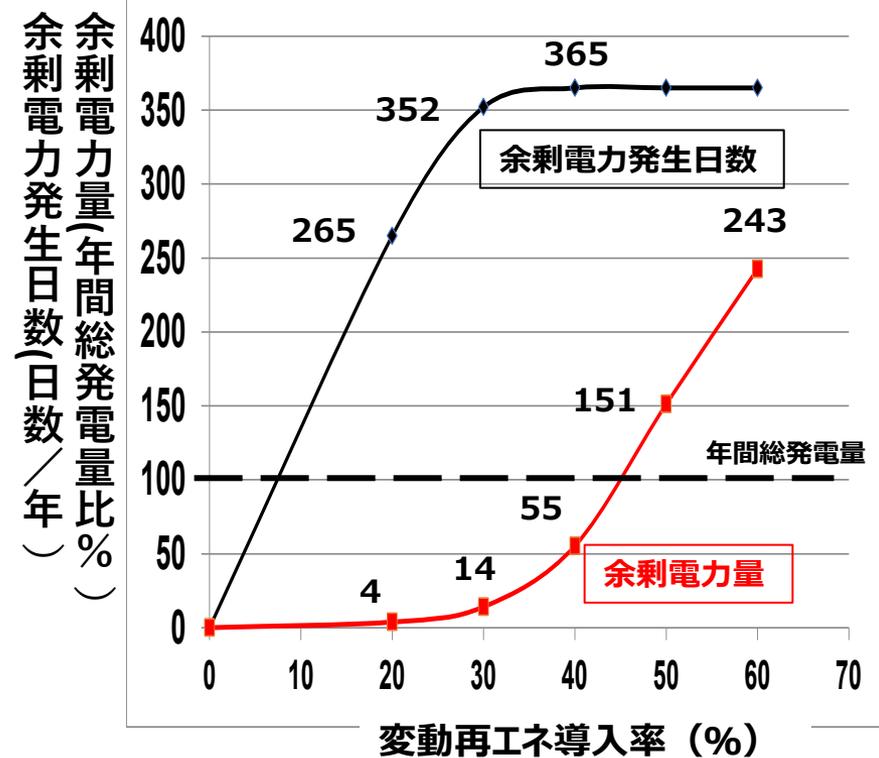
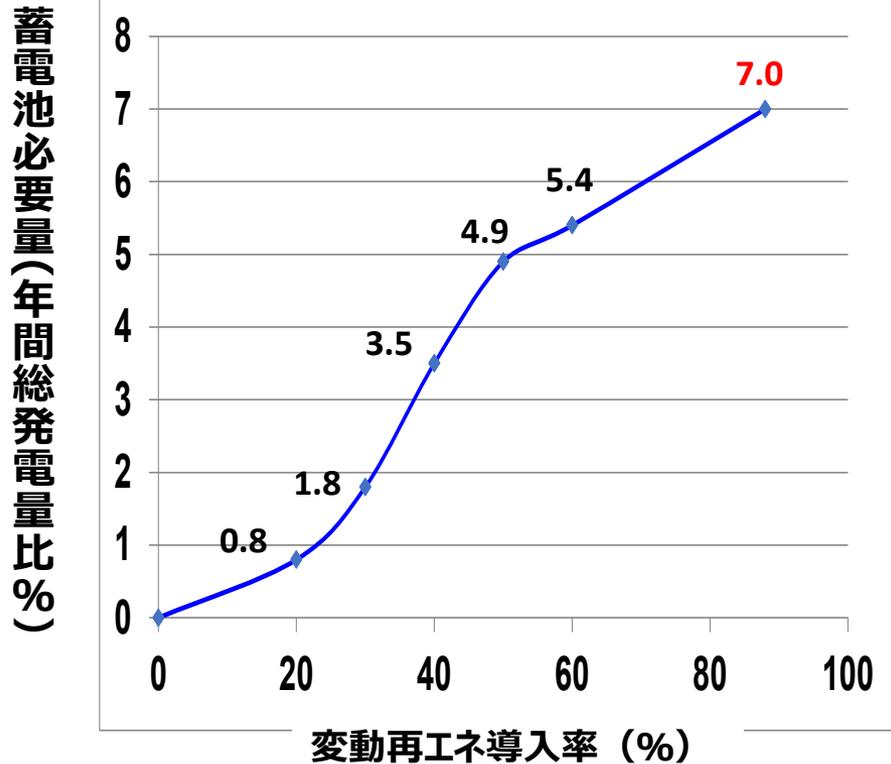
〈蓄電池方式〉

- 蓄電池必要量：下図
- 安定電力供給が期待できる
- 膨大な蓄電池が必要
- 再エネ100%、蓄電池必要量**7%** (= 100TWh、EV(60kWh/台)16億台分)

〈出力抑制+BU電源方式〉

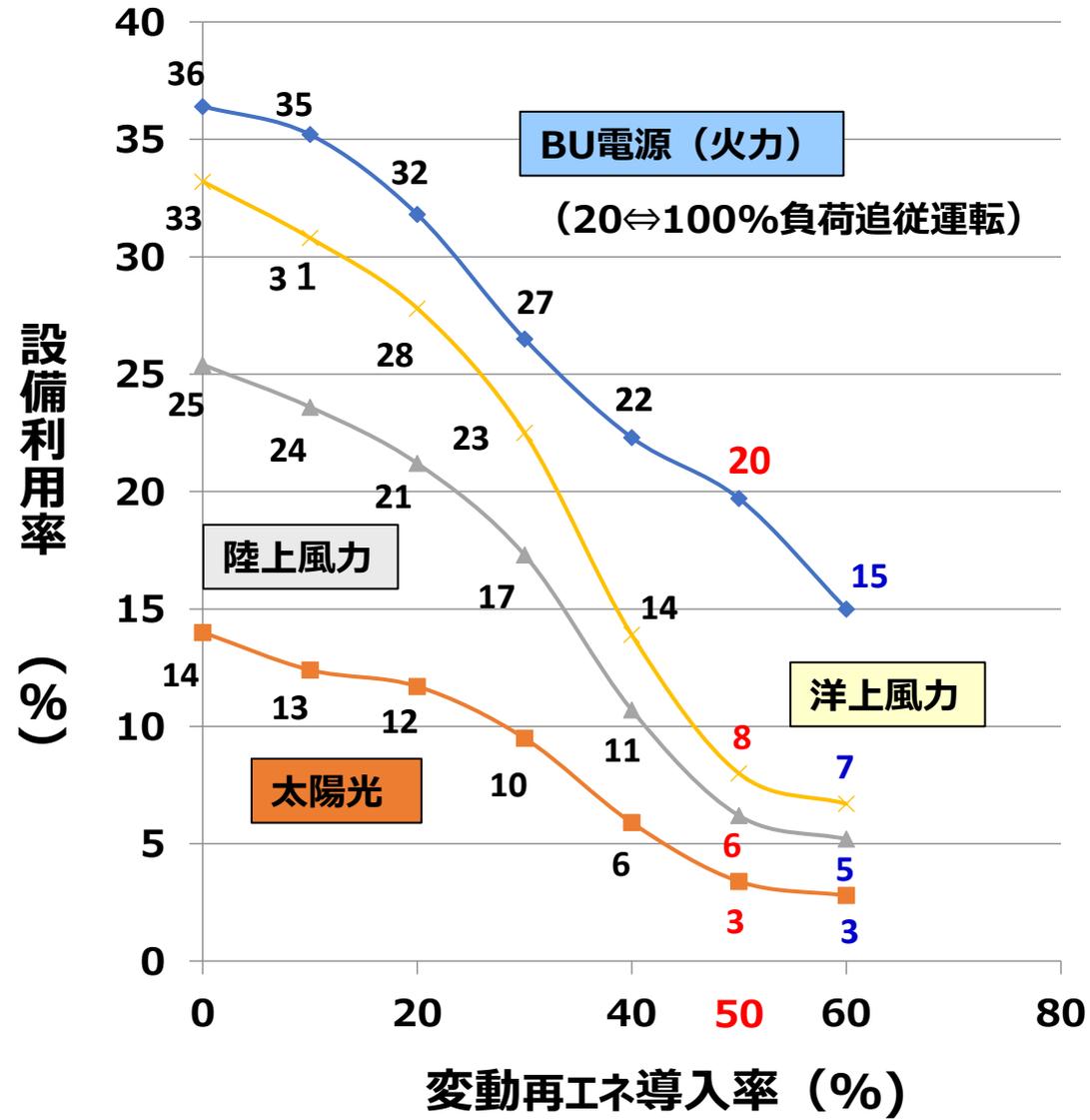
- 余剰電力発生日数、余剰電力量：下図
(余剰電力=抑制電力)
- ほぼ連日出力抑制運転が必要
- 変動再エネ50%以上では
余剰電力が年間総発電量を超える

年間総発電量 = 1400TWh



変動再エネの導入限界

〈出力抑制 + BU電源方式〉の場合



- 変動再エネ導入率増加により
 - ・ BU電源の設備利用率低下
 - ・ 変動再エネの設備利用率低下

↓

経済性低下の主要原因

- 変動再エネ導入率50%
 - ↓
 - BU電源の設備利用率20%
(連続出力低下運転困難)
 - 変動再エネ設備利用率数%

↓

変動再エネ導入限界

- 今後の検討課題
 - 原子力の負荷追従運転**

【目次】

- I. 電源ミックス検討の狙い
- II. 需給シミュレーション
- III. **経済性評価**
- IV. 再生可能エネルギー資源および
変動再生可能エネルギー導入適正量
- V. 調和電源ミックス
- VI. 課題 と まとめ

経産省発電コスト検証WG報告書（2021年9月）（4）

「変動再エネ導入に伴う追加費用」明記

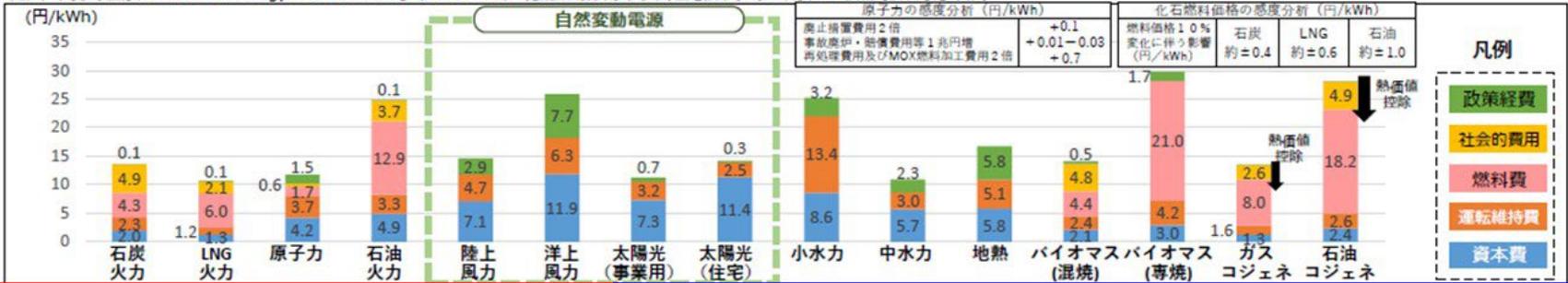
2030年の電源別発電コスト試算の結果概要

均等化発電原価(LCOE)は、標準的な発電所を立地条件等を考慮せずに新規に建設し所定期間運用した場合の「総発電コスト」の試算値。政策支援を前提に達成すべき性能や価格目標とも一致しない。

1. 各電源のコスト面での特徴を踏まえ、どの電源に政策の力点を置かかといいた、**2030年に向けたエネルギー政策の議論の参考材料**とする。
2. **2030年に、新たな発電設備を更地に建設・運転した際のkWh当たりのコストを、一定の前提で機械的に試算。**
(既存の発電設備を運転するコストではない)。
3. 2030年のコストは、燃料費の見通し、設備の稼働年数・設備利用率、太陽光の導入量などの**試算の前提を変えれば、結果は変わる。**
4. 事業者が**現実に発電設備を建設**する際は、ここで示す**発電コストだけでなく、立地地点毎に異なる条件を勘案して総合的に判断**される。
5. **太陽光・風力（自然変動電源）の大量導入により、火力の効率低下や揚水の活用などに伴う費用が高まるため、これも考慮する必要**がある。
この費用について、今回は、**系統制約等を考慮しない機械的な試算**（参考①）に加え、**系統制約等を考慮したモデルによる分析も実施し、参考として整理**（参考②）。

電源	石炭火力	LNG火力	原子力	石油火力	陸上風力	洋上風力	太陽光（事業用）	太陽光（住宅）	小水力	中水力	地熱	バイオマス（混焼、5%）	バイオマス（専焼）	ガスコジェネ	石油コジェネ
発電コスト(円/kWh) ※()は政策経費なしの値	13.6~22.4 (13.5~22.3)	10.7~14.3 (10.6~14.2)	11.7~ (10.2~)	24.9~27.6 (24.8~27.5)	9.8~17.2 (8.3~13.6)	25.9 (18.2)	8.2~11.8 (7.8~11.1)	8.7~14.9 (8.5~14.6)	25.2 (22.0)	10.9 (8.7)	16.7 (10.9)	14.1~22.6 (13.7~22.2)	29.8 (28.1)	9.5~10.8 (9.4~10.8)	21.5~25.6 (21.5~25.6)
設備利用率	70%	70%	70%	30%	25.4%	33.2%	17.2%	13.8%	60%	60%	83%	70%	87%	72.3%	36%
稼働年数	40年	40年	40年	40年	25年	25年	25年	25年	40年	40年	40年	40年	40年	30年	30年

(注1) 表の値は、今回検証で扱った複数の試算値のうち、上限と下限を表示。将来の燃料価格、CO2対策費、太陽光・風力の導入拡大に伴う機器価格低下などをどう見込むかにより、幅を持った試算としている。例えば、太陽光の場合「2030年に、太陽光パネルの世界の価格水準が著しく低下し、かつ、太陽光パネルの国内価格が世界水準に追いつくほど急激に低下するケース」や「太陽光パネルが劣化して発電量が下がるケース」といった野心的な前提を置いた試算値を含む。
(注2) グラフの値は、IEA「World Energy Outlook 2020」(WEO2020)の公表済政策シナリオの値を表示。コジェネは、CIF価格で計算したコスト。



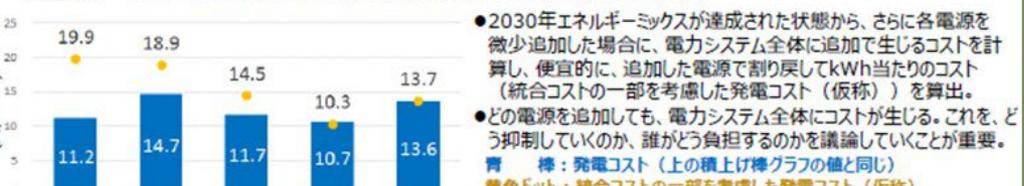
参考① 電源立地や系統制約を考慮しない機械的な試算（2015年の手法を踏襲）

「系統が日本全国で大欄に増強され、日本全体で電力需給が瞬時に調整される」前提を置いてもおお生じる追加費用（火力効率低下や揚水活用等の費用）追加費用として試算。

自然変動電源の導入量・割合※1	生じる追加費用
1450億kWh（15%）程度	年間8,470億円
1850億kWh（20%）程度	年間1兆1,580億円
2350億kWh（25%）程度	年間1兆4,780億円

※1 検証時点では、洋上風力の時間変動実データが得られないため、洋上風力の追加費用の計算には、陸上風力の諸元を流用した。

参考② 電源立地や系統制約を考慮した、モデルによる分析・試算（委員による分析※2）



※2 第8回発電コスト検証WGにおける委員発表資料より引用。

追加費用の試算例⁽⁴⁾

参考① 電源立地や系統制約を考慮しない機械的な試算（2015年の手法を踏襲）

「系統が日本全国で大幅に増強され、日本全体で電力需給が瞬時に調整される」前提を置いて、なお生じる追加費用（火力効率低下や揚水活用等の費用）追加費用として試算。

<u>自然変動電源の導入量・割合※1</u>	<u>生じる追加費用</u>
1450億kWh（15%）程度	年間8,470億円
1850億kWh（20%）程度	年間1兆1,580億円
2350億kWh（25%）程度	年間1兆4,780億円

※1 検証時点では、洋上風力の時間変動実データが得られないため、洋上風力の追加費用の計算には、陸上風力の諸元を流用した。

2050年における電源別発電コスト

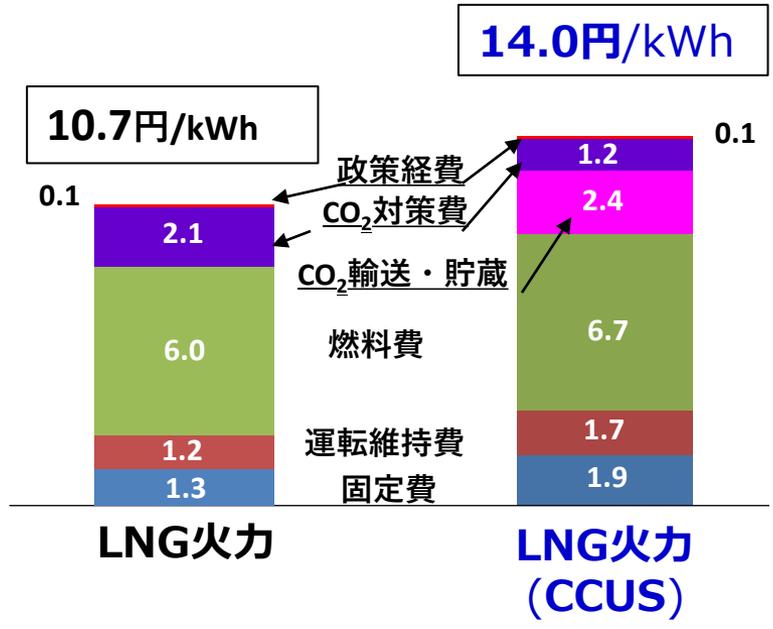
■ 2050年における電源別発電コスト想定値

(経産省発電コスト検証WG報告書 (2021.9) 2030年電源毎発電コストに準拠)

電源	水力	バイオ	地熱	太陽光	陸上風力	洋上風力	原子力	LNG火力 (CCUS)
発電コスト (円/kWh)	11.0	29.9	16.7	11.2	14.7	25.9	8.5	14.0
設備利用率 (%)	60	87	83	14	25.4	33.2	90	70

■ LNG火力 (CCUS) の発電コスト試算

- ・LNG火力発電原価： 8.6円/kWh
 - ・CCS費： 5.4円/kWh
- (“CCSを取り巻く環境”経産省、2018.6⁽⁵⁾)
- 合計 = 14.0円/kWh →



■ 原子力発電コストの国際比較

項目	経産省試算 (2030年)	国際水準 (足下目標)
設備利用率 (%)	70	90
稼働年数 (年)	40	80
発電コスト (円/kWh)	11.7	8.5

変動再エネ導入に伴う追加費用

追加費用	
①	BU電源の出力変動運転および揚水発電活用による余剰電力最小化運転(注4)
②	(なお余剰電力発生の場合)蓄電池活用または変動再エネの出力抑制による余剰電力防止運転
③	電力不足防止のための予備電源増強
④	変動再エネ連系線増設(偏在する変動再エネ電源と需要都市を結び活用拡大を図る)(注6)

■ 追加費用①および②

発電コスト検証WG報告書記載の追加費用データおよびシミュレーション結果から試算

■ 追加費用③

変動再エネ大量導入における電力不足の特徴

『日没時・日の出前+無風』

- ・ 太陽光発電はほぼゼロ
- ・ 風力発電は僅か

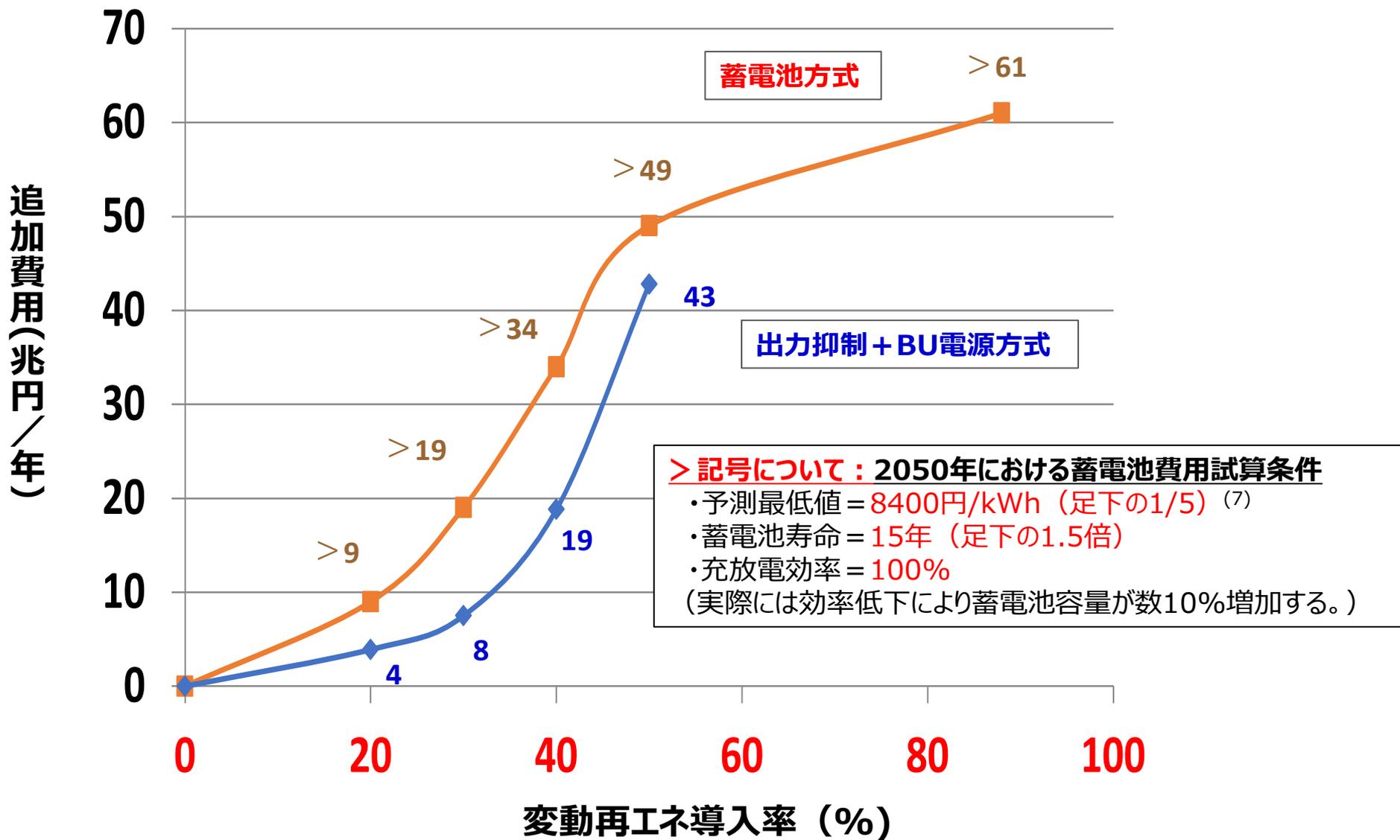
■ 追加費用④

【参考】エリア別の導入イメージ



※2030年については、環境アセス手続中(2020年10月末時点・一部環境アセス手続が完了した計画を含む)の案件を元に作成。
 ※2040年については、NEDO「若狭式洋上風力発電支援事業(洋上風力発電の発電コストに関する検討)報告書」における、LCOE(均等化発電原価)や、専門家によるレビュー、事業者の環境アセス状況等を考慮し、協議会として作成。なお、本マップの作成にあたっては、浮体式のポテンシャルは考慮していない。

変動再エネ導入に伴う追加費用



変動再エネ導入に伴う追加コスト試算

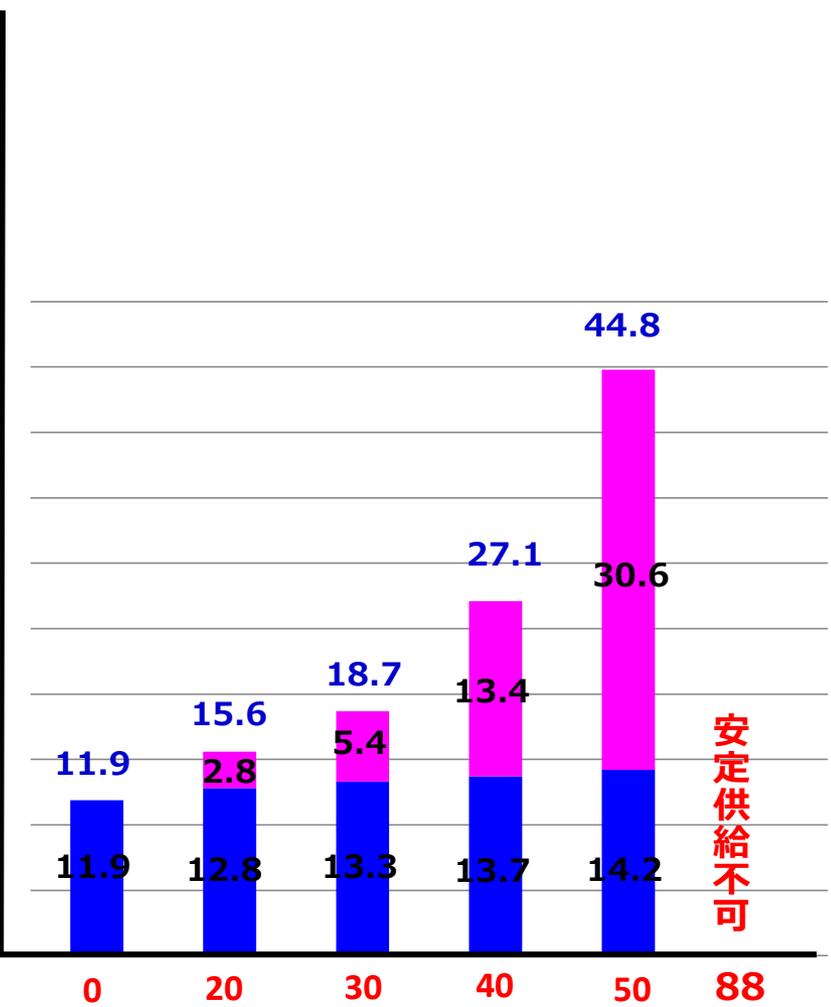
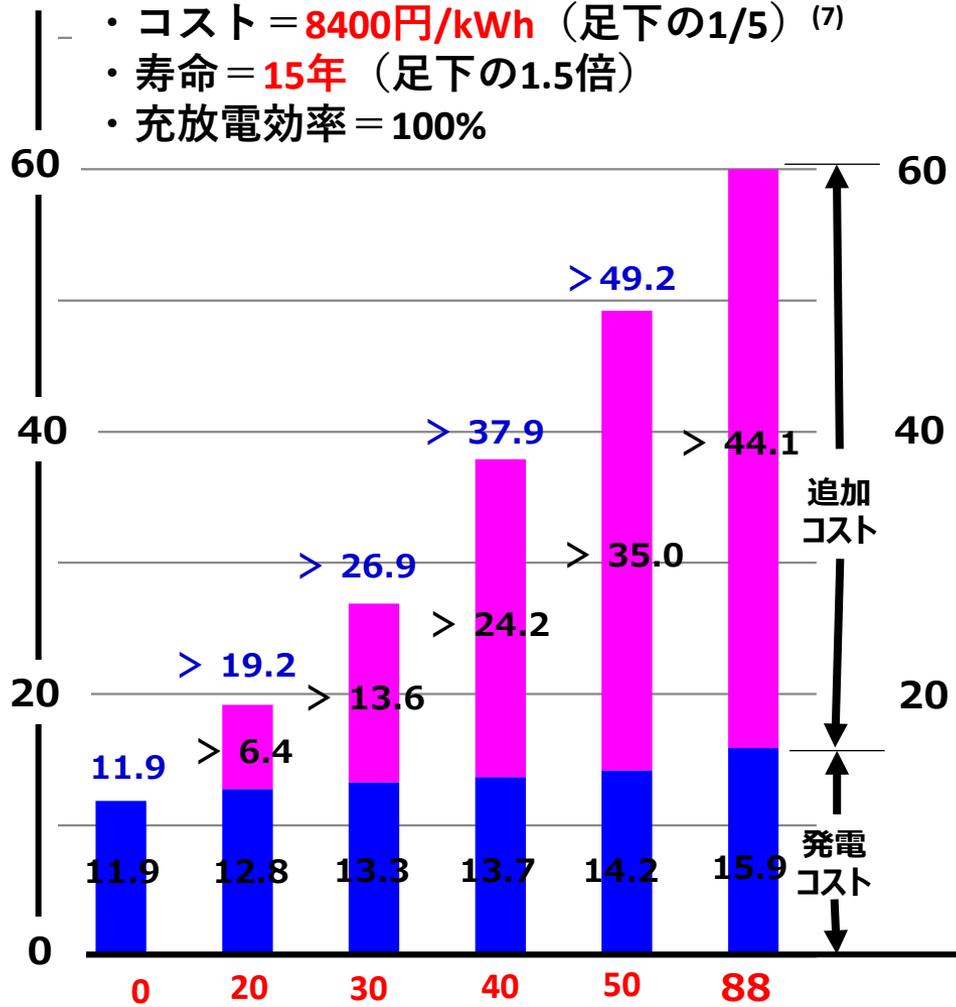
〈蓄電池方式〉

〈出力抑制+BU電源方式〉

2050年における蓄電池費用の想定

- ・コスト = **8400円/kWh** (足下の1/5) ⁽⁷⁾
- ・寿命 = **15年** (足下の1.5倍)
- ・充放電効率 = 100%

平均総発電コスト
(円/kWh)



変動再エネ導入率 (%)

【目次】

- I. 電源ミックス検討の狙い
- II. 需給シミュレーション
- III. 経済性評価
- IV. 再生可能エネルギー資源および
変動再生可能エネルギー導入適正量**
- V. 調和電源ミックス
- VI. 課題 とまとめ

我が国の再エネ資源（自然条件、社会制約）

- **安定再エネ**：第6次エネルギー基本計画における2030年目標発電量に同じとし導入率**12%**と判断（2030年目標値が既に高い水準にある）
- **変動再エネ**：電力中央研究所「受容性重視シナリオ」導入率**35%**が妥当
環境省「導入ポテンシャル」をベースに下記検討を追加
 - ①土地・海域利用に関わる法規制の影響を受けにくい地域に優先的に導入
 - ②地域住民や農業など他の土地利用との競合を避けて最大限の導入

		年間発電量 1400TWh		
電源		設備容量 (GW)	発電電力量 (TWh/年)	導入率 (%)
安定再エネ	水力	54	105	7.5
	地熱	2	14	1
	バイオ	8	49	3.5
	小計	64	168	12
変動再エネ	太陽光	217	260	18.5
	陸上風力	41	91	6.5
	洋上風力	47	140	10
	小計	305	491	35
再エネ	合計	369	659	47

〈参照文献〉

[1]環境省地球温暖化対策課調査
2020.3「わが国の再生可能エネルギーの導入ポテンシャル」

[2]総合資源エネルギー調査会基本
政策分科会第34回 2020.12.14
電力中央研究所「ネットゼロ実現に向けた風力発電・太陽光発電を対象とした大量導入シナリオの検討」

変動再エネの導入適正量

■ 「需給シミュレーション」解析結果

〈蓄電池方式〉

- ・ 電力安定供給が期待されるが、大容量の蓄電池が必要

〈出力抑制＋BU電源方式〉

- ・ 50%以上の変動再エネ導入は困難

■ 「経済性」試算結果（注記：変動再エネ導入率ゼロ時 発電コスト＝11.9円/kWh）

〈蓄電池方式〉（蓄電池技術の大幅向上を見込んだ試算結果）

- ・ 電源ミックス平均総発電コストが**導入率20%で7円/kWh以上上昇**
- ・ 画期的な**安価・大容量蓄電技術**が必須

〈出力抑制＋BU電源方式〉

- ・ 電源ミックスの平均総発電コストが**導入率20%で約4円/kWh上昇**

■ 「再エネ資源」調査結果

- ・ **安定再エネ資源** : **～12%**（第6次エネ基発電量が限界と判断）
- ・ **変動再エネ資源** : **～35%**（太陽光18.5%、陸上風力6.5%、洋上風10%）

【結論】 ・ 我が国の**産業競争力堅持**のための経済性の視点から
『**〈出力抑制＋BU電源方式〉変動再エネ導入率～20%**』が導入適正量と判断
・ 再エネ活用拡大に向けて**革新的蓄電技術開発**に期待

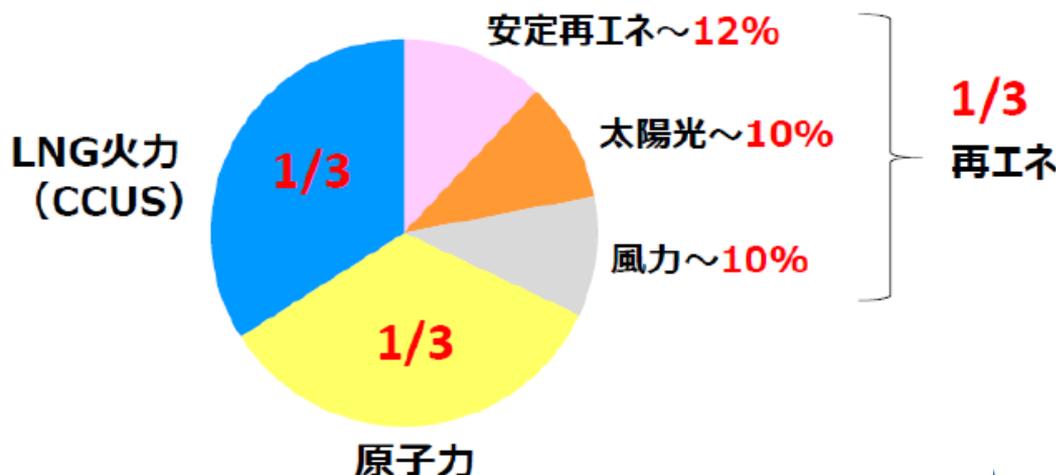
【目次】

- I. 電源ミックス検討の狙い
- II. 需給シミュレーション
- III. 経済性評価
- IV. 再生可能エネルギー資源および
変動再生可能エネルギー導入適正量
- V. 調和電源ミックス
- VI. 課題 とまとめ

『調和電源ミックス』の提案

再エネは前章結論で32%、残り68%は火力と原子力で優劣つけがたく34%ずつ、資源貧国に相応しい1/3ずつの調和がとれた電源ミックスとした。

年間発電量比率 (年間総発電量 = 14000億kWh)



電力安全保障：国民生活に必要な十分な電力を合理的な価格で継続的に確保

【世界的エネルギー危機】

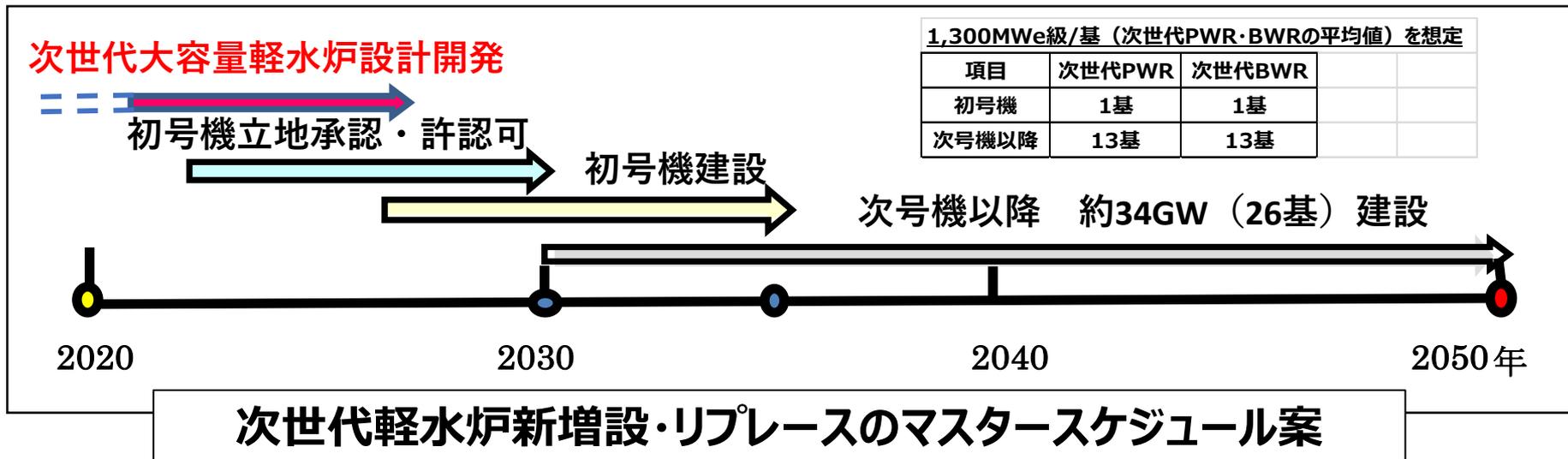
- 原油価格が暴騰
 - ・ 脱炭素に伴う化石燃料投資低迷
 - ・ コロナショック回復に伴う需要増加
 - ・ **ウクライナ危機**

【国内電力安定供給の綻び】

- 2022年3月地震発生：火力約335万kW停止
- 2022年3月22日気温低下・需要増・供給力不足により、**緊急電力逼迫警報**
- 2022年6月猛暑による需要増**電力需給注意報**

次世代大容量軽水炉の新增設・リプレース(8)

- **原子力1/3に必要な発電設備容量** : **60GW** (想定設備利用率90%)
 (内訳) 既設再稼働 (60年運転) : 24GW
 新增設・リプレース : **36GW** (次世代PWR・BWR28基相当)
- **第3次改良標準化で開発されたAPWR・ABWRに優れた安全性と経済性を取り入れた世界最高水準の次世代大容量軽水炉**を目指す。
- **次世代大容量軽水炉**の基本設計には見通しが得られている。(原子力プラントメーカーによる海外市場への挑戦、原子力学会“次期軽水炉の技術要件”⁽⁹⁾等)



- ◇ 20XX～2035年 : **初号機2基建設 (人材育成・サプライチェーン再構築)**
- ◇ 我が国の建設実績 : 30年間 (1970～2000年) に54基建設
- ◇ 立地敷地 : 計画中7基、廃炉敷地など電力事業者現保有敷地内

・**SMR** (小型モジュール軽水炉) および**高温ガス炉**は開発が間に合えば選択肢として追加

『調和電源ミックス』の提案

- 現状の技術レベルでは<出力抑制 + BU電源方式>が経済性で優位
- 将来においては<蓄電池方式>との併用になると推測

〈蓄電池方式〉

蓄電池 1 1 2 億kWh

・LNG火力 (CCUS) 174GW : 曇天・無風対応
蓄電池活用により設備容量低減の可能性有

電源	設備容量 (GW)	年間総発電量		構成比率
		導入率 (%)	電力量 (TWh)	
安定再エネ	61	12	168	1/3
変動再エネ	太陽光	10	140	
	陸上風力	5	70	
	洋上風力	5	70	
LNG火力 (CCUS)	174	34	476	1/3
原子力	60	34	476	1/3
合計	464	100	1400	1

〈出力抑制 + BU電源方式〉

・変動再エネの設備容量 (kW) が増加
(導入率 (kWh) 確保のため)

電源	設備容量 (GW)	年間総発電量		構成比率
		導入率 (%)	電力量 (TWh)	
安定再エネ	61	12	168	1/3
変動再エネ	太陽光	10	140	
	陸上風力	5	70	
	洋上風力	5	70	
LNG火力 (CCUS)	171	34	476	1/3
原子力	60	34	476	1/3
合計	494	100	1400	1

【目次】

- I. 電源ミックス検討の狙い
- II. 需給シミュレーション
- III. 経済性評価
- IV. 再生可能エネルギー資源および
変動再生可能エネルギー導入適正量
- V. 調和電源ミックス
- VI. 課題とまとめ

『調和電源ミックス』実現のための課題

赤字：課題講演

電源	課題
再エネ	<ul style="list-style-type: none"> ・大容量蓄電システムの開発 ・洋上風力の国産化 ・大幅コスト低減
原子力	<ul style="list-style-type: none"> ・原子力の持続的活用 ・2050年までに新設36GW（大型軽水炉28基）が必要 ・再稼働加速、設備利用率90%・80年運転の実現 ・規制改革：安全性と経済性の両立を目指す国際標準に則った科学的・合理的規制への改革が必須 ・国民の理解促進 ・バックエンド問題の解決
火力	<ul style="list-style-type: none"> ・CO₂回収・利用・貯留システム（CCUS）の開発 ・低負荷（20%）運転技術の開発と費用負担の明確化

国家的課題

- 政府の強いリーダーシップのもと、
- 実行可能なエネルギー基本計画を提示し、
- 産官学総力結集した戦略的取り組みが必要

完

参考資料

- (1) “エネルギー基本計画” 閣議決定資料、令和3年10月
- (2) “2050年カーボンニュートラルに向けた検討” 資源エネルギー庁基本政策分科会資料、2021.5
- (3) “ライブラリー：自然エネルギー・データ集” 環境エネルギー政策研究所（ISEP）
- (4) “基本政策分科会に対する発電コスト検証に関する報告” 経済産業省発電コスト検証ワーキンググループ、令和3年9月
- (5) “CCSを取り巻く環境” 経済産業省地球環境連系室、平成30年6月11日
- (6) “マスタープランに関する議論の中間整理～連携線を中心とした増設の可能性～” 電力広域的運営推進機関第9回広域連携システムマスタープランおよびシステム利用ルール在り方等に関する検討委員会資料、2021.4.28
- (7) “原子力・再生可能エネルギー電力システム研究会報告書” 日本機械学会動力エネルギーシステム部門原子力・再生可能エネルギー調和型エネルギーシステム研究会、2021.7
- (8) “提言「次世代軽水炉の新增設・リプレイス」” 牧、金氏、早瀬、公開発言 エネルギー問題に発言する会（engy-sqr.com）
- (9) “次期軽水炉の技術要件” 日本原子力学会原子力発電部門「次期軽水炉の技術要件検討」ワーキンググループ、2020.6