

電気学会主催 公開シンポジウム  
平成24年11月12日13:30~16:00  
宇都宮ポートホテル

# 大切な電気エネルギーのインフラ構築に向けて 社会における電気エネルギーの役割

電気学会会長代理  
東京大学大学院工学系研究科電気系工学専攻  
日高 邦彦

# 講演内容

1. 電気エネルギーシステム  
(電気を作る, 送る, 配る, 使う)
2. 電気エネルギーの特質
3. 日本の電力供給・需要の特徴
4. 社会インフラ間の連携
5. 電気エネルギー依存の高まり
6. スマート社会への貢献
7. 豊かな日本への貢献

# 1. 電気エネルギーシステム (電気を作る, 送る, 配る, 使う)

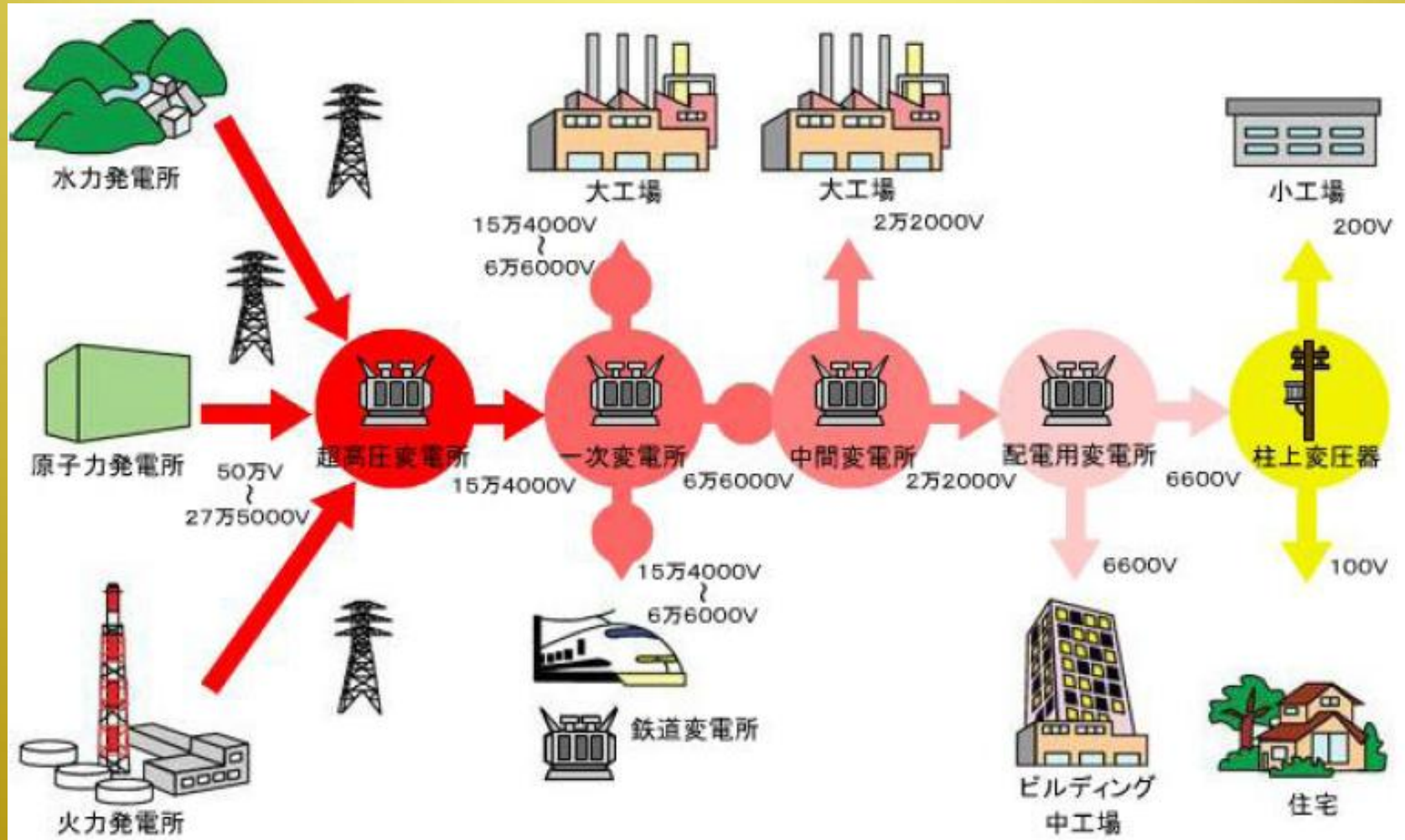
# 電気エネルギーシステム

電気を作り, 送り, 配る, (貯える)

発電

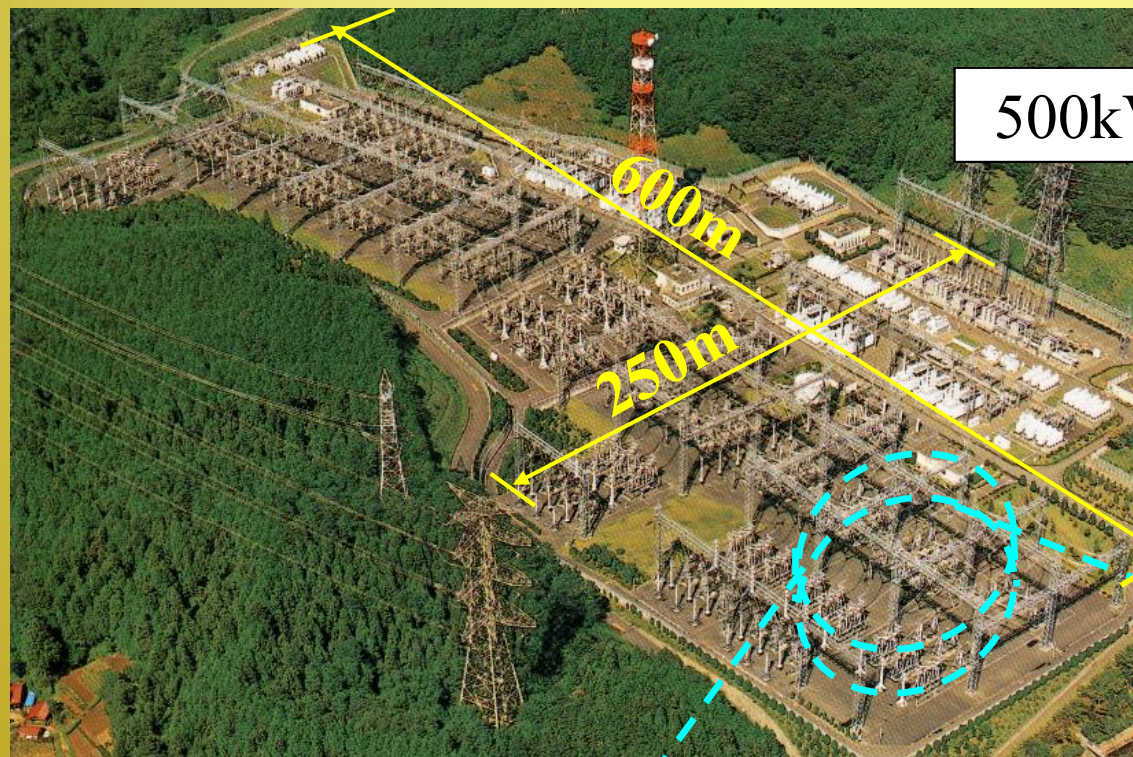
送変電

配電





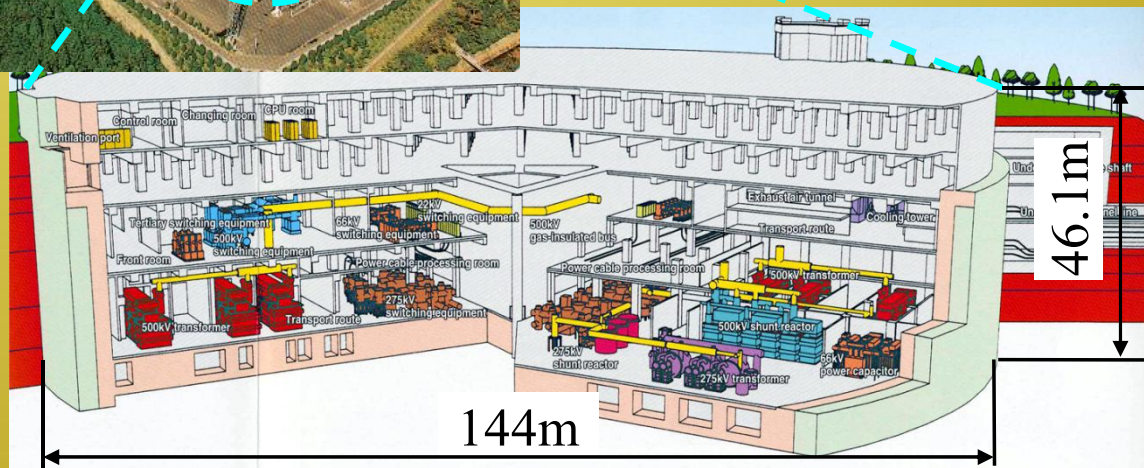
# 高密度化のための電力技術



500kV/275kV 従来型変電所

$$\frac{16,286.02\text{m}^2}{116,125.37\text{m}^2} \doteq \frac{1}{7}$$

500kV/275kV  
地下変電所





# 地下変電所

TEPCO

高野山真言宗 総本山  
金剛峯寺 東京別院

東京電力管内  
全変電所 : 1495箇所  
地下変電所 : 190箇所



東京電力高輪変電所 275/66kV 900MVA

## 2. 電気エネルギーの特質

# 電気エネルギーの特質を概観してみる

- 電源と負荷のシステムを考えると、一見、単純なシステムと思われる。
- 電気エネルギーの供給(生産)と需要(消費)の関係が、他のもの(商品)と決定的に違う点は、**瞬時**においても、**売れ残り(供給過剰)**、**売り切れ(需要大)**が認められないことである。
  - 商品の低廉化、通信の低廉化の手法をそのまま導入できない。
    - 目玉商品の売り切れや在庫処分セールもない。
    - 回線話し中も許されない。
- 電気エネルギーは**貯蔵**できない？(在庫なし?)
  - ✓ 電気エネルギーを電気の形で貯蔵はできない。
  - ✓ 変換して貯蔵はできる(電気エネルギー ⇔ 力学、化学エネルギー)
  - ✓ 電力機器等の効率は非常に高く、その効率では貯蔵できない。
    - やむを得ず貯蔵する(総合的に貯蔵することが有利な場合)
    - 原子力発電→揚水発電(効率~70%)、NaS電池同程度の効率



# 電気エネルギーの特質をまとめると

電気エネルギーはクリーンで、何にでも応用でき使いやすい



社会の電気への依存度は上昇



しかし、電気エネルギーは貯蔵できない



電力需要に見合った電力供給制御が必要



最大電力需要に見合った電力供給設備が必要

電力供給

バランス

電力需要

# 需給調整と電力輸送量の確保

## 需給

電力系統全体で 発電(供給) = 消費(需要) とすることが必要

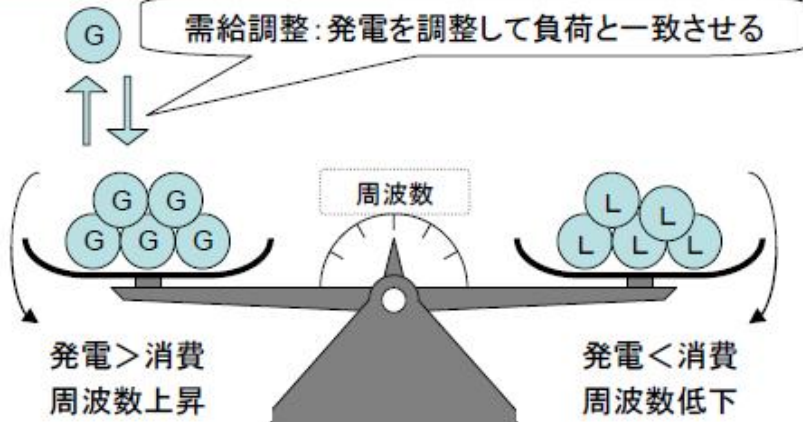
発電 > 消費 ⇒ 周波数上昇※  
 発電 < 消費 ⇒ 周波数低下※

- ・ 機器への悪影響
- ・ 大規模停電の発生

時々刻々消費を予測し、発電を調整

電気を大量・効率的に貯蔵することは困難なため、消費の変化に対応できるように供給力を確保しなければならない

## 需給調整のイメージ



## 安定供給の確保

## 系統

電力を流通設備をとおして消費地まで送電することが必要

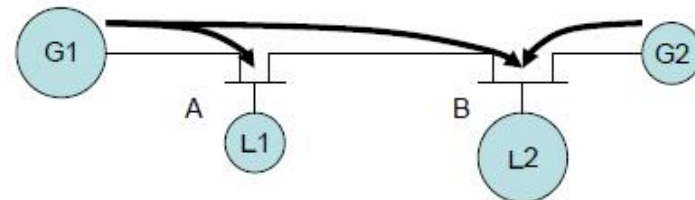
下図において、系統全体で発電 = 消費とすることができても、A～B間の送電が制限されると発電と消費を一致させることは不可能

電力の輸送経路を確保

電源の運用・負荷の状況と協調をとった流通設備形成・運用が必要

## 輸送確保のイメージ

負荷L2には発電機G1とG2が供給しており、A～B間の送電が制限されると、G2だけでは発電が不足し、L2に供給できない。



出典: 電力系統利用協議会 ESCJ「電力系統利用に関する技術資料」平成18年10月

# 系統安定度とは？

## モデルによる説明(1)

発電	把手を回す力(機械的入力)	A
	円盤が回転する力(電气的出力)	B
送電	ゴムを伝える力	C
負荷	巻き上げる錘の重さ	D

エネルギーの流れ

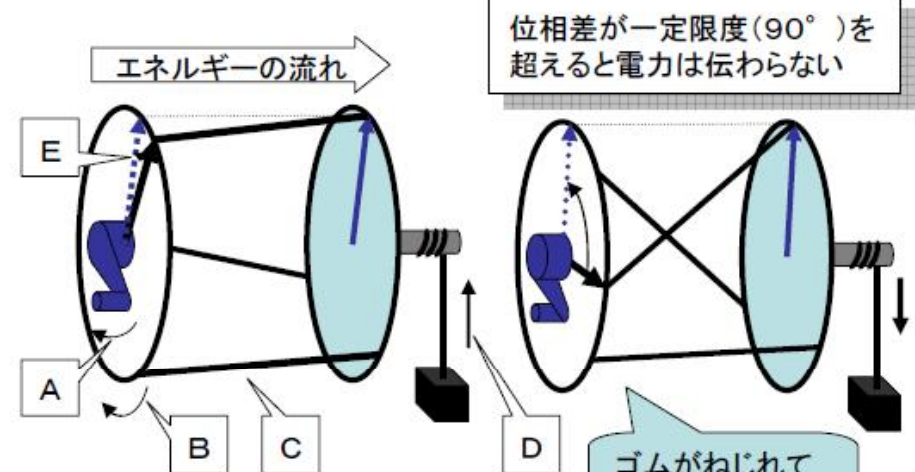
- 回転速度は周波数に相当
- 負荷の回転は発電機より一定の角度で遅れる(位相差[E])

### 安定運転の条件

- 回転速度がすべて等しい(同期運転)
- すべての力がA→B→C→Dと、確実に伝わる必要がある
- 位相差[E] < 90°

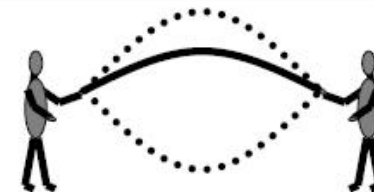
### 電力システムのイメージ

複数の発電機、負荷が複数の送電線で結ばれているもの



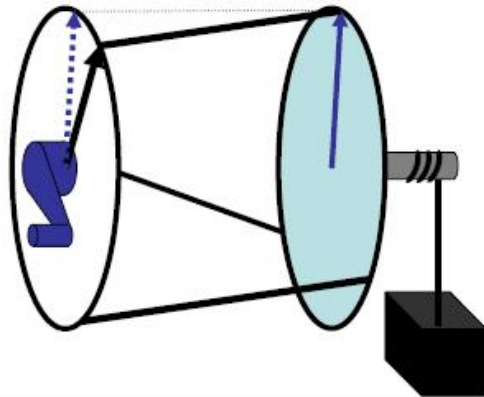
### 安定運転のイメージ

重いロープ(負荷)を安定に回すためには、回転速度が等しいことと、2人が回す角度のずれやロープの回転の遅れが一定範囲内であることが必要

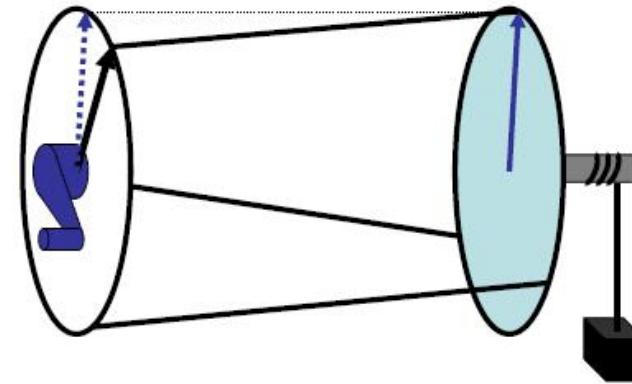


# 系統安定度とは？ モデルによる説明(2)

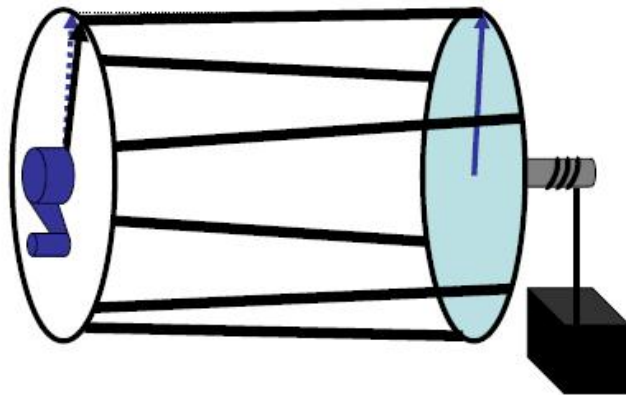
錘が重くなるほど位相差は大きくなる  
⇒大電力送電の限界



発電機と負荷の距離が長くなるほど位相差は大きくなる  
⇒長距離送電の限界



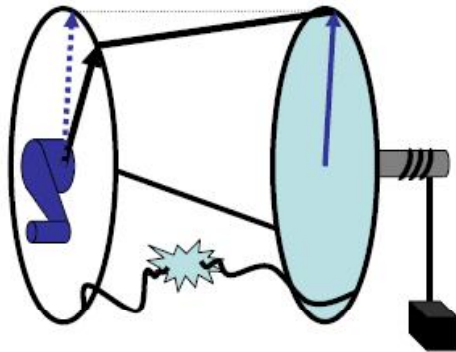
ゴムを強くする(太くする、数を増やす)とねじれにくくなり、距離を長くしても、錘を重くしても位相差の増加は少なくなる  
⇒系統増強の効果



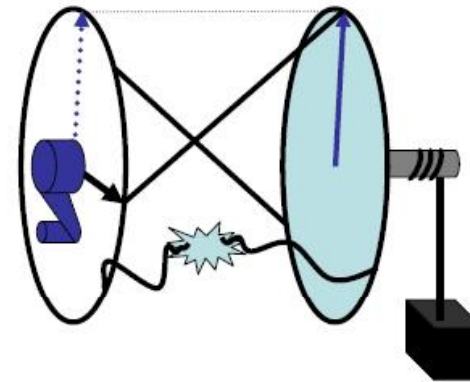


# 系統安定度とは？ モデルによる説明(3)

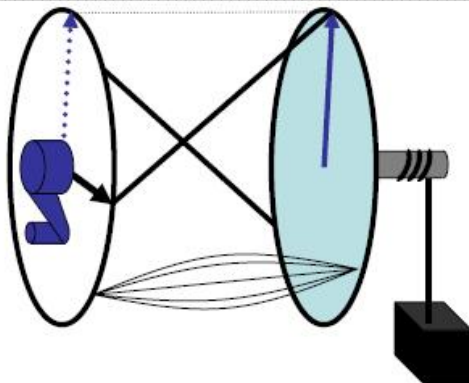
ゴムが切れる(送電線事故に相当)と位相差は大きくなる



ゴムが切れたことにより位相差が $90^\circ$  を超過  
⇒過渡安定度の問題



ゴムをはじいただけ(微小外乱)で位相差が $90^\circ$  を超過  
⇒定態安定度の問題



出典: 電力系統利用協議会 ESCJ「電力系統利用に関する技術資料」平成18年10月

### 3. 日本の電力供給・需要の特徴



標準に配慮した海底ケーブルの敷設(沖縄電力)

- 50万V送電線
- 15.4~27.5万V送電線
- 直流連系線
- 主要変電所、開閉所
- 周波数変換所(F.C.)
- 交直変換所

**北本連系線**

北海道と本州は函館と上北に交・直流変換設備を設置し、この間を架空送電線および海底ケーブルで結んでいます。

60Hz ←→ 50Hz

**関門連系線**

本州と九州は50万V送電線で連系されています。



**周波数変換所(F.C.)**

東日本の50ヘルツ系統と西日本の60ヘルツ系統は、静岡県佐久間、静岡県東清水および長野県新信濃の周波数変換所で連系されています。

- 佐久間周波数変換所(電源開発):30万KW
- 新信濃周波数変換所(東京電力):60万KW
- 東清水周波数変換所(中部電力):13.5万KW

※2012年秋が5.30万KWで運用予定

**本四連系線 阿南紀北直流幹線**

本州と四国は瀬戸大橋に添架された50万V送電線と、阿南と紀北に交・直流変換設備を設置し、この間を架空送電線および海底ケーブルで結んでいます。



佐久間周波数変換所(電源開発)

# 我が国の電力システム

**最大電力: 183GW**  
**年間消費電力量: 906TWh**

出典: 電事連「電気事業の現状 2012」



# 大阪



## 大都市圏の電力システム

大都市圏の社会活動、経済活動を支える電気エネルギー

# 名古屋



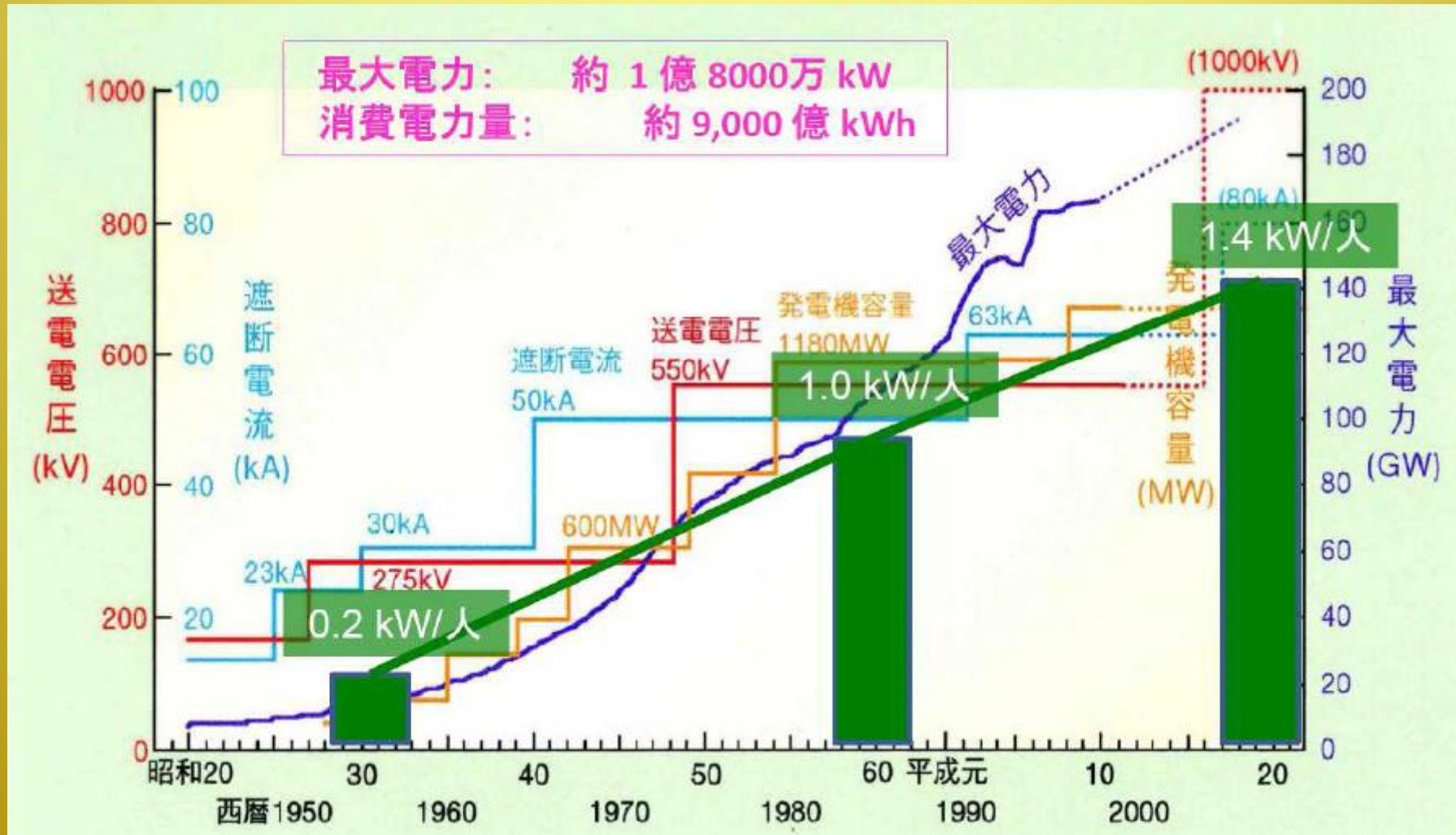
# 東京



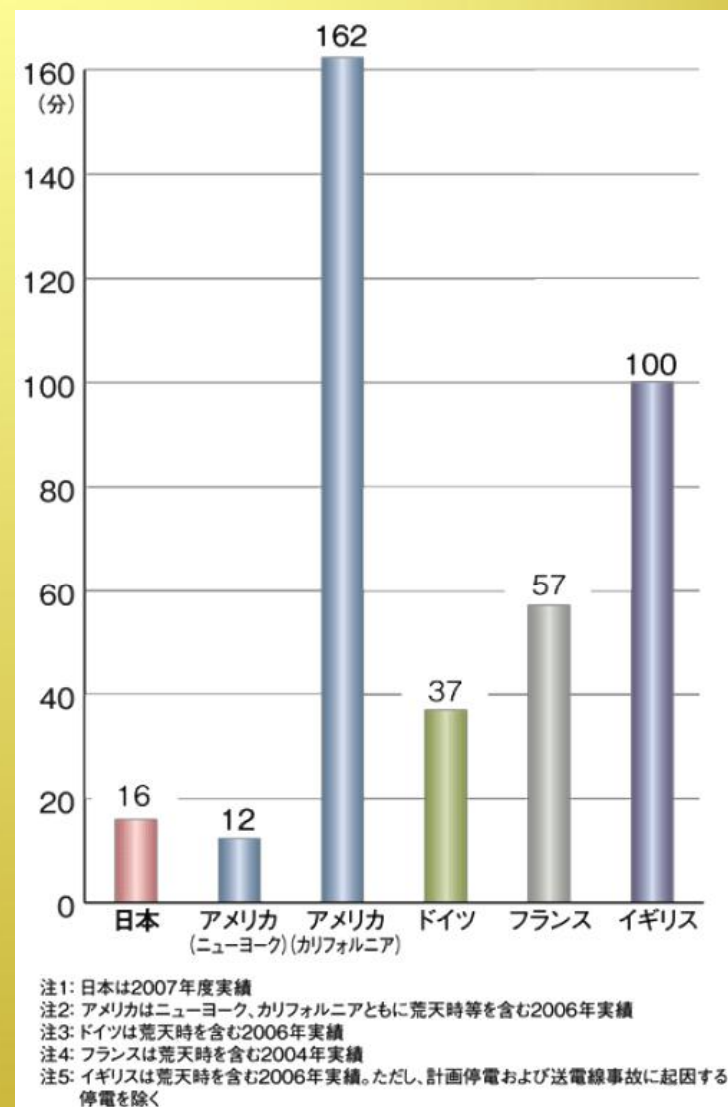
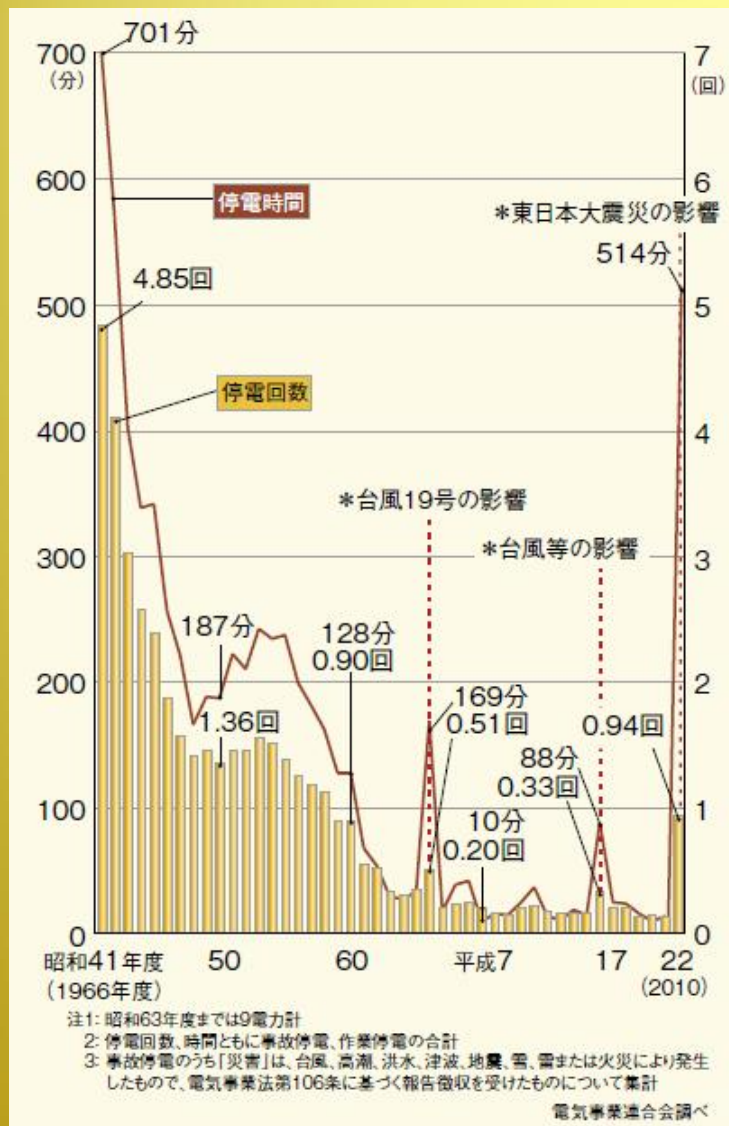


# 我が国の電気需要の増大と技術変遷

一人当たりの最大消費電力 = (最大電力) / (総人口)



# 電気の品質：年間停電時間



我が国の1軒あたりの年間停電回数、停電時間

出典：電事連「電気事業の現状 2012」

1軒あたり年間停電時間の国際比較

出典：電事連「電気事業の現状 2009」<sup>18</sup>

# 日本の電力供給・需要の特徴と電力システム

## 《特徴》

- ★狭い国土に産業と人口が集中
- ★世界第3位のGDP(520兆円)、それを支える電力需要183[GW]
- ★世界一の大都市電力供給密度
- ★世界最高品質(停電時間最小)
- ★発電のための燃料(資源)のほとんどすべてを輸入
- ★一つの国に50/60Hzという二つの周波数
- ★家庭全世帯(100%)へ電力供給
- ★電力安定供給に脅威となる自然災害(地震、台風、雷など)が多い



## 《日本の電力システム》

- ✓大都市圏に大容量の電力を送るシステム
- ✓電力の安定供給を確保する高信頼性システム
- ✓電氣的に安定なシステム(発電所, 需要地の配置)
- ✓自然災害(雷, 台風, 地震など)の被災最小化システム
- ✓災害時, 緊急時の相互支援システム
- ✓島国で他国との系統関係なし

# 電力供給のための技術的条件

発電所で生産され送電線を通じて需要家へ届けられる電気、その電気の品質としての必要条件：

1. 電圧が一定であること  $101 \pm 6$  [V]
2. 周波数が維持されること  $50 \pm 0.2$  [Hz]
3. 系統安定度が維持されること
4. 系統遮断容量が基準を超えないこと
5. 系統絶縁協調が成り立つこと
6. 瞬低, 停電しないこと=電力の安定供給

これが維持されないと  
大停電発生の可能性



電力需要との協調

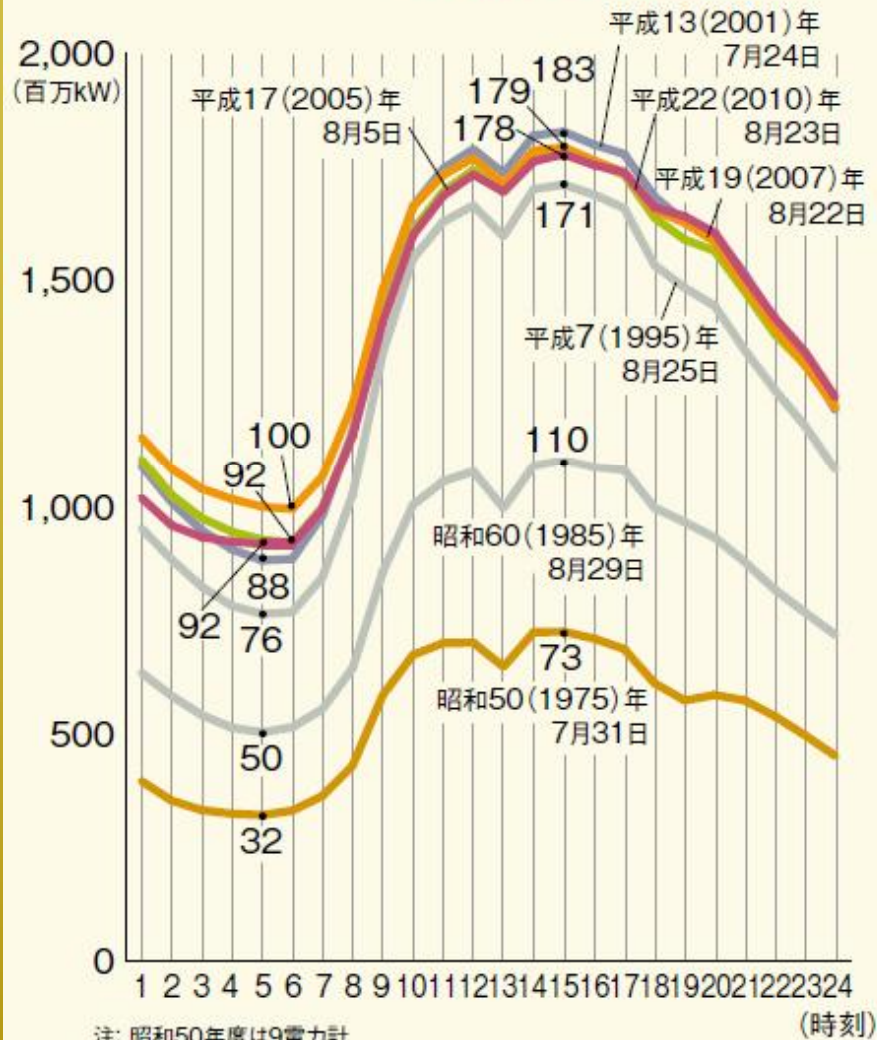
それ以外の必要条件：

- (a) 環境調和すること
- (b) 経済性が成り立つこと
- (c) 損失(ロス)が少ないこと
- (d) 台風・雷などの自然条件をクリアできること、など



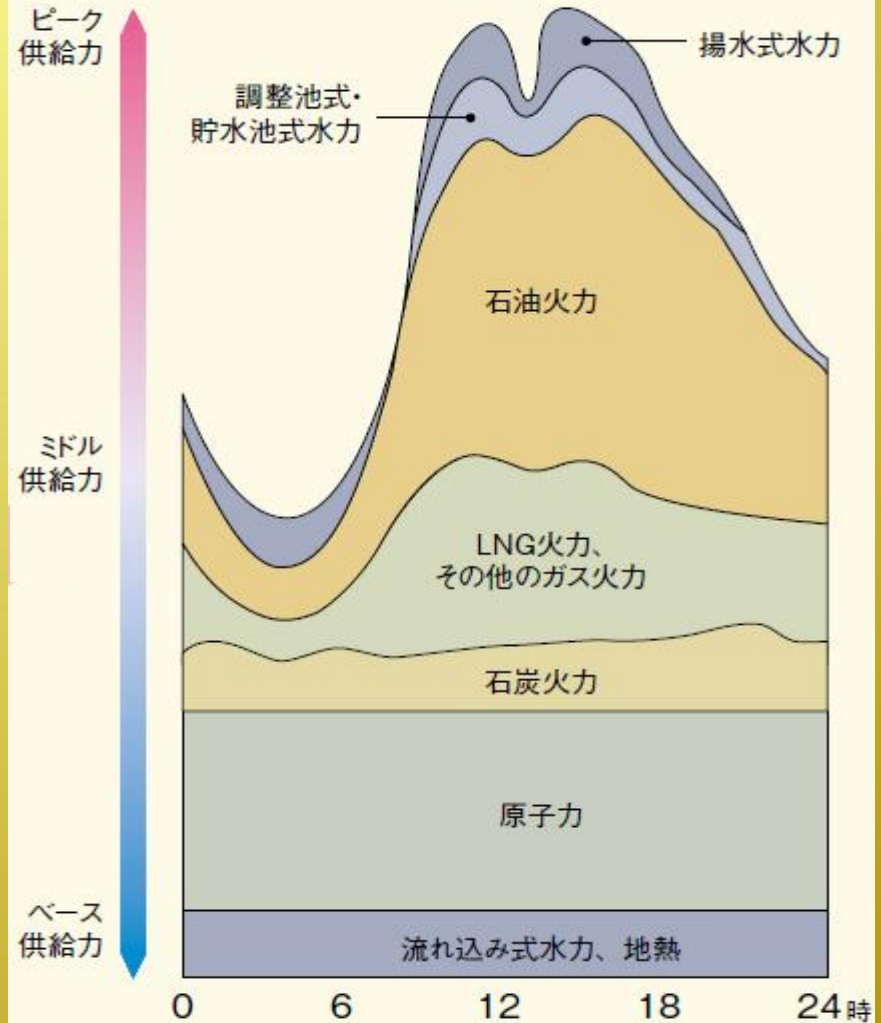
# 1日の電気の使われ方と需要に合わせた発電

●夏季の1日の電気の使われ方[10電力計]  
(年間最大電力を記録した日)



電気事業連合会調べ

●電力需要に合わせた電源の組み合わせ  
(イメージ図)

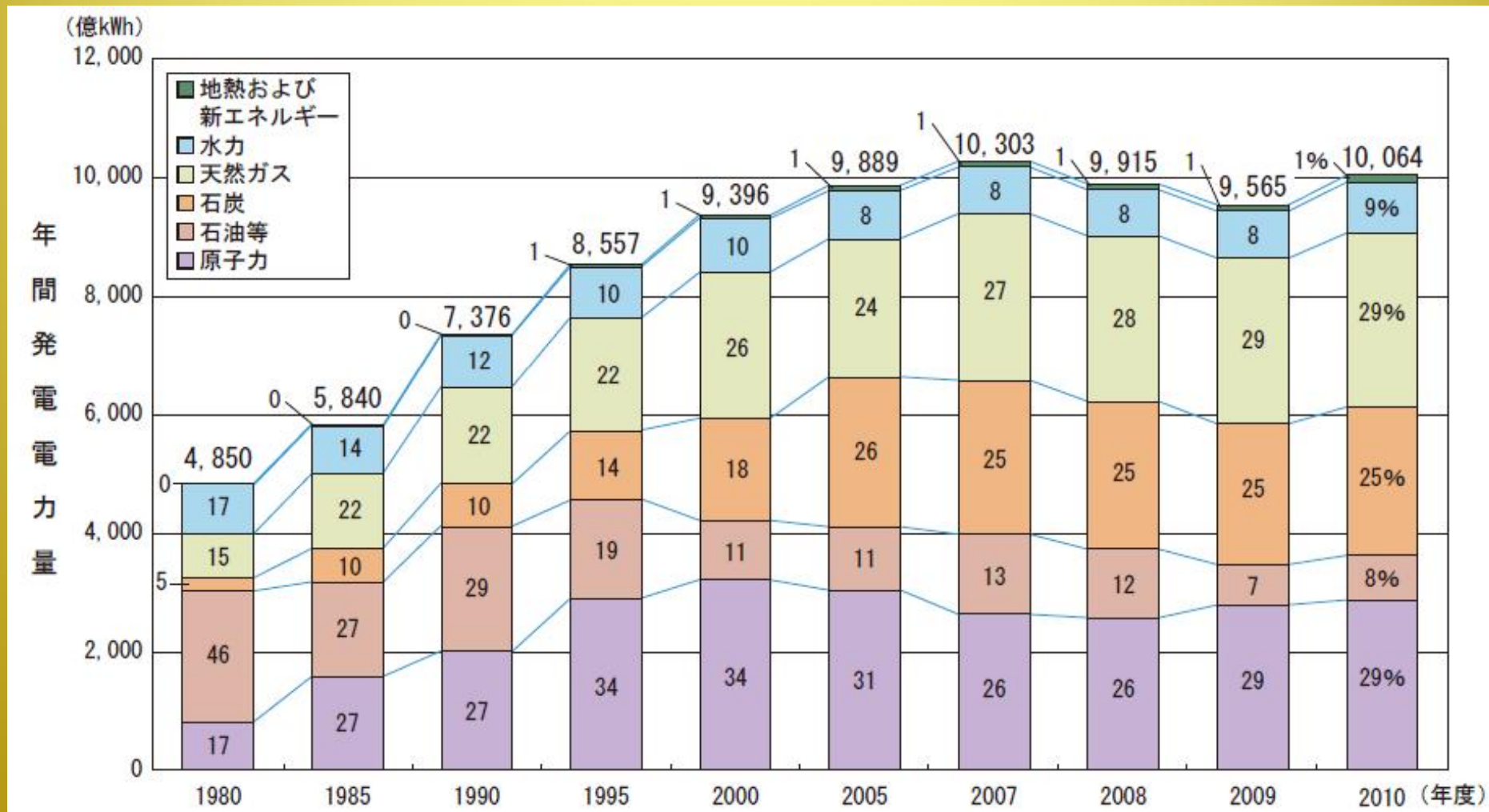


## 発電方式別の発電原価試算結果 (1kWh当たりの発電費用)

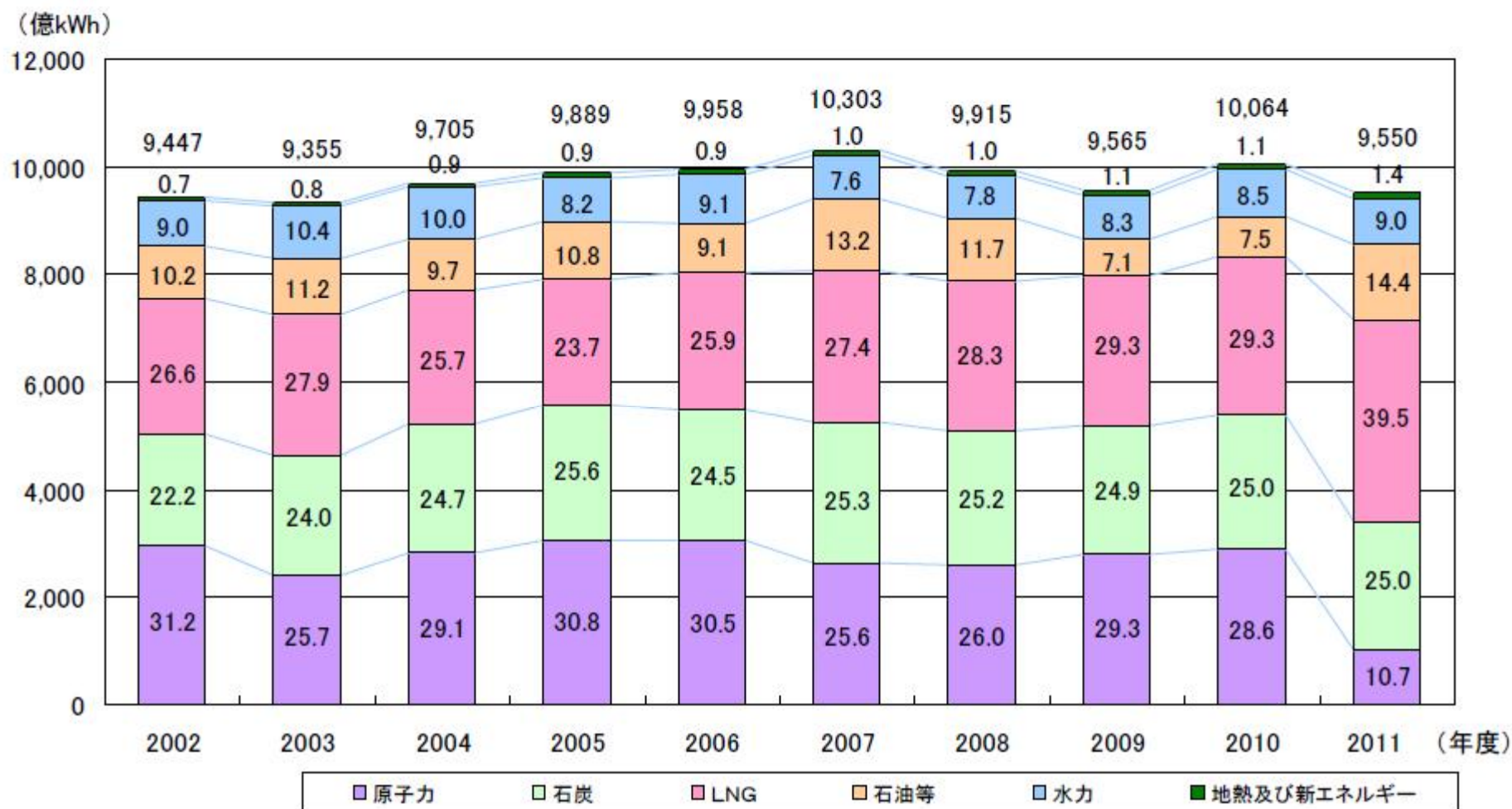
発電方式	発電単価(円／kWh)	設備利用率(%)
水力	8.2～13.3	45
石油	10.0～17.3	30～80
LNG	5.8～7.1	60～80
石炭	5.0～6.5	70～80
原子力	4.8～6.2	70～85
太陽光	46	12
風力	10～14	20

注) 設備利用率(%) = 1年間の発電電力量 / (出力 × 1年間の時間数) × 100%

# 電源別発電電力量(2002~2011年度)



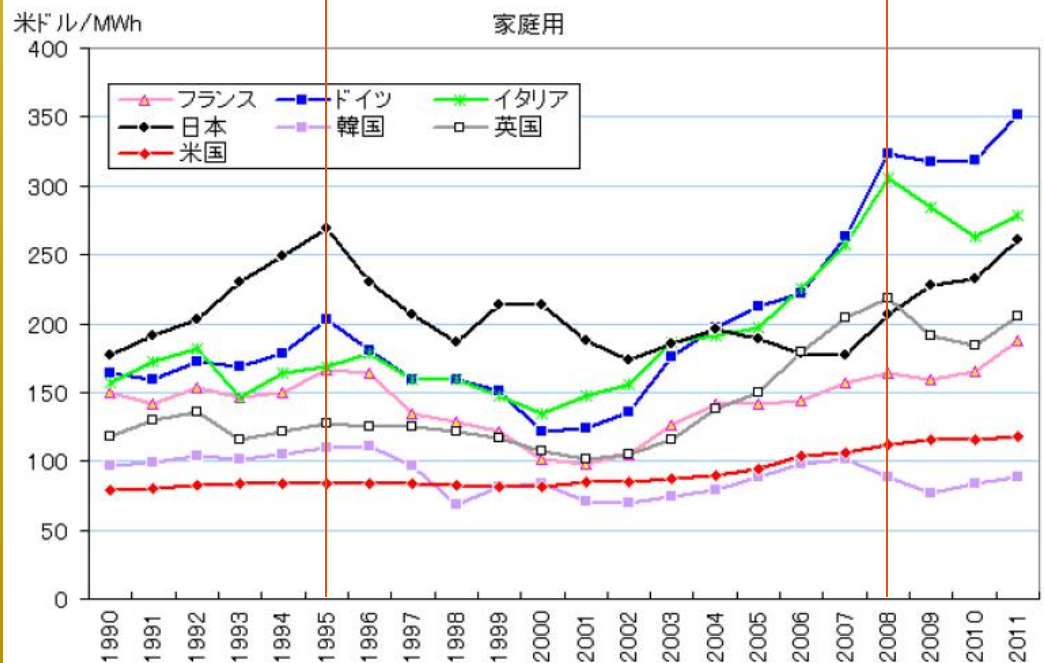
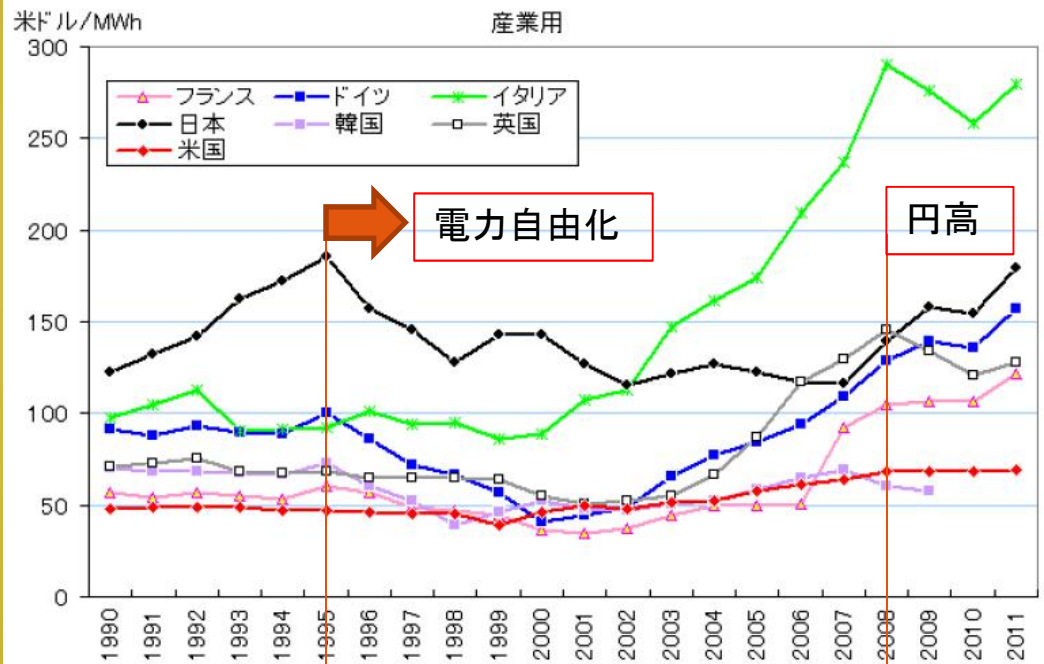
# 電源別発電電力量(2002～2011年度)



(注) 10電力計、他社受電分を含む。グラフ内の数値は構成比(%)。石油等にはLPG、その他ガスを含む。



# 電気料金の国際比較



出典: OECD/IEA, Energy Prices and Taxes, Vol. 1999-1, Vol.2005-1, Vol. 2012-2

# 50Hz/60Hzを巡る議論

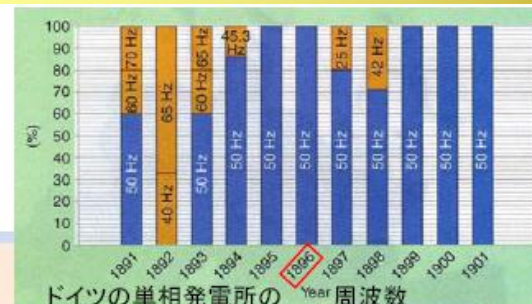
- 明治29年(1896):  
関東:ドイツ(AEG社)から発電機を輸入(50Hz:東京電灯)  
関西:米国(GE社)から発電機を輸入(60Hz:大阪電灯)

- 大正3年(1914):  
逓信省が周波数調査委員会を組織して審議  
50Hzを標準(25Hzも認める)  
→ 電力逼迫状況(第一次大戦)で流れる。

- 大正9年(1920):  
日本電気協会が中心で周波数統一委員会が組織  
50/60の委員は、他の系統の変更には賛成  
→ 電力逼迫状況で流れる。境界には50/60で運転できる発電所。

- 昭和17年(1942):  
戦時(第二次大戦)逓信技術審議会, 電気部門委員会(内外地および東亜諸国の電気方式統一問題) 50Hz単一統一  
→ 資材難と国際状況変化で流れる。

- 昭和20年(1945):  
戦後の再出発として、周波数統一準備委員会。60Hzが妥当。昭和22年から5カ年計画  
→ 電力需要増と工事費高騰のため流れる。



ドイツの単相発電所のYear周波数

IEEE power & energy magazine

※欧州では50Hzが標準化  
・当時60Hzでは回転変流器(AC→DC:鉄道用)が困難。



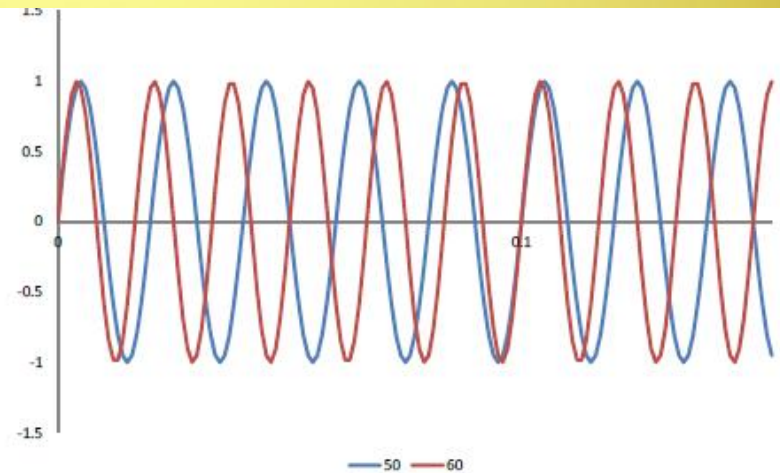
<http://koedaka.cocolog-nifty.com/blog/2004/06/053.html>

統一の議論



# 50Hz/60Hzに関する疑問

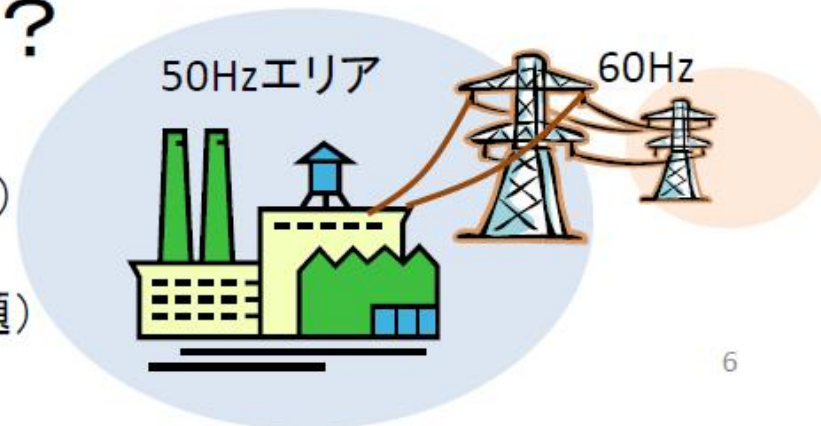
- 直接接続できないか？
- 60Hzエリアを広げられないか？



- 送電線 → 問題なし
- 変圧器 → 60Hz用を50Hzで使うと鉄心が過励磁(使用不可)
- 保護リレー → デジタルリレーのサンプリング周波数が50/60用に固定(互換性なし)
- 計測装置 → コンデンサとリアクトルの組み合わせについては問題あり

## • 需要家端まで60Hzを輸送？

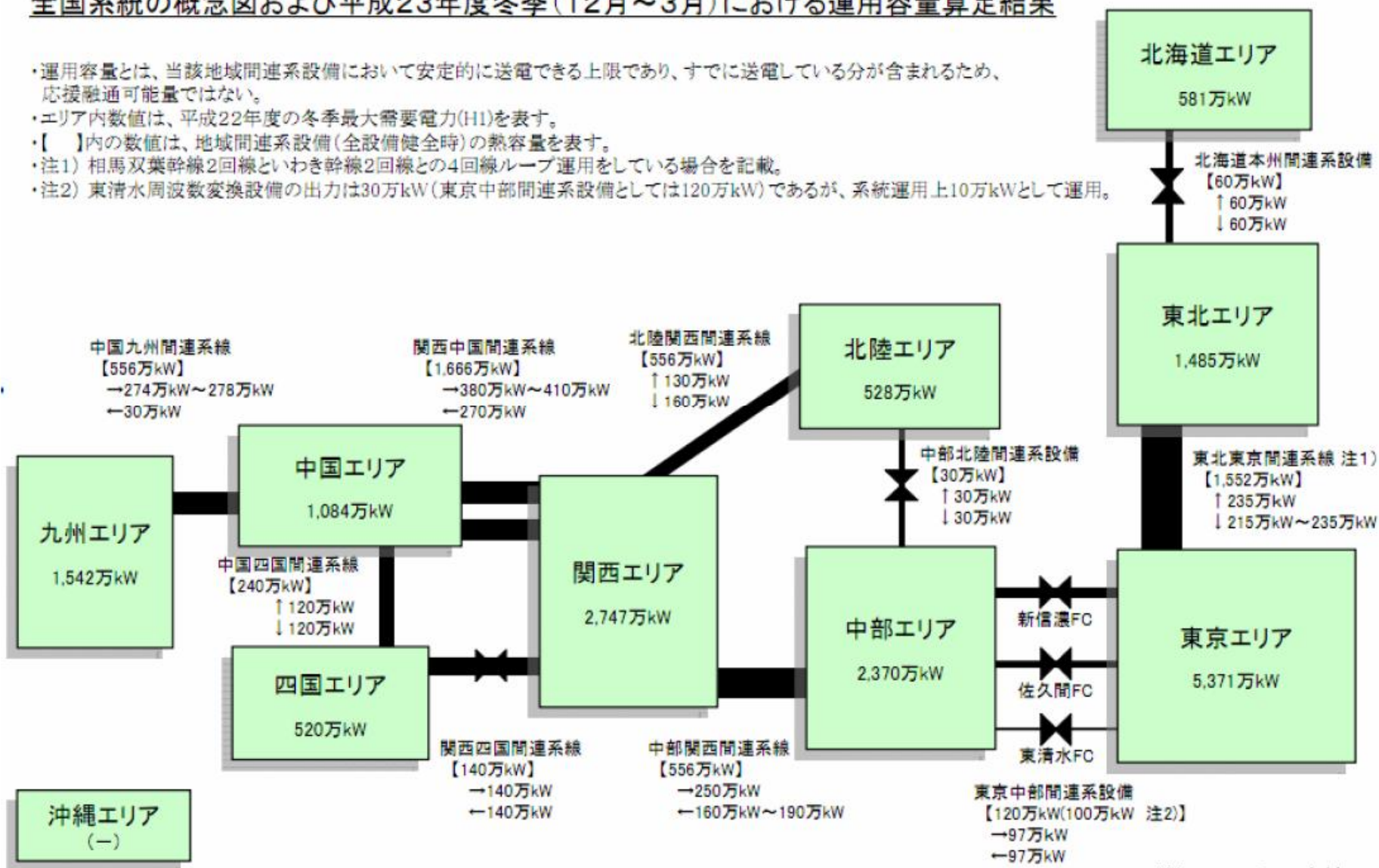
- インバータ駆動の回転機 → 問題なし
- 誘導機を用いている場合 → 問題(速度変化)
- 自家発との共用の場合 → 問題
- 自端で周波数変換 → 問題なし(コストは問題)



# 連系容量(運用容量)

## 全国系統の概念図および平成23年度冬季(12月～3月)における運用容量算定結果

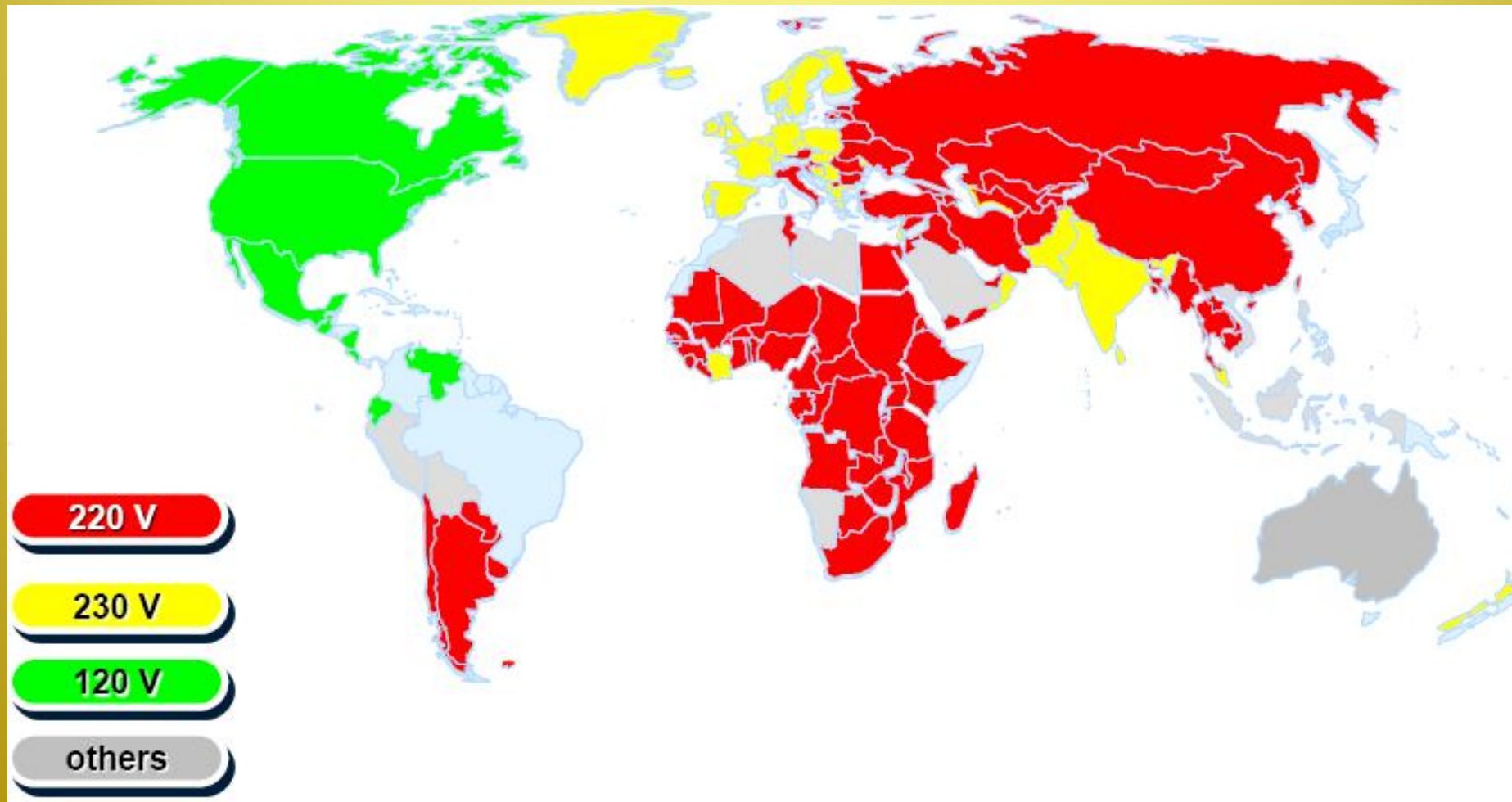
- 運用容量とは、当該地域間連系設備において安定的に送電できる上限であり、すでに送電している分が含まれるため、応援融通可能量ではない。
- エリア内数値は、平成22年度の冬季最大需要電力(H1)を表す。
- [ ]内の数値は、地域間連系設備(全設備健全時)の熱容量を表す。
- 注1) 相馬双葉幹線2回線といわき幹線2回線との4回線ループ運用をしている場合を記載。
- 注2) 東清水周波数変換設備の出力は30万kW(東京中部間連系設備としては120万kW)であるが、系統運用上10万kWとして運用。



※ ESCJのHPより

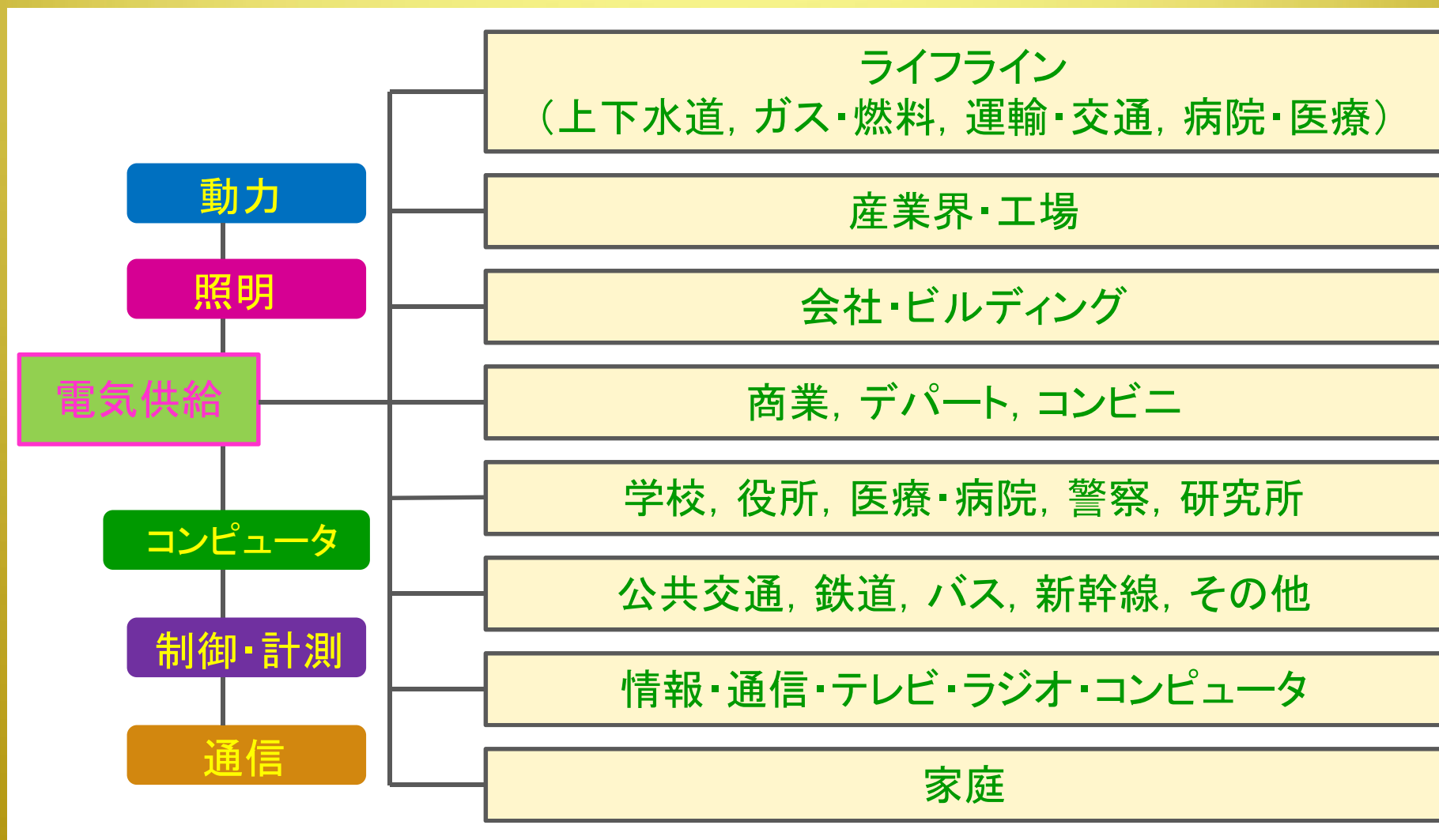


# 家庭用の電圧

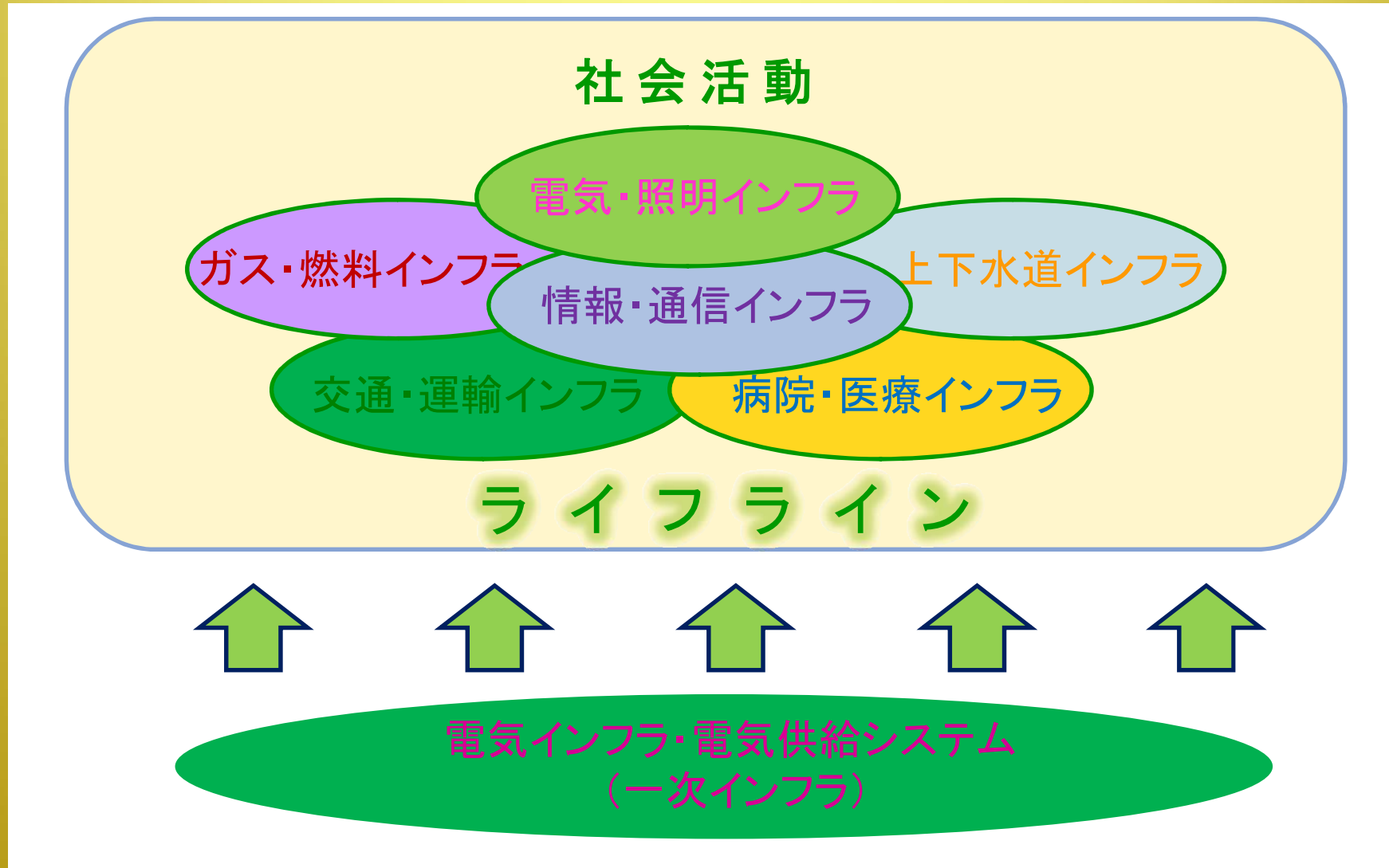


## 4. 社会インフラ間の連携

# 社会における電気供給の役割

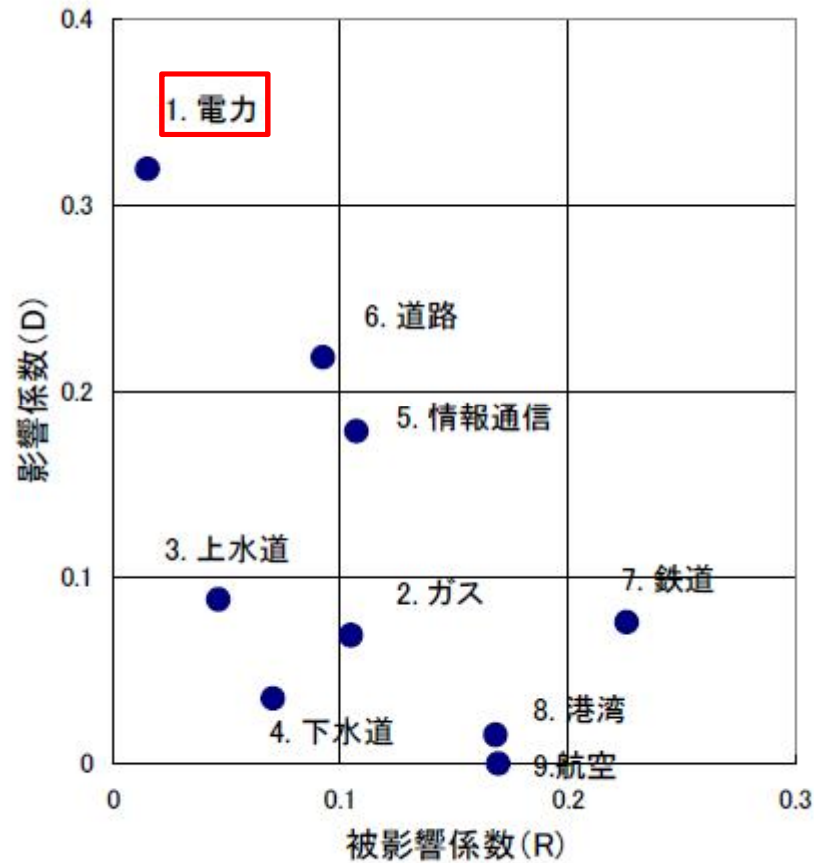


# 総てのインフラを支える電気インフラ

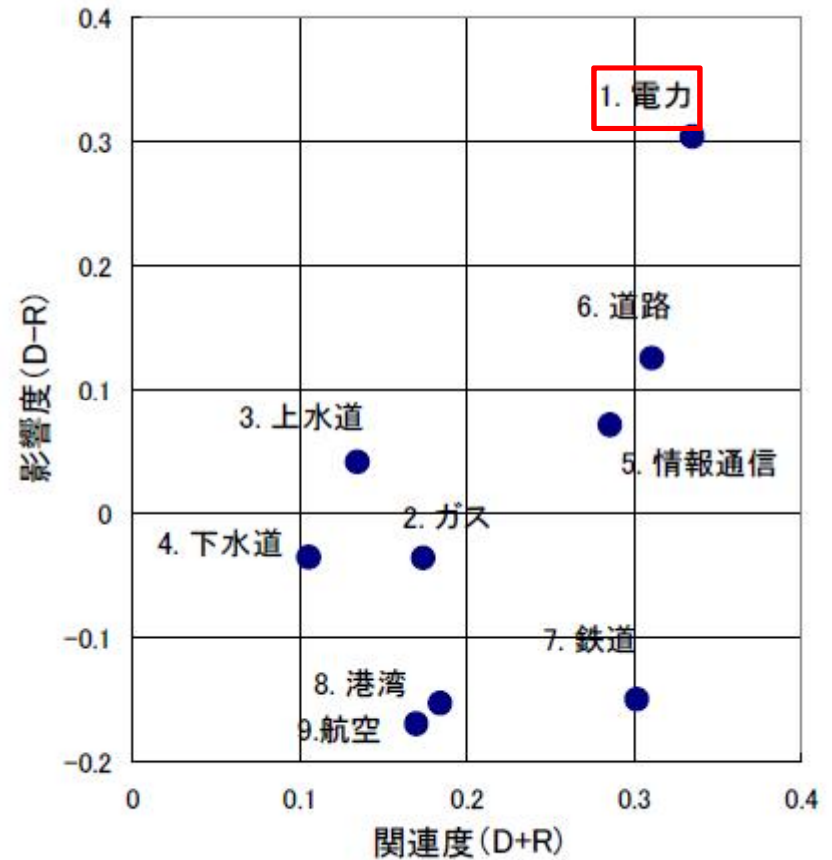




# 各インフラ間の影響度係数、関連度



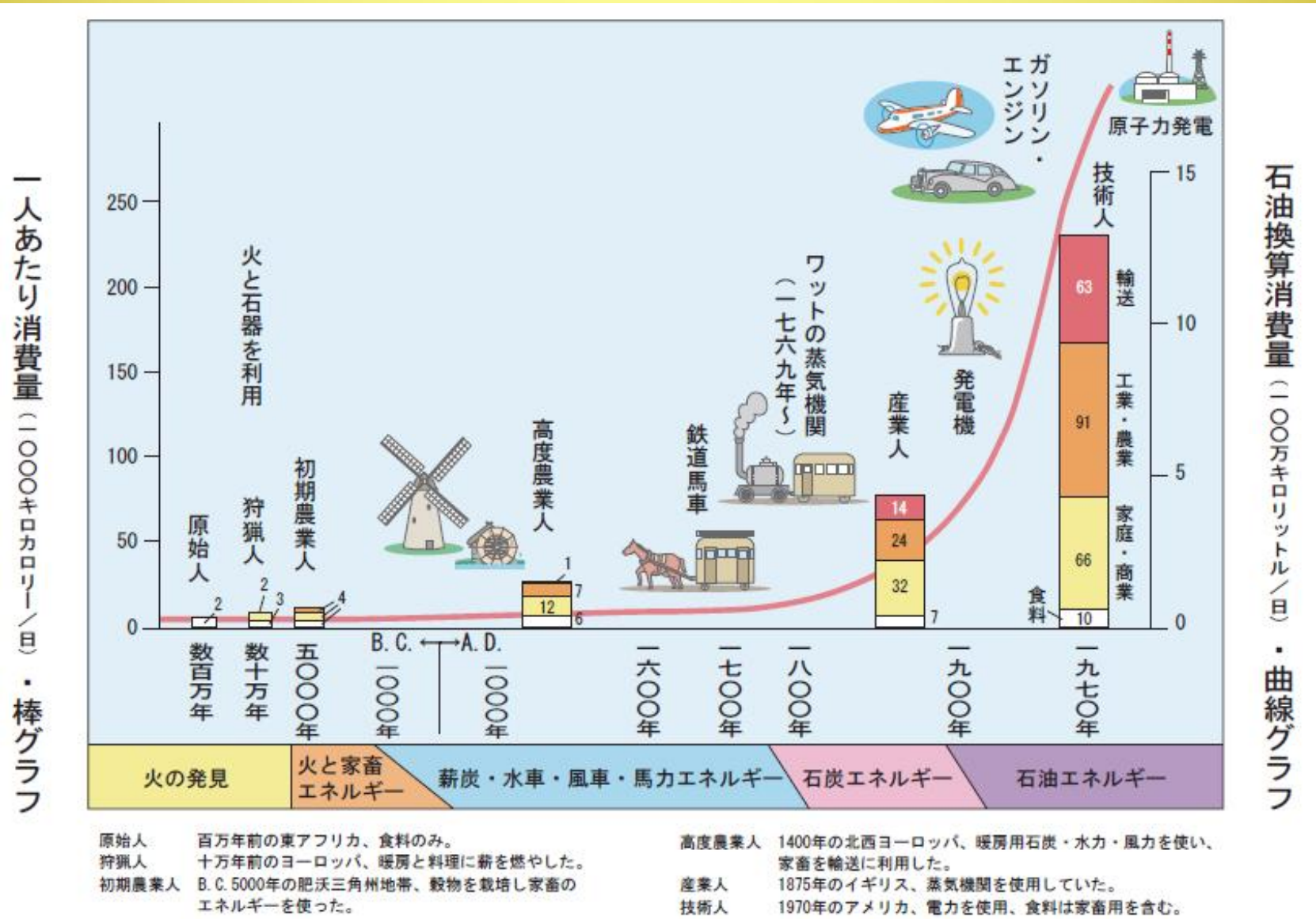
(a) 影響係数・被影響係数



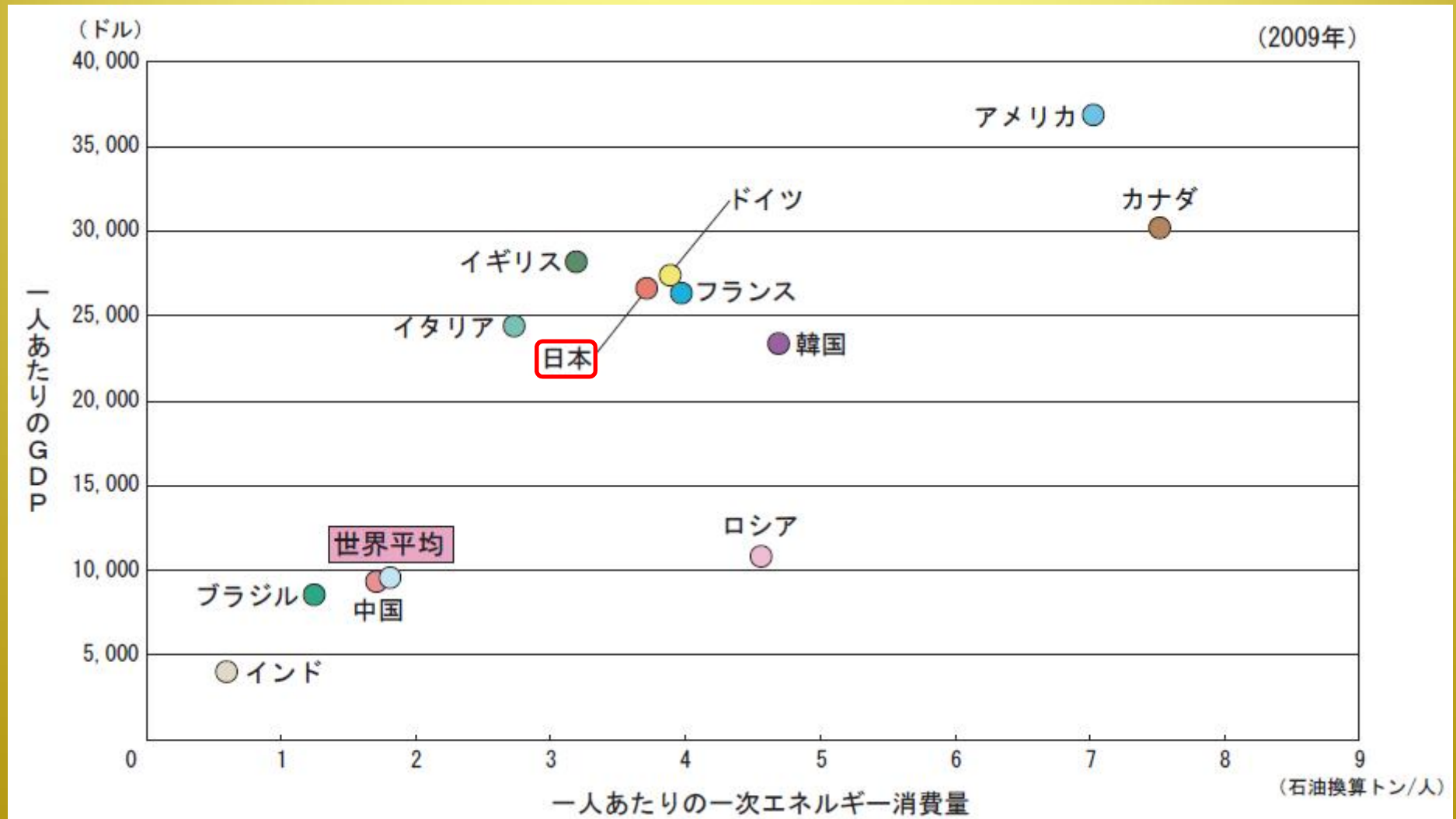
(b) 影響度・関連度

## 5. 電気エネルギー依存の高まり

# 人類とエネルギーの関わり

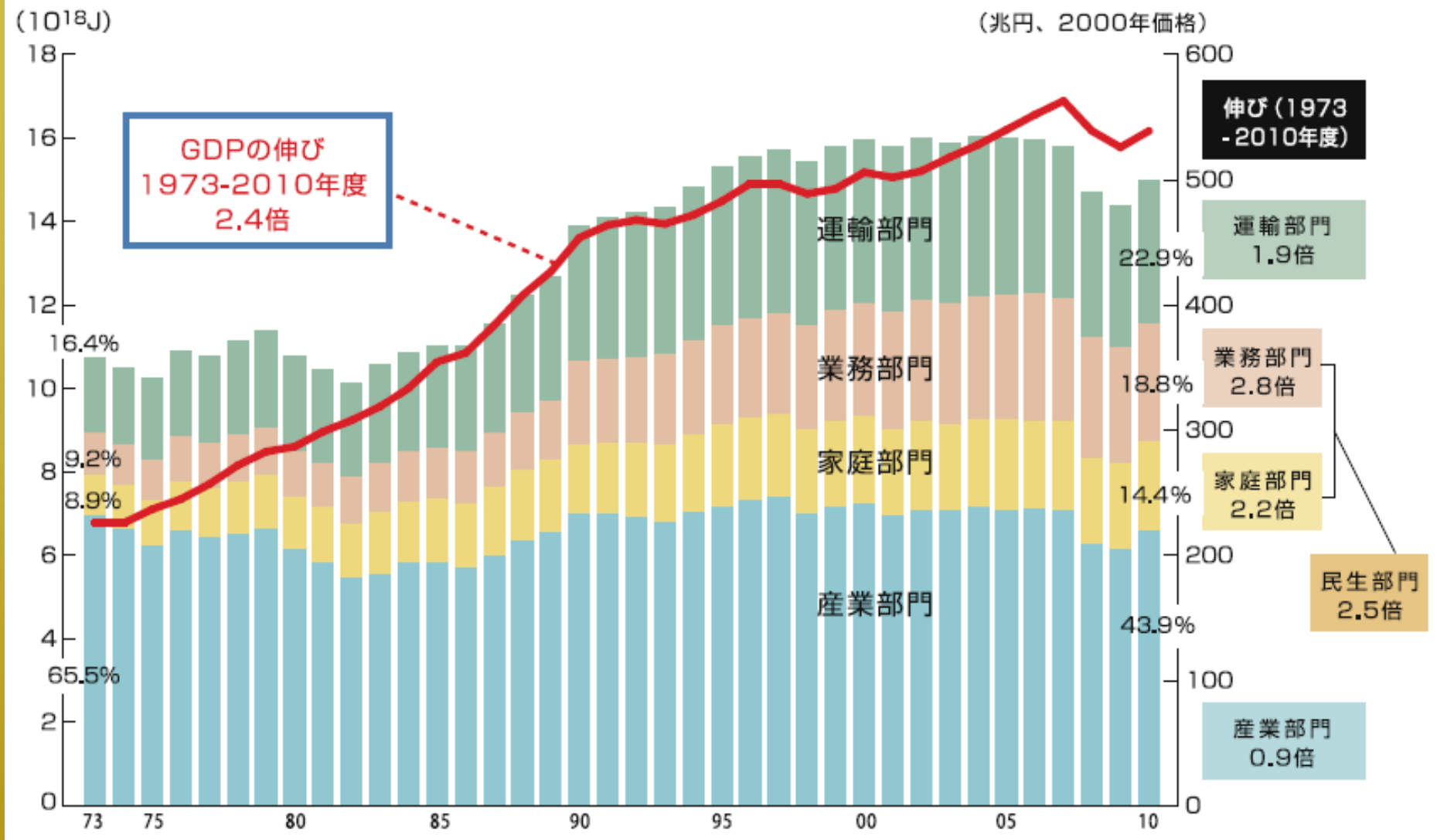


# 一人当たりのGDPと一次エネルギー消費量



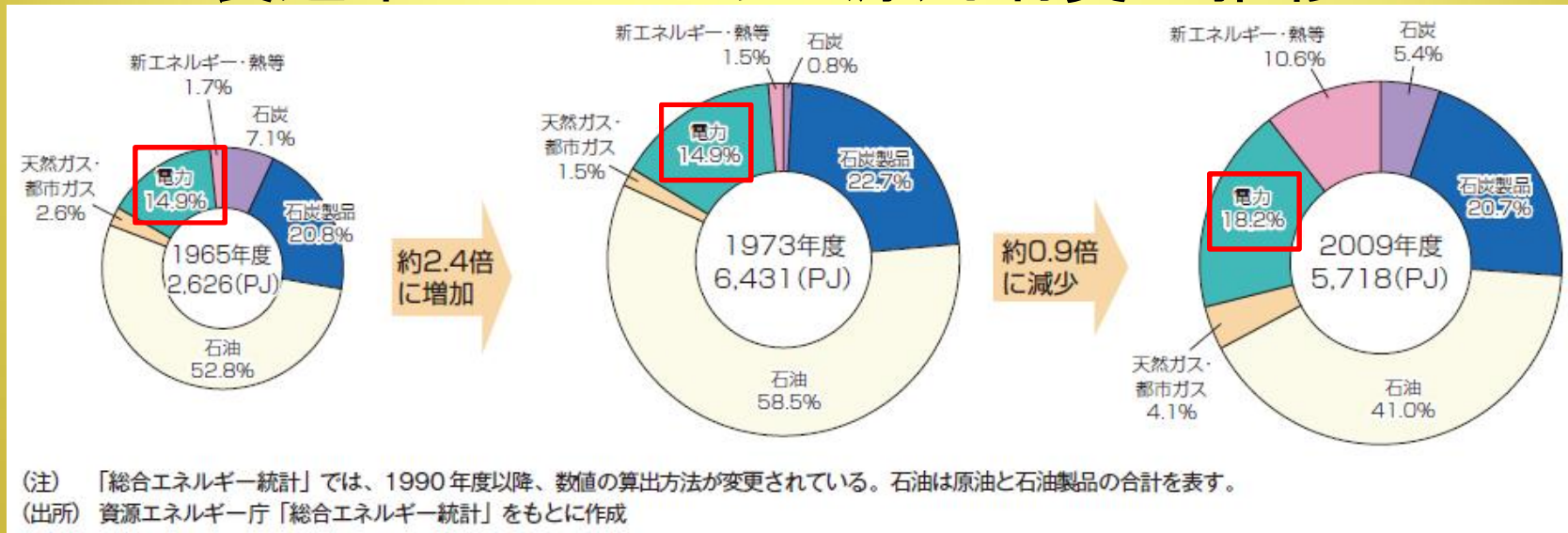


# エネルギーの使われ方

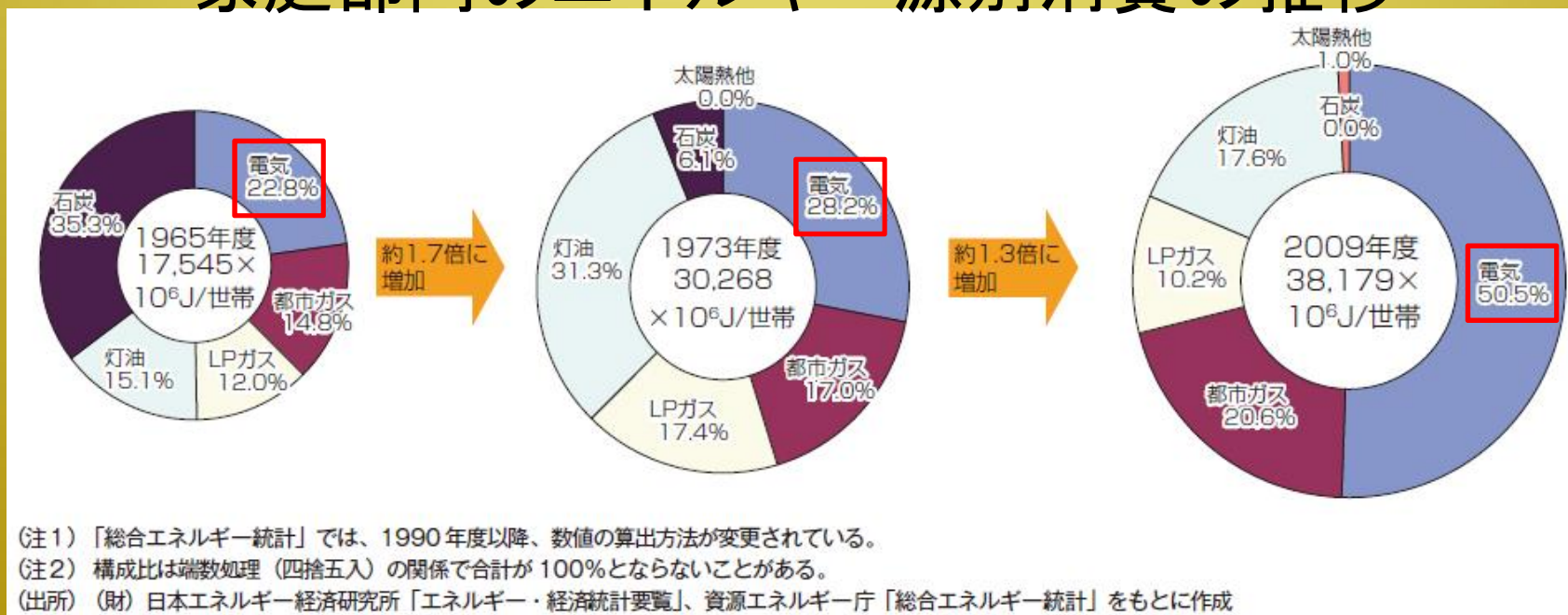




# 製造業のエネルギー源別消費の推移



# 家庭部門のエネルギー源別消費の推移



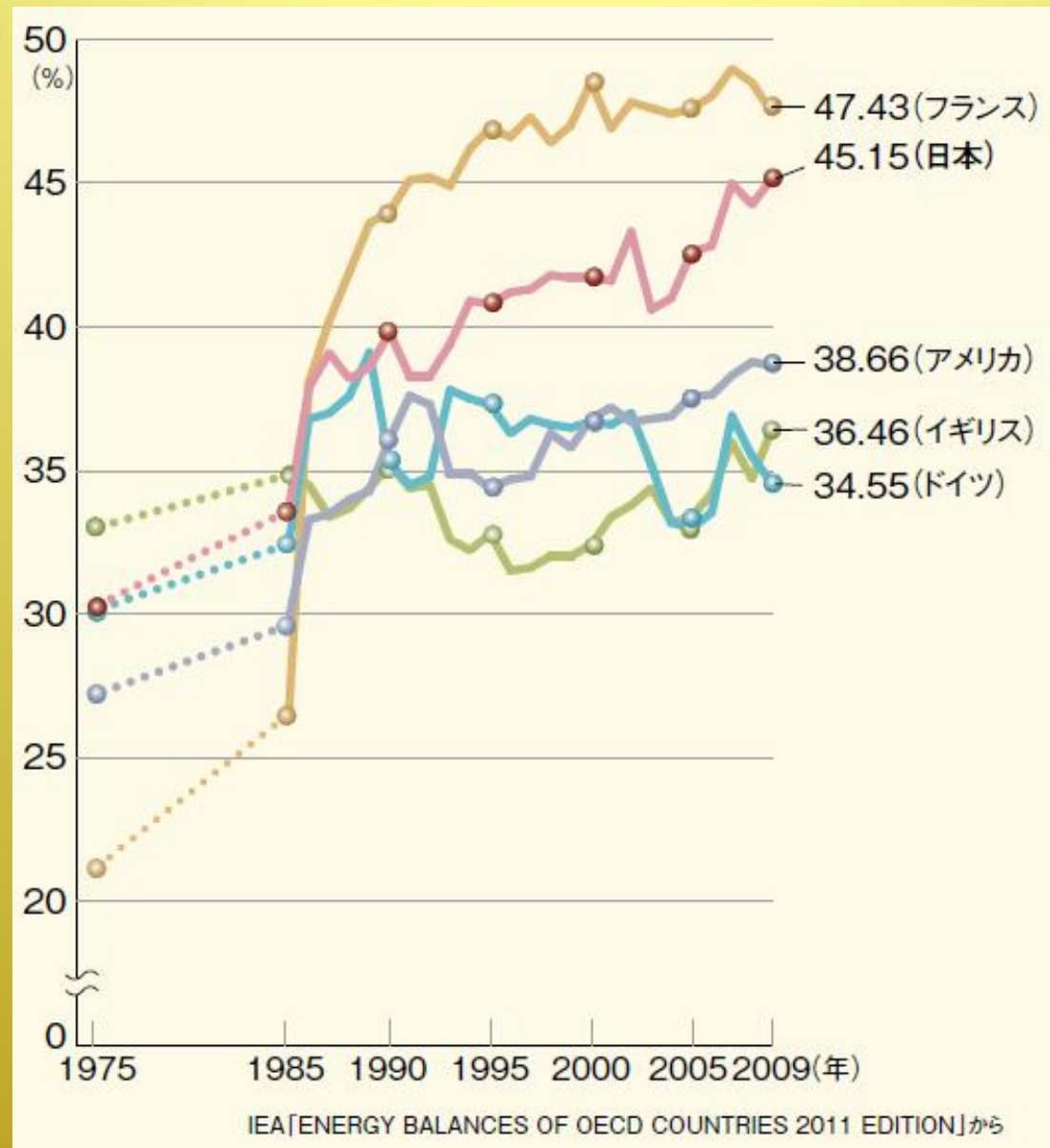


# 一次エネルギーに占める電力の比率（電力化率）



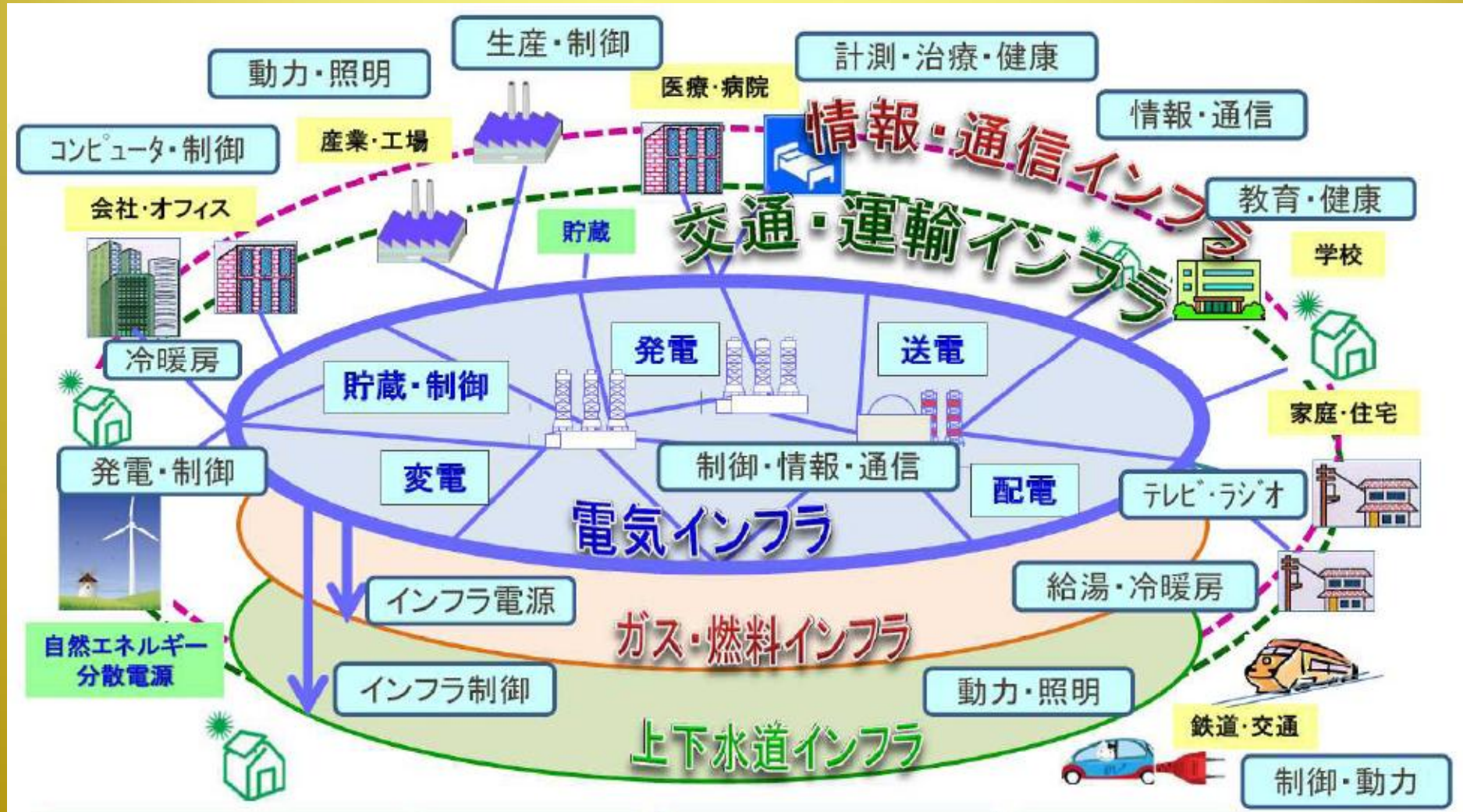


# 主要国の電力化率の推移



出典:電事連「電気事業の現状 2012」

# 電気依存が一層高まる社会



出典: 電気学会公開シンポジウム2012.5.10 大久保仁前会長講演スライド

## 6. スマート社会への貢献

# これからの社会に求められるもの

人口減少・高齢化であっても生産性の向上等を通じて  
持続的な成長を達成できる社会

安全・安心

快適・健康

環境・低炭素化

スマート社会  
《電気の安定供給》

電気システム

情報通信システム

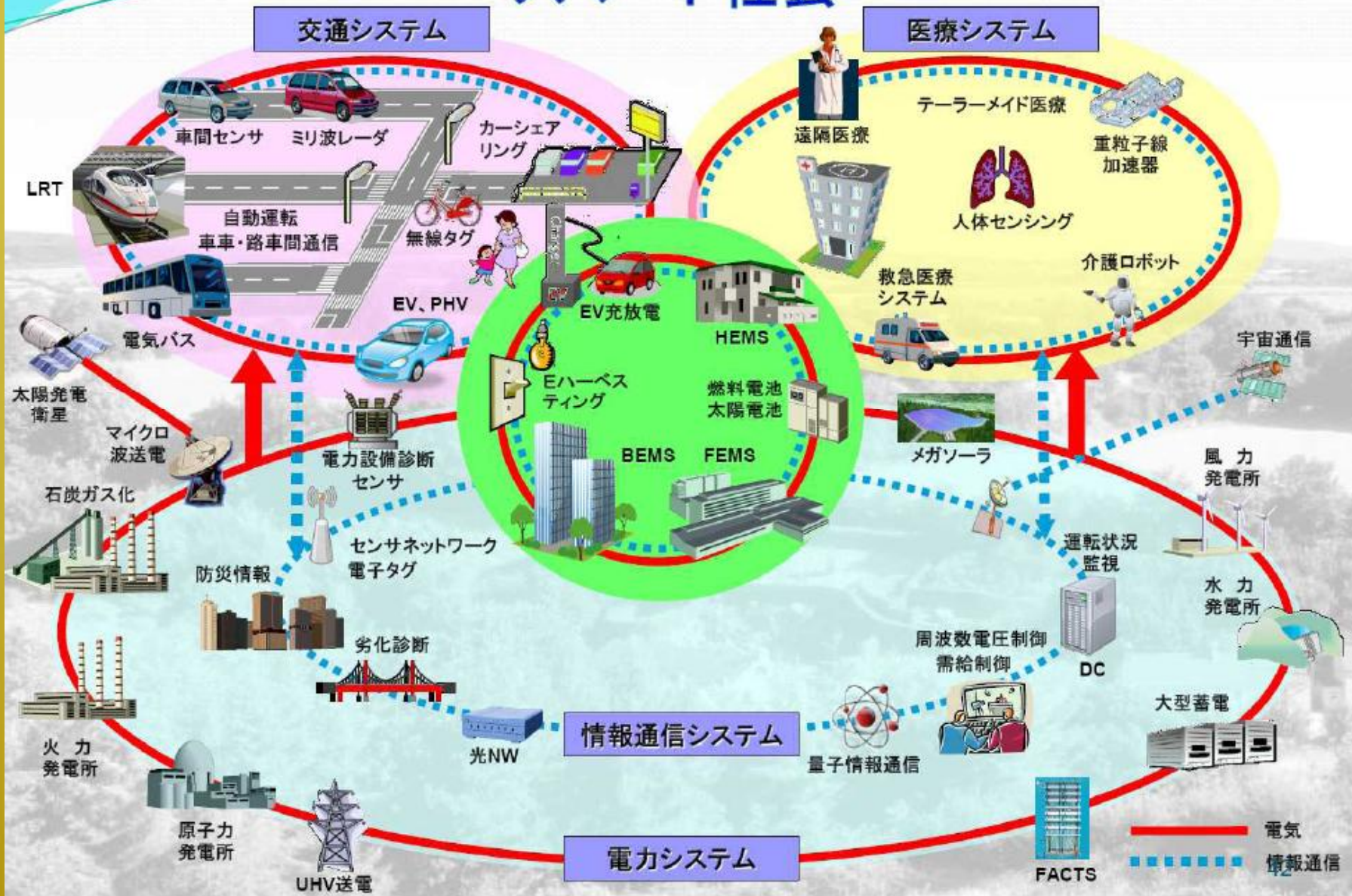
交通システム

医療システム

電気エネルギー供給

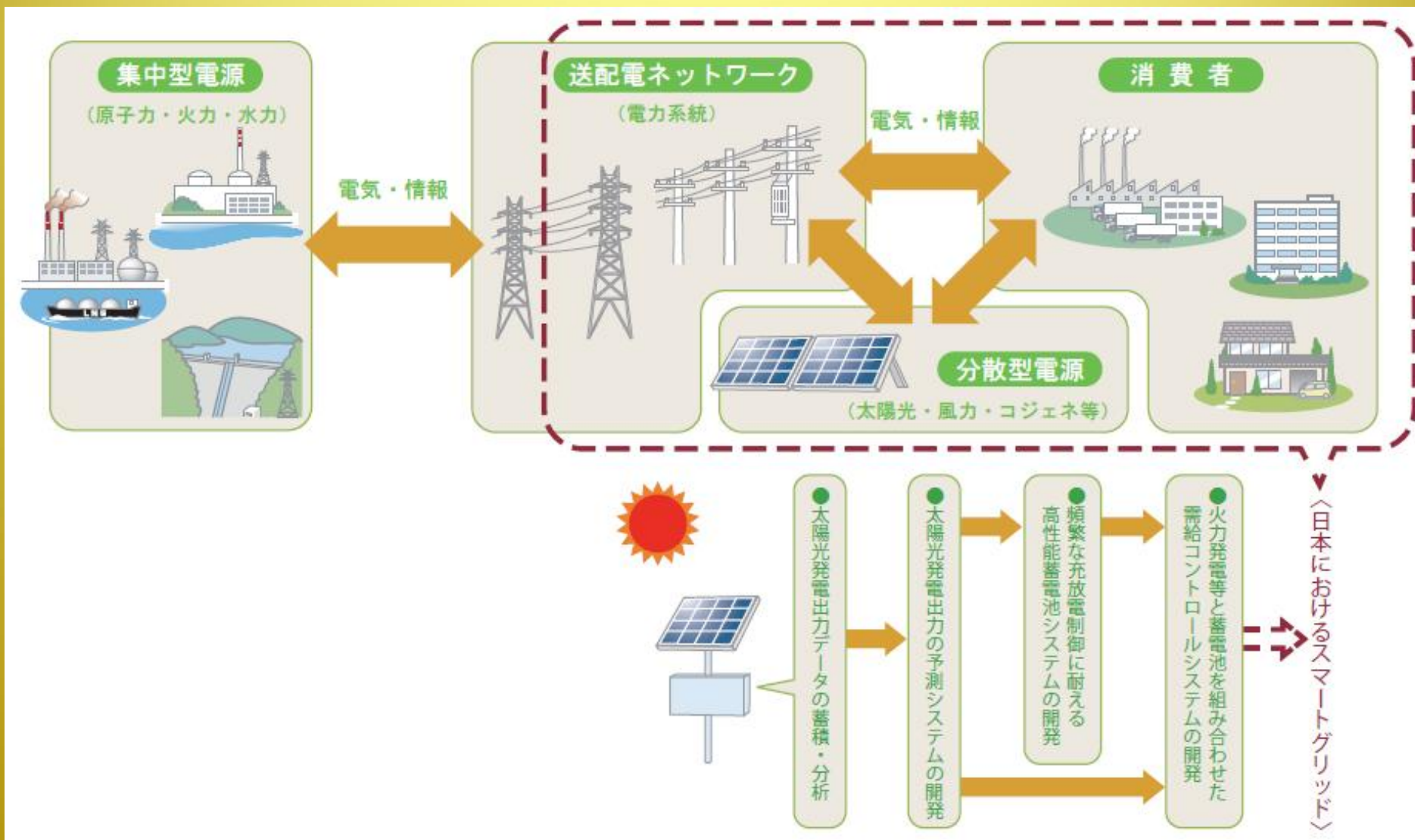


# スマート社会



出典: 電気学会公開シンポジウム2012.5.10 大久保仁前会長講演スライド

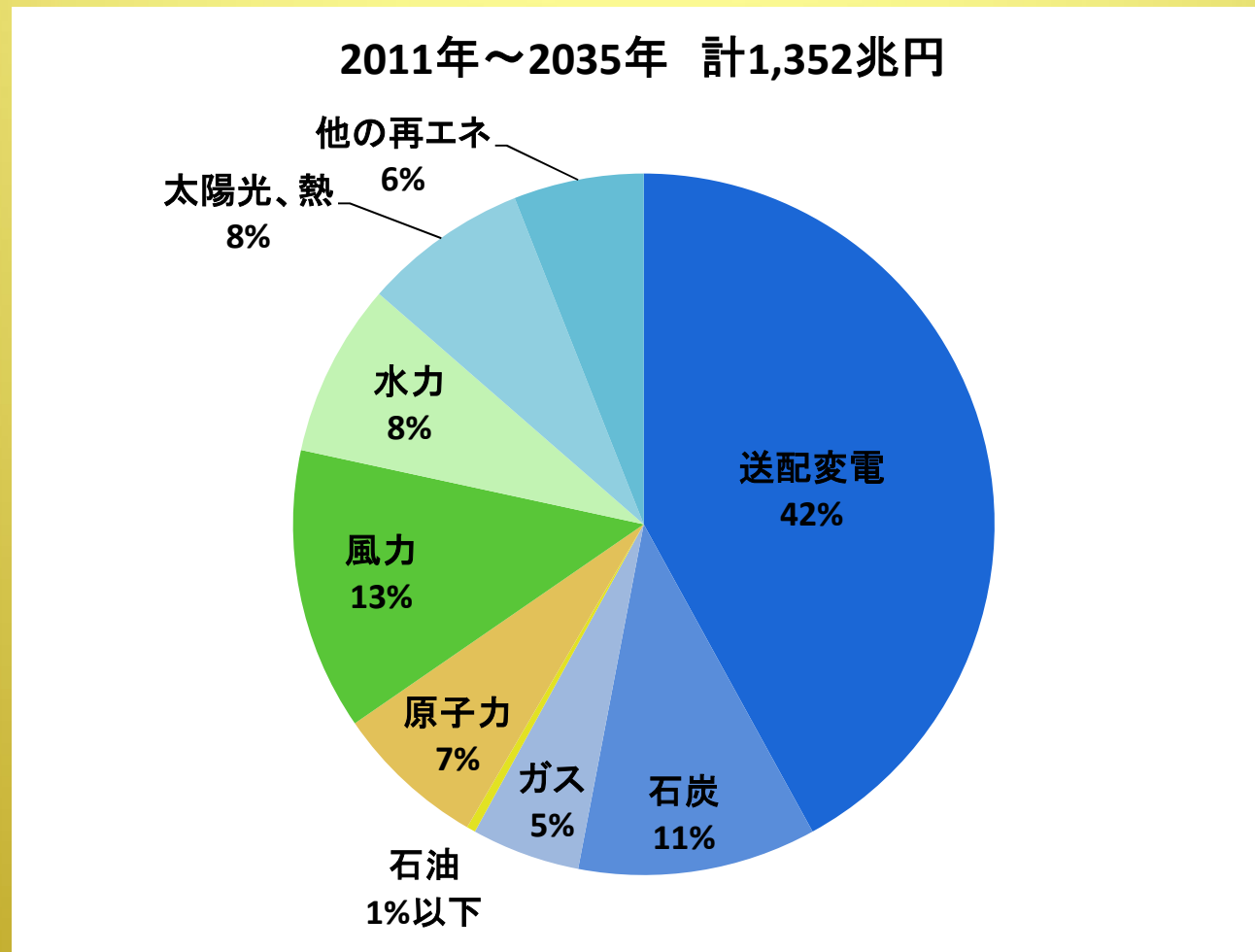
# 日本におけるスマートグリッド概念図



# 7. 豊かな日本への貢献



# 世界における電気事業への投資予測

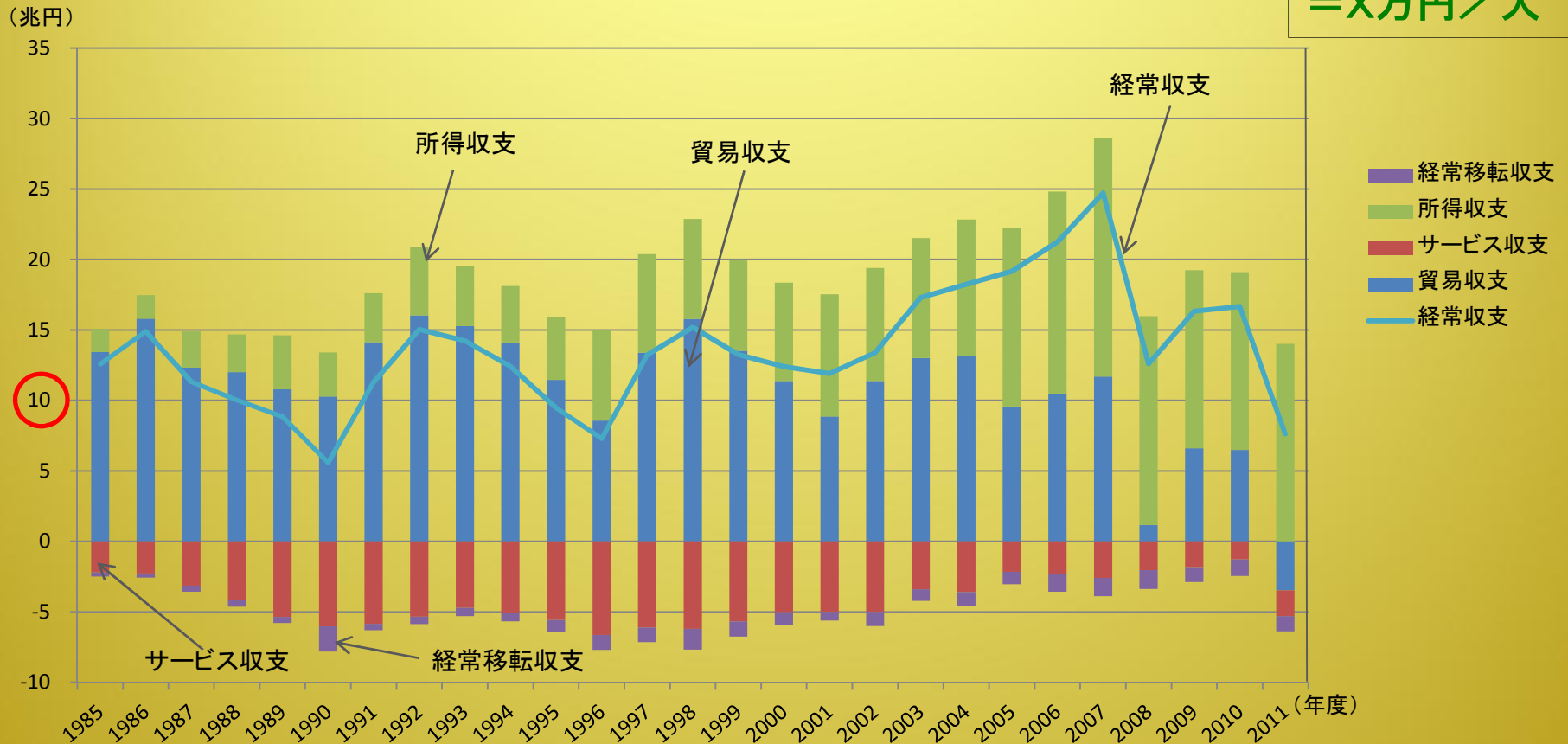


今後25年間に亘り、毎年54兆円（各種発電に31兆円、送配変電に23兆円）の投資が見込まれている。送配変電関係は、新設の他、需要の高まりに応える設備の増設や既存設備の改修、交換への投資が続くと予想される。

出典：World Energy Outlook 2011, p.193の図面を編集

# 我が国の国際経常収支の推移

X兆円／1億人  
=X万円／人



## < 経常収支の内訳 >

- 所得収支：日本企業が海外で得た利益と外国企業が日本で得た利益を差し引きした金額
- 貿易収支：輸入と輸出を差し引きした金額
- サービス収支：日本人が海外旅行などで使った、宿泊代やショッピングなどの金額
- 経常移転収支：発展途上国への経済援助や国際機関へ収めた金額



# まとめ

## 大切な電気エネルギーのインフラ構築に向けて

- 電気への依存度が高まる現代社会において、電気システムの特徴を良く理解して、電気をスマートに使っていくことが必要である。
- 電気エネルギー供給の安定性、信頼性の確保、電気が社会インフラの要であることの再認識から、より柔軟な運用・制御システムを構築する。

多方面での連携を進め、環境適合型の安全・安心スマート社会を構築し、再び豊かな日本を目指したい。

続く講演で更に詳しくご説明を致します。