



「日本の電力システムの現状・所来展望と 超電導技術への期待」

公益社団法人 低温工学・超電導学会 会長

電力中央研究所 名誉特別顧問

秋田 調

低温工学・超電導学会主催 一般公開シンポジウム

「カーボンニュートラル社会創出に向けて
—低温工学・超電導技術の役割を語る—」

2022年6月22日

 電力中央研究所

我が国の電力システムの現状・ 将来展望と超電導技術への期待 —2050年カーボンニュートラルへ向けての 取り組みと超電導技術の役割—

【低温工学 56巻 5号 PP243-247, 2021年】

電気事業の歴史

歴史：直流配電と交流配電

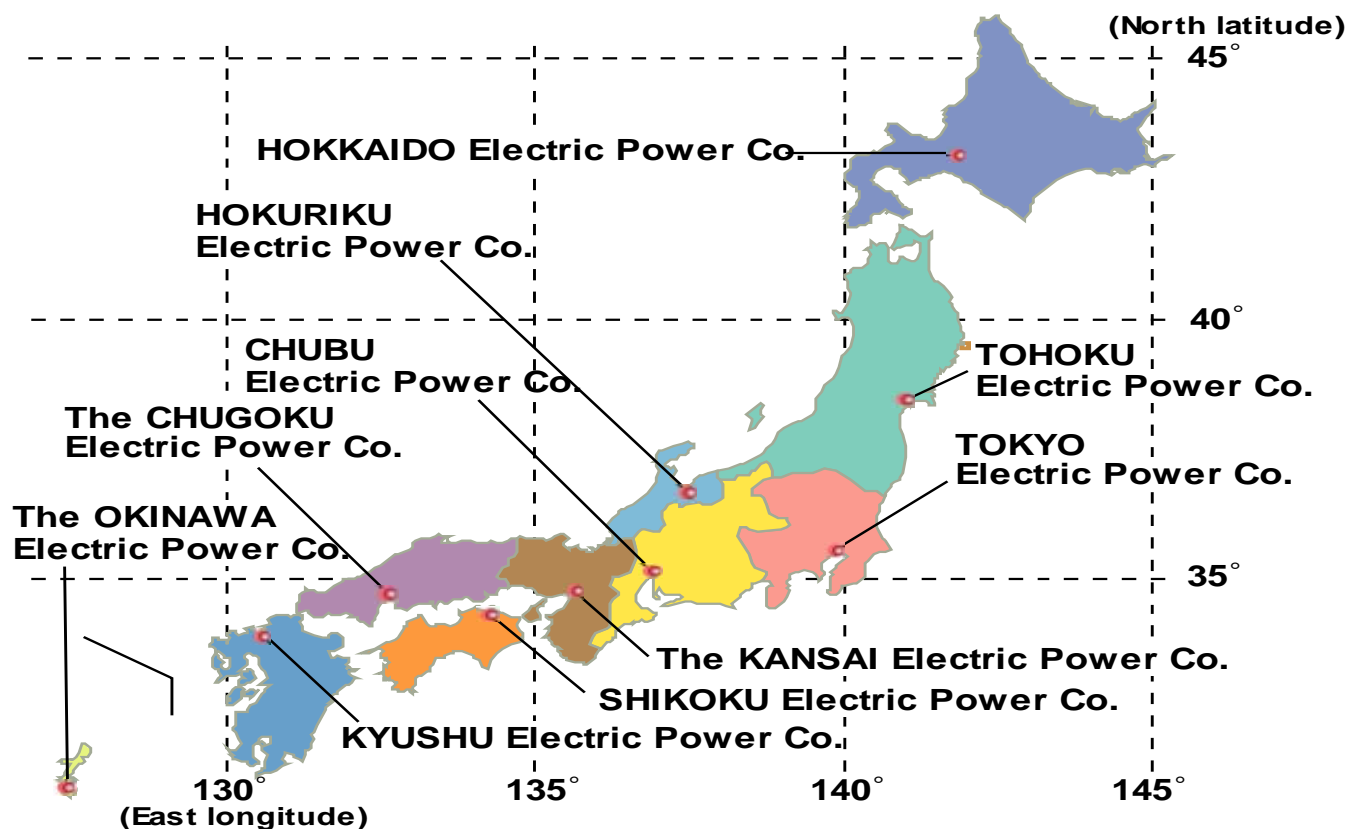
○直流配電：変圧器では電圧の昇圧/降圧ができず、長距離配電に不向き
⇒近距離の同種類の負荷に配電

○交流配電：変圧器で容易に昇圧/降圧ができ、長距離配電が可能
⇒異種の負荷を集め、設備利用率が向上できる

(エジソン(敗)とウエスティングハウス(勝)の戦い)

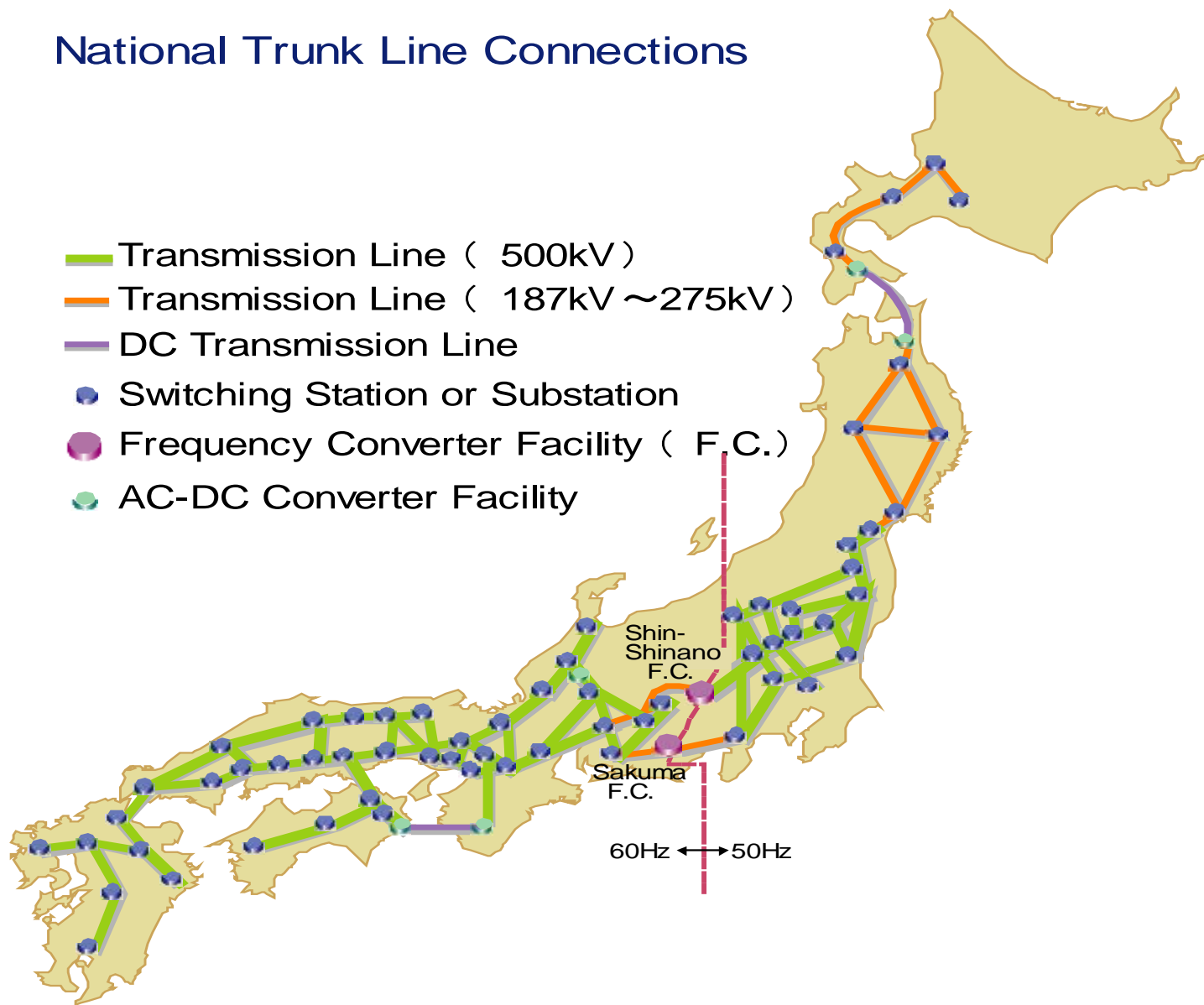
2000年3月までの電気事業

Encompassing All of Japan—The Ten Electric Power Companies by Service Areas



(電力会社の営業地域は明確に分かれていた)

National Trunk Line Connections



(電力系統は西と東で以前から一体化している)

歴史：電気事業のこれまでのあり方

異種の負荷を集め、日間、年間の設備利用率を向上させ、固定経費を如何に切り詰めるかの事業であった。

例：「冬の製氷業はありがたい」（シカゴの電力会社の創成期）

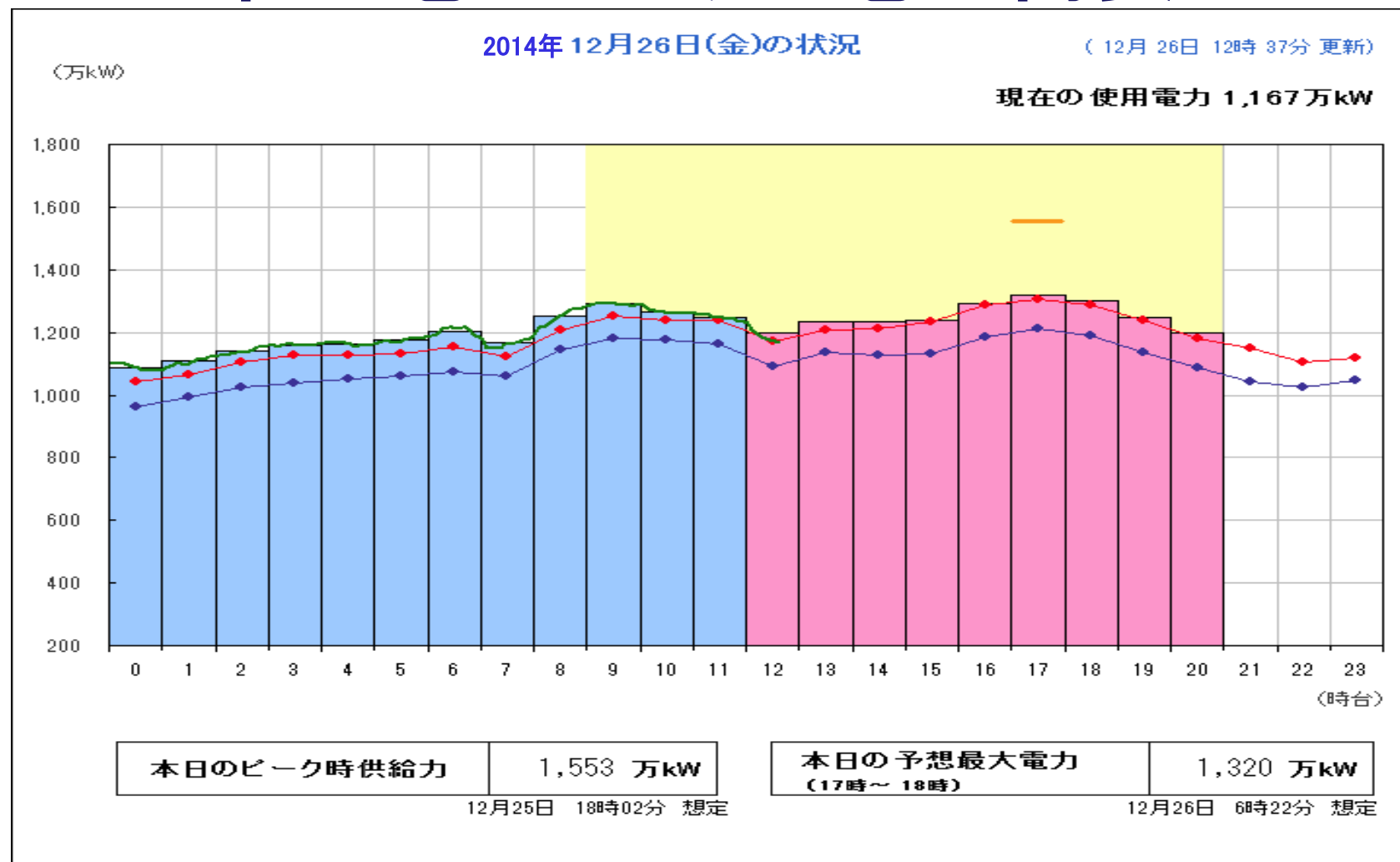
（設備稼働率が上がると電気料金が下がる）

歴史：電気事業の取り組み

- 深夜電力料金の設定
- 蓄熱空調方式への補助金
- エコキュートの普及促進

(設備稼働率を上げるための工夫が進められた)

東北電力の冬の電力需要



(工夫が進み昼と夜の電力需要がほとんど同じ)

電気事業のいま

低炭素社会への挑戦

- ① 低炭素排出電源の利用
- ② 省エネルギー技術の活用

需要側

供給側

高効率な機器

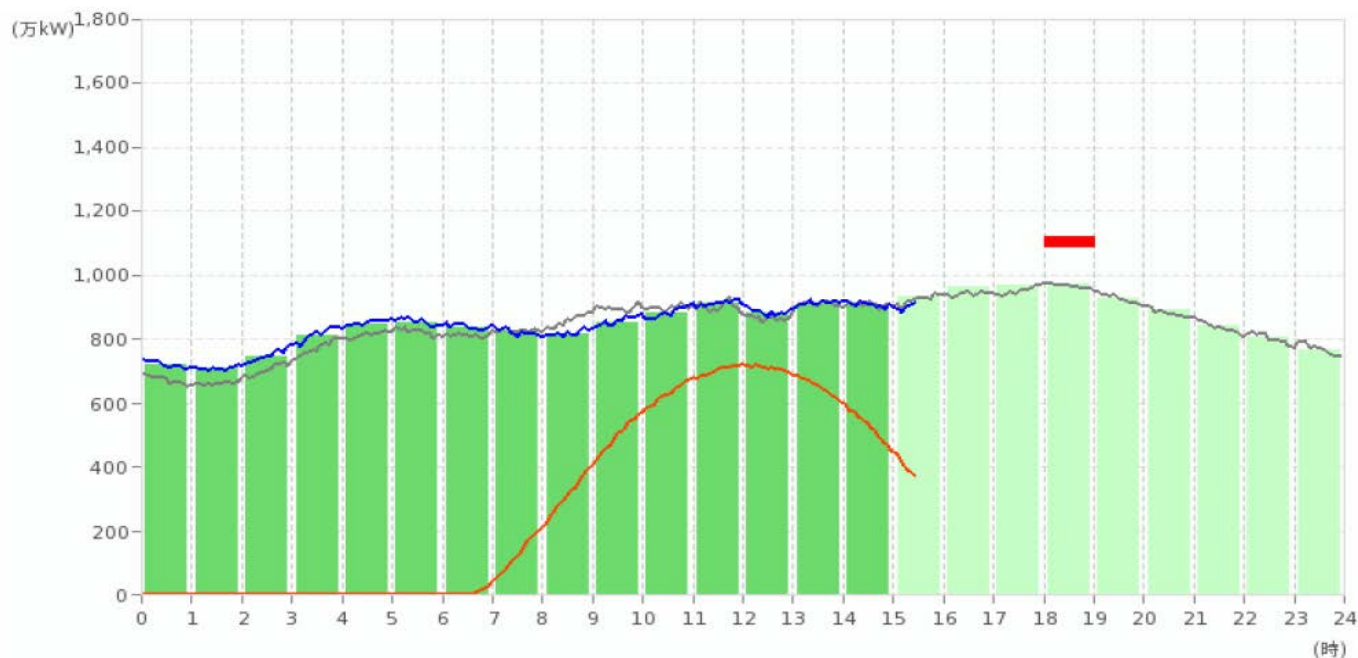
低いCO₂原単位

大幅なCO₂排出削減

(菅前首相は2050年にカーボンニュートラルと表明)

2020年10月20日の九州電力の需給実績

電力使用状況の推移



本日電績(5分値) 本日電績(1時間値) 予測値 ピーク時供給力
 本日の太陽光発電実績(5分値)
 前日電績(5分値) ※土・日曜日については前週実績、月曜日については前週金曜日実績を参考値として表示します。

(九州電力の太陽光発電導入割合はほぼ世界一)

2018年10月21日の九州電力の需給実績

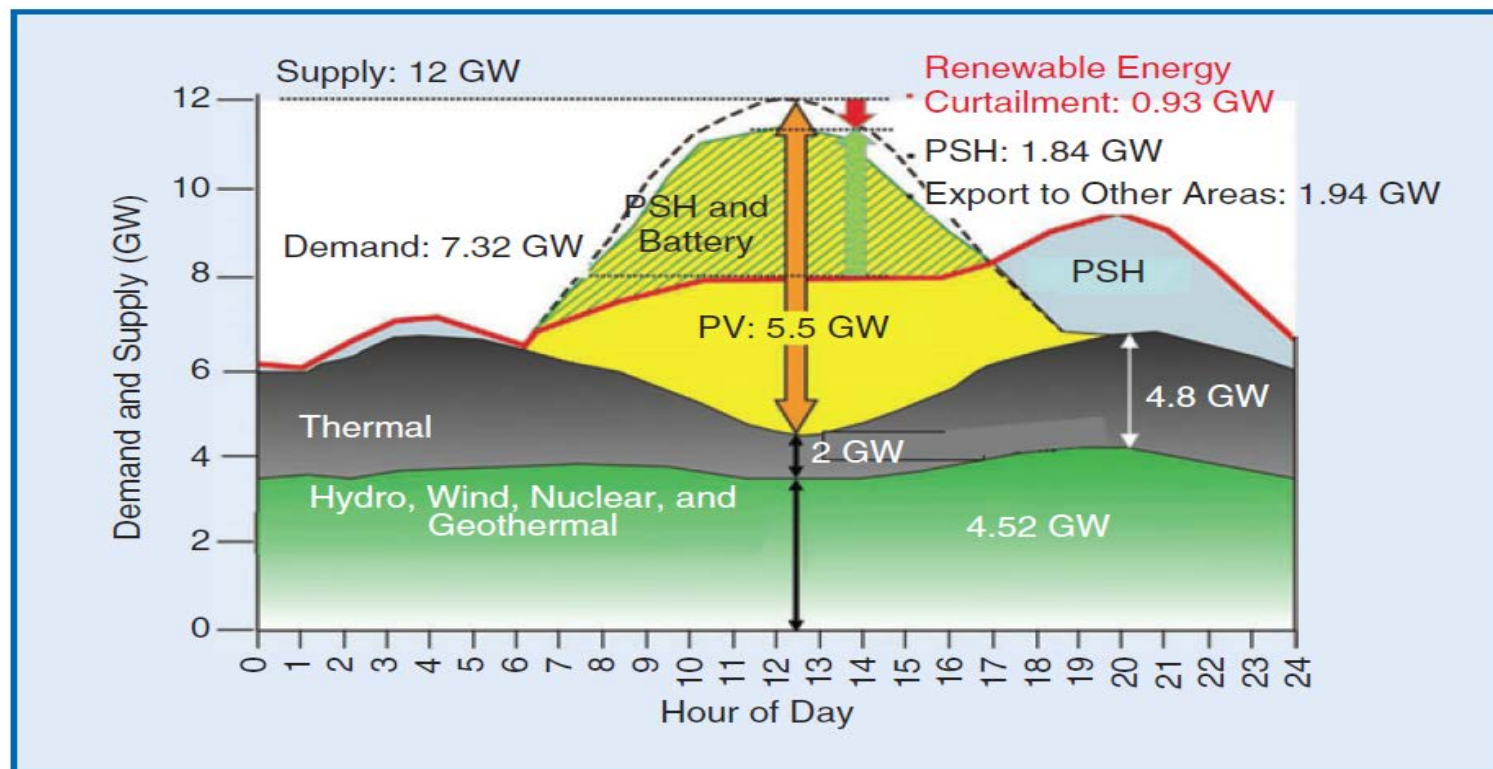


figure 5. The demand and supply operation on 21 October 2018. (Source: Kyushu EPCO; used with permission.) (PSH : pumped-storage hydropower⇒揚水発電)

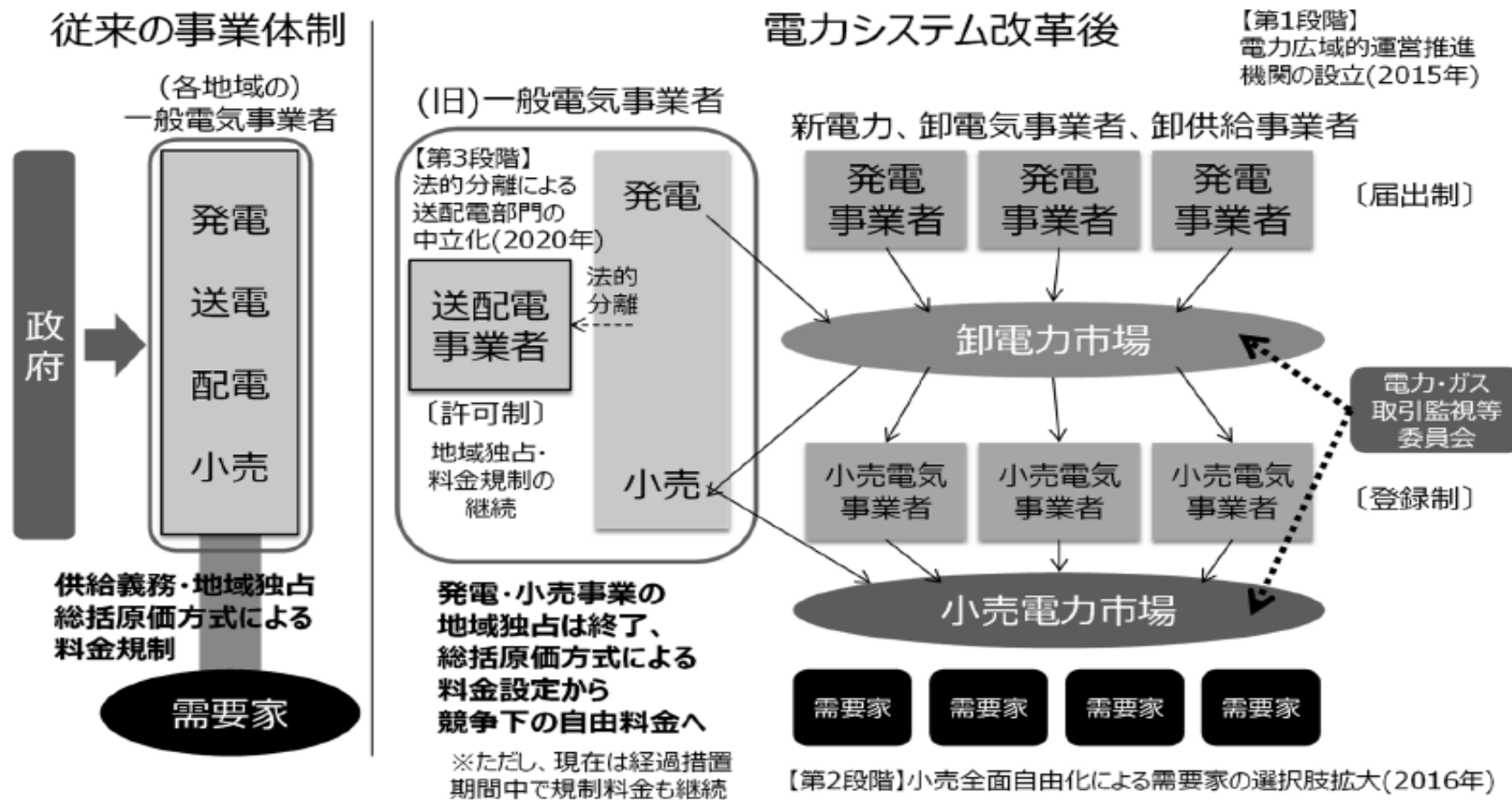
(余剰の太陽光発電を揚水で吸収)

“Making Renewables Work”, by Kazuhiko Ogimoto and Hiroshi Wani(九州電力)
 IEEE Power & Energy Magazine November/December 2020 p.51

電力システム改革の状況

- (1) 広域系統運用の拡大 (2015年)
- (2) 電気の小売業への参入の
全面自由化 (2016年)
- (3) 法的分離方式による送配電部門の
中立性の一層の確保、2020年4月)

電気事業の自由化



「電力システム改革における新市場創設の意義と課題」電力経済研究No.66(2019.3)

(一体であった電気事業を分割し市場でつなげる)

電気事業に関し開設される市場

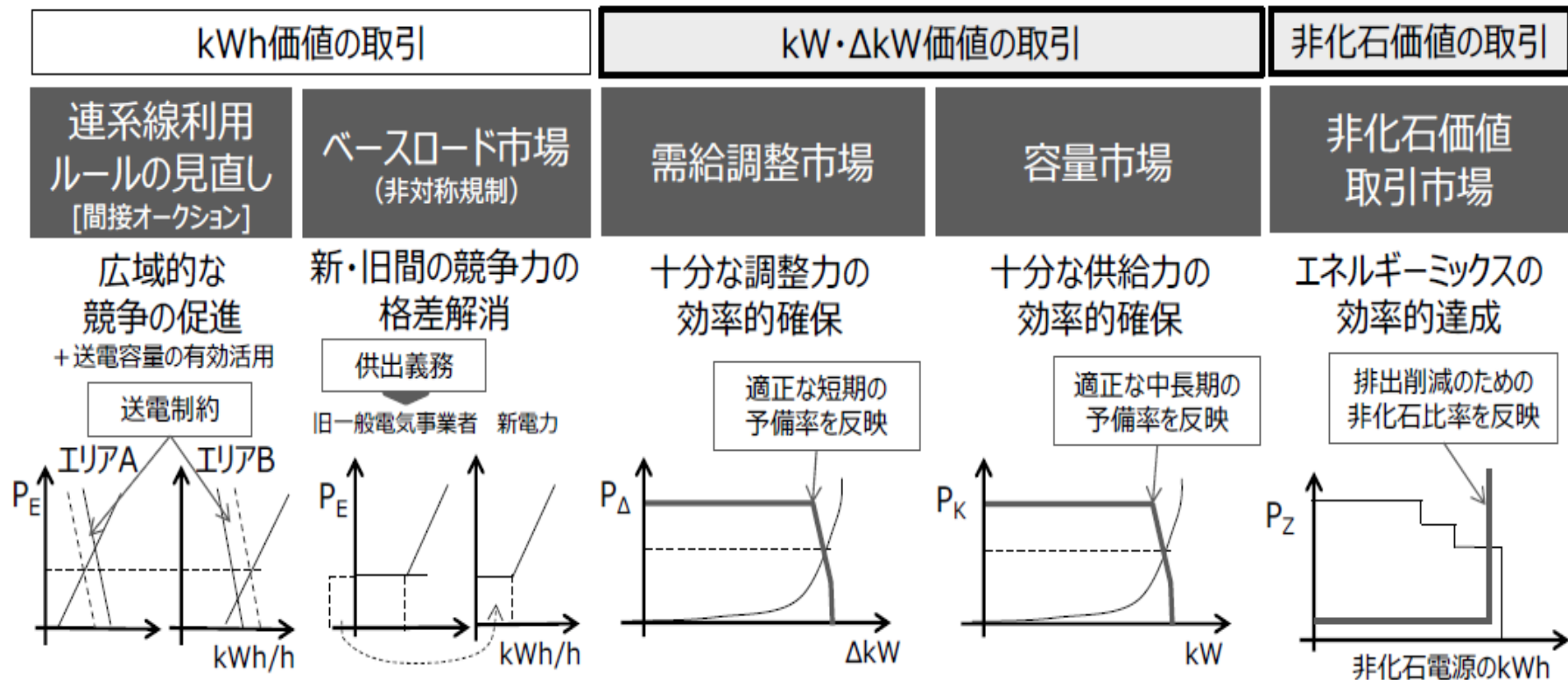


図2 新市場で取引される価値とその目的

「電力システム改革における新市場創設の意義と課題」電力経済研究No.66(2019.3)

(市場が円滑に機能するかはまだ不明)

電気事業に関し開設される市場

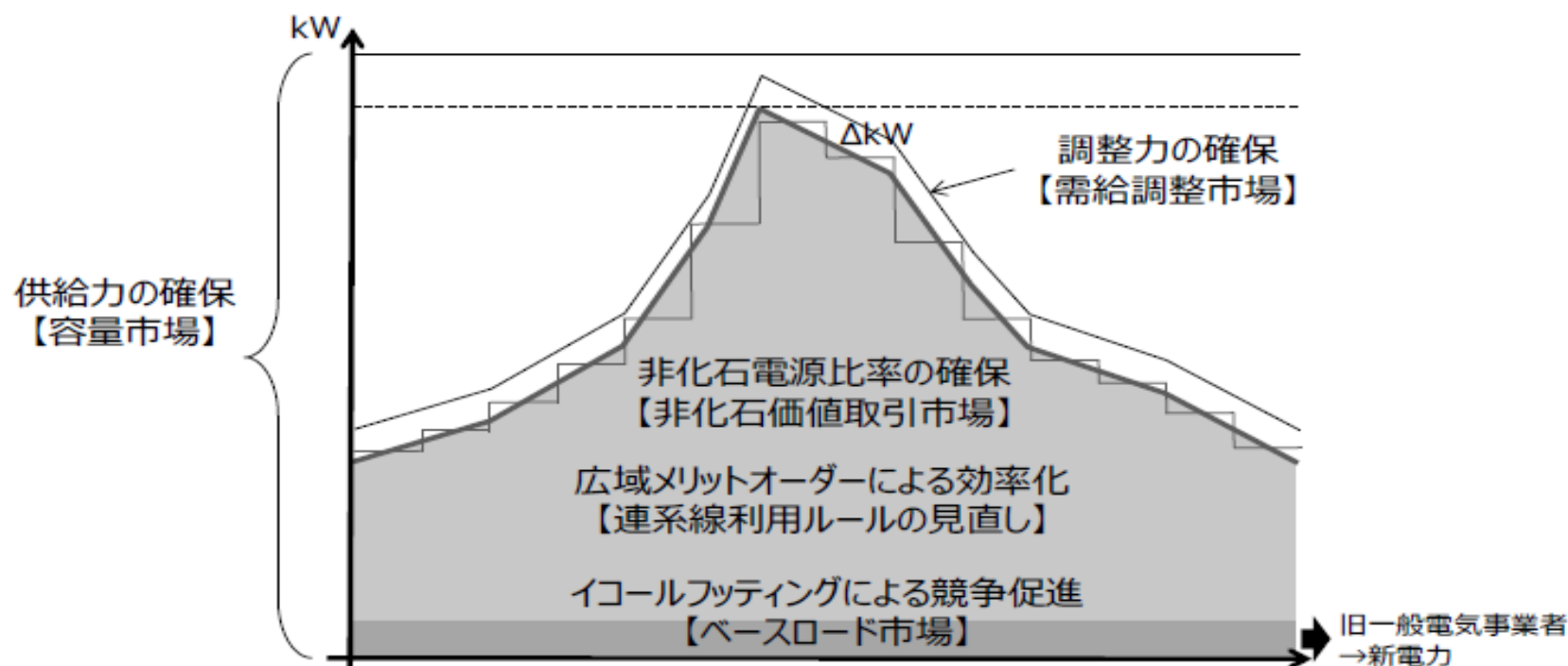


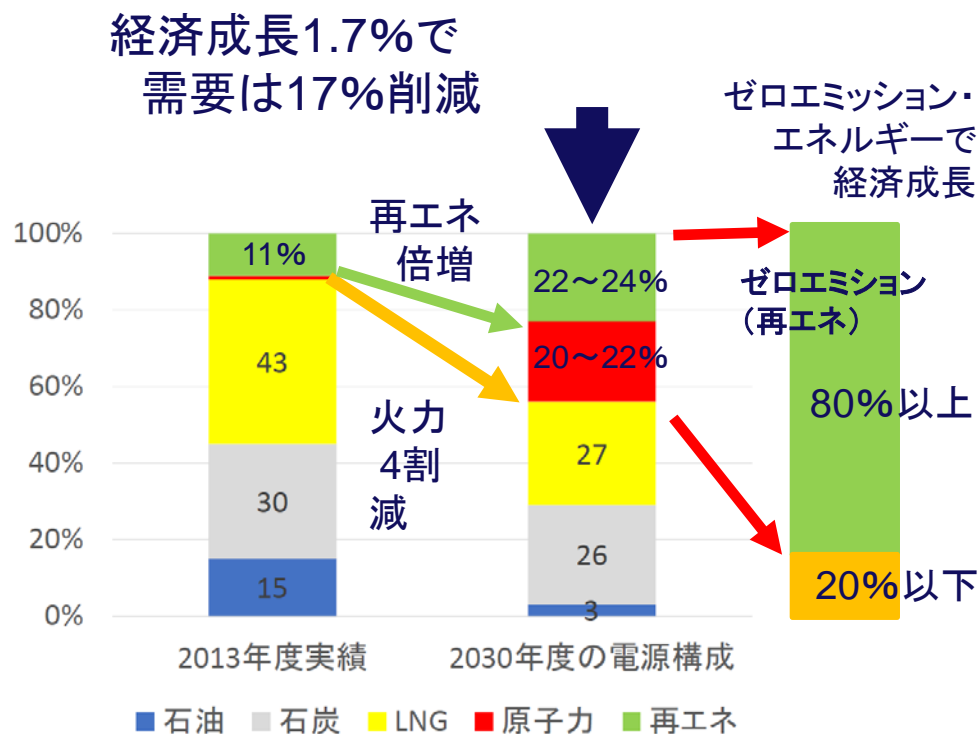
図3 新市場と電力需給の関係

「電力システム改革における新市場創設の意義と課題」電力経済研究No.66(2019.3)

(市場で取引する価値が複雑に絡み合っている)

電気事業の今後

2050年低炭素化のこれまでの姿



- ◆ 2050年には80%以上までのゼロエミッション電源導入
⇒さらにカーボンニュートラルへ
- ◆ 系統安定化技術の高度化が不可欠
- ◆ 国内の太陽光・風力発電だけでは、容量不足か。
- ◆ 国外からの再エネ輸入？ 再エネ由来エネルギーの水素等の輸入か。
- ◆ 既存のインフラなどのエネルギーシステムの最大限の活用

2050年の80%削減には、

- ✓ ゼロエミッション電源の導入加速。88%必要との試算結果。
- ✓ 火力発電の高効率化と再エネ由来の水素燃料の混焼・専焼技術と貯蔵・輸送技術の実用化

カーボン
⇒ **ニュートラルへの**
道筋は不明確

2050年80%減の社会の姿

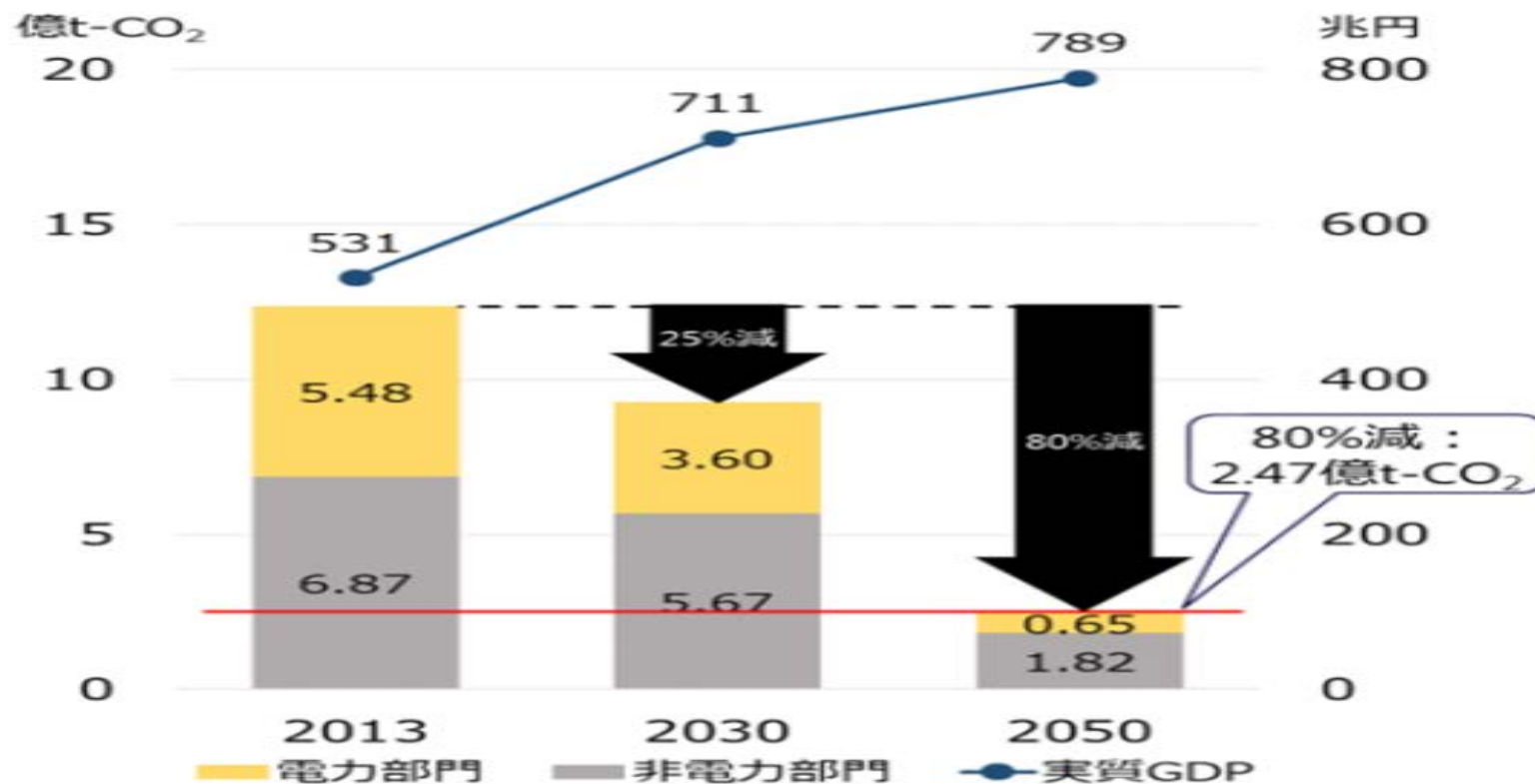


図1 実質GDPとCO₂排出量の推移
電力中央研究所 研究資料 No. Y19501 (2019年4月)より

⇒電力部門の排出削減は88%

2050年80%減の電力供給

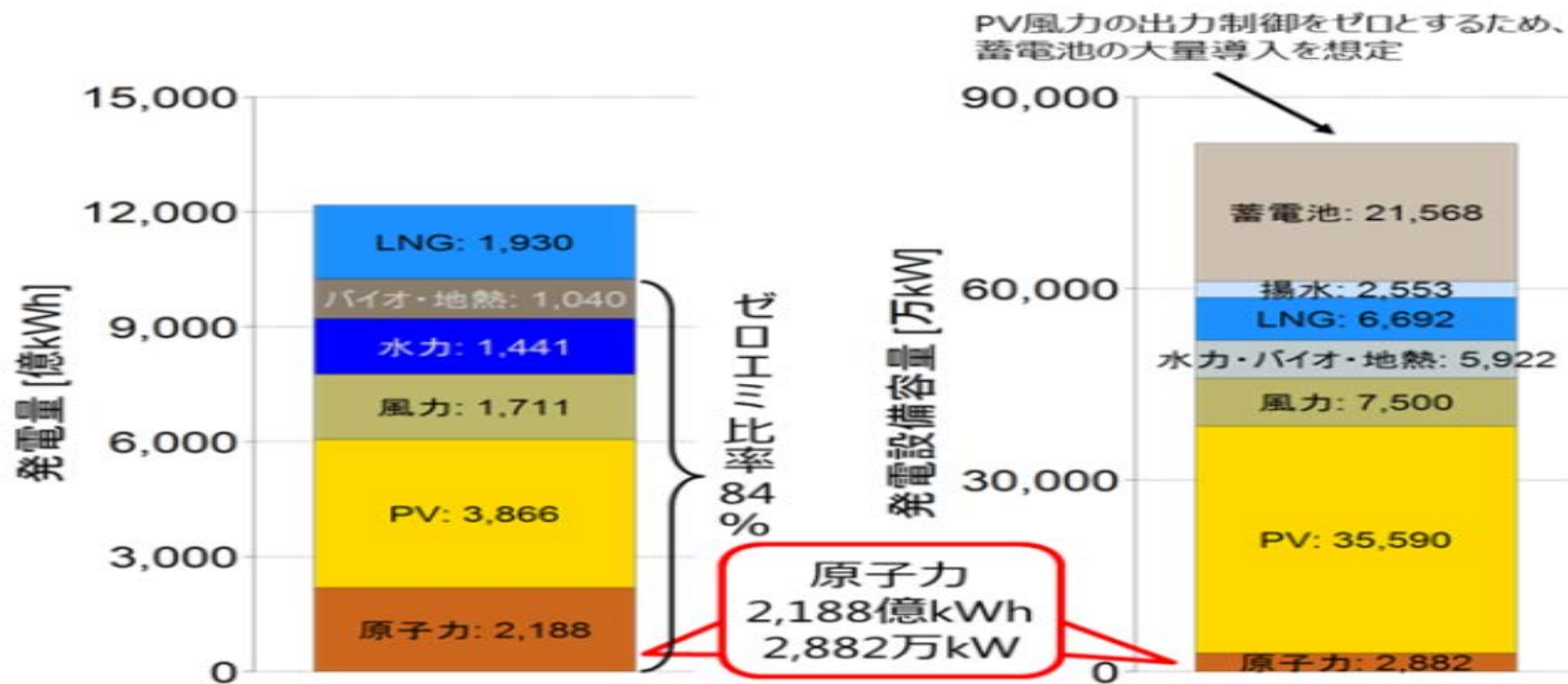
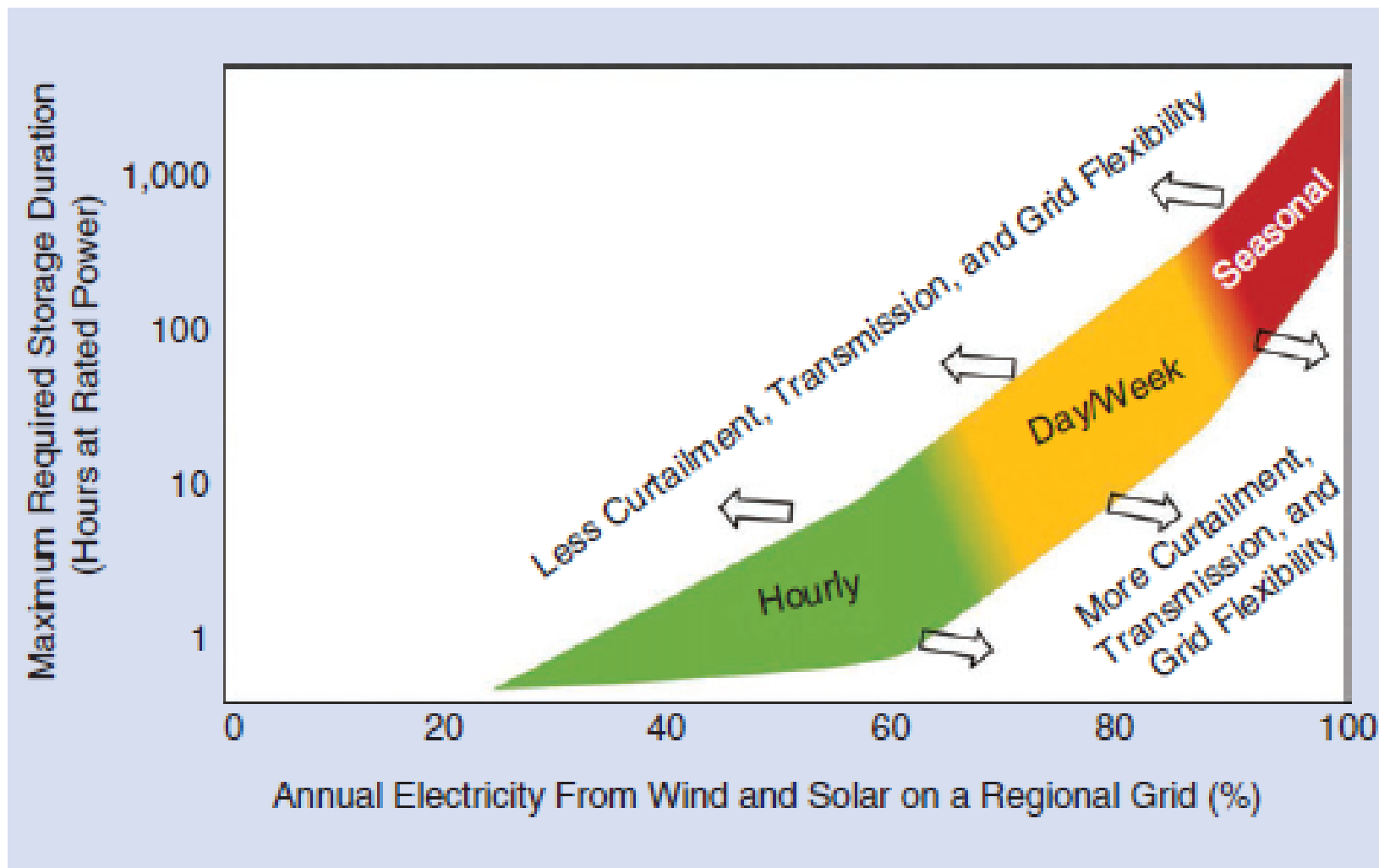


図 2 CO₂80%減を達成する際の 2050 年の電源構成
電力中央研究所 研究資料 No. Y19501 (2019年4月)より

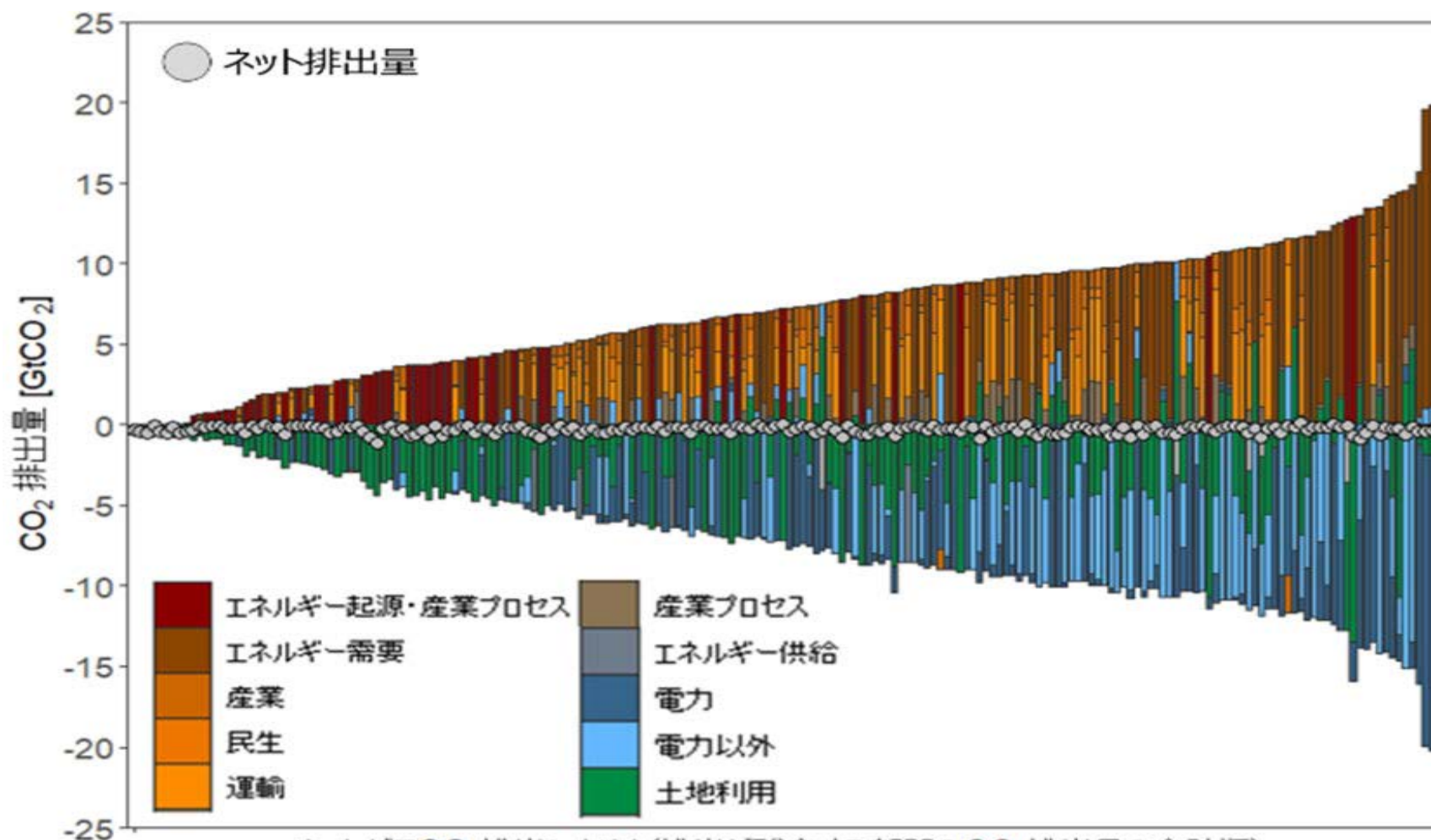
⇒偏在する再生可能エネルギーをどのように需要地に送電するかは未検討

風力太陽光大量導入時の電力貯蔵



IEEE Electrification Magazine DECEMBER 2021 p. 6

IPCC/SR15におけるネットゼロ排出達成時のCO₂ 排出量



ネットゼロCO₂排出シナリオ (排出が残余する部門のCO₂排出量の合計順)

電力中央研究所研究報告Y20001 (2020年10月)より

2050年頃の電気事業の姿

- ◆ 低炭素化（原子力、再生可能エネルギー、CCUS付火力、ダイレクトキャプチャー（DAC））

（日立東大ラボの試算では、2050年に約1億トンのCCSと約3億トンのDACで我が国のカーボンニュートラルを達成するとしている。）

+

- ◆ レジリエンス強化（自然災害対応、サイバーセキュリティ、早い復旧）
- ◆ 機器の高年化対応（高機能化リプレース、アセットマネジメント、リスクベース）

⇒ **リスクとコストのバランスに対しての社会的合意が不可欠（RIDM）**

今後必要になる電気事業における研究開発①

◆低炭素化

- ・原子力：60年を超える長期運転
- ・再生可能エネルギー：太陽光、風力に加え地熱も
- ・CCUS付火力：カーボンリサイクルと貯留技術
- ・ダイレクトキャプチャー：技術的に意味がある効率
- ・水素利用技術：二次エネルギーおよびカーボンリサイクル材料としての活用技術

⇒ **あらゆる低炭素化技術開発に取り組む**

必要がある（グリーンイノベーション基金の重点分野では

①洋上風力産業 ②燃料アンモニア産業、③水素産業）

水素キャリアの相対評価の一例

◎：他の水素キャリアに比べ優位、○：優劣は中位、△：他の水素キャリアよりも劣位

各水素キャリア間を比較したもので化石燃料との比較で優位性を評価したものではない

	輸送効率 (体積・重量 水素密度)	水素エネルギー 利用割合	経済性(国内 配送50kmを 含むコスト)	取扱い容易性 (輸送/貯蔵 性)・安全性	既存インフラ 技術利用可 能性	特記事項(優 位性、課題 など)
液化水素 (LH ₂)	・常圧ガスの 1/800 ・7kg/100L (20K,0.1MPa)	・製造時に30%(理 論は10%)相当の エネルギー投入が 必要	・54円/Nm ³ (2030年CIF目標 値30円/Nm ³)	・-253℃の極低 温のため長期間 保存難	・新規インフラ必 要海上輸送・荷 役・貯蔵に技術 開発が必要	・投入時の冷熱 は国内で利用可 ・長期展望での 有力候補
有機ハイド ライド (MCH)	・常圧ガスの 1/500 ・5kg/100L (常温)	・脱水素時に吸熱 により76%(計算 値)に減少	・50円/Nm ³	・-85~100℃で液 体で取扱い容易	・既存インフラ利 用可(大量では 新設必要)	・脱水素化時の エネルギー投入 とトルエン回収
アンモニア (g-NH ₃)	・常圧ガスの 1/1300 ・12kg/100L (240K,0.1MPa)	・脱水素時に吸熱 により69%(計算 値)に減少するが、 直接燃焼時は不要	・48円/Nm ³ ・40円/Nm ³ (直接燃焼利用 時)	・-34℃で液化 ・少量で健康被 害	・既存インフラ利 用可(大量では 新設必要)	・水素から製造 時の高効率化 ・直接燃焼時の NOx低減対策
メタン (g-CH ₄)	・常圧ガスの 1/1100 ・10kg/100L (112K,0.1MPa)	・脱水素時に吸熱 により78%(計算 値)に減少するが、 直接燃焼時は不要	・40-53円/Nm ³ (利用時のCO ₂ 回 収・固定化価格 に大きく依存)	・-162℃で液化	・既存インフラ利 用可	・製造時のCO ₂ 調 達と利用時の回 収、固定化は本 質的な課題
備考 (相対順 位)	・重量では LH ₂ >g-CH ₄ >g-NH ₃ >MCH 体積では g-NH ₃ >g-CH ₄ >LH ₂ >MCH ・輸送を考慮し て体積で評価	・LH ₂ 製造は海外エ ネルギー利用 ・海外輸送の観点 で、国内実用時は LH ₂ >g-CH ₄ >g-NH ₃ >MCH	・エネルギー研試 算 ^{※1)} に追加分析 した結果 ・g-CH ₄ 利用時の 国内CO ₂ 回収・固 定化費用により 順位は大きく変 動	・取扱い容易性 では、 MCH>g-NH ₃ >g-CH ₄ >LH ₂ ・物理的/化学的 安全性は一長一 短あり	・早期実用化の ためのインフラ 整備状況は g-CH ₄ >g-NH ₃ ≒MCH>LH ₂	・全体的には g-NH ₃ のバランス が良い ・長期的にはLH ₂ が有望 ・MCHは排熱利 用の限定

電力中央研究所研究報告Q18005(2019年4月)より

今後必要になる電気事業における研究開発②

◆レジリエンス強化

▪ 自然災害予測

⇒ 台風被害の予測、

⇒ 地震被害の予測

⇒ 津波被害の予測

▪ 素早い復旧のための技術

▪ サイバーセキュリティ

⇒ 電力が社会を支える主たるエネルギーになるためレジリエンスも一層重要になる

今後必要になる電気事業における研究開発③

◆ 機器の高年化対応

- ・ 経年劣化の診断技術と寿命予測技術

⇒ センサーおよびAIが重要

- ・ リプレース機器の開発

⇒ 超電導を含む新しい材料の活用

⇒ 標準化による低コスト化

⇒ ICT技術の活用

⇒ 電力機器の高経年化は確実に進むが一斉には更新できない

超電導技術への期待

2018年10月21日の九州電力の需給実績

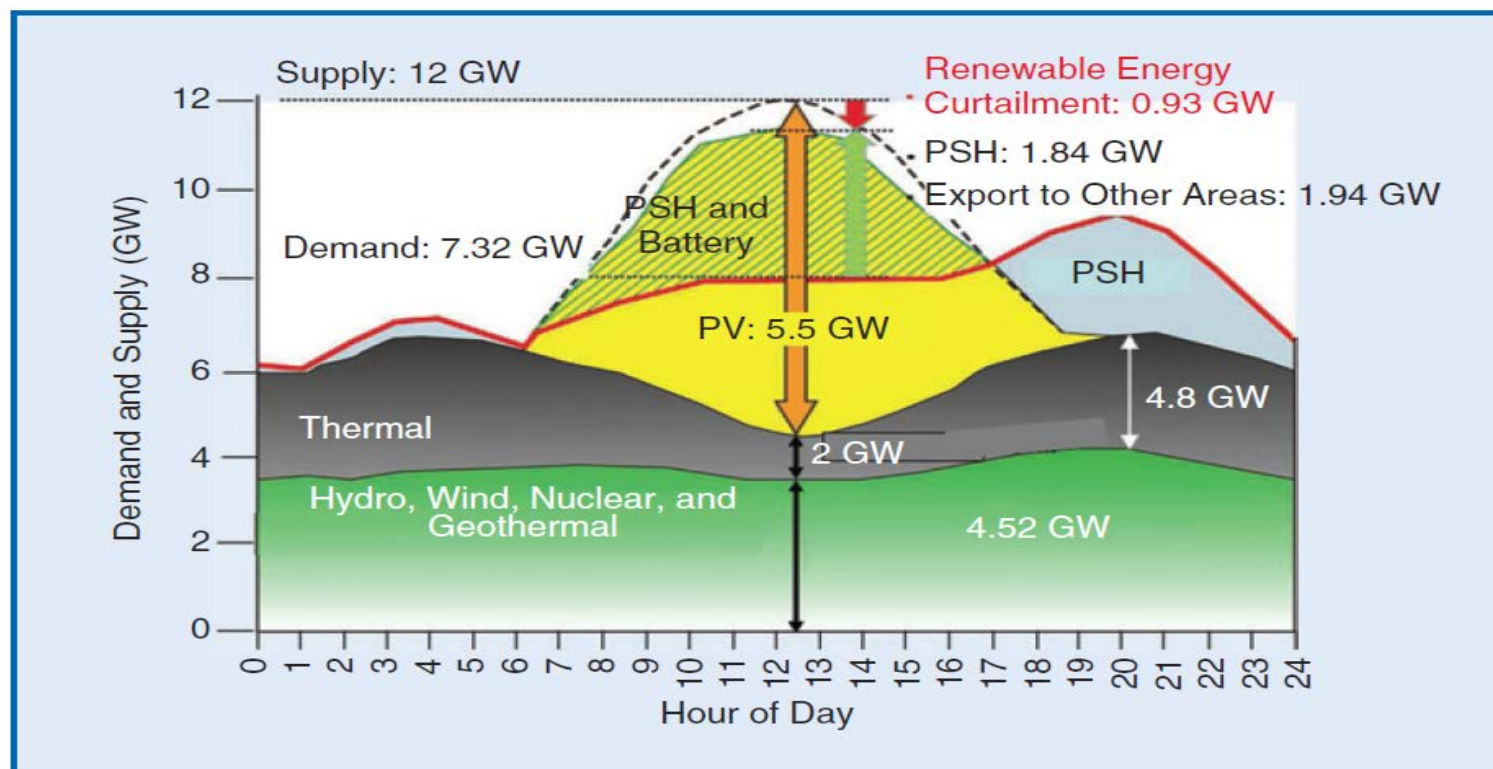


figure 5. The demand and supply operation on 21 October 2018. (Source: Kyushu EPCO; used with permission.) (PSH : pumped-storage hydropower⇒揚水発電)

(余剰の太陽光発電を揚水で吸収)

“Making Renewables Work”, by Kazuhiko Ogimoto and Hiroshi Wani(九州電力)
 IEEE Power & Energy Magazine November/December 2020 p.51

電力の大量輸送技術としての超電導技術

■ 電力の長距離送電技術は不可欠

- ・ 稚内駅から東京駅までは約1100 kmで既存技術で対応可能
- ・ 北海道から本州への送電では直流海底ケーブルの利用有力視
- ・ ± 800 kV、800 万kW 送電で5000 A(超電導化メリット期待大)

⇒ 直流超電導ケーブルでは電圧を下げ電流値を上げる方が適切

⇒ 最適化のためには詳細な設計研究が必要

⇒ 1 回線で800 万kW 送電すると送電線故障の影響大

⇒ **カーボンニュートラル**は**大規模停電**の発生リスクと**比較衡量**が必要な政策目標

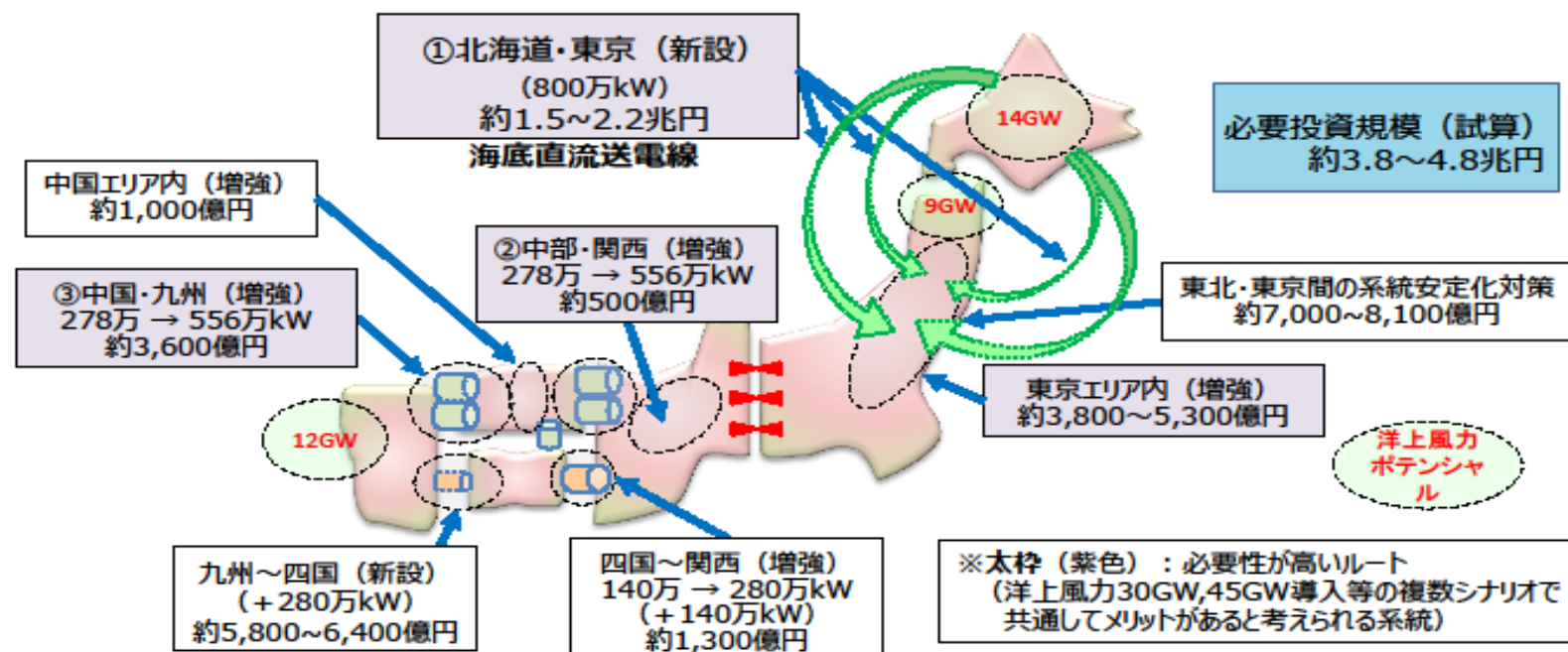
⇒ 大規模停電発生リスクへの対応可能なら導入の可能性あり

マスタープランにおける電力の大量輸送技術

送電網の増強

- 再エネ主力電源化に向けて、系統制約を克服する取組は重要。
- 再エネポテンシャルへの対応、電力融通の円滑化によるレジリエンス向上に向けて、全国大での広域連系システムの形成を計画的に進めるため、マスタープランの中間整理を2021年5月にとりまとめた。新たなエネルギーミックス等をベースに、2022年度中を目途に完成を目指す。
- 北海道と本州を結ぶ海底直流送電等の必要性が高いルートは、順次、具体化を検討。

マスタープランの中間整理（電源偏在シナリオ45GWの例）



出典：広域連系システムのマスタープラン及び系統利用ルールの在り方等に関する検討委員会 中間整理

電力の需給調整技術としての超電導技術(1)

■ 電力需給のkW の整合を取る技術も重要

- ・LNG コンバインド発電所を起動する
- ・水素を製造する水の電気分解装置を立ち上げる

⇒再生可能エネルギーの変動の速さと発電あるいは需要創造の立ち上げの速さが整合しない

⇒LNG コンバインド発電では電池貯蔵装置併設の研究開発も

⇒貯蔵電力量よりも発電時/貯蔵時のkW の大きさが重要

⇒最もSMES の特徴を発揮しやすい適用先

電力の需給調整技術としての超電導技術(2)

■ 無効電力の調整も重要

- ・超電導同期発電機/超電導同期調相機は、同期リアクタンス小で進み無効電力範囲を含め無効電力の調整範囲が広い
- ・電力系統の慣性力を確保できるとのメリットも

⇒再生可能エネルギーのインバーター出力を電動機に入力し同期発電機から出力するM-Gセットを介して電力系統に接続するとの考え方も提案されておりM-G セットの同期発電機を超電導化することも一案

周波数が低下した場合の調整力

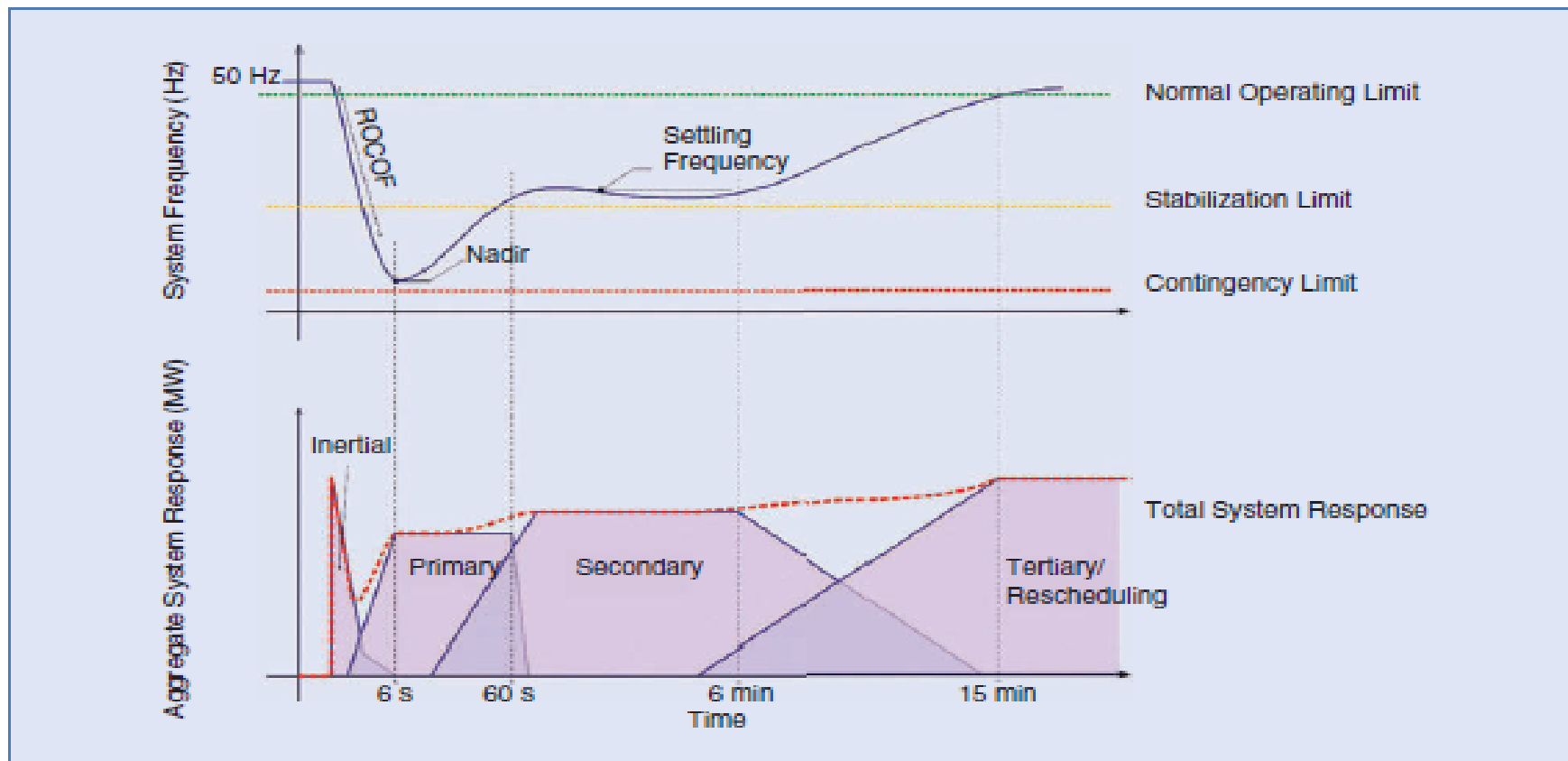


figure 5. (a) The system frequency appropriately managed after a contingency event. (b) Frequency management mechanisms to support the restoration of system frequency following a contingency event. ROCOF: rate of change of frequency.

“Essential System Services Reform”

IEEE Power & Energy Magazine September/October 2021 p.40

周波数が低下した場合の発電機出力

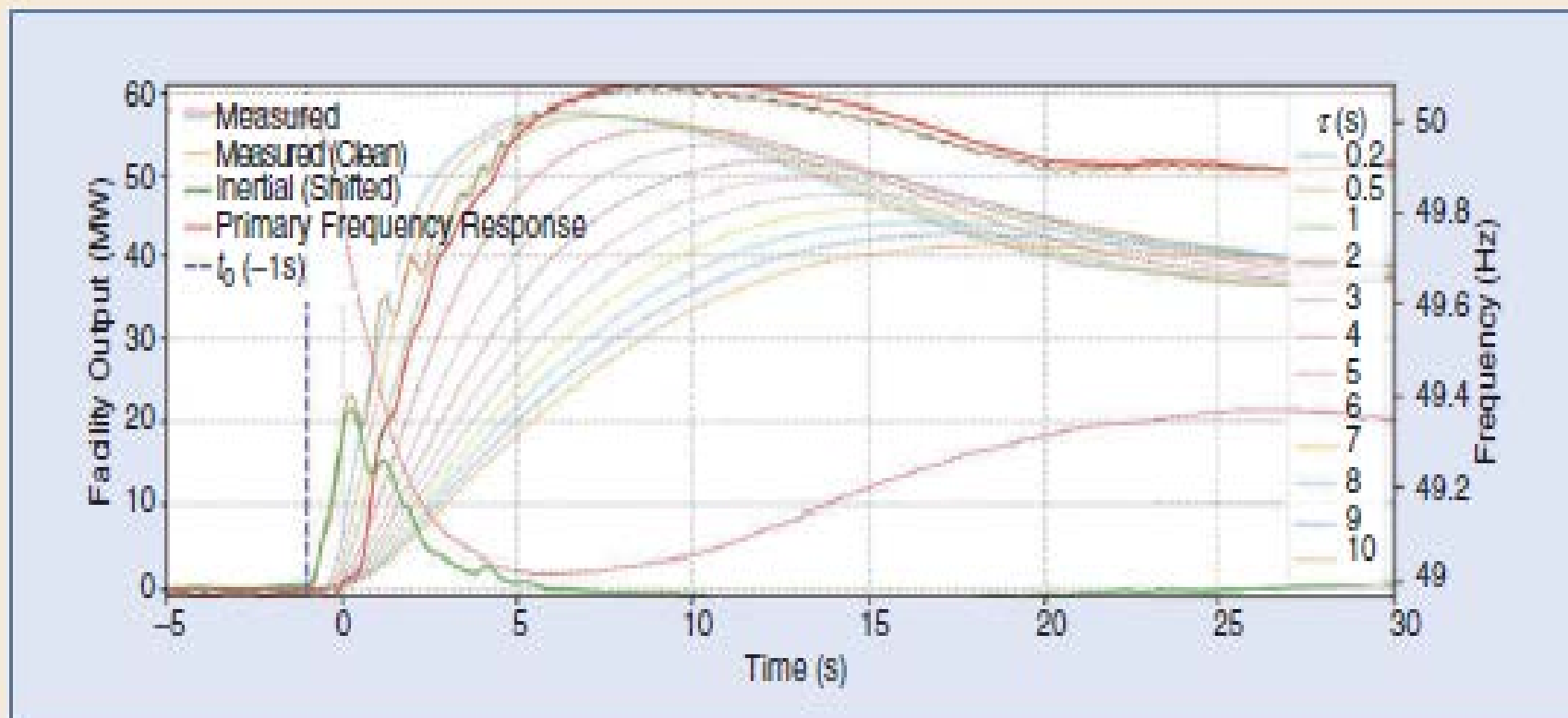


figure 53. The physical response of a gas turbine is measured and compared against an array of hypothetical “perfect exponential” responses of different speeds.

“Essential System Services Reform”, IEEE Power & Energy Magazine
 September/October 2021 p.41 (西オーストラリア電力系統は最大電力4GW程度)

フレキシビリティを高める超電導技術(1)

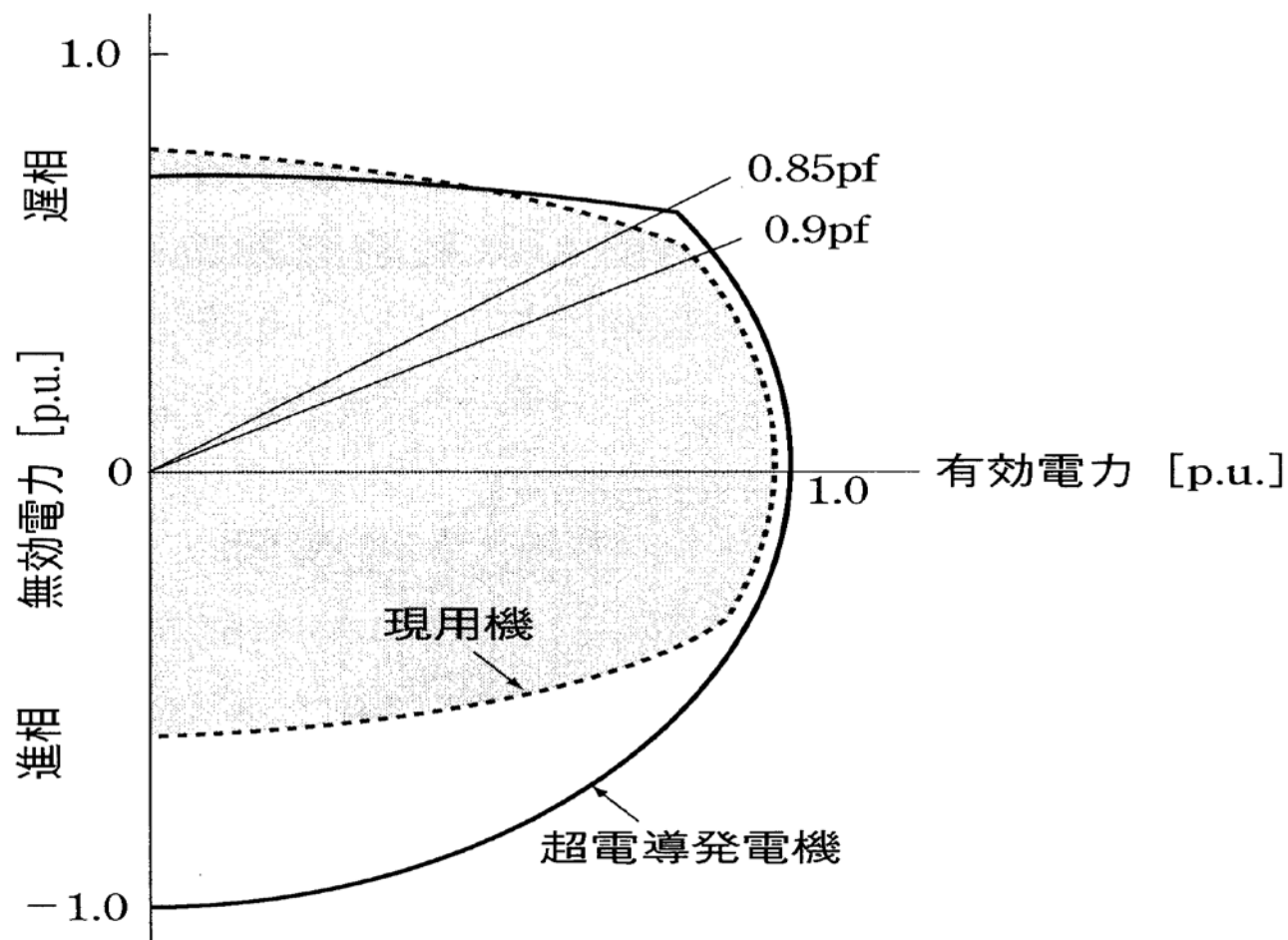
■ 超電導同期機による無効電力制御

- ・界磁磁束密度高で低同期リアクタンス設計可能
- ・従来の同期発電機、同期調相機との比較で本質的優位

⇒特に、電機子巻線に鉄心を持たないため、従来機に存在する電機子巻線の鉄心端部の過熱による進相無効電力の制限がない進相の無効電力の運転範囲が広い

⇒電力系統全体の電圧が上昇する傾向がある再生可能エネルギーが大量に導入された電力システムにおいては、電圧上昇を抑制できる進相運転範囲が広い超電導同期機の必要性が高まることも

超電導同期機による無効電力制御



● 図 7.3 超電導発電機の運転領域の拡大

「超電導発電機」上之蘭 博 編著 才一ム社 p169 (平成16年)

フレキシビリティを高める超電導技術(2)

■超電導ケーブルによる送電ルートのフレキシビリティ向上

- ・ケーブル敷設時の重量支持構造が簡略化
- ・従来ケーブルの敷設が困難箇所への敷設も可能
- ・電源/大容量負荷の立地制約緩和の可能性

⇒今後、電力ケーブル自体の軽量化が開発課題となる可能性もあり、超電導ケーブルの軽量性が課題解決につながる可能性もある。

フレキシビリティを高める超電導技術(3)

■ 超電導限流器による短絡電流抑制技術

- ・新規電源接続時は短絡電流が規定値以下を毎回確認
- ・現状の解決策

⇒電源の接続点を短絡電流が問題とならない地点に

⇒短絡電流の規定値を引き上げ遮断器を更新

- ・超電導限流器による解決策

⇒**新規電源の接続点に超電導限流器**を設置し短絡電流を従来の規定値以下に保つことが出来れば費用対効果は極めて高い

フレキシビリティを高める超電導技術(4)

■ SMES による電力システムの安定度評価と対策

- ・落雷などによる送電線の短絡事故等が起こっても継続的に安定に送電を継続できることをすべて確認した上で運転
- ・再生可能エネルギーによる発電が大量に導入された電力系統では、**電源と負荷のバランスと空間的配置が時々刻々変化**
- ・事前の電力系統安定度評価がすべての事象をカバーできていない可能性も

⇒電力システムの安定度をSMES により電力系統振動の固有値としてリアルタイムで計測する提案

⇒ SMES をそのまま**電力系統安定化装置として利用可能**

⇒ SMES は大きな電力kW を短時間電力システムに注入する装置としては理想的

「超電導技術への期待」に応える

■ 2050 年カーボンニュートラル社会を目指して電力システムがどのように貢献できるかは今後の研究開発が必要となる技術的課題も十分には整理されていない。

■ 我が国の限られた国土でカーボンニュートラル社会を実現する技術的ハードルは他国と比較して極めて高く、**超電導を含むあらゆる技術を総動員**する必要があることは間違いない。

■ **低温工学および超電導技術が貢献できる技術的課題**も多くあり、継続的に技術開発の状況を注視し、積極的に情報を発信していくことが重要である。



【御清聴ありがとうございました】 「日本の電力システムの現状・所来展望と 超電導技術への期待」

公益社団法人 低温工学・超電導学会 会長

電力中央研究所 名誉特別顧問

秋田 調

低温工学・超電導学会主催 一般公開シンポジウム

「カーボンニュートラル社会創出に向けて
—低温工学・超電導技術の役割を語る—」

2022年6月22日

 電力中央研究所