

「電気を送る～電気の品質と送る技術～」
電力輸送，電気の品質（周波数，電圧）

平成26年2月3日

東京電力株式会社
パワーグリッド・カンパニー
系統エンジニアリングセンター
所長 岡本 浩

目次

1. 電気を送るしくみ
2. 電気を送る設備（電力流通設備）
3. 電力流通設備の新しい課題
～再生可能エネルギー・分散型システムとの統合・電力全面自由化～
4. 将来のグリッドに向けて

1. 電気を送るしくみ

1-1 電気事業のはじまり

■1882年9月4日にトマス・エジソン[Edison Thomas Alva] (1847~1931) がニューヨーク市のパールストリートに直流配電システムを構築

【事業内容】

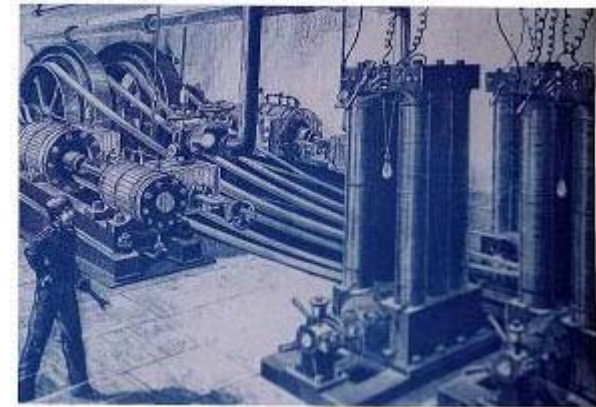
- ・中央ステーション（発電所）に火力発電機を設置[6台/出力540kW]
- ・100,000フィート（約30km）におよぶ配電網
- ・ウォール街の半径1kmにある白熱電灯千個強に供給



図. パールストリートの中央ステーション



図. 工場の発電機内観



1-2 直流から交流へ(1)

■1887(明治20)年に東京電燈は、直流送電による電気の一般供給を開始

【事業内容】

- ・ エジソンが開発した低圧直流方式を採用
- ・ 電燈局（発電所）から半径2km程度に送電
- ・ 低電圧により送電ロスが大きく、送電範囲も狭かったため複数の電燈局から送電

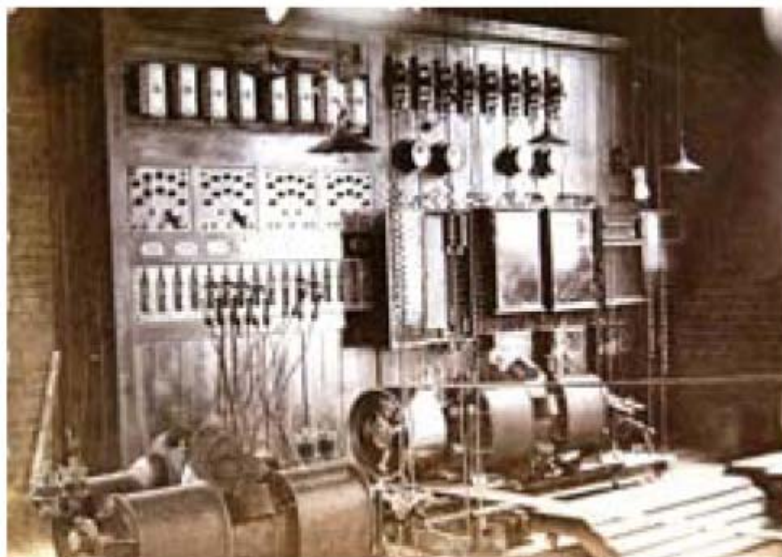


図. 麹町の第一電燈局配電盤

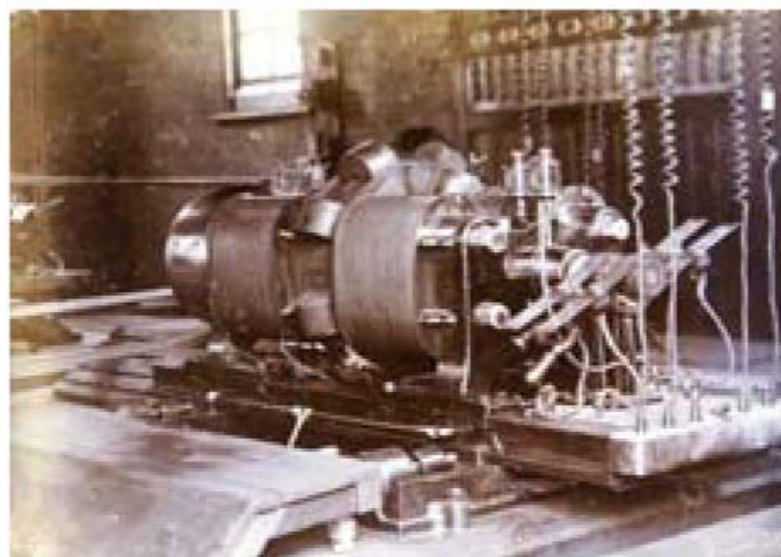


図. 麹町の第一電燈局に設置された
ブラックシェアーク灯用発電機

1-2 直流から交流へ(2)

■1897(明治30)年に東京電燈は、東京都内に分散配置していた変電所を一箇所に集約し、大規模交流発電所となる浅草火力発電所を本格運転した

【供給方法】

- ・ 直接2,000Vの交流で配電
- ・ 交流2,000Vで配電所に送電し、直流125Vへ変換した後、需要家へ配電



図. 浅草発電所全景

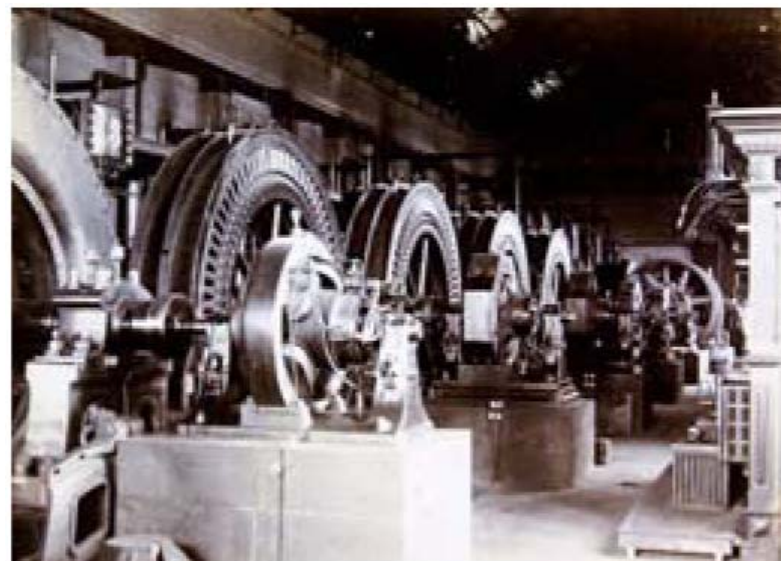
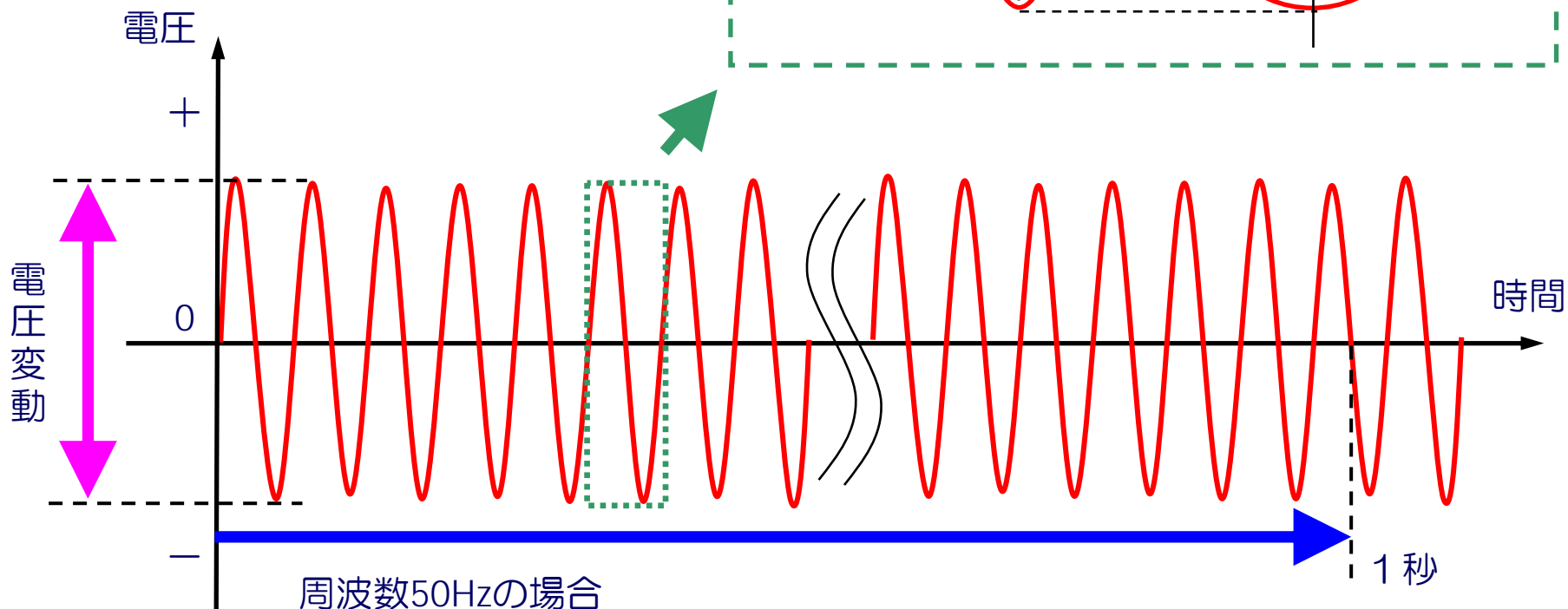
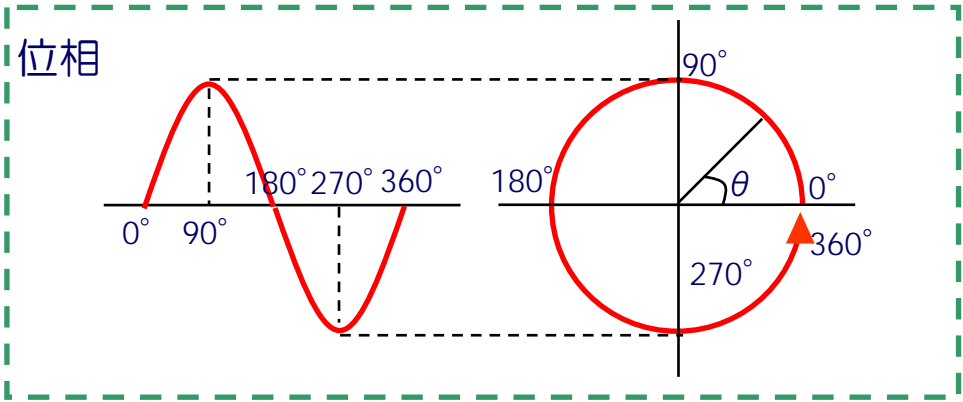


図. 浅草発電所AEG社(ドイツ)製発電機
【50Hzの始まり】

1-3 交流の電気

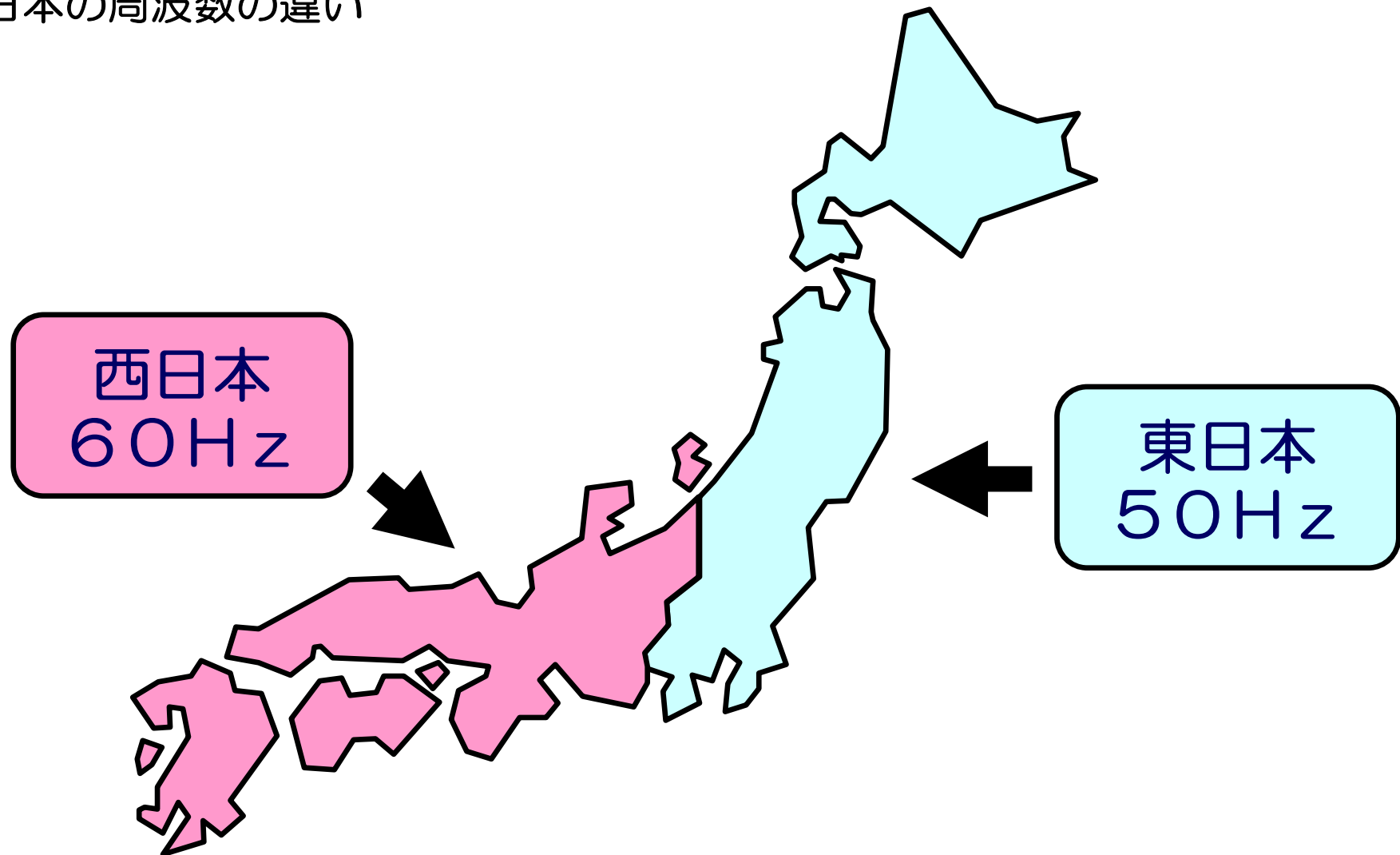
■交流について
周波数・電圧・位相とは



周波数50Hzの場合
1秒間に“+”と“-”の電圧変動が50回繰り返される

(参考) 交流の電気

■日本の周波数の違い



1-4 交流で電気を送る

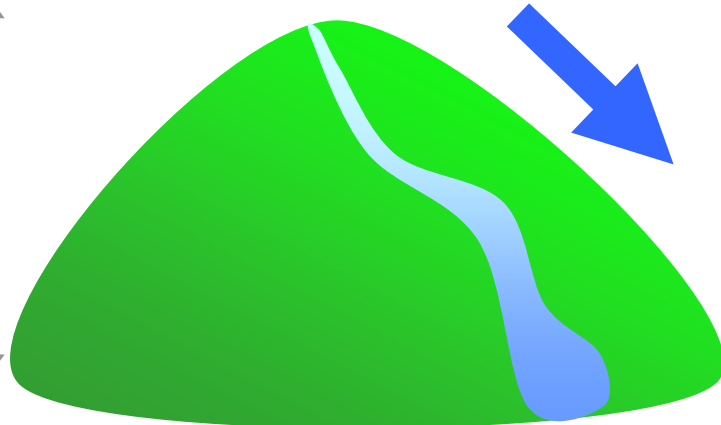
■水の流れるように、交流の電力は位相が進んでいる（標高の高い）ところから位相が遅れている（標高の低い）ところへ流れていく

●水の流れ

標高：高い

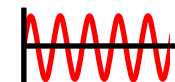
高低差

標高：低い



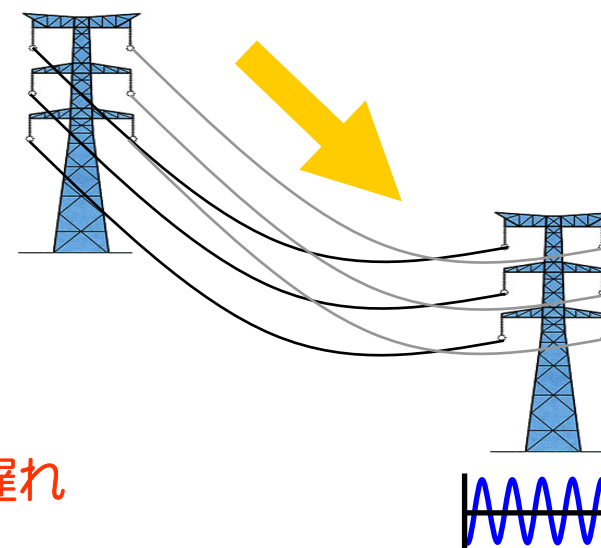
●電力の流れ

位相：進み

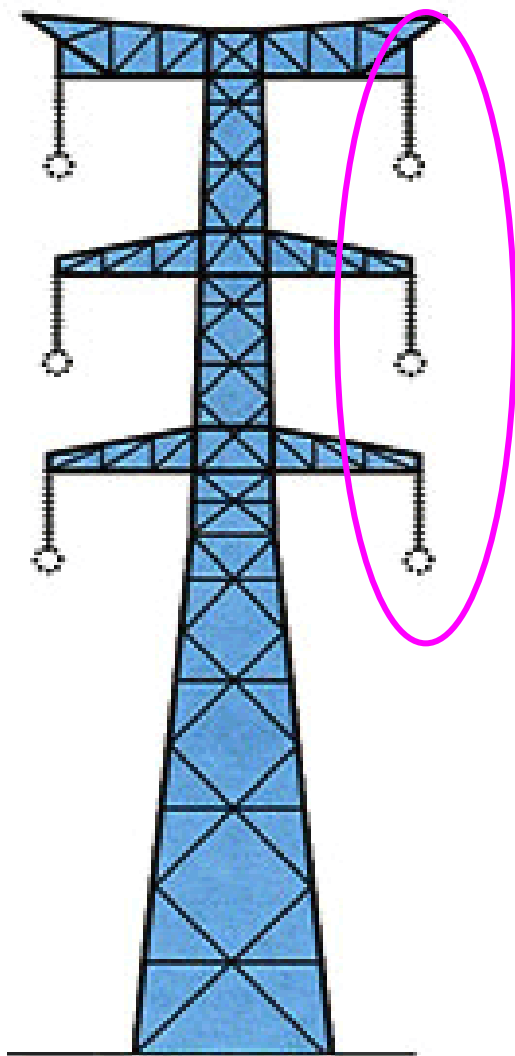


位相差

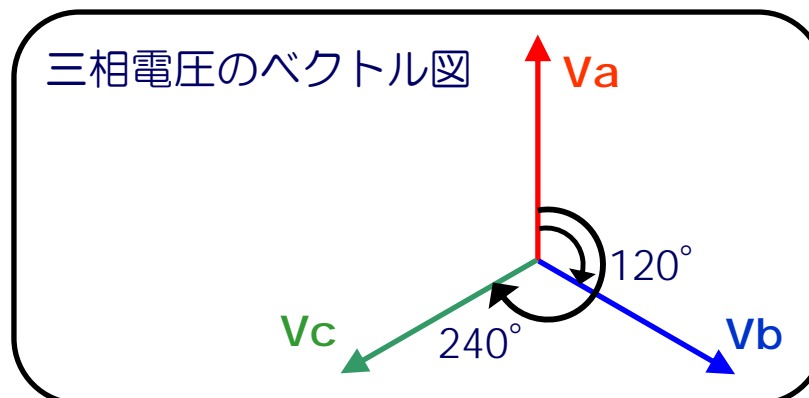
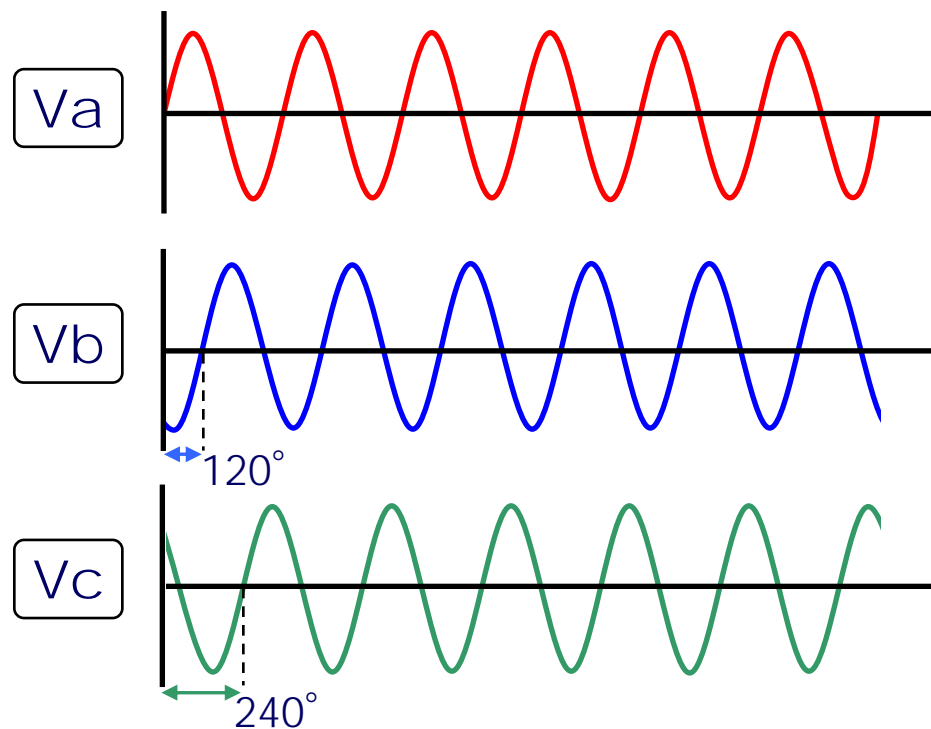
位相：遅れ



1-5 三相交流



2回線送電鉄塔図



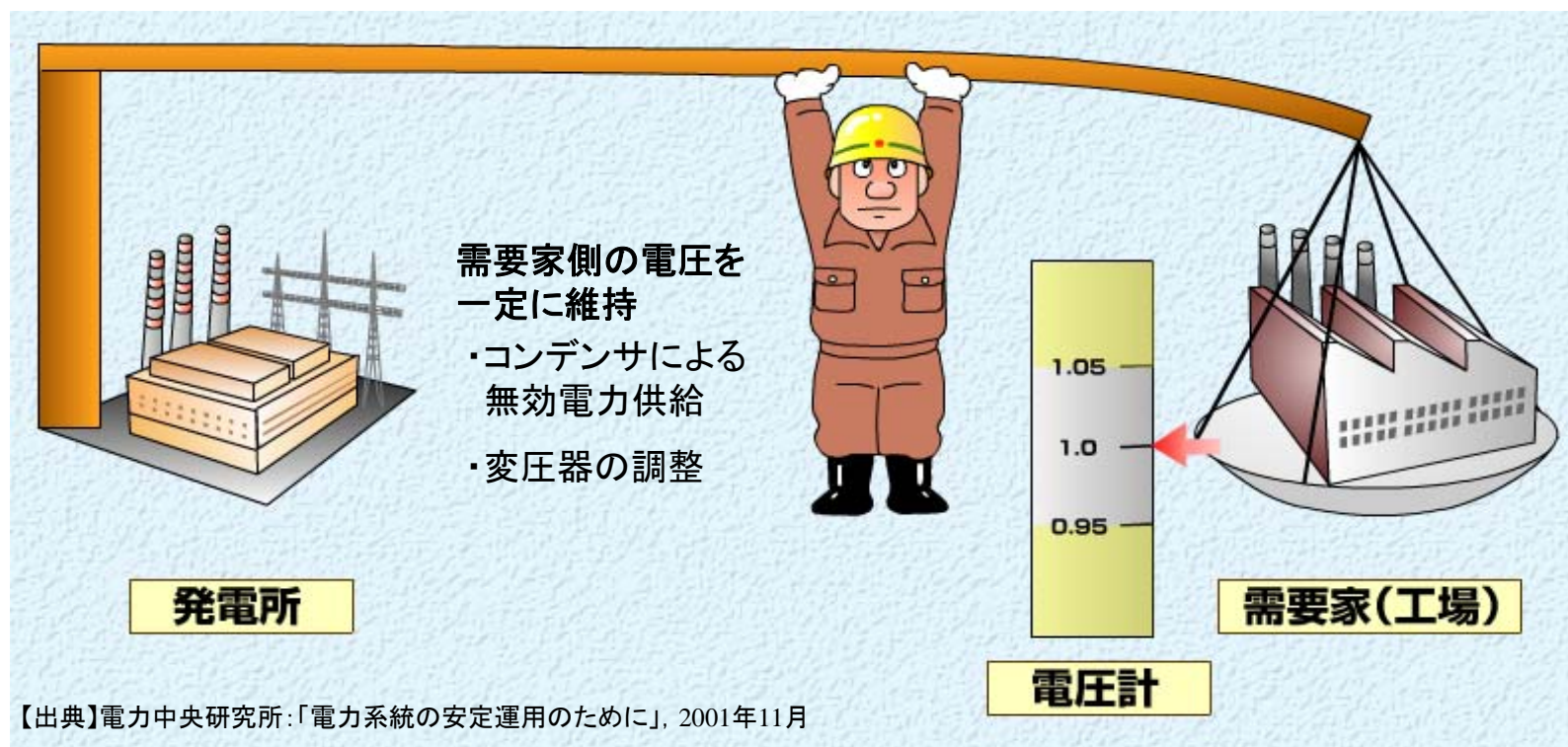
1-6 パワープールと周波数

- 交流でつながっている範囲では、巨大な貯水池のように水位（周波数）はどこも同じ。
- 需要側（取水口）から電気が流れていくが、同量を発電して、水位を厳密に一定に保つ必要がある。



1-7 電圧と無効電力

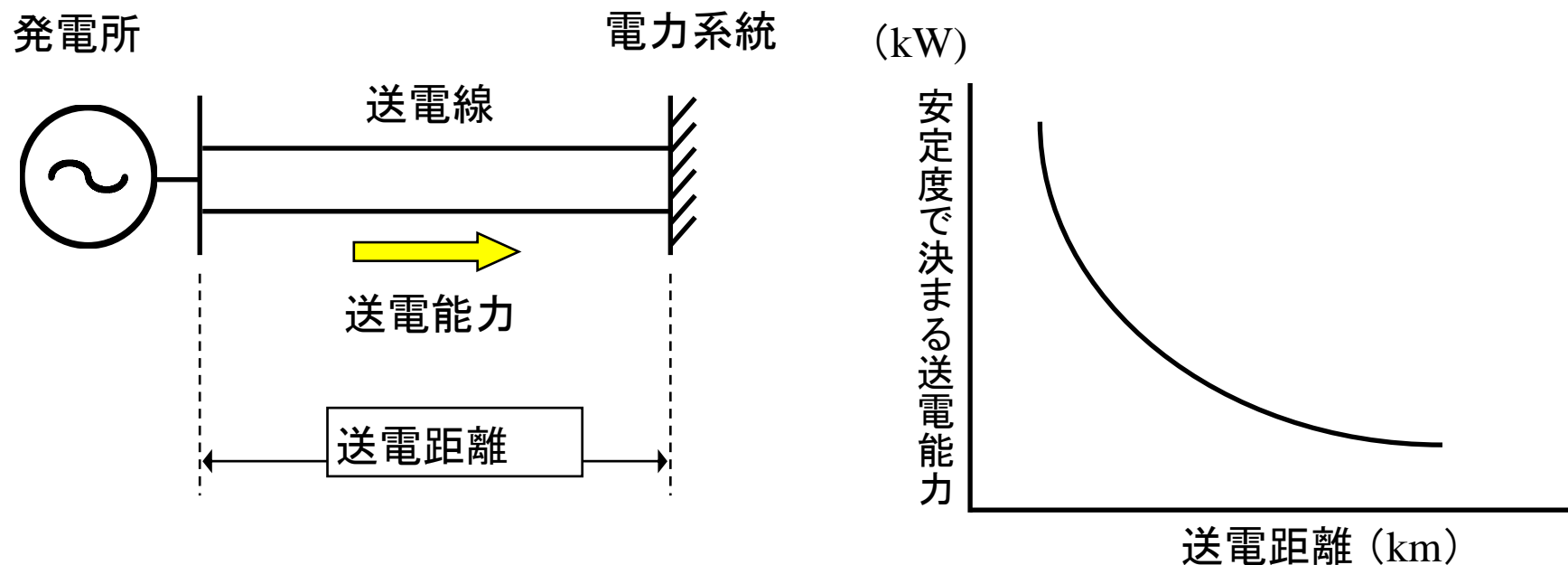
- 需要増加などで電気の流れが増すと、需要家側の電圧が低下（逆に流れが減ると電圧上昇）する。このため、コンデンサや変圧器の調整により系統内の電圧を維持している
- これは交流電力の送電に不可欠な無効電力（潤滑油的な性質の電力）が増加するため
- 電圧が適切に維持できないと、需要家設備が動作しなくなる、送電ロスが増すなどの弊害が発生する



【出典】電力中央研究所:「電力系統の安定運用のために」, 2001年11月

1-8 安定度

- 交流の電力系統では、安定度の問題（発電機の回転の足並みの乱れ）によって送電能力に限度が生じる。
- 安定度の限度を超えて送電すると、発電機は安定した運転を継続できない。安定度で決まる送電能力は同じ太さ（同じ電流を流せる能力を持つ）の送電線であっても、距離が長くなるに従い小さくなる特性がある。

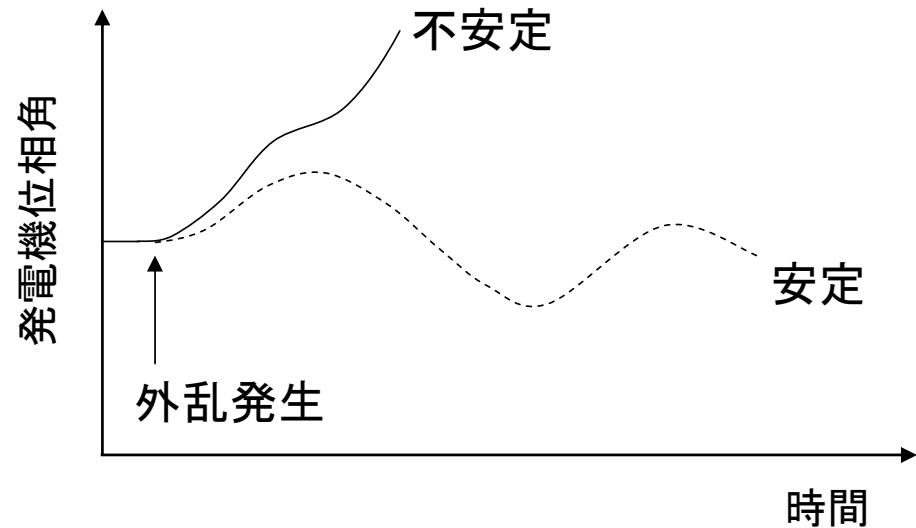


(参考) 安定度

■安定度の分類

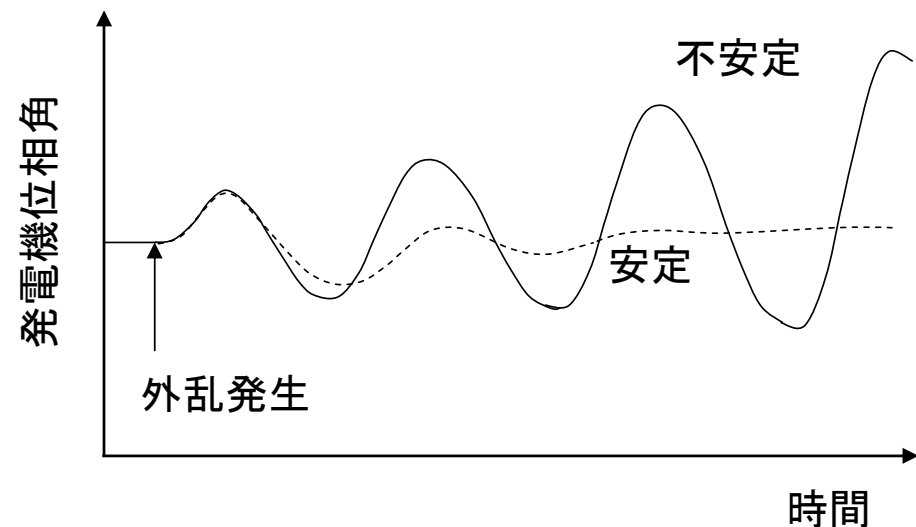
■ 過渡安定度

- 送電線への落雷など、大きな外乱発生時の安定度
- 外乱発生後1～2秒で発電機が同期外れ（脱調）



■ 動態安定度

- 負荷変動や送電線の投入・開放等の小さな外乱発生時の安定度
- 外乱発生後、数十秒程度以内に動揺が発散し、同期外れ（脱調）に至る

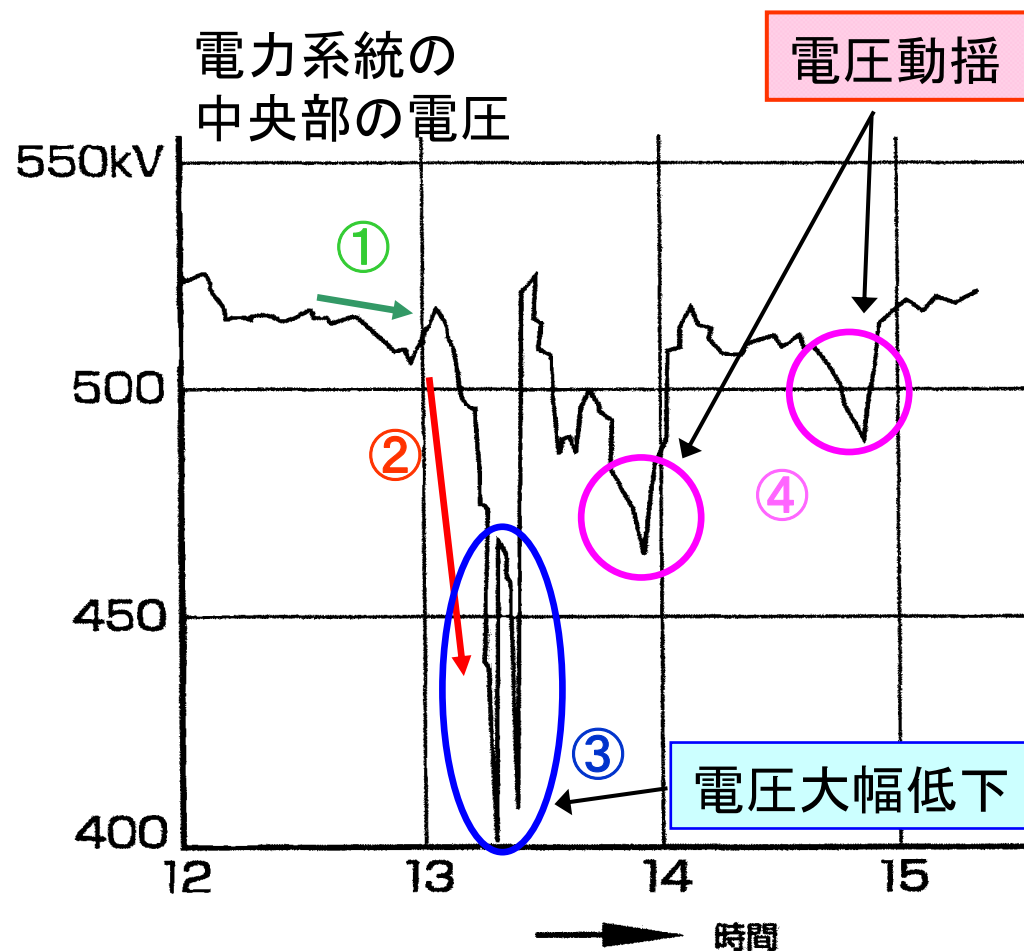


1-9 電圧安定性

■過去の事例

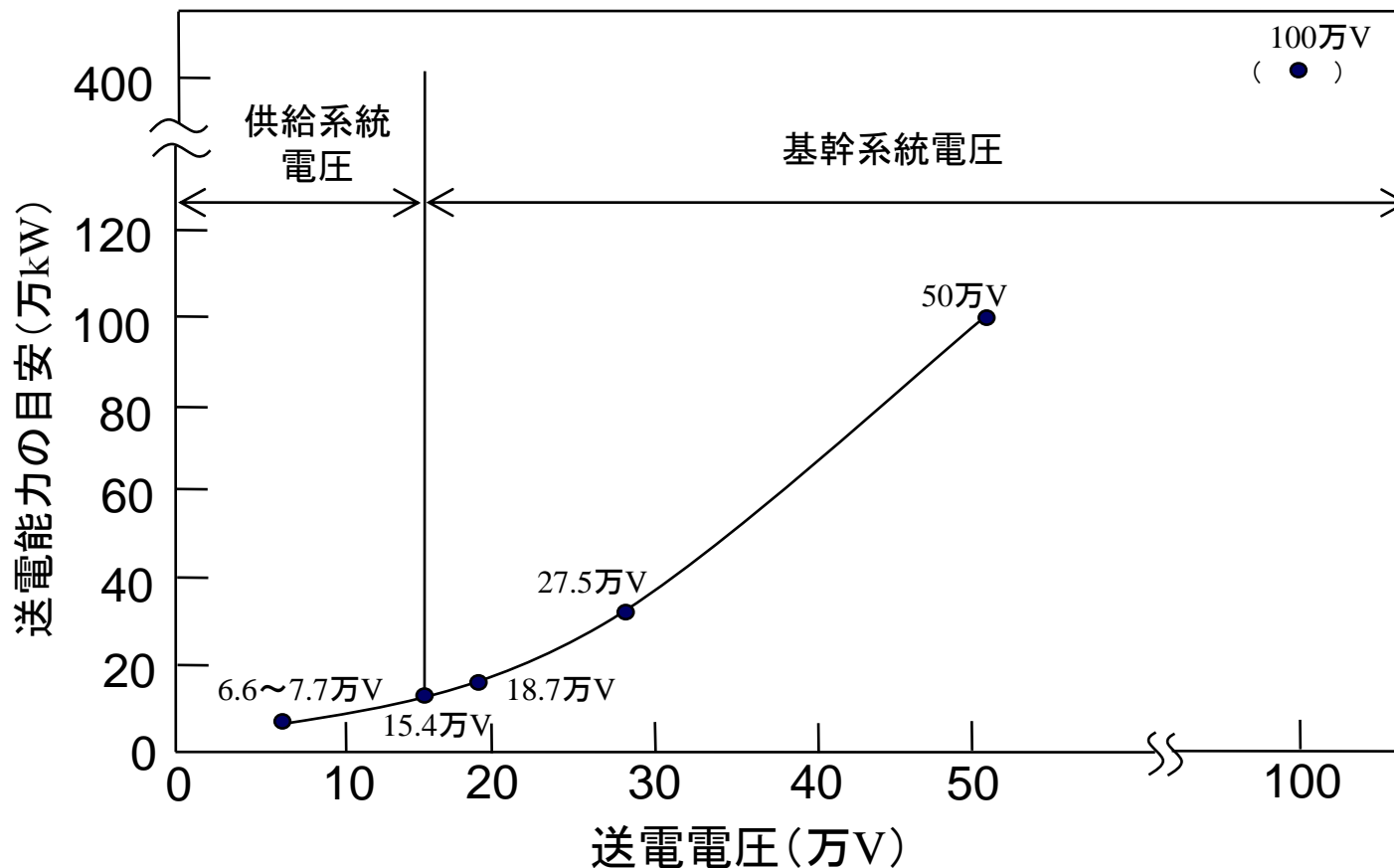
1987年7月23日に東京電力エリアで電圧安定性が原因で大規模停電発生

- ① 昼休み終了後、通常の数倍の速度（例年比）で電力需要が増加
- ② 系統の電圧を維持するためのコンデンサによる無効電力の供給が追いつかず、系統電圧が中央部の系統を中心に低下
- ③ 817万kW（東京電力の約1/5の需要）の需要家が停電
- ④ 結果として需要が減ったために、系統電圧は回復したがなかなか安定な電圧とならなかった



1-10 送電容量はどうやって決まる？

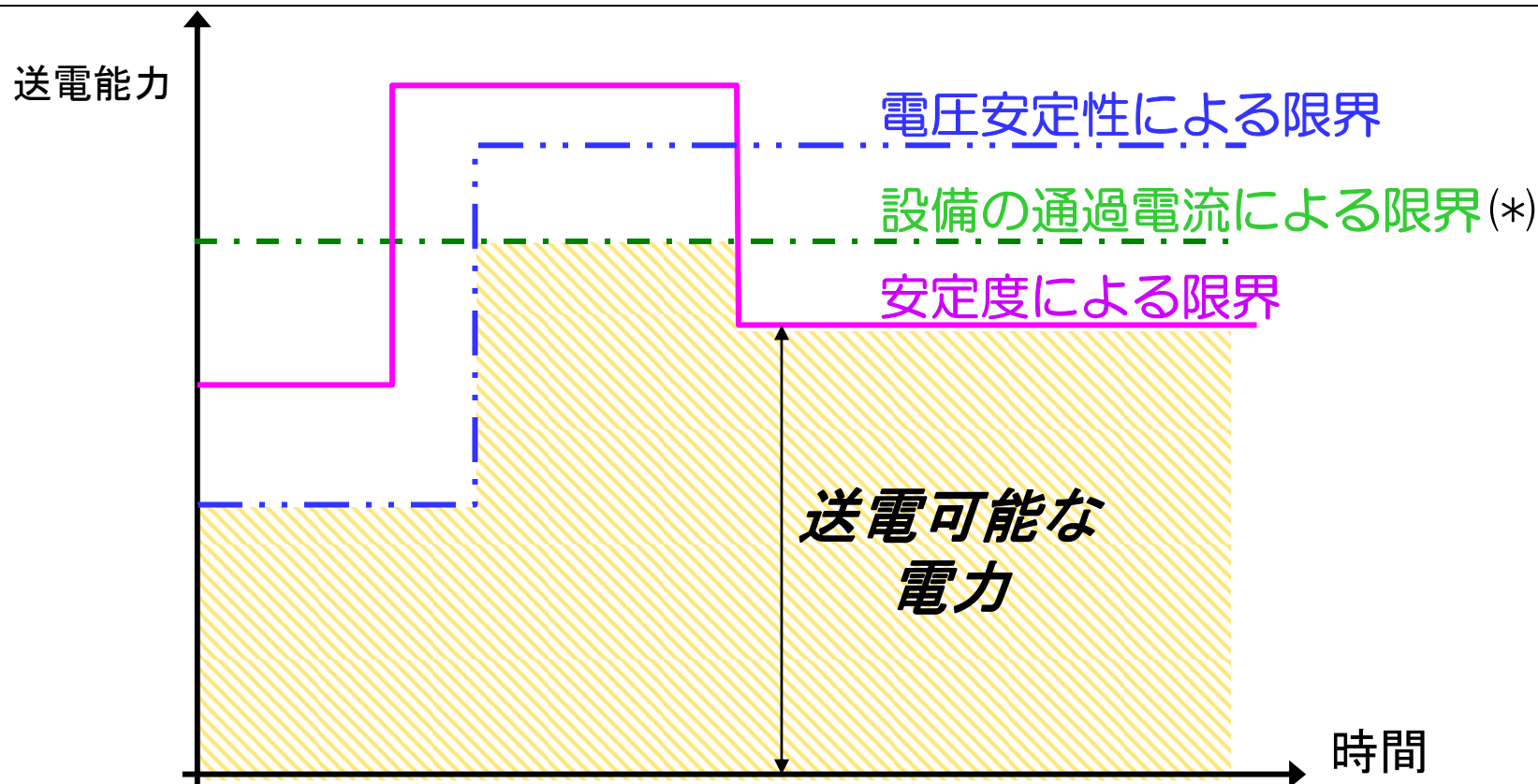
- 送電能力は、おおむね送電電圧の2乗に比例
- 送電ロス率は電圧の2乗に反比例。
 - 高電圧の基幹系統のロス率は小さい：2～3%（東京電力の例）



1-10 送電容量はどうやって決まる？

■ 「運転可能限界送電電力」の決まり方

通過電流制約，安定度制約，電圧制約の最も厳しい制約が送電容量を決める
系統の状態によって変わるため詳細なシミュレーションによって確認

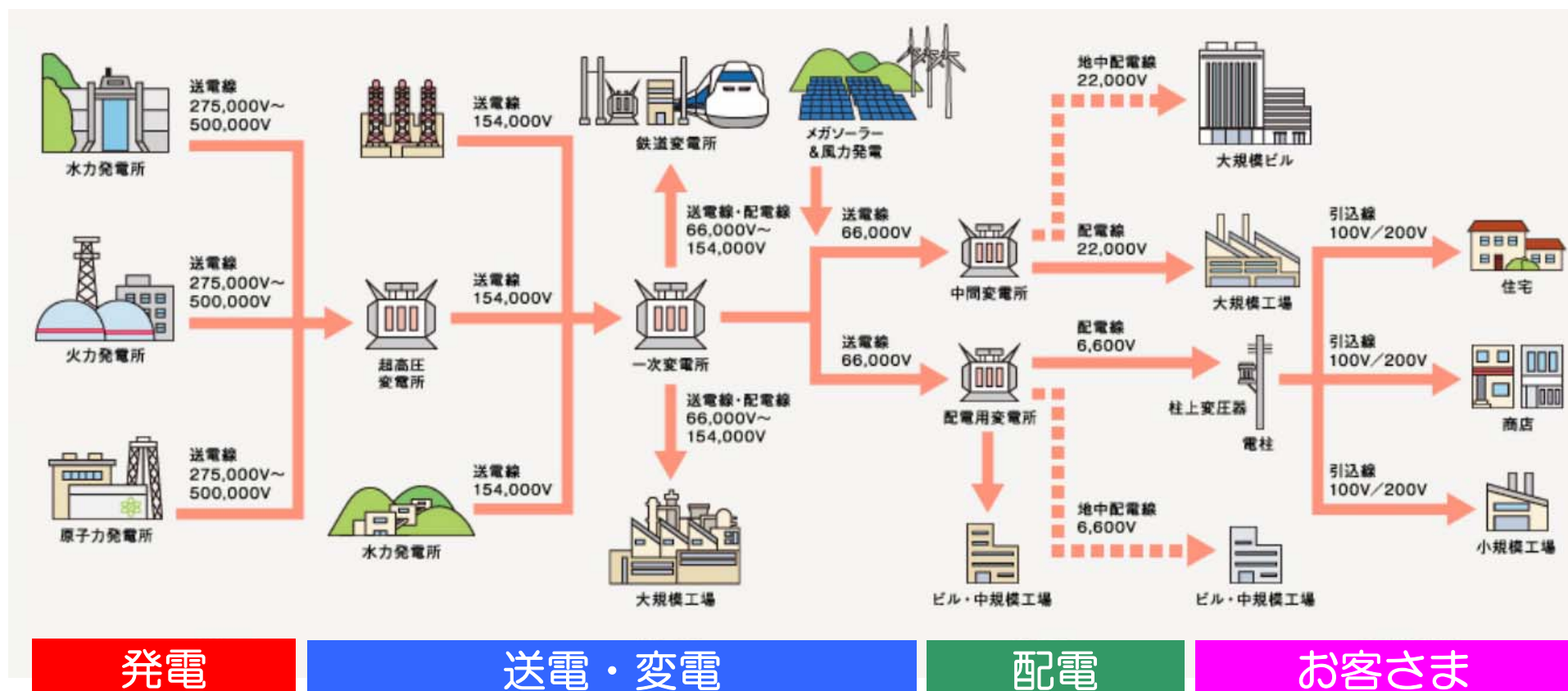


(*) ネットワーク内の設備（送電線，変圧器など）に電流を流しすぎると 温度が上昇しすぎて壊れてしまう。

2. 電気を送る設備（電力流通設備）

2-1 電力システムの構成

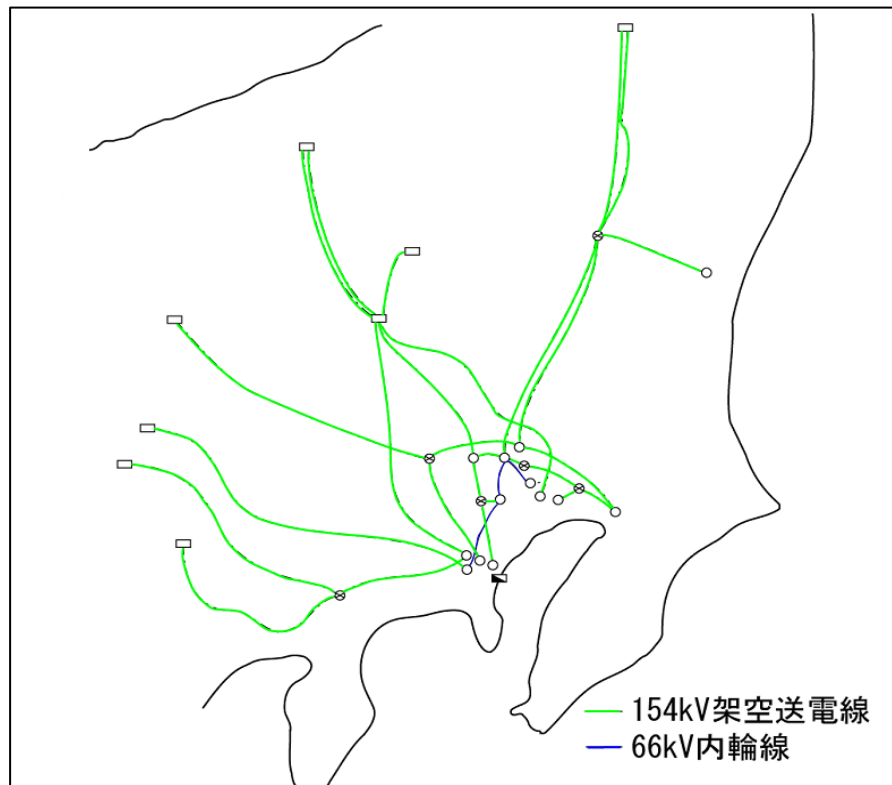
- 超高压（50万ボルト）から100ボルトまで一貫した設備運用
- 発電所群と変電所群を高位の電圧で結ぶ「送電系統」と、配電用変電所から消費者までを低位の電圧で結ぶ「配電系統」とで構成。



2-2 東京電力の電力ネットワークの発展の歴史

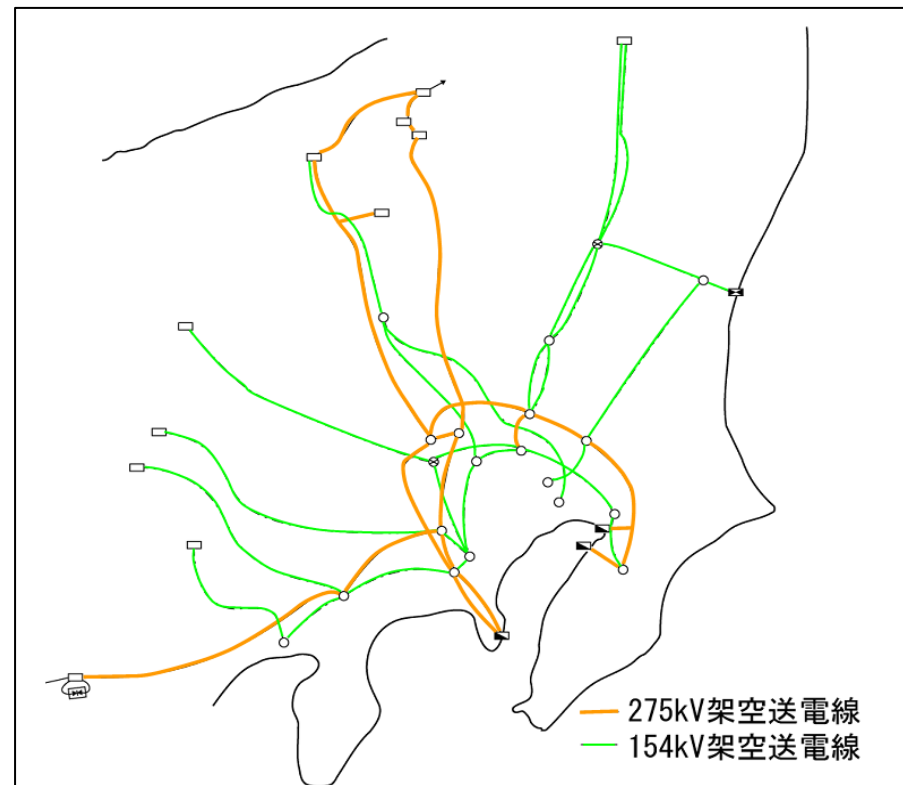
1955年当時

山間部の水力発電所と京浜地区を結ぶ
154kV送電線と都区内周辺を取り巻く66kV
内輪線で構成。



1965年当時

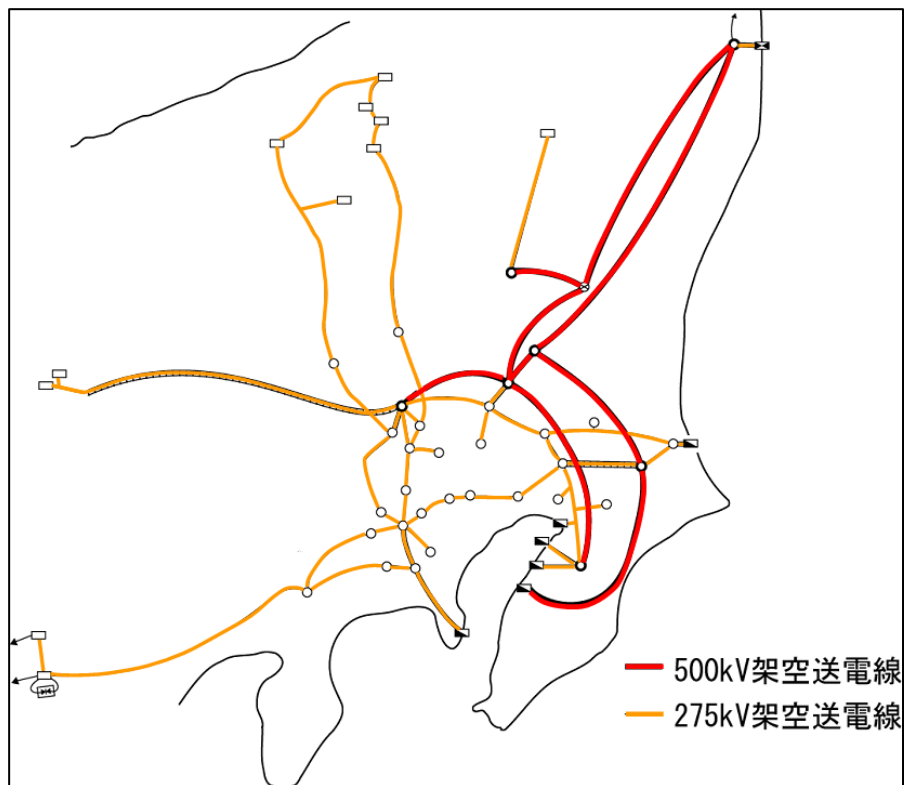
大容量火力、水力発電所建設により、安定的な電力システムとするため、275kV外輪系統を構築。



2-2 東京電力の電力ネットワークの発展の歴史

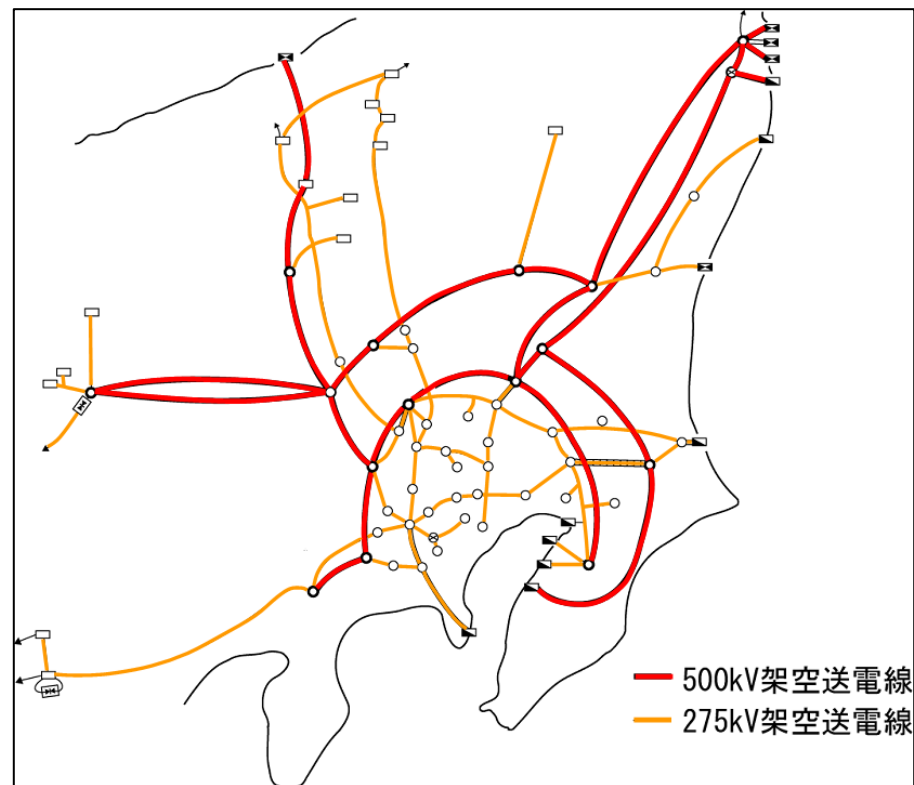
1975年当時

電力需要の増大、発電所の大容量遠隔化に対応するため、500kV外輪系統を構築し、275kV系統で都内に導入。



1985年当時

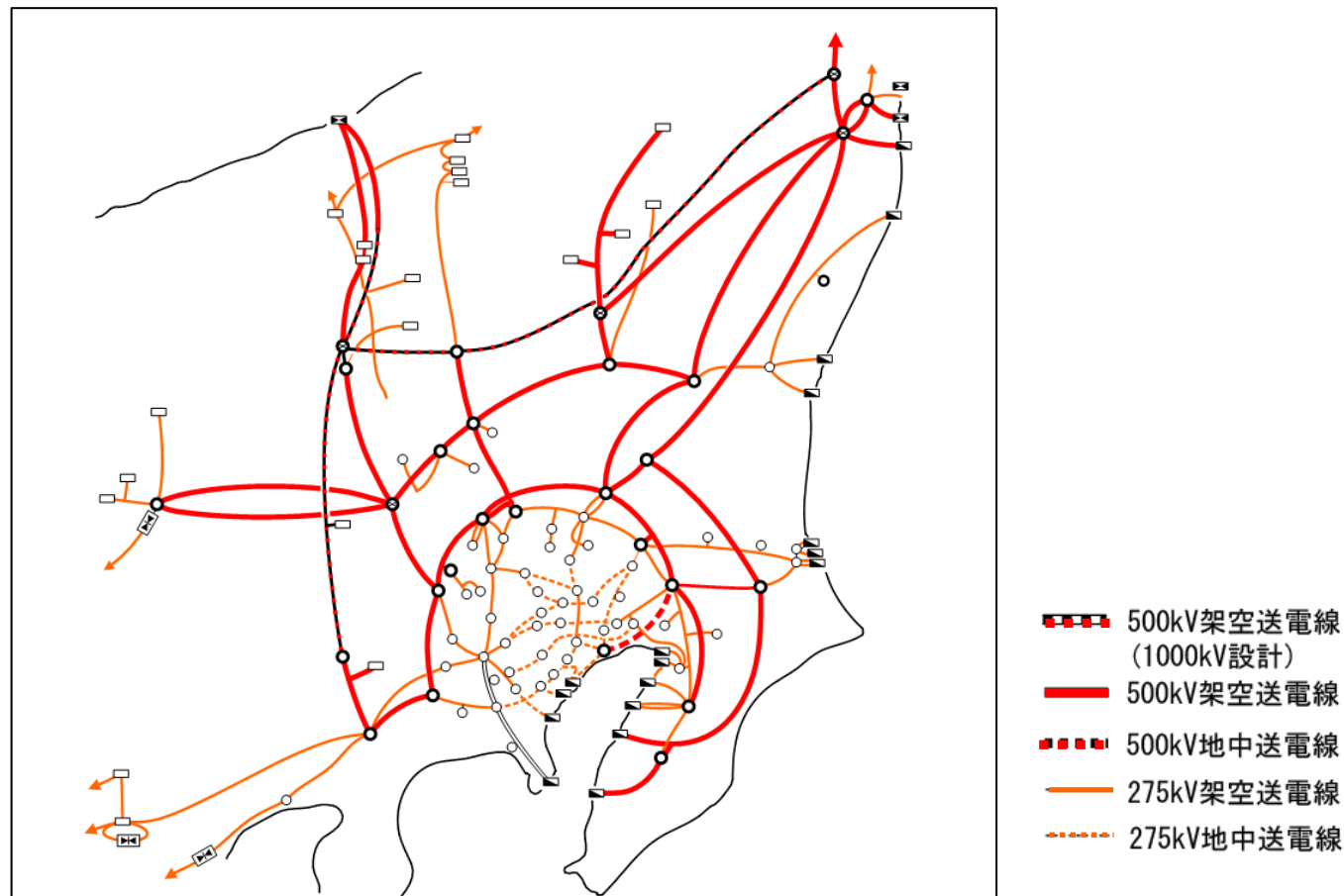
首都圏を囲む500kV二重外輪系統がほぼ完成。その後も、需要の増大、電源の開発に対応して、500kV系統を逐次構築。



2-2 東京電力の電力ネットワークの発展の歴史

2014年現在

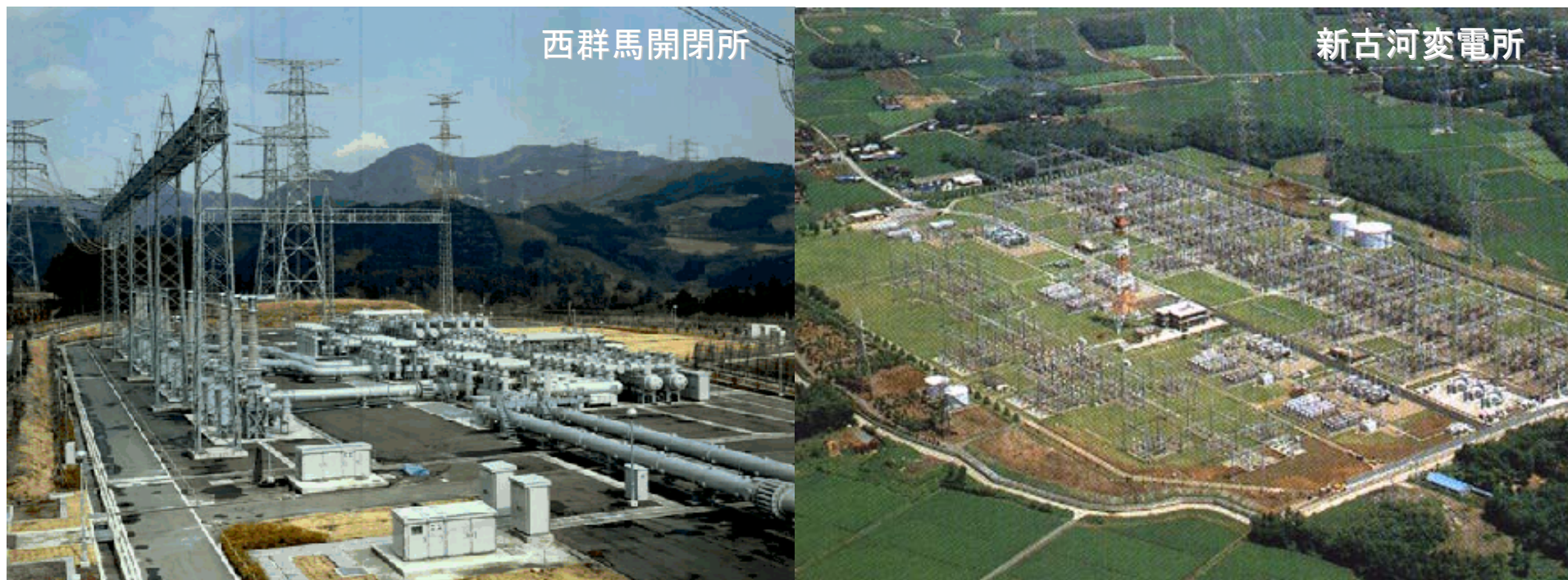
遠隔地の大容量発電所の開発進展、系統規模拡大に対応するため、500kV外輸系統の外側に1000kV設計送電線を構築（現在は500kVで運転中）。また、都内の需要増加に伴い、500kV系統を地中送電線・変電所で直接導入。



2-3 変電設備

■ 変電所とは

電気の電圧や周波数の変換を行い適正に維持するとともに、各系統の接続・開閉を行って、電力の流れを制御する電力流通の拠点となる施設

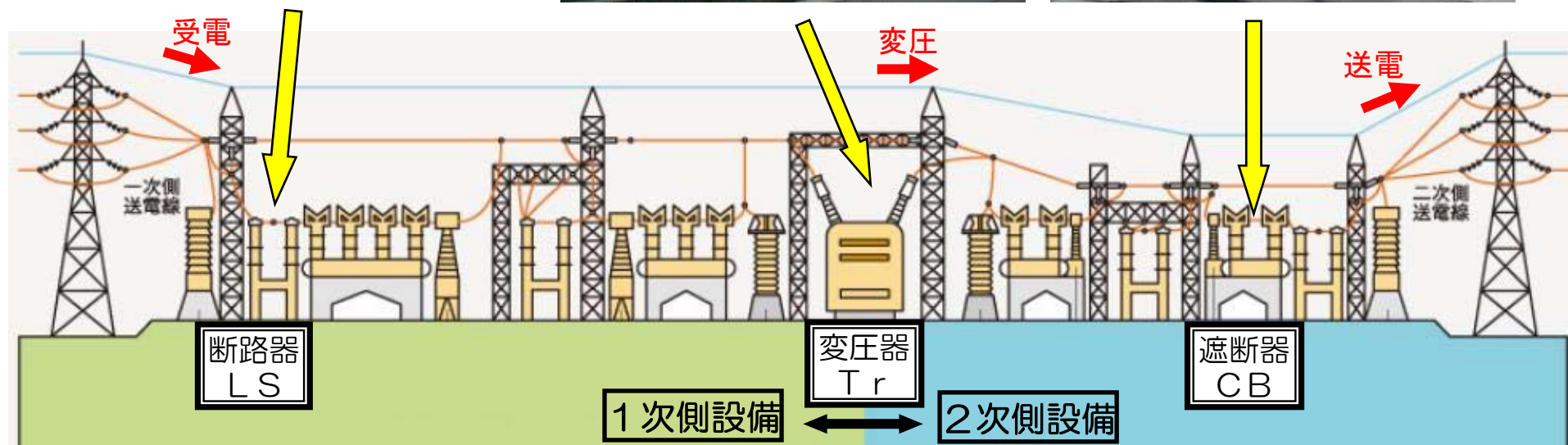


敷地面積

- ・ 西群馬開閉所: 約38,000m²
- ・ 新古河変電所: 約270,000m²

2-3 変電設備

■ 変電所を構成する設備



2-4 送電設備

■ 送電線は

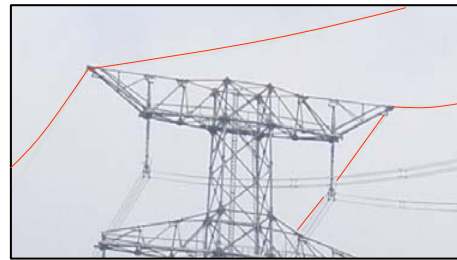
発電所と変電所、あるいは変電所どうしの間を結んで、大量の電気を高電圧で効率的に送る役目を持つ



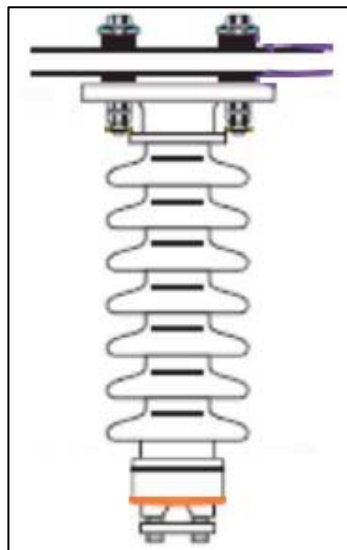
新新潟幹線
・電圧階級: 50万ボルト
・線路巨長: 約100km

2-4 送電設備

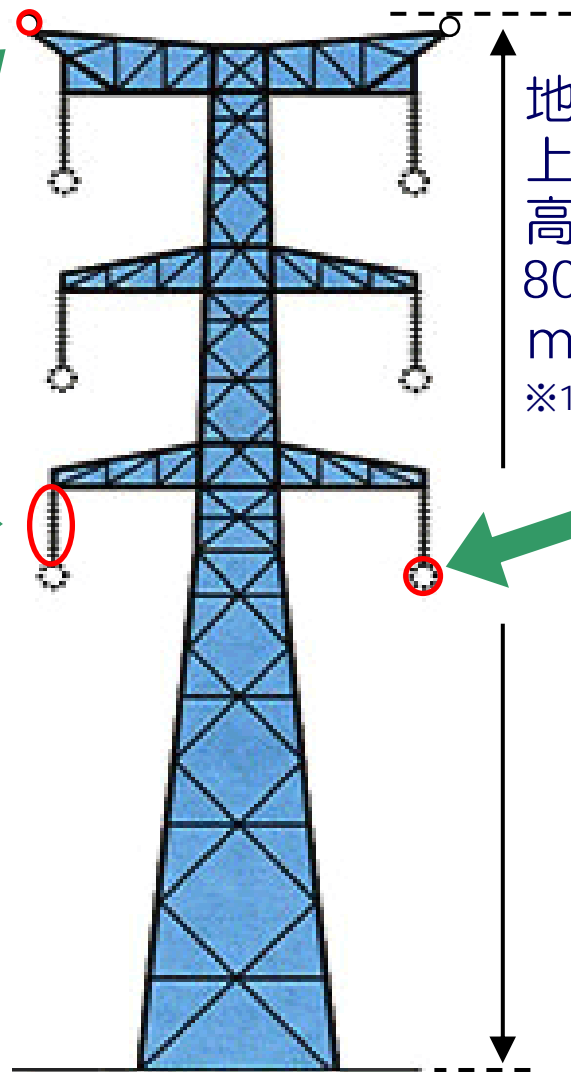
■送電線を構成する設備



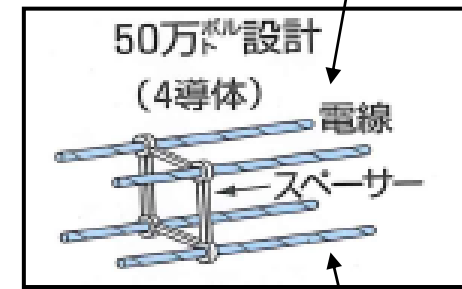
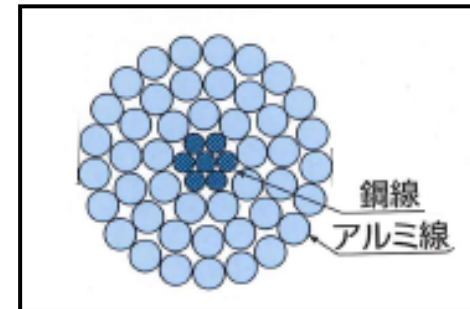
架空地線



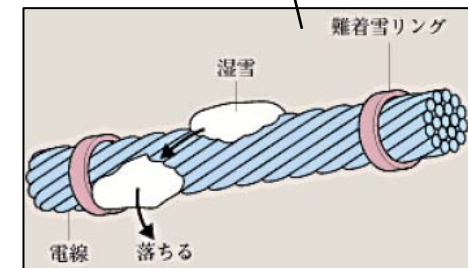
がいし



地上高
80
m
※1



送電線



※1:50万ボルト設計

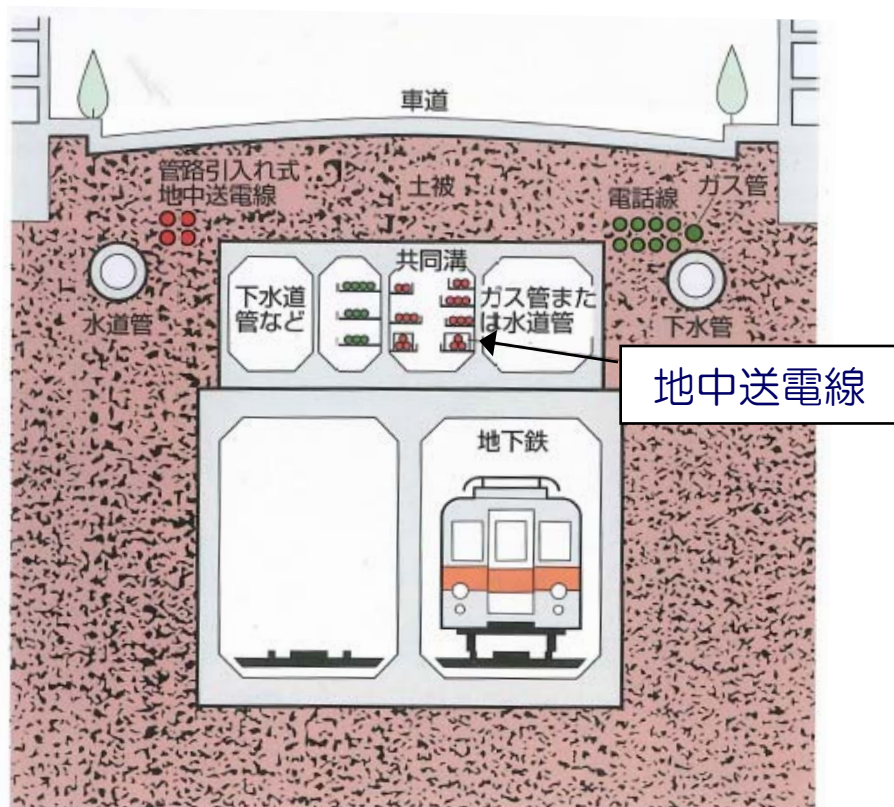
2-4 送電設備

■送電線と自然災害（落雷）



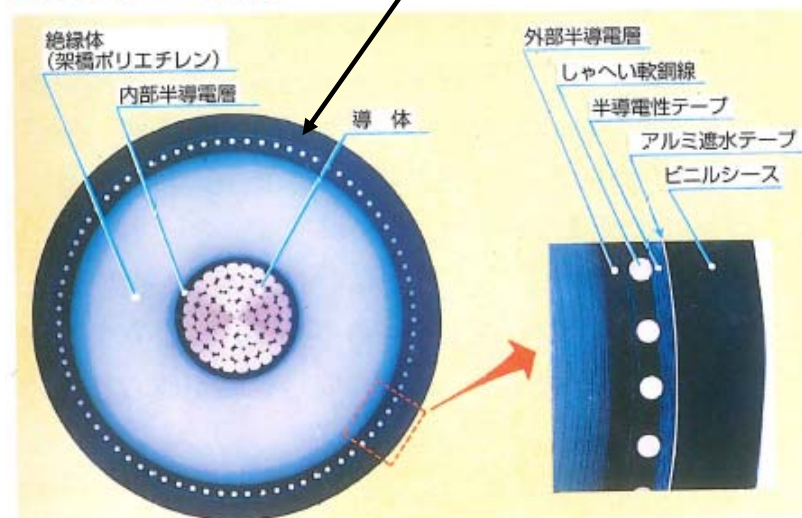
2-4 送電設備

- 高層ビルが立ち並ぶ都心地区には、高い供給信頼度と少ないロスで送電することができる地中送電線が使用されている
- 50万ボルトや27万ボルトの超高压で電気を送る



狭い空間に収納するため安全な絶縁処理が施されている

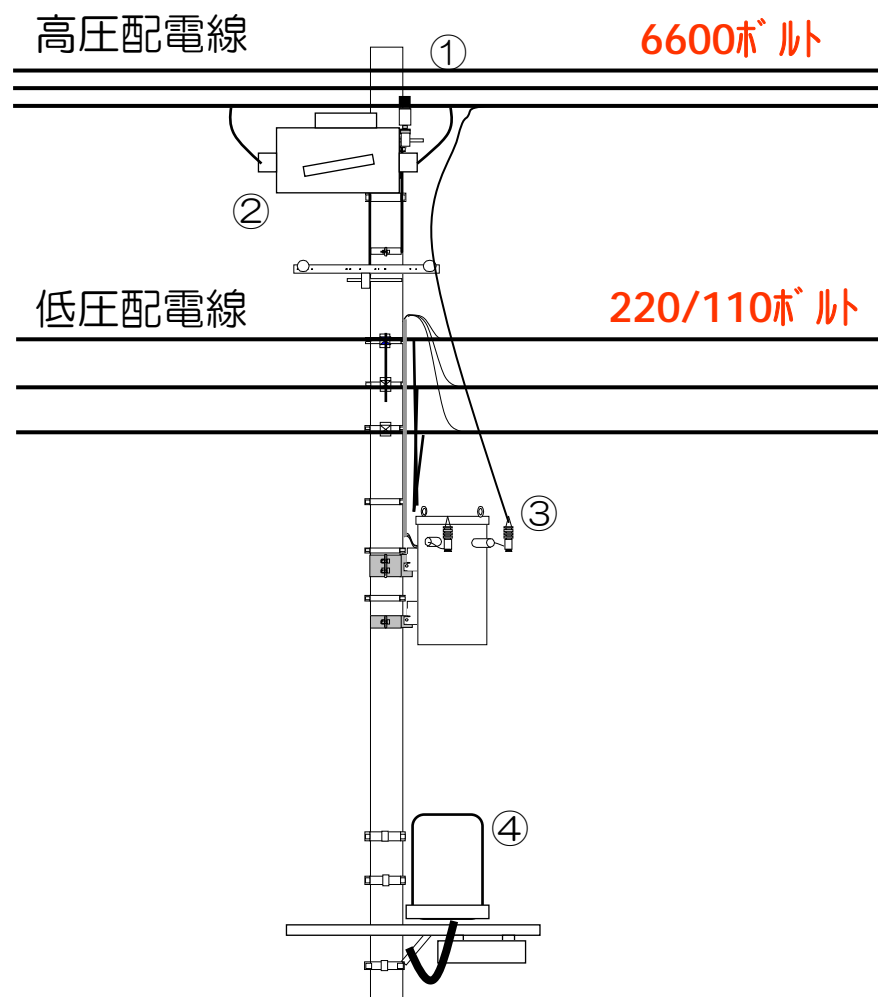
ICVケーブル



50万V設計
導体公称断面積:2,500mm²

2-5 配電設備

■配電線を構成する設備



①高圧結合器



②自動開閉器



③柱上変圧器



装柱写真

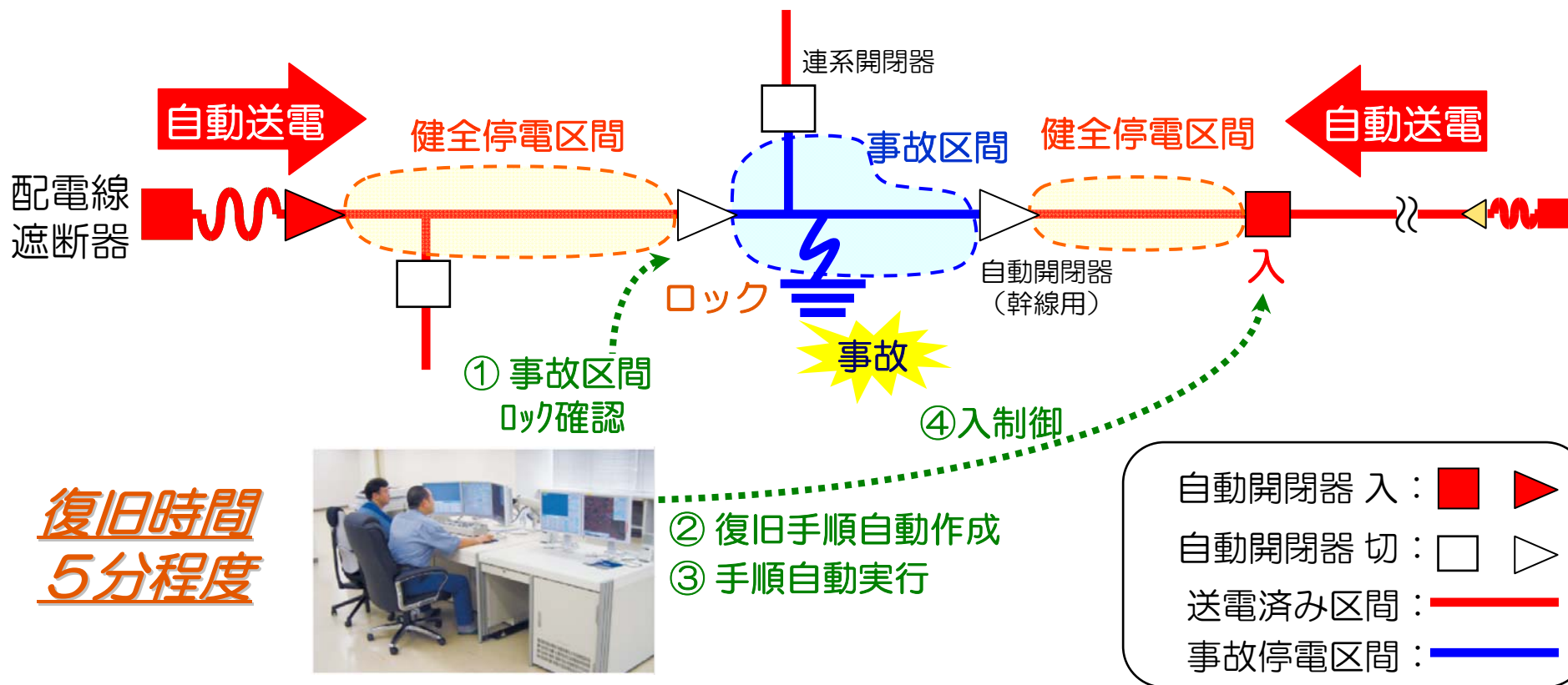


④遠方制御器

2-5 配電設備

■ 配電自動化の主な機能

- ・ 通常時：現地自動開閉器の「入」「切」を遠方制御（業務効率の向上）
- ・ 事故時：健全停電区間への自動送電（停電時間の短縮）
→隣接配電線と連系可能な自動開閉器（連系用）を自動的に遠方制御で「入」



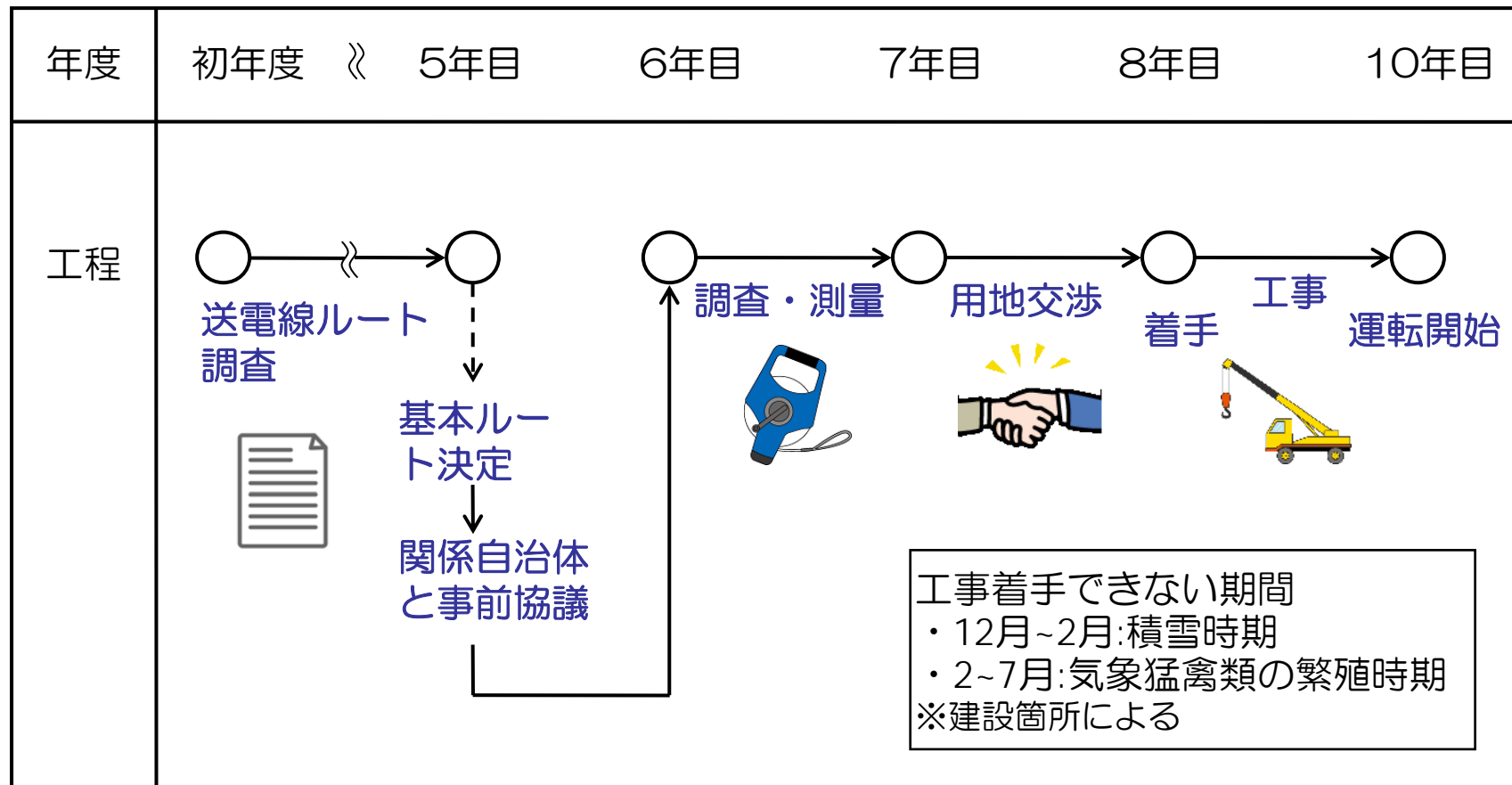
復旧時間
5分程度



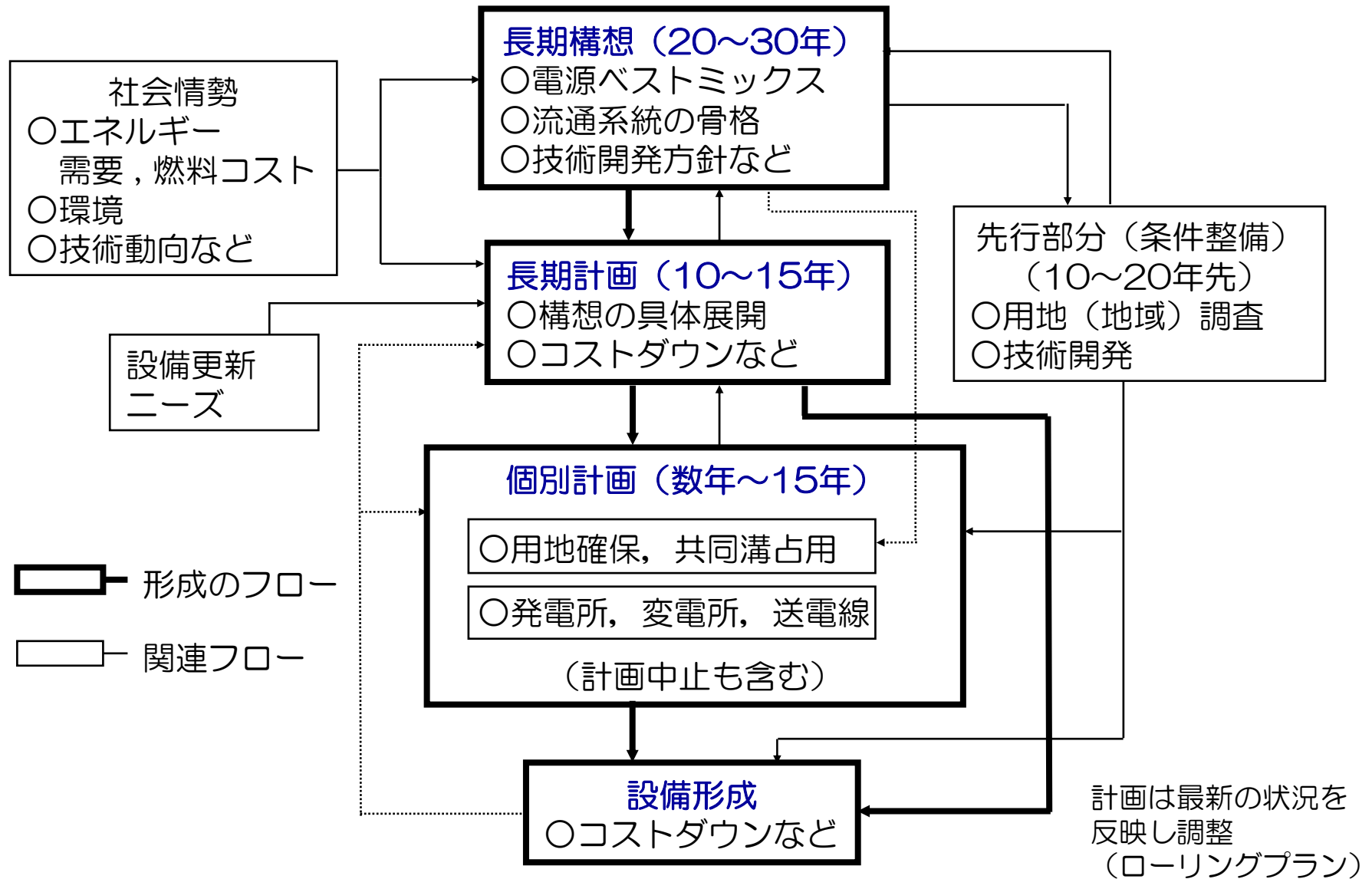
配電自動化システム（制御所）

2-6 電力流通設備の計画（系統計画）

■ 流通設備新設の所要工期（（例）送電線[50万V-2回線、亘長19km] ）



2-6 電力流通設備の計画（系統計画）



2-6 電力流通設備の計画（系統計画）

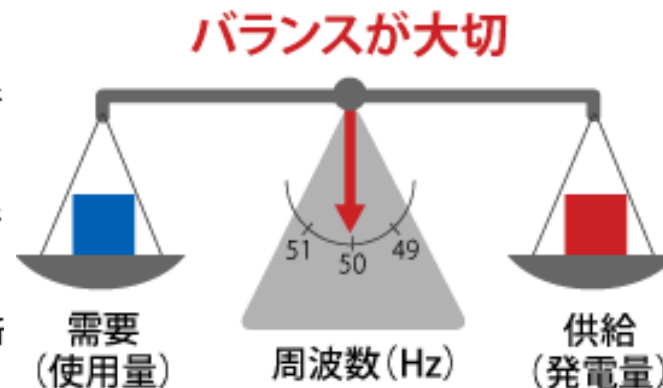
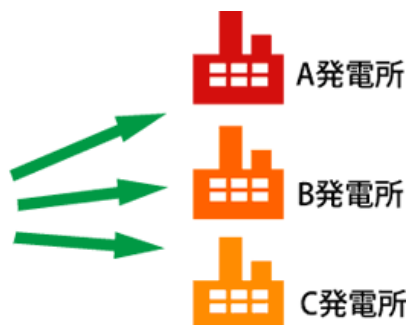
具体的計画事項

- 送電電圧と電線サイズ
 - 送電能力と経済性から評価
- 架空送電と地中送電
 - 環境性，経済性，地域性から評価
- 送電方式と回線構成
 - ループ方式と放射状方式
 - 多くの場合，架空送電線には1ルート2回線構成を採用
- 送電線の変電所への引き込み方式
 - π引き込み方式やT引き込み方式を採用
 - 送電能力，信頼度，経済性，運用面から評価
- 変電所規模と母線構成
 - 変電所の系統における位置づけ，供給規模，信頼度から評価
- 発電設備の仕様

2-7 電力流通設備の運用（需給運用）

■中央給電指令所（24時間3交替のコントロールセンター）で周波数調整

- 需給・周波数調整
- ・出力変化速度制約等を考慮した指令により、周波数を一定に維持。



朝の立ち上がり時の指令イメージ

時刻	発電所	発電機	出力変更(万kW)
09:00:00	A火力発電所	2号機	25→35
09:00:16	G揚水発電所		20→30
09:00:26	B火力発電所	2号機	90→100
09:00:26	B火力発電所	3号機	90→100
09:00:26	B火力発電所	4号機	90→100
09:00:30	B火力発電所	1号機	50→60
09:00:36	C火力発電所	1号機	90→100
09:00:36	C火力発電所	2号機	90→100
09:00:47	D火力発電所	1号機	50→60
09:00:47	D火力発電所	2号機	50→60
09:00:47	D火力発電所	4号機	50→60
09:00:47	D火力発電所	5号機	50→60
09:00:47	D火力発電所	6号機	50→60
09:00:58	H揚水発電所		25→30

中央給電指令所（東京電力）



2-7 電力流通設備の運用（系統運用）

○系統運用の役割

- 系統の安定運用（大規模停電防止・迅速な事故復旧）
- 経済的な運用

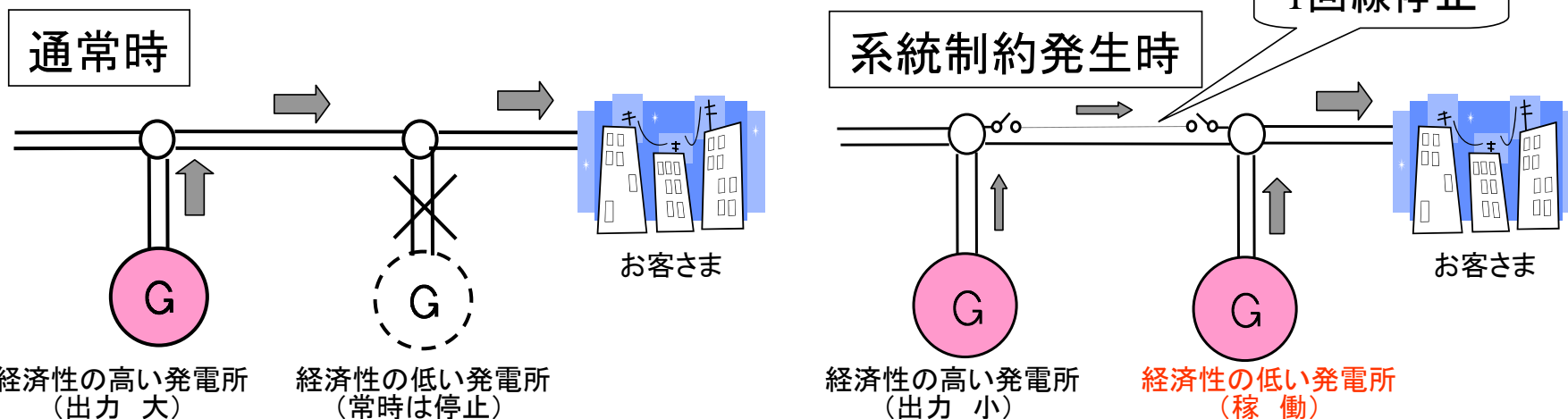
○事前の準備（系統運用計画）

- 様々な断面のシミュレーションにより、安定運転対策をオフラインで検討
 - ◆ 来年, 1ヶ月先, 来週, 翌日, あるいは正月, GWなどの特殊期間
 - ◆ 送変電設備の停止計画

○リアルタイムオペレーション（日々の運用）

- 需給バランス維持（系統制約を考慮した経済負荷配分(ELD)）、周波数制御(LFC)
- 電圧調整のための無効電力制御(VQC)
- 系統保護システムによる事故除去、事故波及防止等

<参考：系統制約を考慮した電源運用>



【参考】揚水発電

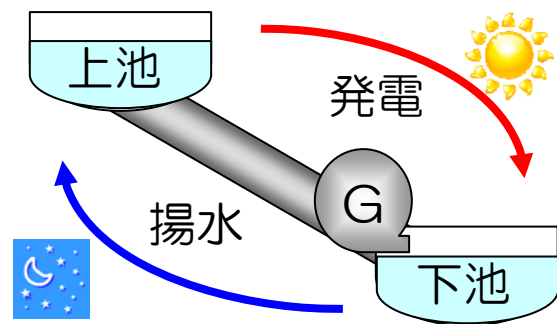
○揚水発電

- 効率約70%でロスが発生するため、必要量のみ稼動するのが経済合理的。
- 1日に利用可能な水量、上池と下池の容量制約、一晩で汲み上げ可能な水量には限界があることから、ある特定の1日だけでなく連続した複数日の池水位を総合的に考慮し、計画的な運用をする必要

揚水発電とは

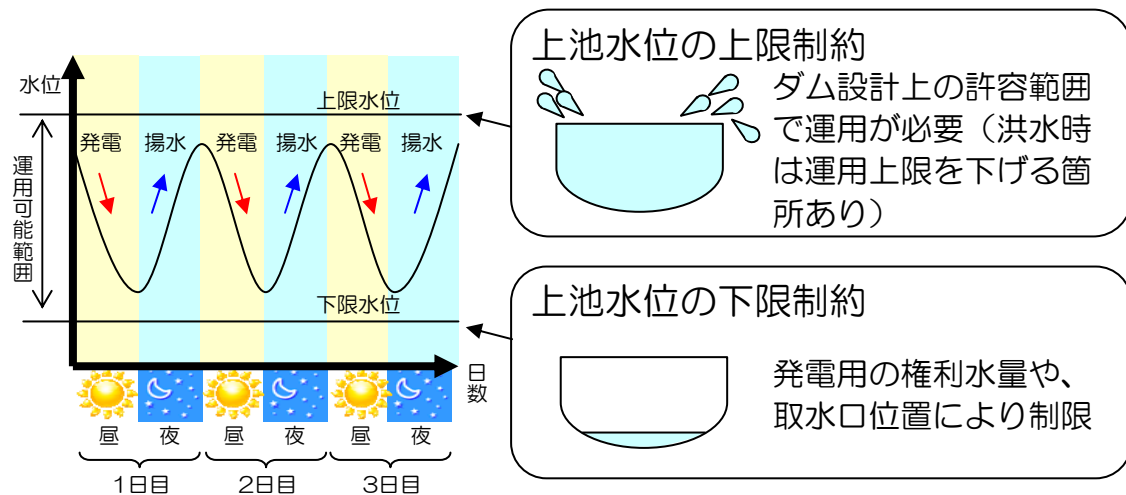
軽負荷時に下池の水を汲み上げ、重負荷時にこの水を発電に使用する発電所。

[出所]パワーアカデミー



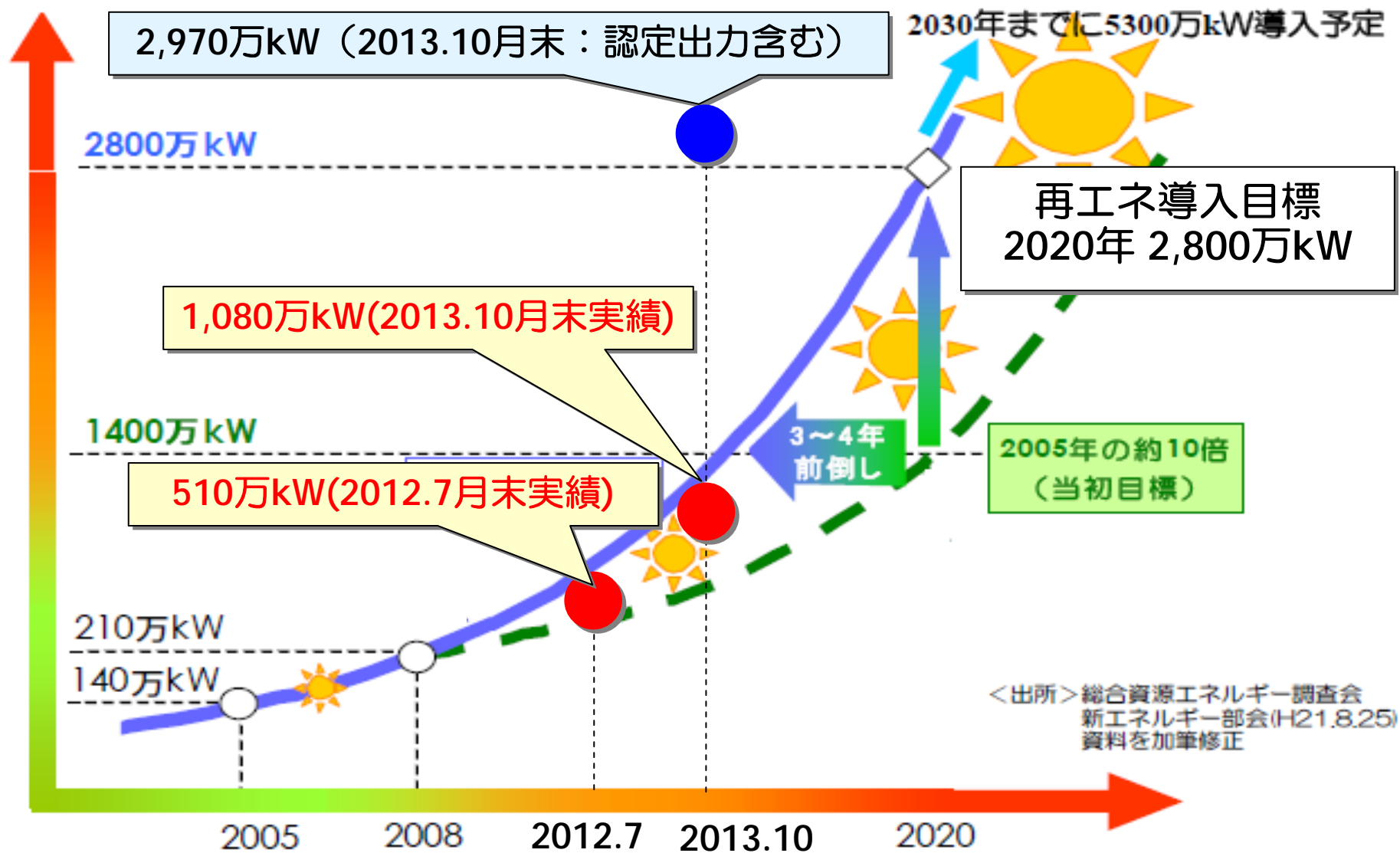
日々の水位運用

揚水発電の運用は池水位制約により1日単位では定まらず、週間単位の計画が重要である。



3. 電力流通設備の新しい課題 ～再生可能エネルギー・分散型システムとの統合 ・電力全面自由化～

3-1 再生可能エネルギーの拡大

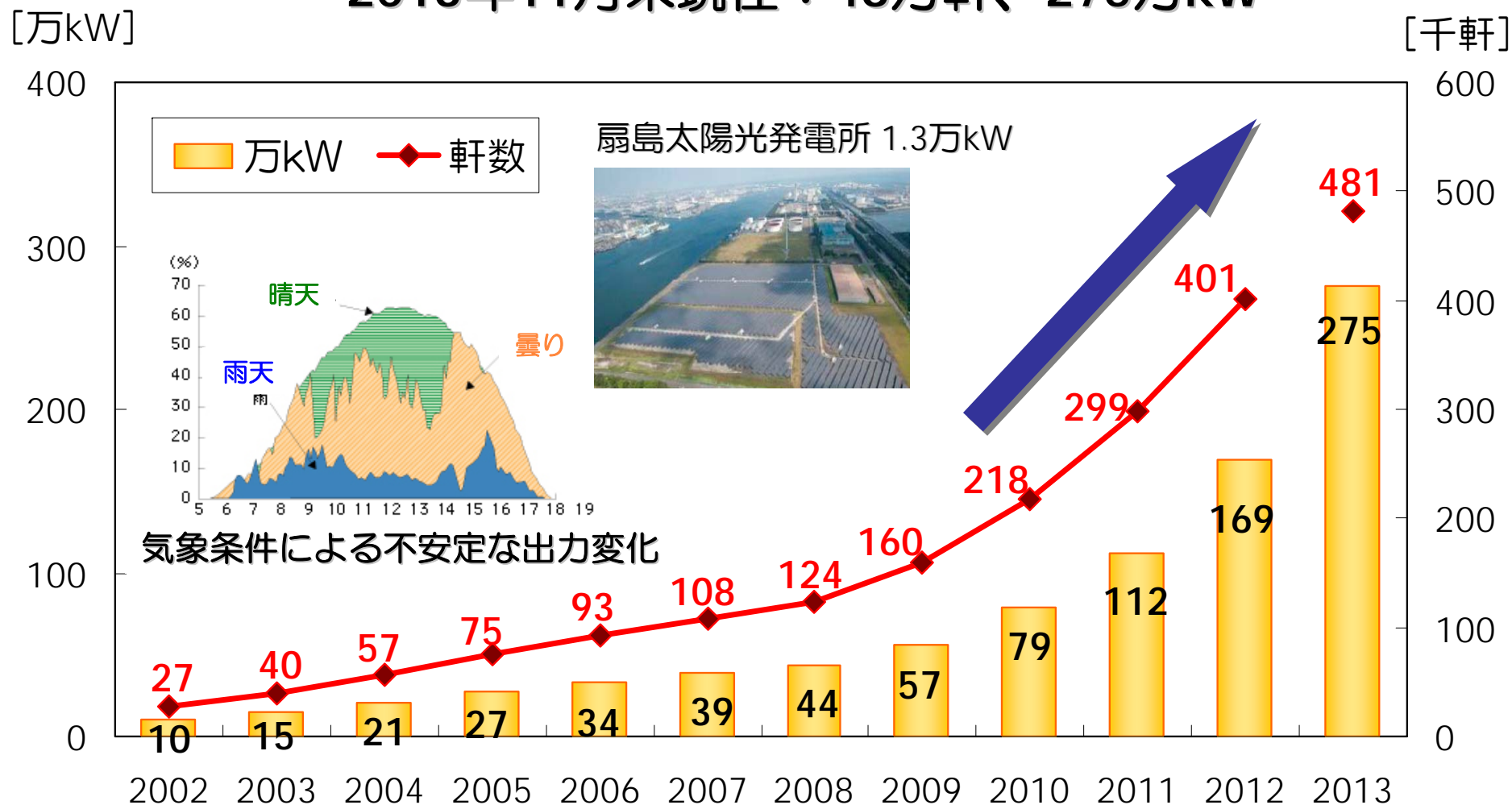


<出所> 総合資源エネルギー調査会
新エネルギー部会(H21.8.25)
資料を加筆修正

再エネ固定買取制度開始 2012.7~

3-1 太陽光発電の連系数と出力推移（東京電力エリア）

2013年11月末現在：48万軒、275万kW



<出所>東京電力HP：毎月更新

3-1 再エネの導入目標

再エネ導入計画（2030年時点）

	エネルギー 基本計画 (2010)		革新的エネルギー 環境戦略(民主党) (2012)	
	万kW	億kWh	万kW	億kWh
太陽光	5,340	571	6,328	666
風力	1,000	176	3,490	663
水力	2,778	1,095	2,378	1,095
地熱	165	103	312	219
バイオ	-	328	552	328
海洋	-	-	100	30

[出所]再生可能エネルギー関連資料, エネルギー環境会議, 2012

3-1 再エネの特徴① ～変動・予測困難～

■出力が変動する

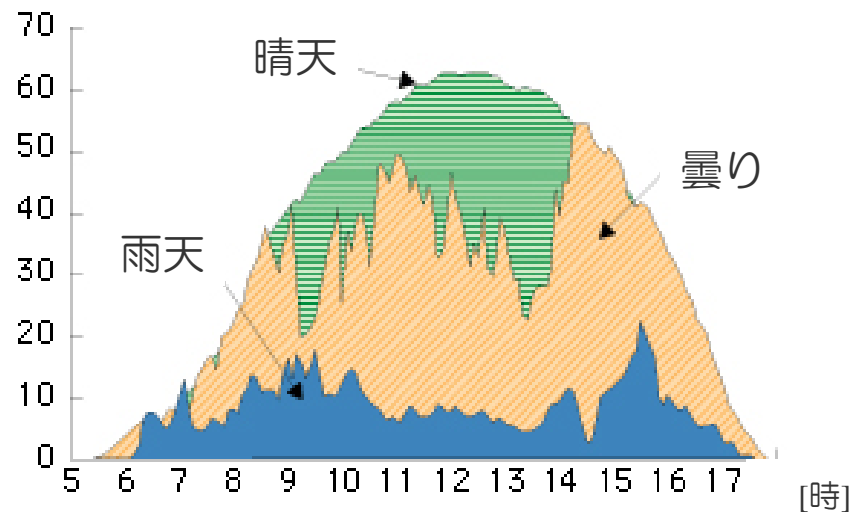
- 太陽光発電は太陽高度への依存を基本に，気象条件に大きく依存
 - 風力発電も気象条件に大きく依存
- 他の電源によるバックアップ画筆用

■出力の予測・把握が困難

- 予測精度は，概ね天気予報と同程度
- 小規模設備の実時間計測・通信はコスト面から困難

定格容量で割った出力 [%]

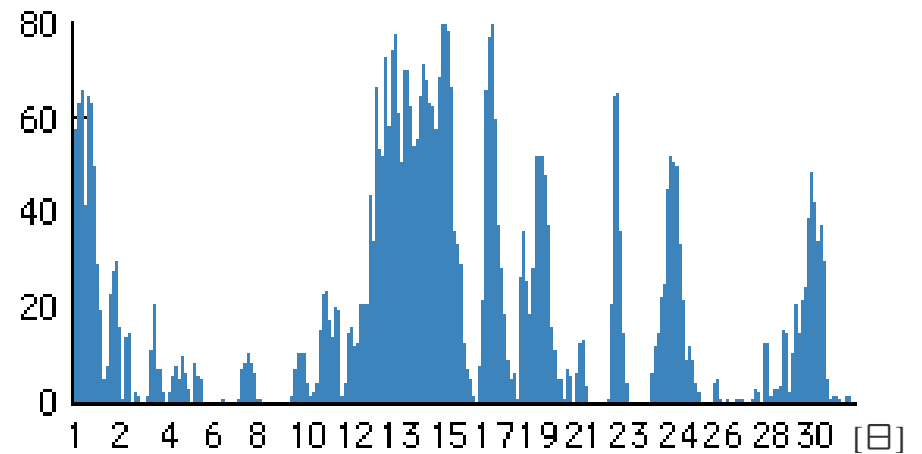
太陽光発電出力



[出所] Energy White Paper, METI

風力発電出力

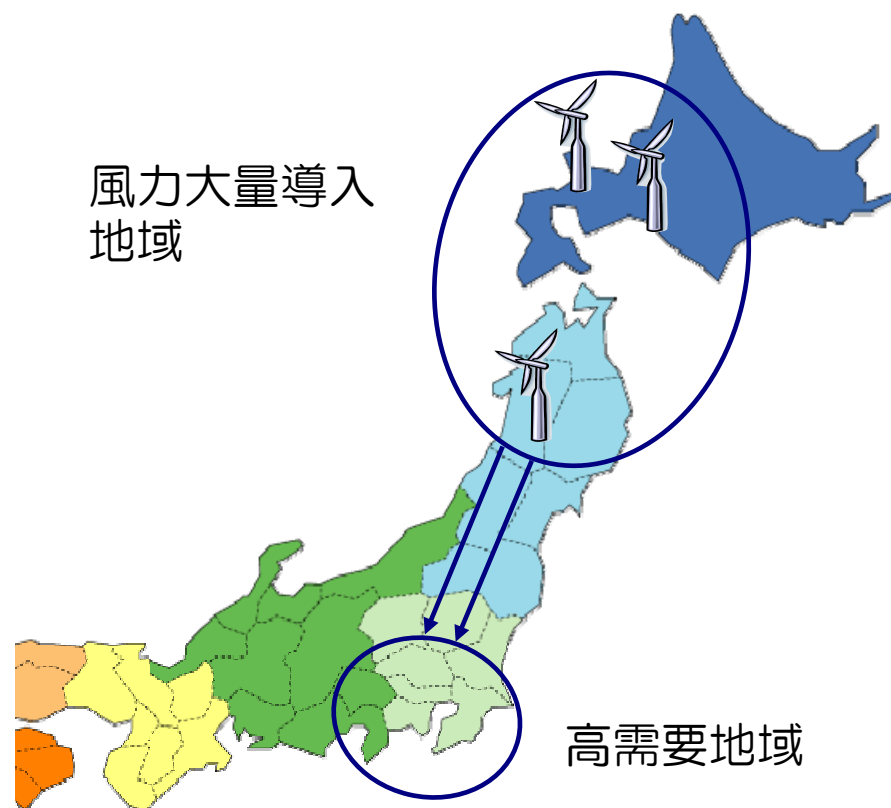
定格容量で割った出力 [%]



[出所] Tappi Wind Park, Aug 1999

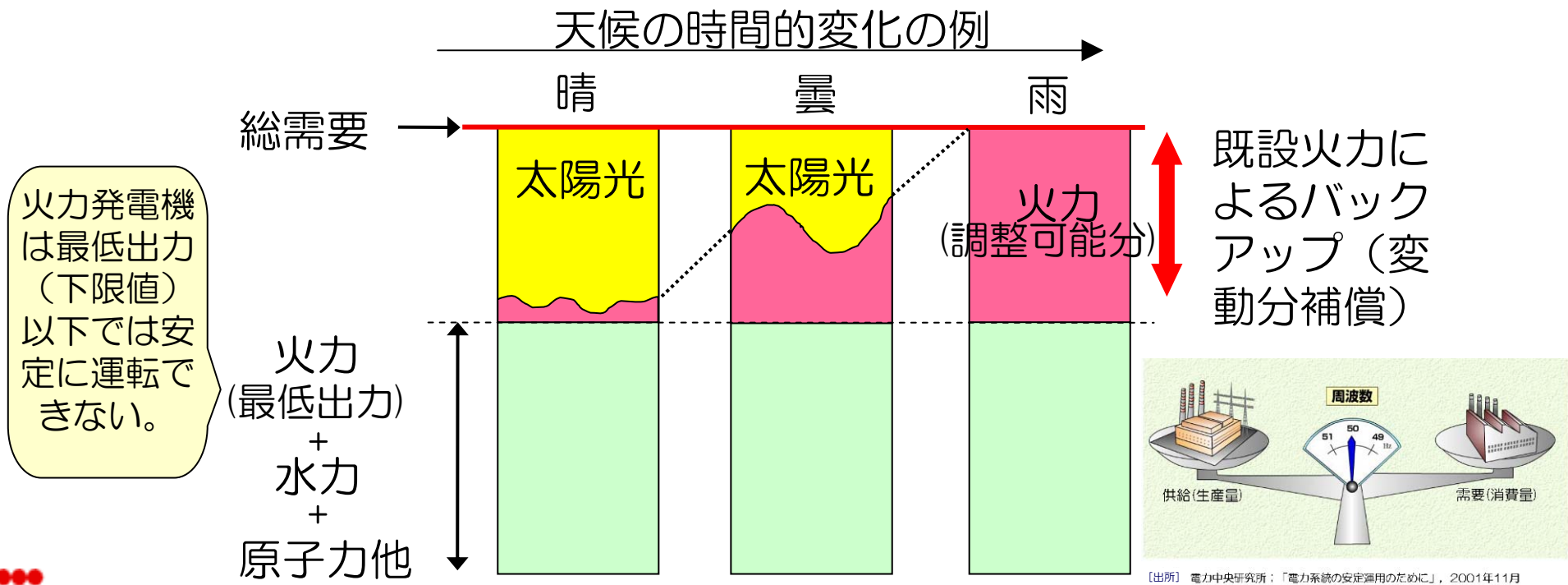
3-1 再エネの特徴② ～ 低密度・需要地遠隔 ～

- 再エネの多くは太陽エネルギー由来であり、エネルギー密度が小。
 - 太陽光発電はスケールメリットが小さいため小規模→配電系統に接続
- （特に風力で）適地が偏在（需要地域から離れている）
 - 以上から、普及時に送電系統や配電系統の設備増強を要する可能性



3-1 再エネ大量普及の課題① ～需給調整力～

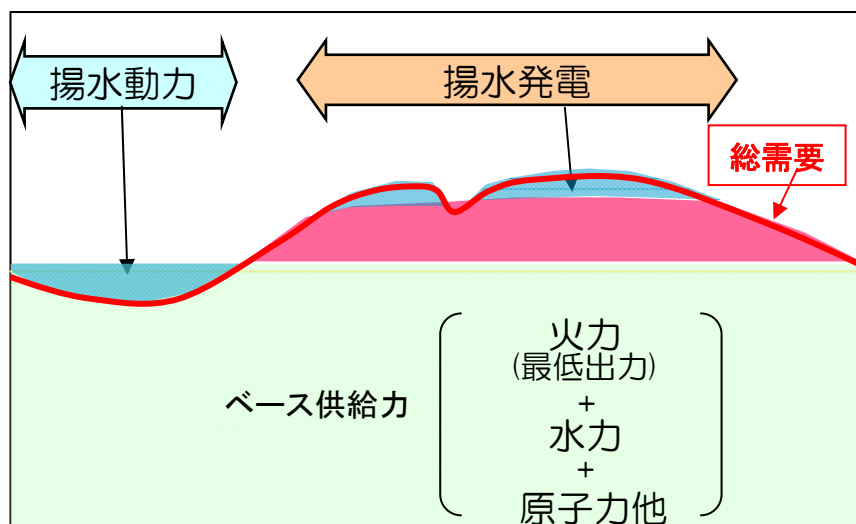
- 各種電源の制約と、再エネ予測の不確実性を考慮すると、運用は複雑化。
 - 再エネ（下図では太陽光）出力の、天候に依存した変化に備え、既設電源（代表的には火力）をバックアップ運転させる必要。
 - 部分負荷運転時（出力を絞って運転する場合）の火力は効率が低下する。
 - 火力は最低出力以下では安定に運転できない。またいったん止めてしまうと再起動に時間がかかる（数時間～数日）。
 - 揚水発電を余剰吸収に用いることもできるが、効率は70%程度でロス発生。



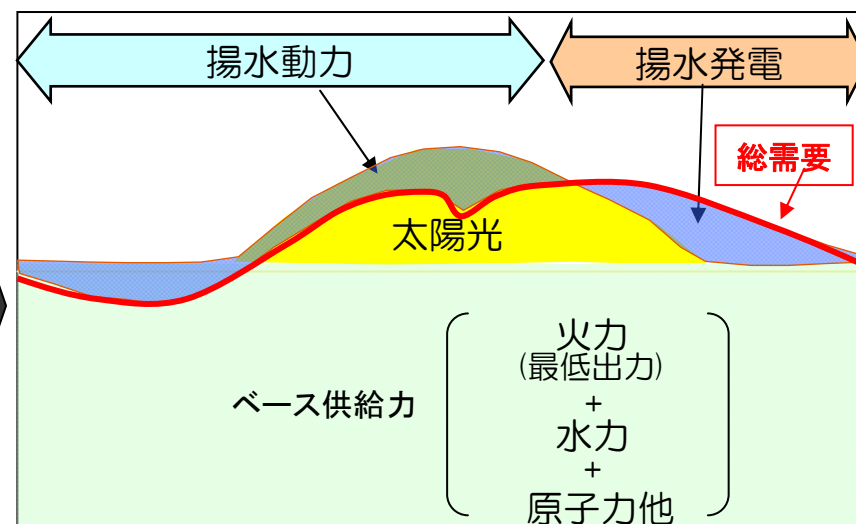
3-1 再エネ大量普及の課題② ～ 再エネの余剰 ～

- 大量普及下での需給バランスの例を下図に示す。
- 従来との違いは、揚水のエネルギー規模拡大と運用変更。
- 図から見て取れる課題は次のとおり。
 - 揚水等のエネルギー貯蔵設備が不足してくる
 - 揚水機の発電と動力を短時間で切り替えるケースが生じてくる
 - さらに予測外れも考慮する必要があるため、運用が複雑化する

揚水発電は、上池・下池容量の範囲でしかエネルギー貯蔵できない。



太陽光無の場合の需給運用（軽負荷期）

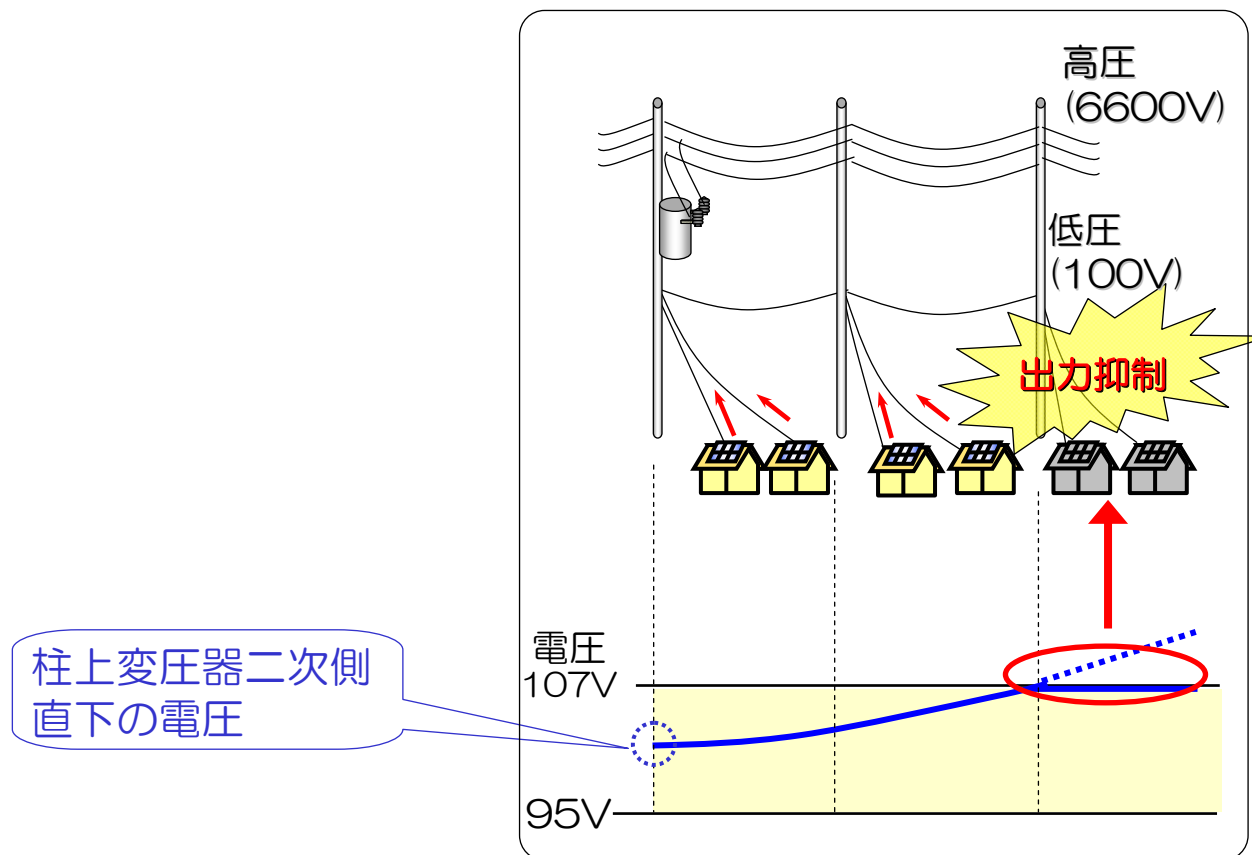


太陽光大量導入後（同時期晴天日）

3-1 再エネ大量普及の課題③ ～ 電圧逸脱 ～

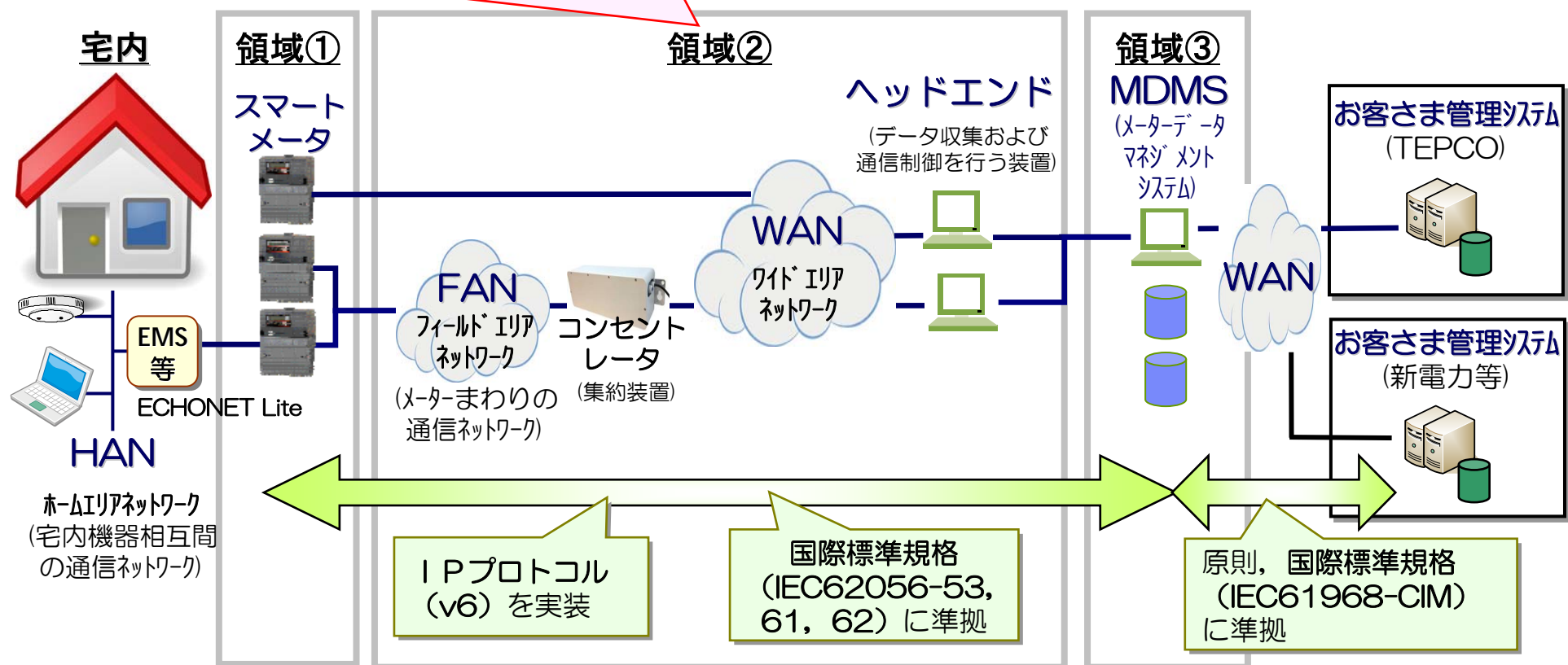
■配電システムの末端に再エネが大量に接続され発電すると、**電圧が上昇し許容範囲を逸脱**する恐れがある。

(なお、過電圧を防止するため、再エネ機器自身が連系地点の電圧に応じて、出力抑制する機能が具備されている。)

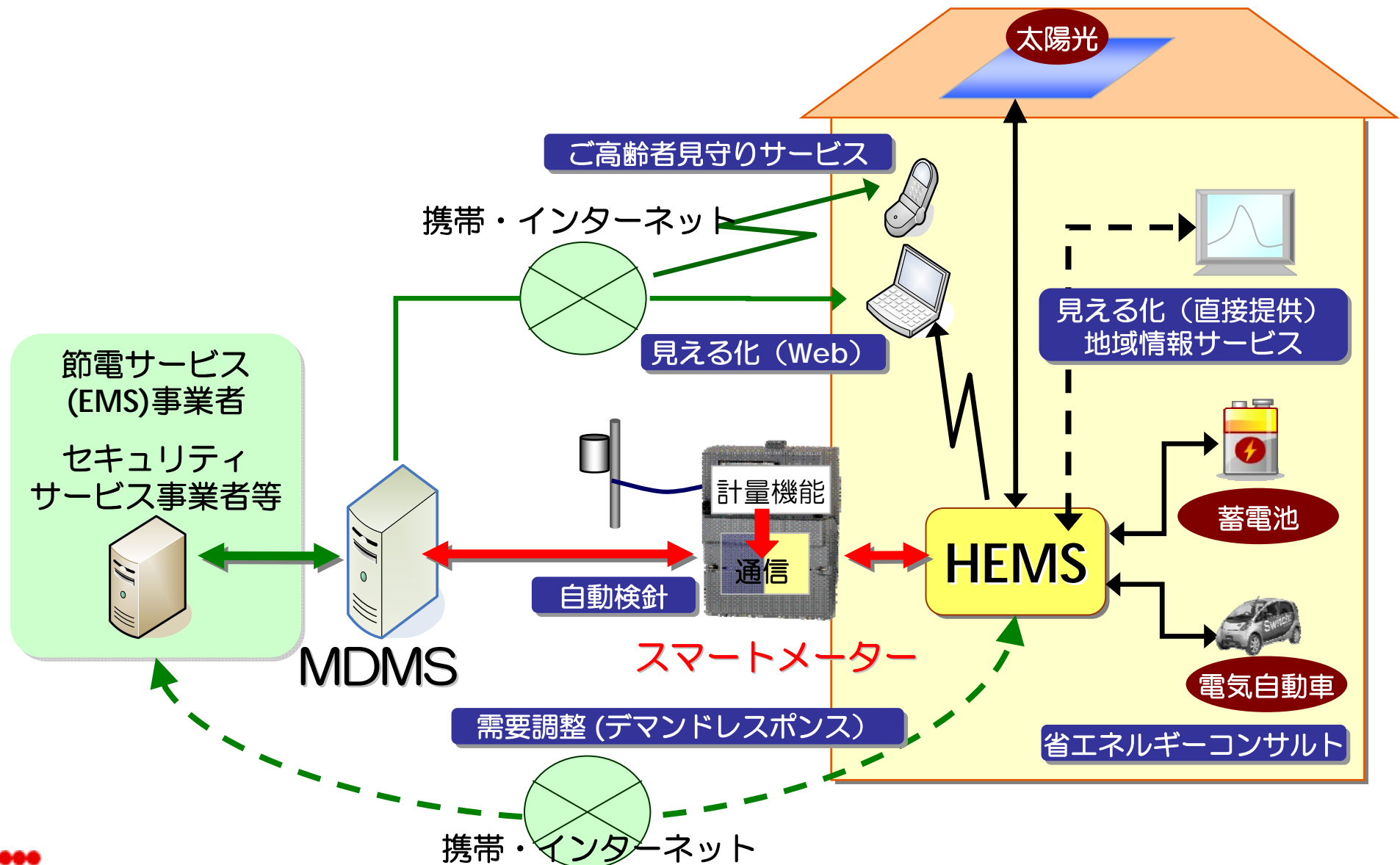


3-2 分散システムとの統合（スマートメータシステム）

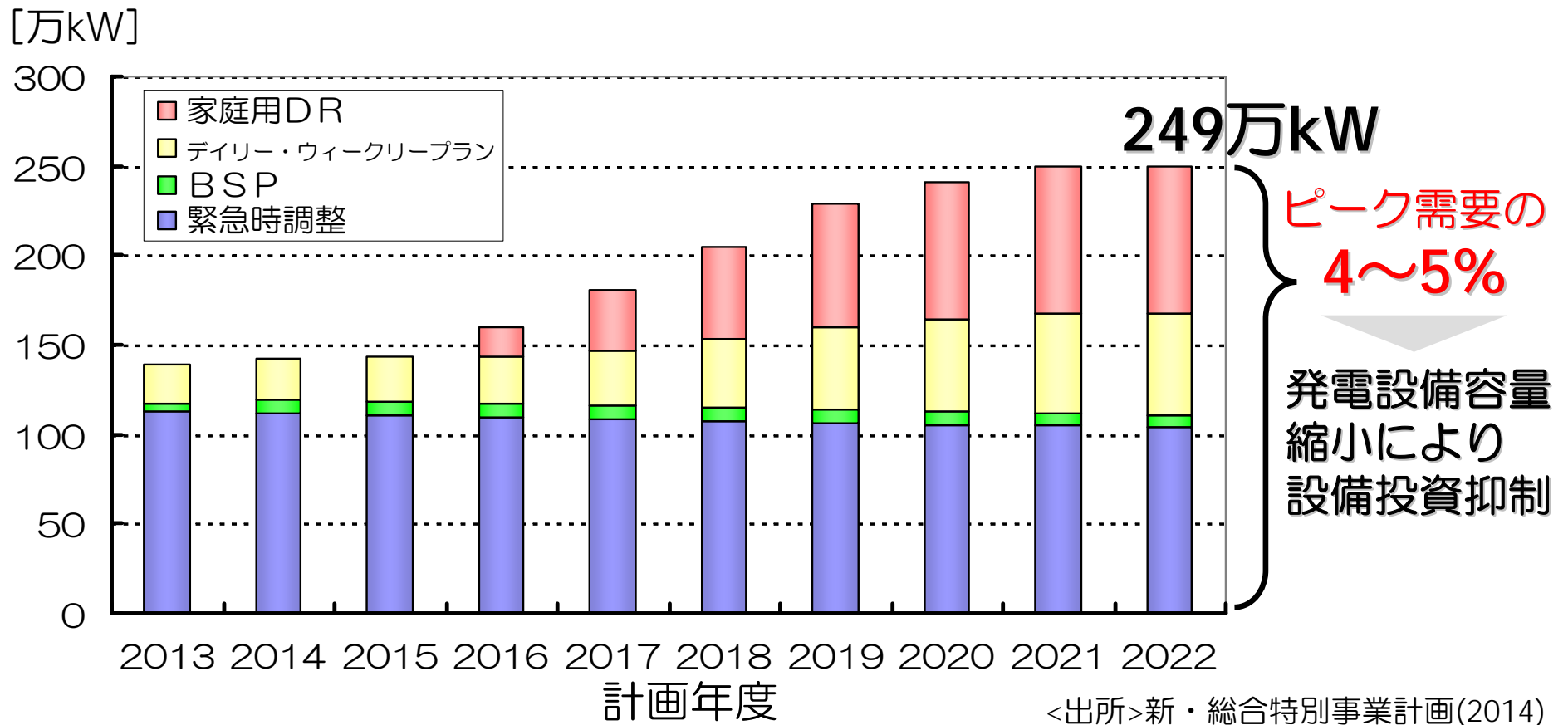
- ✓国際標準の製品導入により、技術的拡張性を担保
- ✓将来的にマルチベンダ化とする事でコストを削減



3-2 スマートメーター導入で実現する機能の例



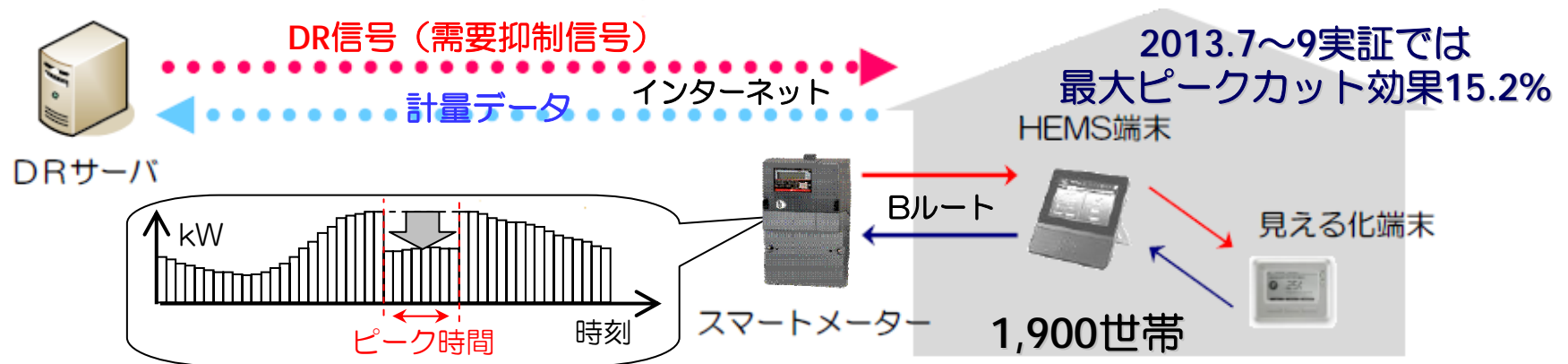
3-2 デマンドレスポンスの活用拡大



3-2 家庭用デマンドレスポンスメニューの検討・導入

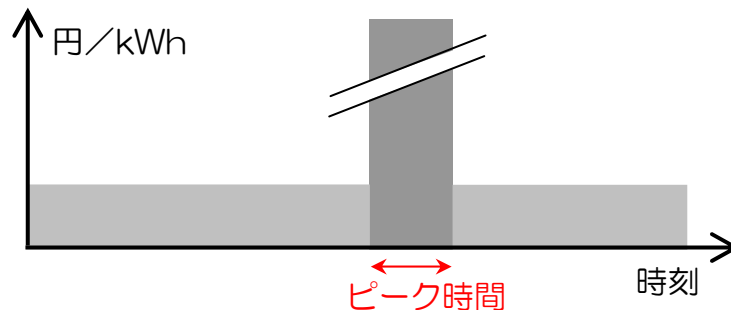
＜横浜スマートシティプロジェクト(YSCP)家庭部門におけるDR実証イメージ＞

- 横浜スマートシティプロジェクト（YSCP）の結果等を踏まえ、新たなデマンドレスポンス新メニューへ反映予定



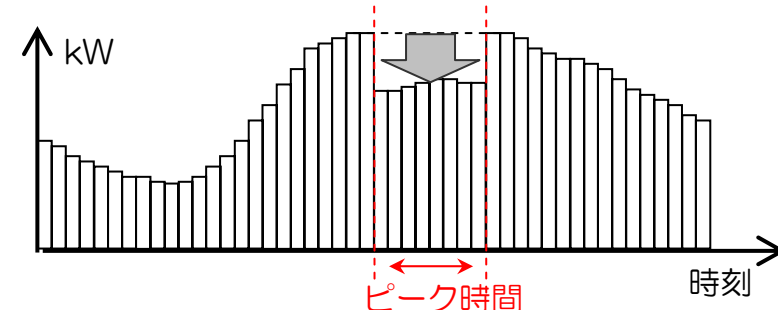
CPP（Critical Peak Pricing）

- 需給バランスが危機的状況になると予想される日のピーク時間帯の料金を大幅に引き上げ

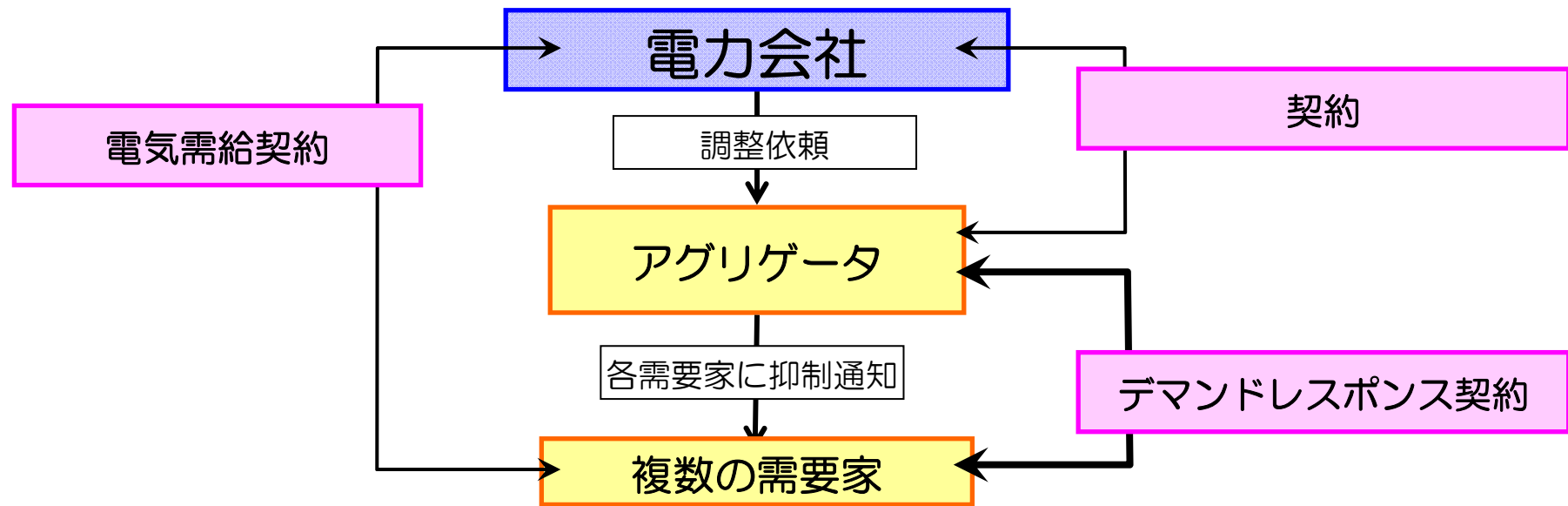


PTR（Peak Time Rebate）

- CPPの該当時間帯に、電力消費を抑制した需要家にリベートを付与



3-2 アグリゲーターを介したデマンドレスポンス



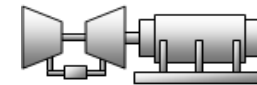
アグリゲーター・需要家間で締結したデマンドレスポンス契約に基づき、電力需要を抑制



空調
(設定温度変更等)

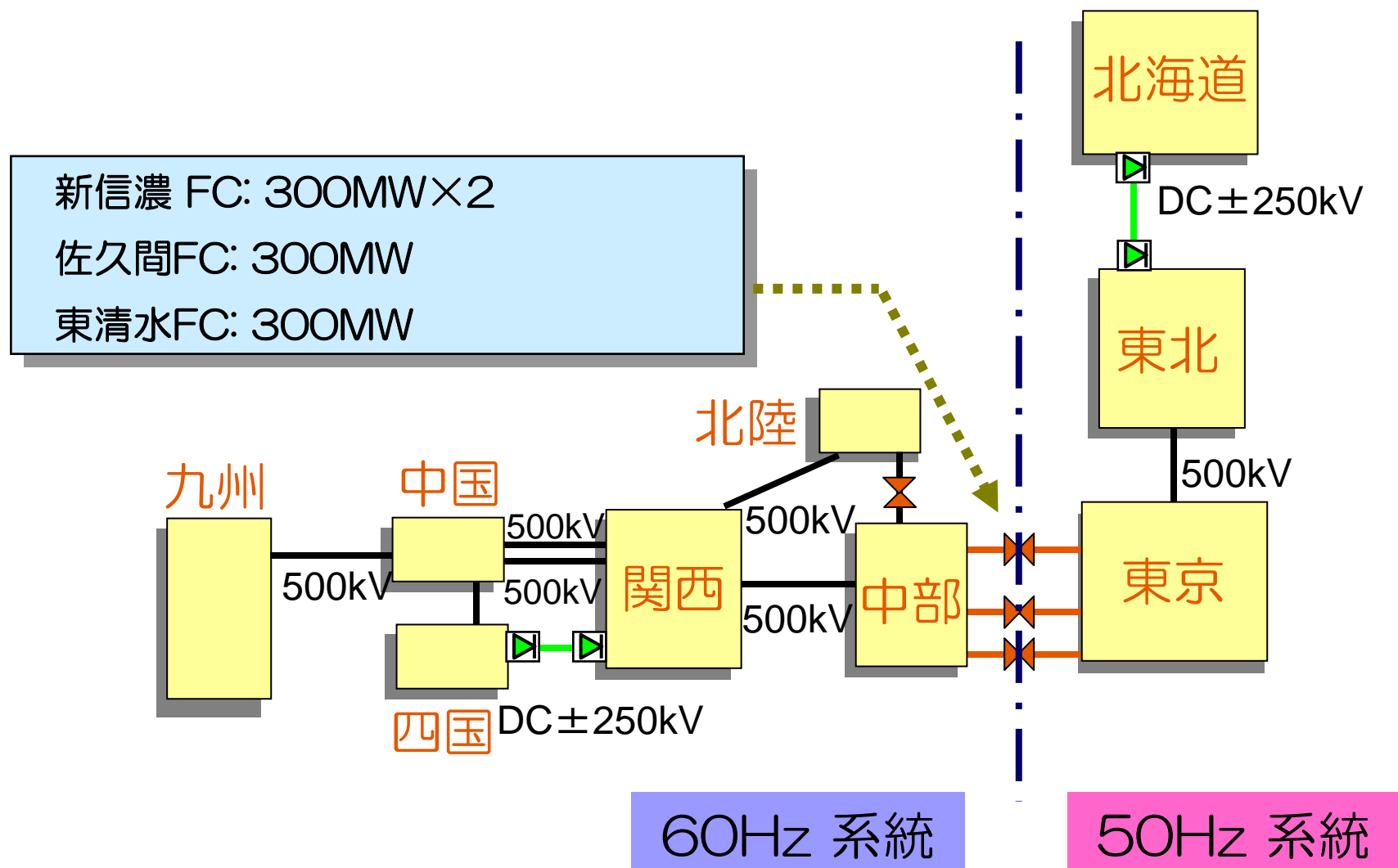


照明
(間引き・照度変更等)

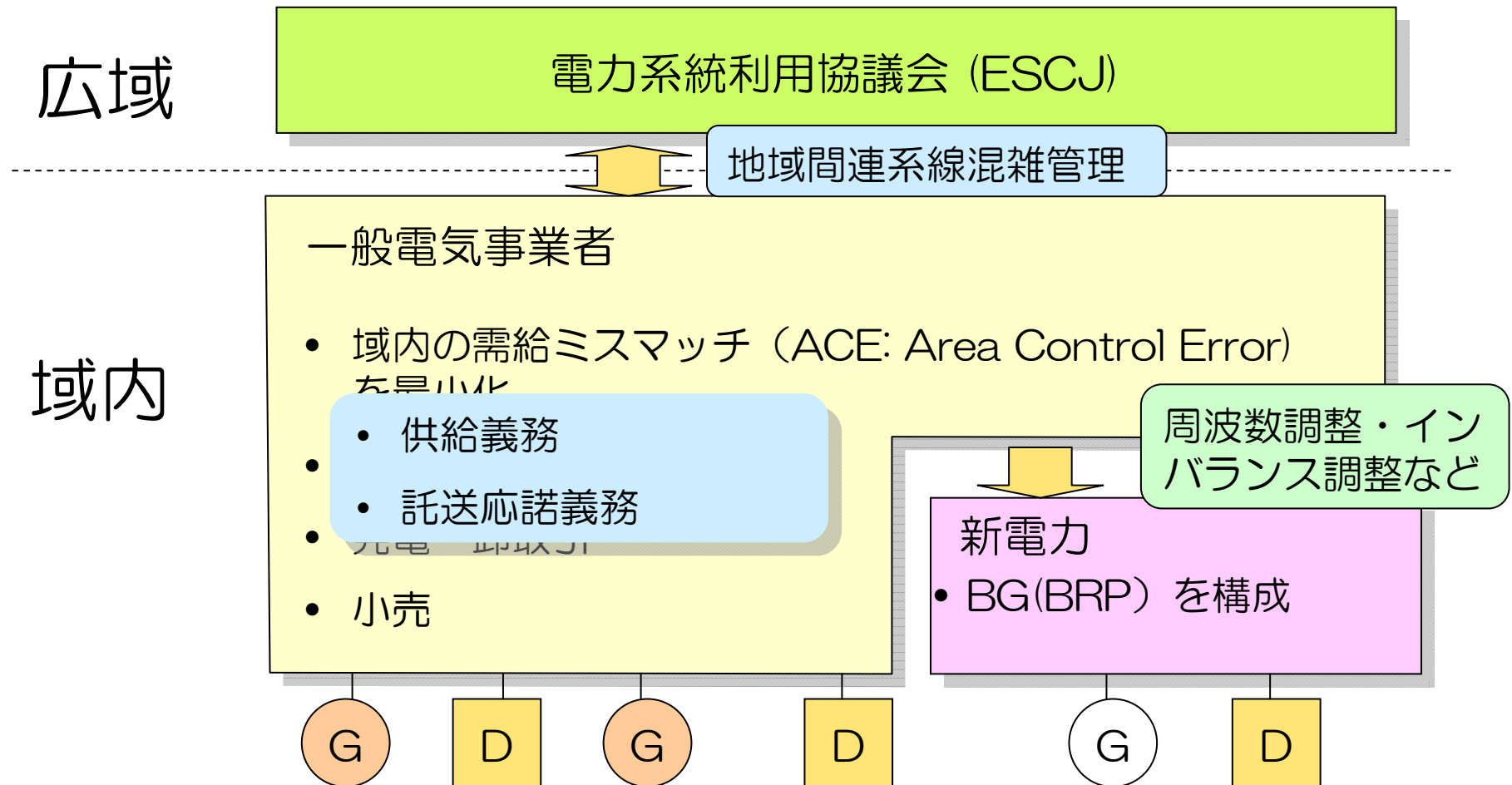


休止中の自家発電働

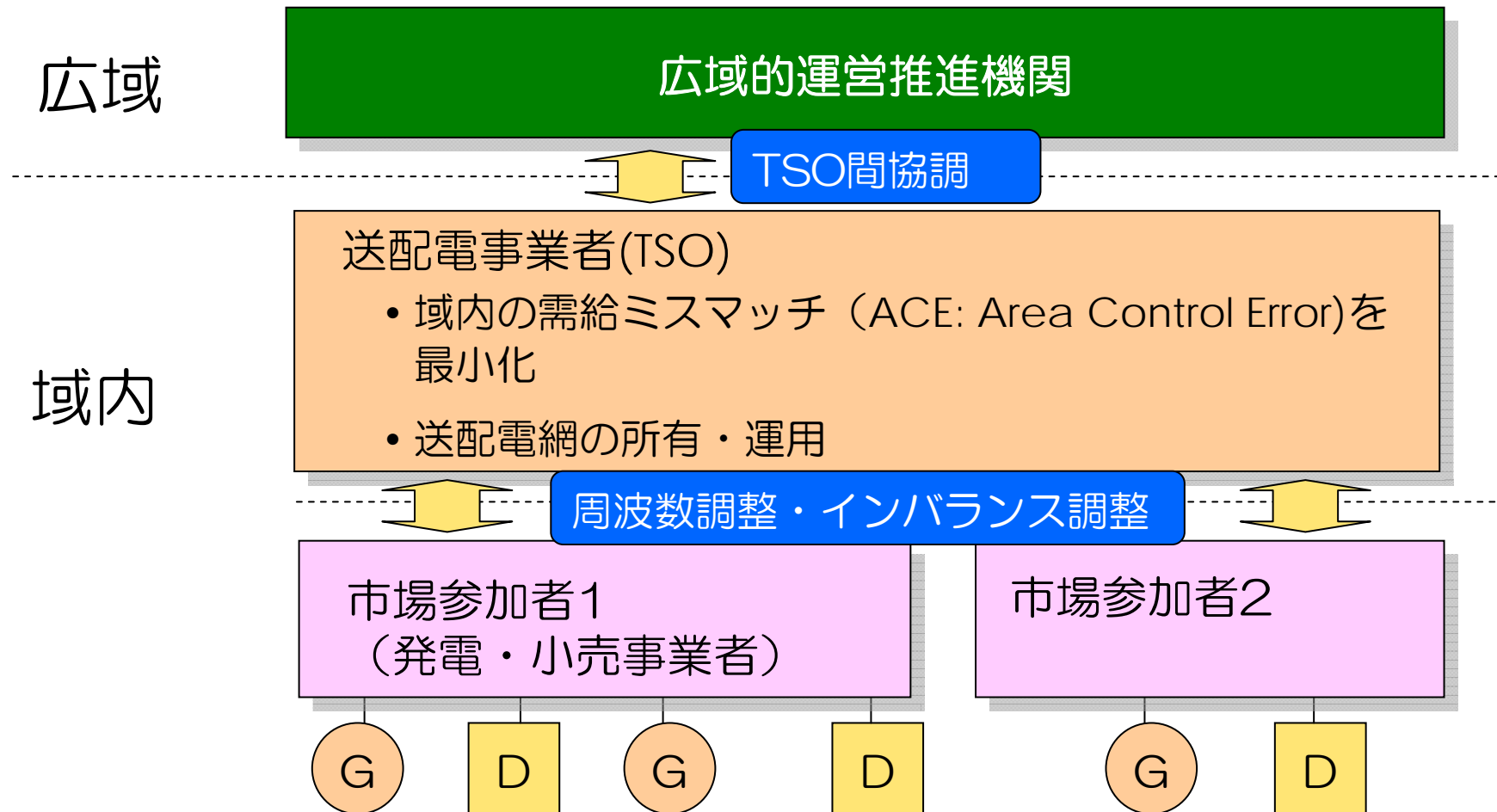
3-3 現在の日本の電力市場



3-3 部分自由化(現在)における各プレイヤーの役割分担



3-3 電力の全面自由化後の各プレイヤーの役割分担



3-3 送電系統運用者(TSO)と市場参加者(BG)の役割分担

市場参加者（バランスグループBG）

1. お客さまに低廉な電気を供給するため、経済性・効率性を追求
2. 自社需要を想定、一定時間単位での自社需給をバランス
(ずれ分はTSOがまとめて調整して精算)
3. TSOもしくはTSOの運営する市場にアンシラリーサービス（周波数調整・混雑管理など）を提供
 - TSOの定めるルールやインセンティブにより、安定供給に貢献

TSO

1. 短期的な安定供給を維持（周波数維持・電圧維持など）
 - 安定供給確保のための各種のサービス（アンシラリーサービス）を市場参加者から公平かつ競争的な手段で調達
2. 中長期的な需給バランス維持に向けたインセンティブの導入
3. 中長期的な系統計画

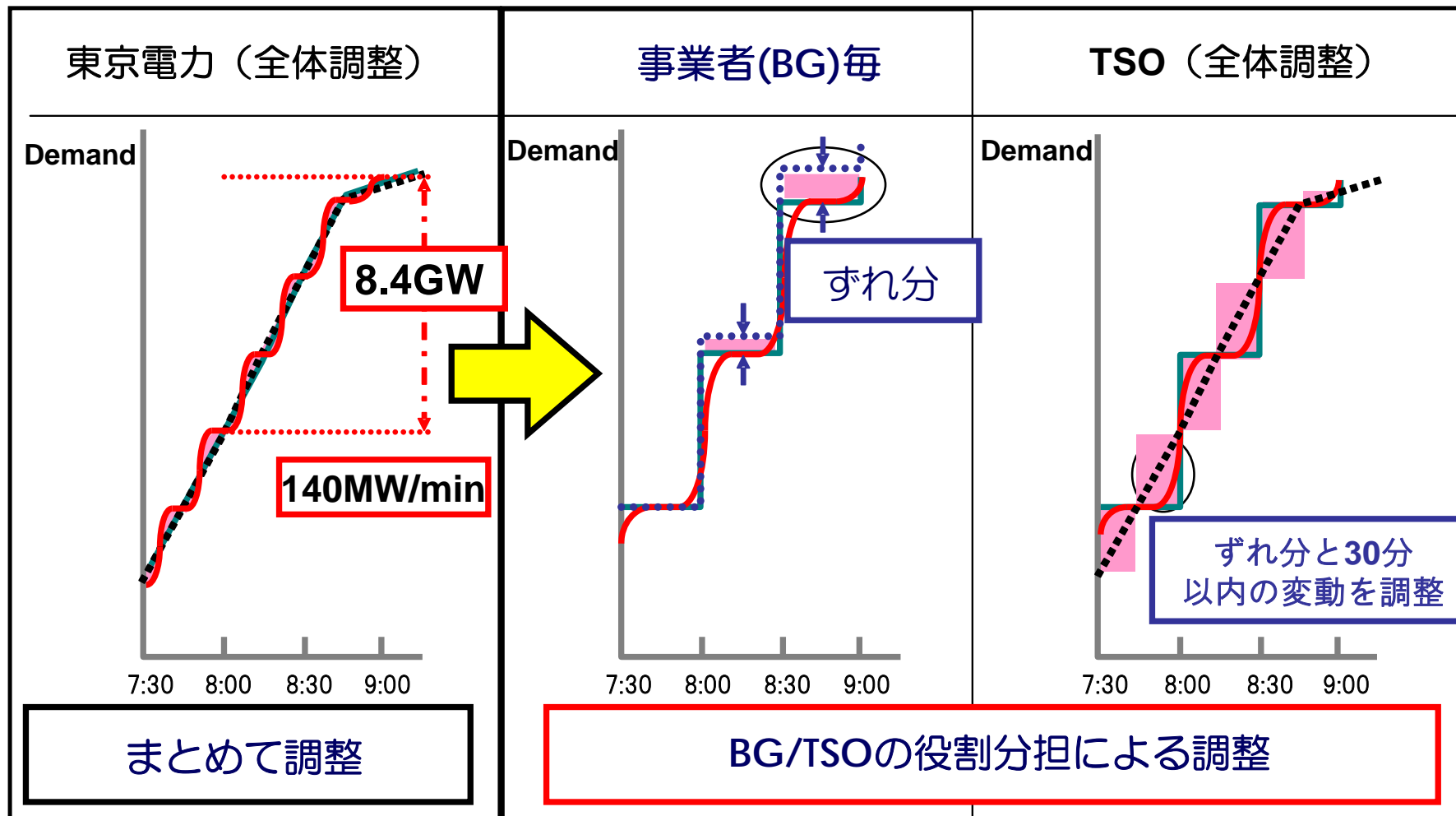
中長期の義務は市場や契約にゆだねられる

3-3 TSOとBGの役割分担上の課題例①

常時の需給調整

現在

全面自由化後




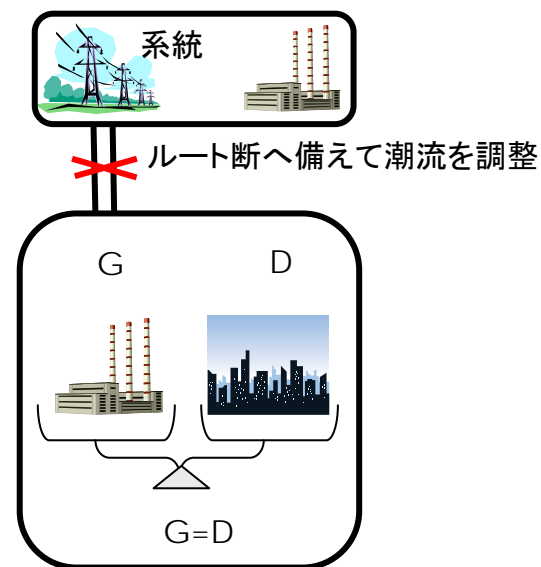
3-3 TSOとBGの役割分担上の課題例②

非常時対応

- ◆ 火力発電の定期点検の延期
- ◆ 経年火力発電所の運転再開
- ◆ 緊急設置電源の設置
- ◆ 新增設機の試運転電力の活用
- ◆ 定格出力を超える出力での運転
- ◆ 需要抑制 など

信頼度維持のための運用

- ◆ 天候急変などに備え 
- ネットワークを切り替えるために、コストの高い発電所を運転
- 大規模電源脱落時の瞬動予備力を確保するため揚水発電所を動力運転
- 発電所の持ち替え（経済性を犠牲）による潮流の事前調整



4. 将来のグリッドに向けて

4-1 今後の電力流通部門（グリッド）の役割とは？

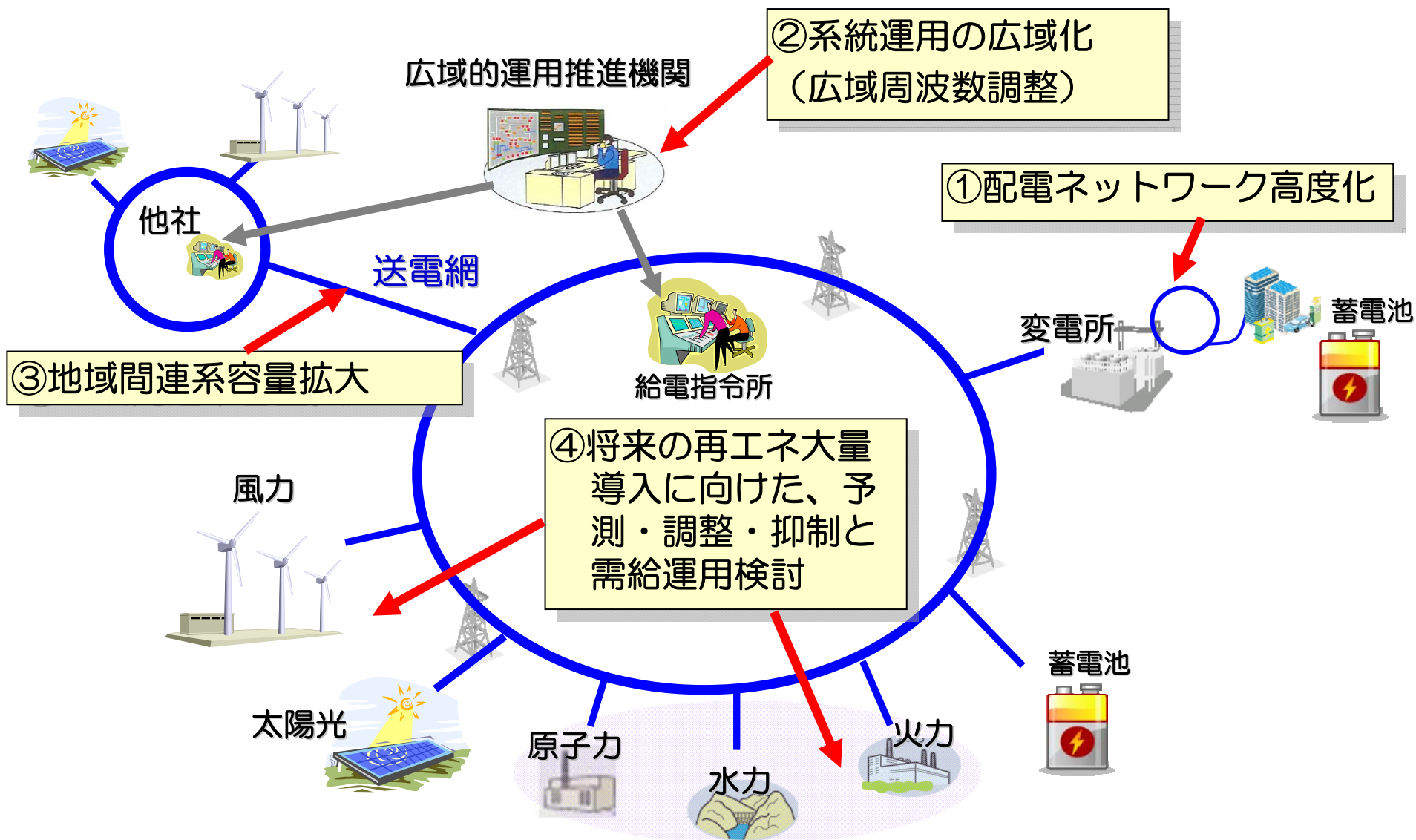
- 高品質な電気を安全かつ出来るだけ安価にお届け



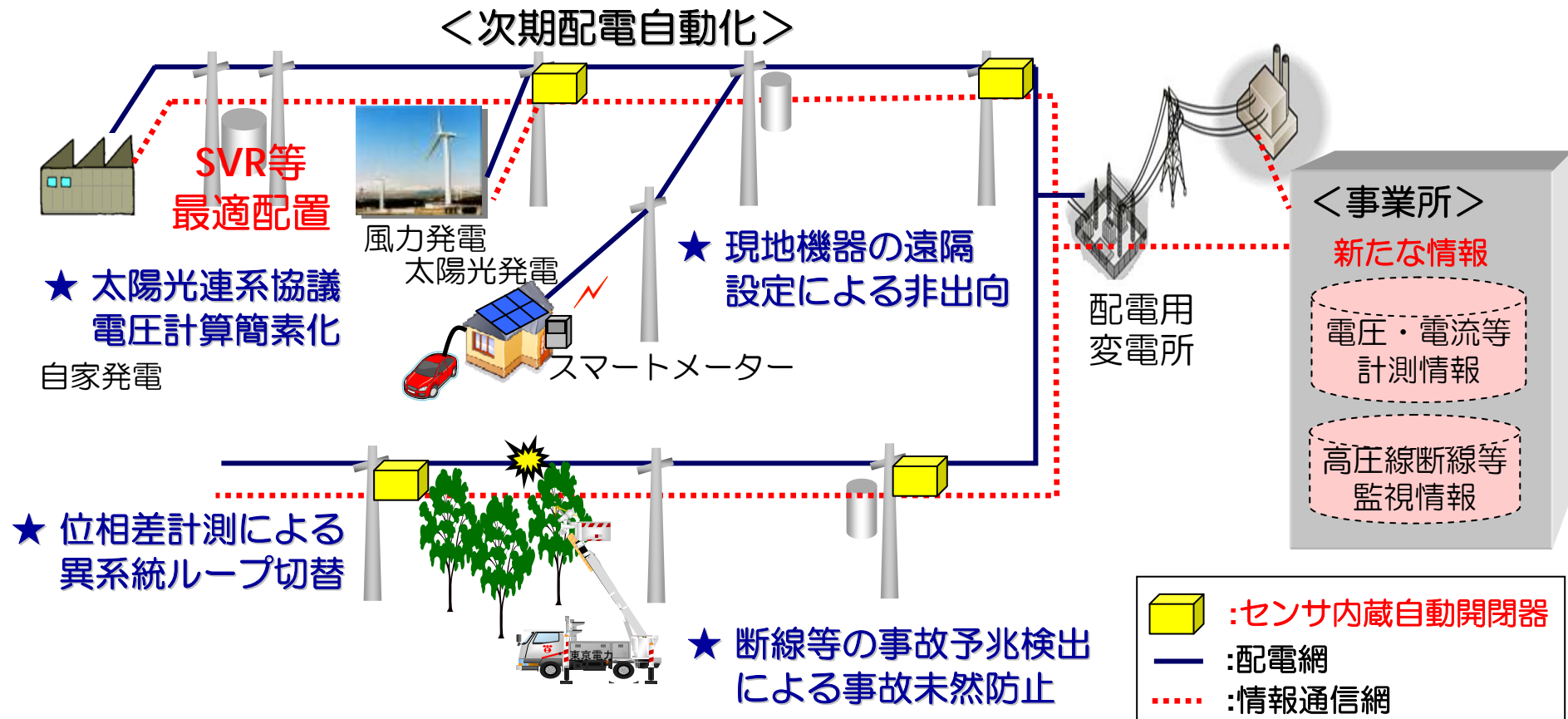
追加されるミッション

- グリッド上でさまざまなサービスを行う市場参加者に対する「プラットフォーム」を提供
 - スマートメーターなど「情報の管理や提供」も含む
- 自ら提供するプラットフォーム上での市場参加者の競争を通じてお客さまにとってのよりよいサービスや経済性を実現
 - 電力会社や発電側だけでなく需要側からもサービス調達
 - 電力システム全体での整合性確保や全体最適を実現するためのルール作りやインセンティブを導入
 - ICTなどを活用しプラットフォームを常に進化

4-2 将来に向けた取り組みの領域例



4-2 ①配電ネットワークの高度化



4-2 ②地域間連系の広域化による風力発電の導入拡大～東地域実証～

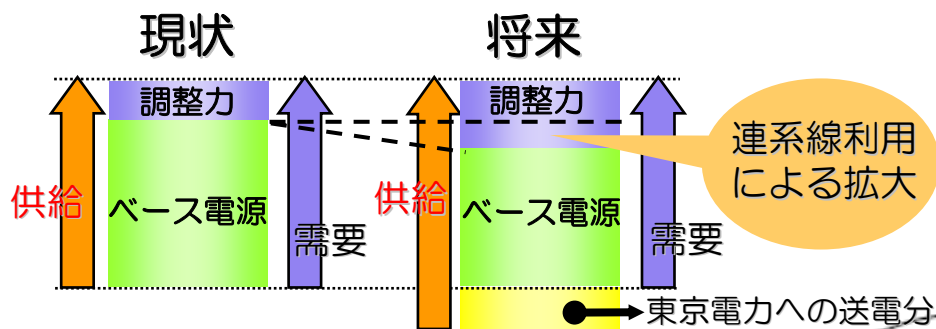
■課題

- 北海道、東北：風力発電の適地が多いが、系統容量が小さく、連系可能量に制約
- 東京電力：系統容量が大きい風力発電の適地が少ない

■実証試験

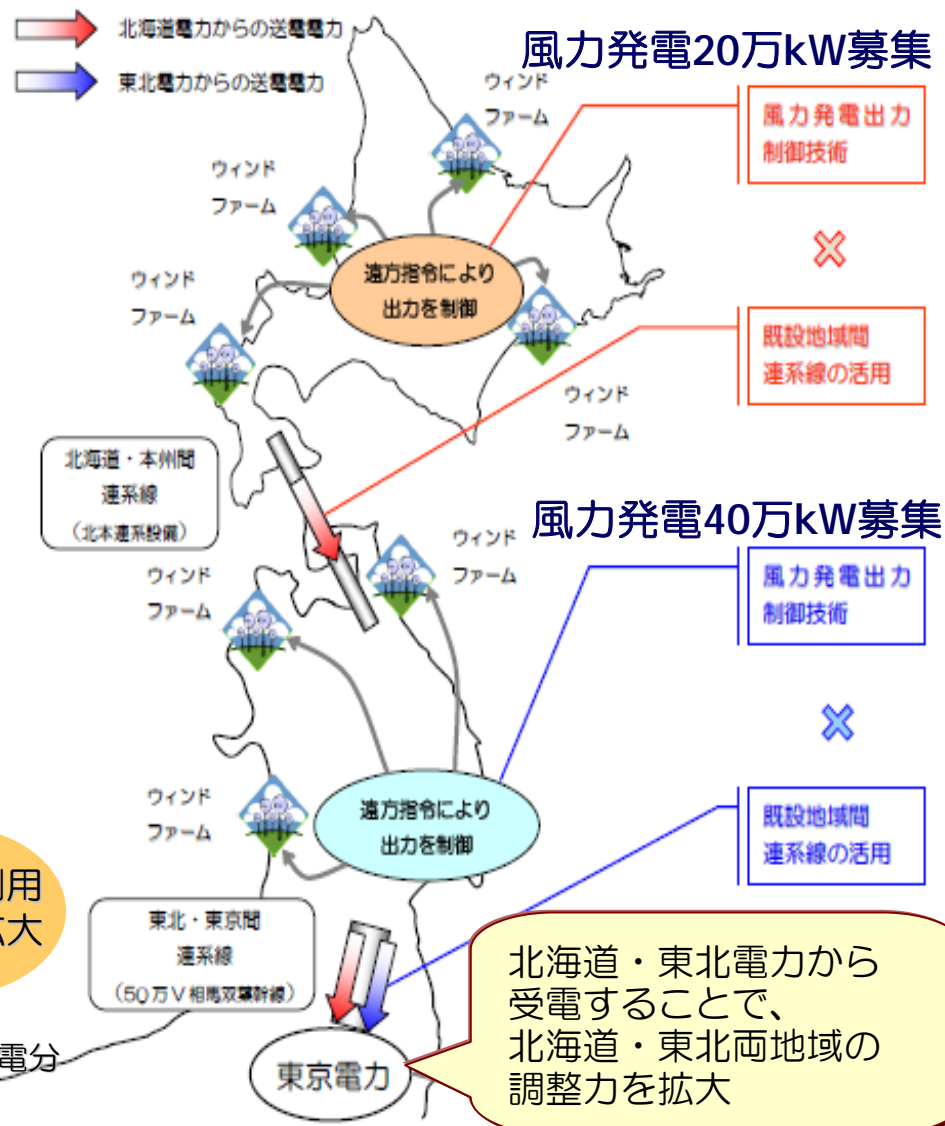
- 地域間連系線を使用。系統規模の大きい東京の調整力を活用

[出所]東京電力プレス(2011)



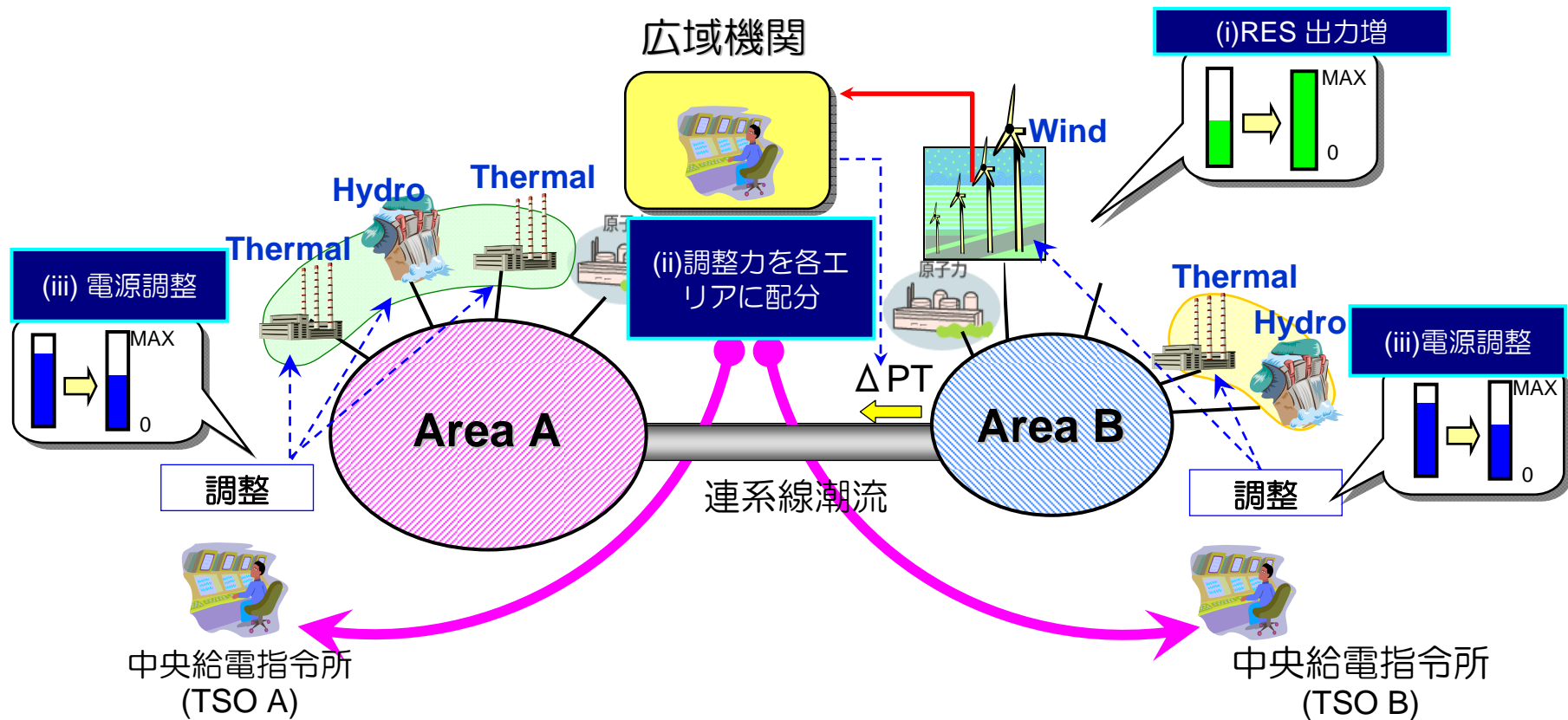
- ・調整力の不足時には、風力発電所の出力を制御

風力発電の出力制御



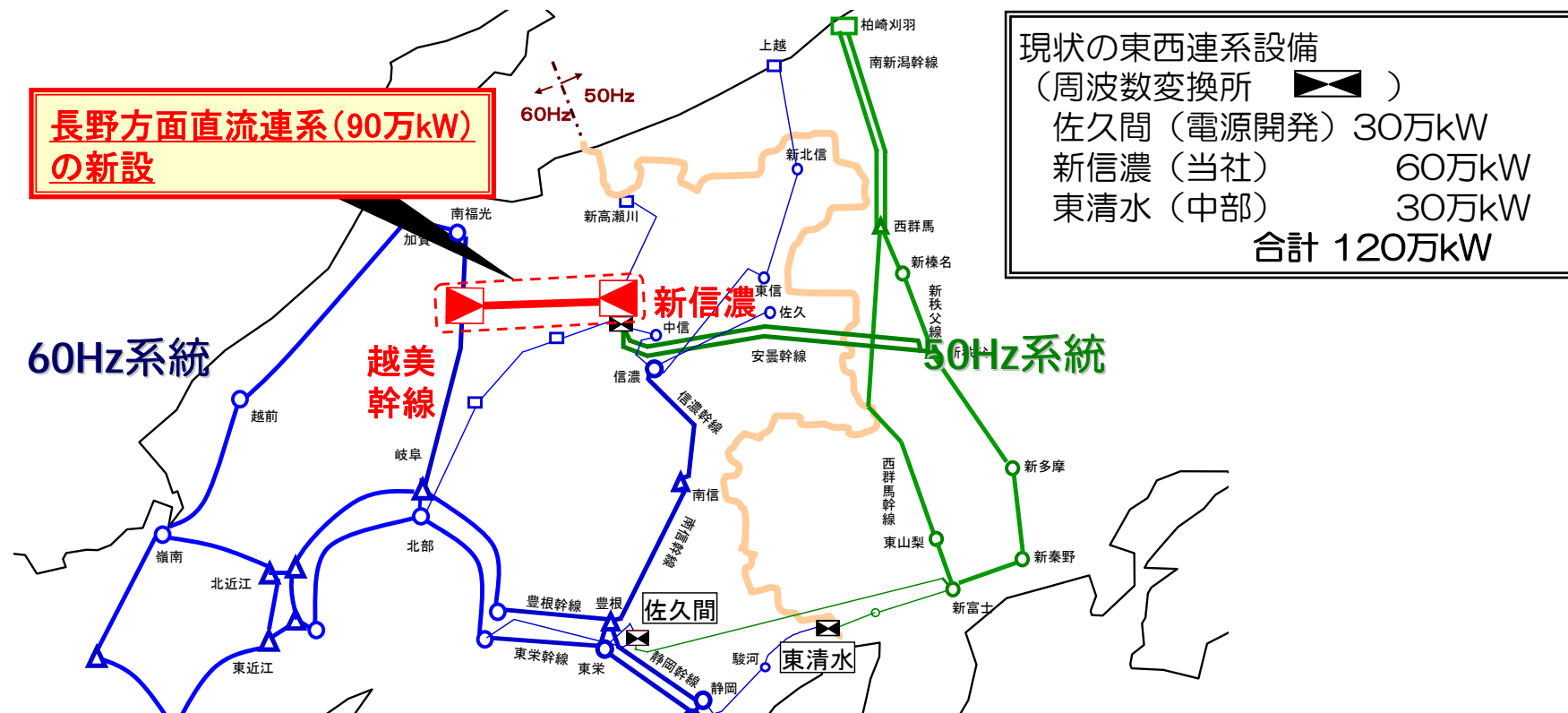
地域間連系線の活用

4-2 ②広域周波数調整の導入



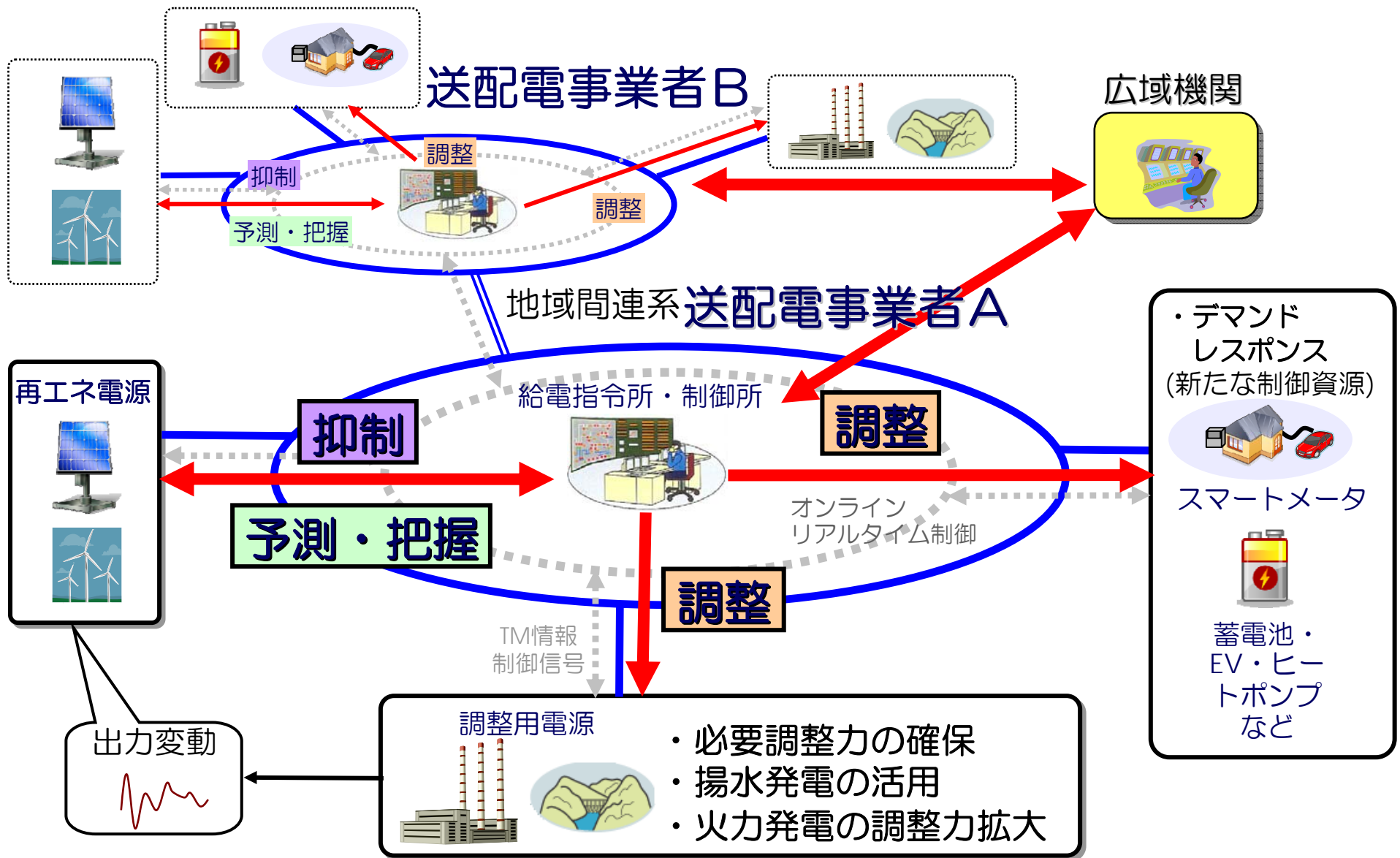
4-2 ③地域間連系容量の拡大

- 東京(50Hz)と中部(60Hz)の電力を直流に変換し、地域間連系を強化
- 東西連系容量を120万kW→210万kWへ拡大
- 2020年度の運用開始を目指し、プロジェクト推進中



<出所>東京中部間連系設備の増強に関わる提言【ESCJ】(2013)

4-2 ④広域周波数調整や分散システムを統合した再エネ拡大策



4-3 将来のグリッド像

電気工学に加えて、さまざまな領域（経済、金融、ICT、機械など）の知見を総合的に発揮して、全体最適の視点を持ちながら、新領域に積極果敢にチャレンジする若手人材の育成が必要

