

平成25年度 電気学会公開シンポジウム  
「大切な電気を効率的に つくる。送る。賢く使う」

## 電気を効率的につくる：現状並びに今後・将来

エネルギー資源、電源構成、発電方式、効率、需給運用  
再生可能エネルギーと大量導入の課題、電力貯蔵

広島大学 大学院工学研究院 電力システム工学  
餘利野 直人

2013年12月2日 広島国際会議場 2014年2月3日 学士会館

# 内 容

1. 電源構成の現状
2. 各種発電方式
  - ・火力発電(石油、石炭、天然ガス)
  - ・高効率火力発電
  - ・原子力発電
  - ・水力発電
3. 最近の再生可能エネルギー発電と分散電源
4. 再生可能エネルギー大量導入の課題  
(電圧、周波数、信頼度)
5. 将来に向けた技術開発(電力貯蔵、スマートグリッドなど)

# お伝えしたいこと

電力システムは他のインフラとかなり異なる。

## 伝えたい特徴

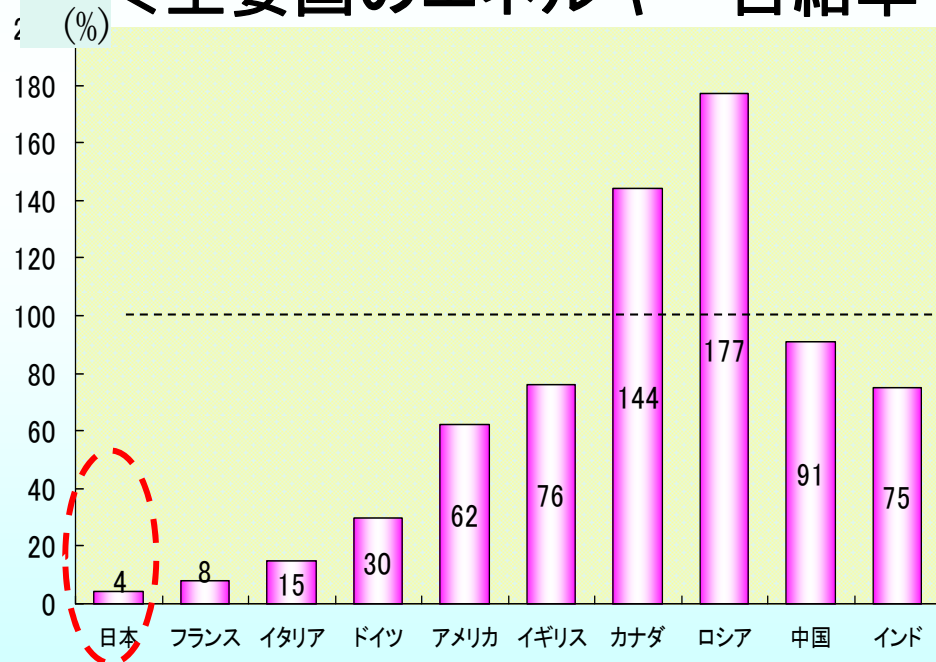
- 電力システムはエネルギー利用の生命線
- 長い時間軸上で信頼性を重視(後戻り不可)
- 人類が作った最大級の複雑システム

## いろいろな課題

# 日本のエネルギー自給率

- 日本における**エネルギー自給率は、わずか4%**  
〔(参考) 食料自給率 40%〕
- 世界の主要国と比べても、**極端な資源小国**であるのが実態

## ＜主要国のエネルギー自給率

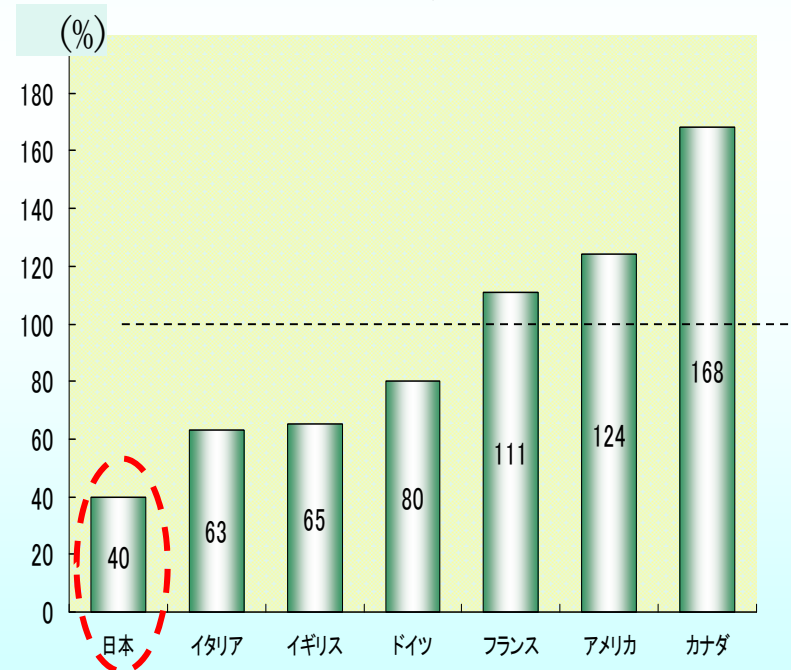


(注1)原子力を除く

(注2)100%以上はエネルギーの純輸出国であることを指す

出典: IEA Energy Balances of OECD Countries2009等

## (参考) 主要国の食料自給率



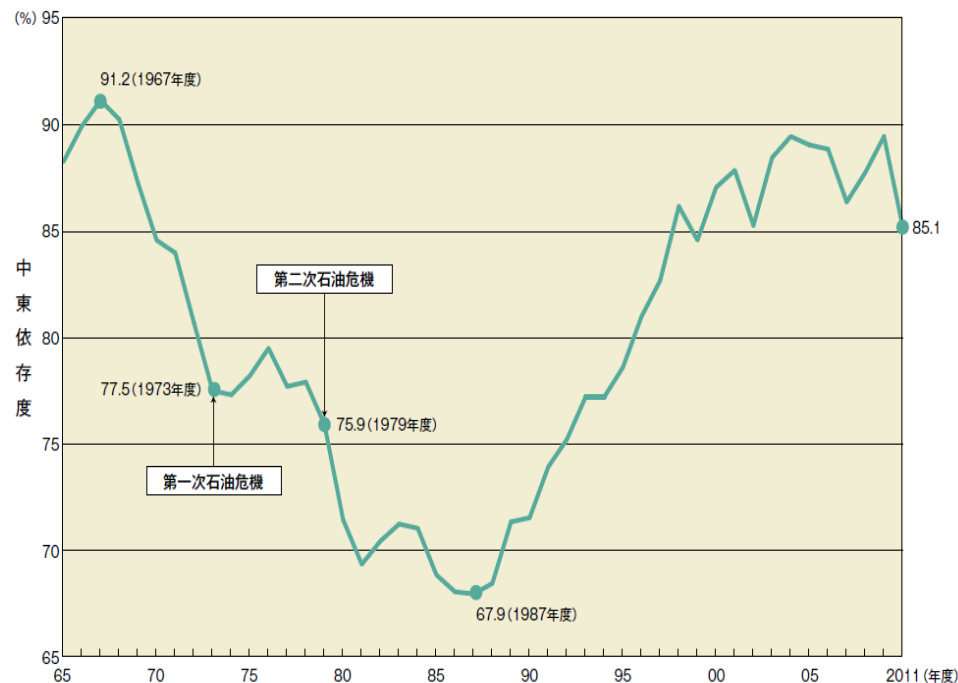
(注) カロリーベース総合食料自給率

出所: 農林水産省ホームページ  
世界の食料自給率(2007年)

# 石油を取り巻く状況

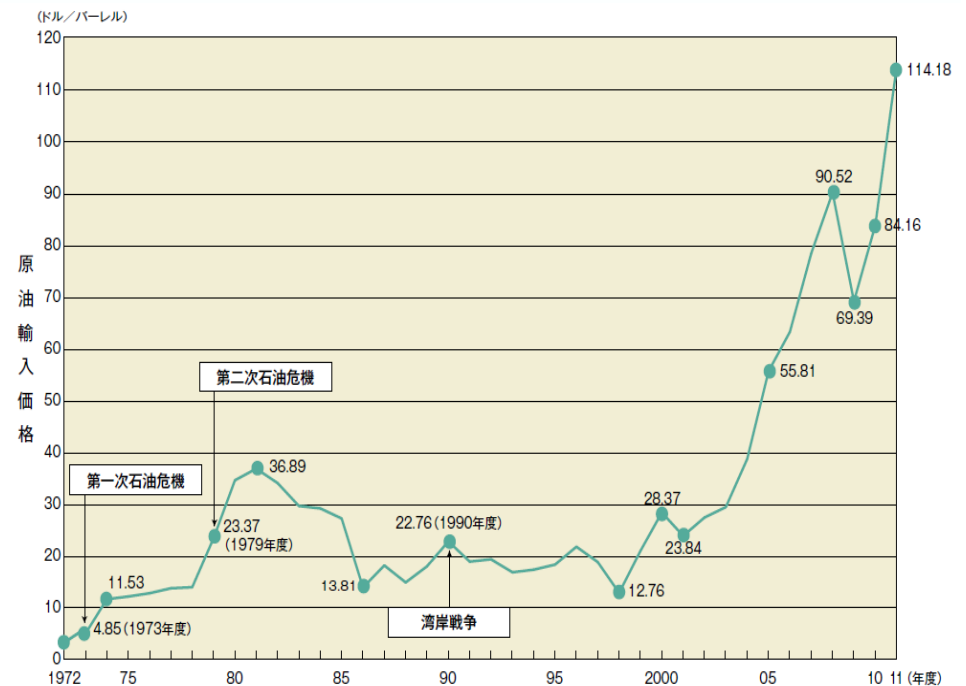
- 1960年代、石炭から石油の時代へ。
- 1973年中東戦争勃発。2度のオイルショックを経て中東依存脱却に取り組み、依存度は、1980年代に一旦低下したものの、再び増加。
- **石油の中東依存度は、現在では約9割。脆弱な調達構造**

## 原油輸入の中東依存度の推移



原出典: 石油連盟統計資料

## 原油輸入価格の推移



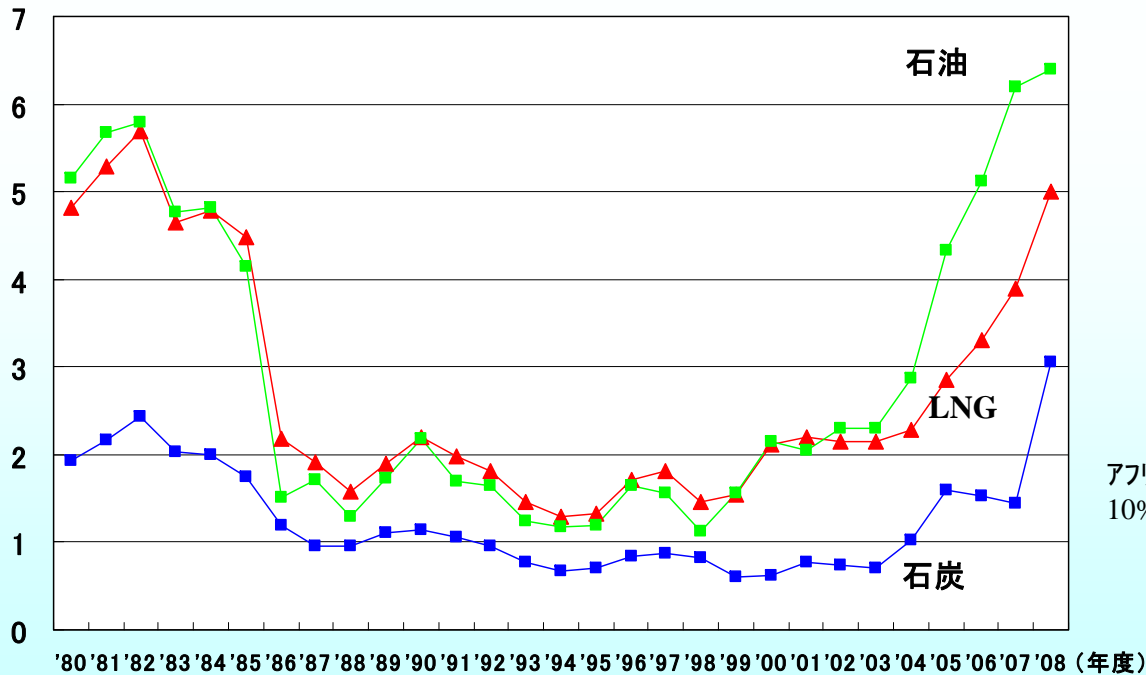
出典: 電気事業連合会

# 石炭の特徴

石炭火力はエネルギー安定供給の観点から重要

- 他の化石燃料に比べ**可採年数が長く**、**豊富**に存在
- 政情の安定した国を中心に**世界中に広く分布**して存在
- 取引価格は、石油・天然ガスよりも相対的に**低位安定**
- 炭素や硫黄、灰分等の含有量が多いため、**燃焼に伴う環境負荷が大きい**

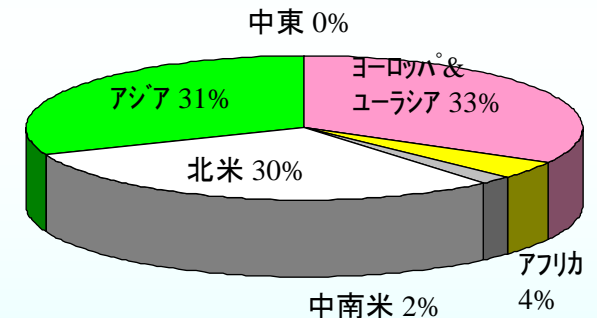
(円/千kcal) <石炭・石油・LNGの価格推移>



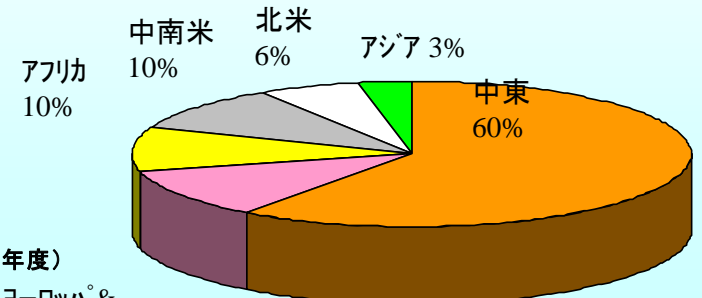
【出典】資源エネルギー庁「エネルギー白書2010」

<資源の分布>

《石炭》



《原油》



【出典】BP統計2009

# 天然ガスの特徴

天然ガスもエネルギーの環境適合，安定供給の観点から重要

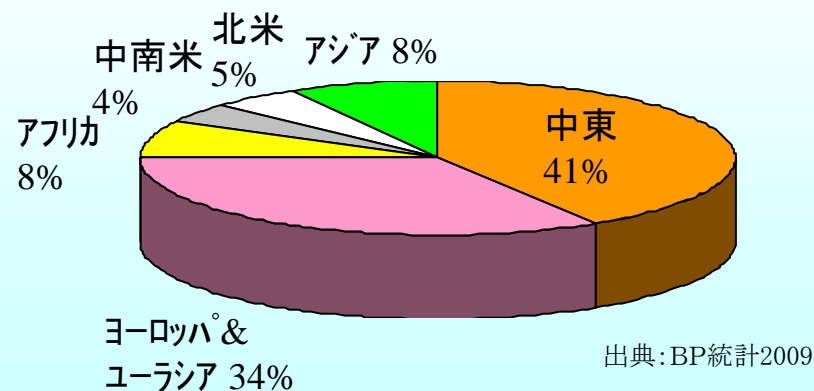
- 化石燃料の中では，**最も低CO<sub>2</sub>**。有害成分(SO<sub>x</sub>,煤塵)も液化段階で除去(ほぼゼロ)
- 中東依存度は原油の2/3程度で**政情の安定した地域に比較的多く賦存**

＜1kWhあたりのCO<sub>2</sub>排出量＞

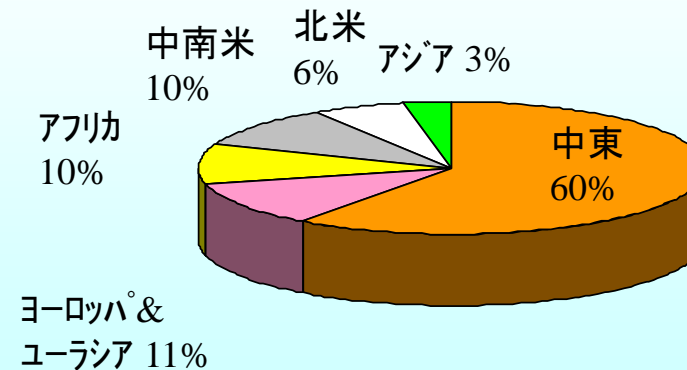
(単位:g-CO<sub>2</sub>/kWh)

石炭火力	石油火力	天然ガスコンバインド
943 (ベース)	738 (8割)	474 (5割)

＜天然ガス埋蔵量の分布＞



＜原油埋蔵量の分布＞



# ウラン燃料の特徴

日本のエネルギー戦略と地球環境問題の観点ではメリット大。ただし、安全性の確保が条件。

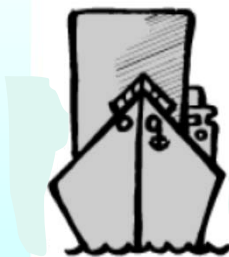
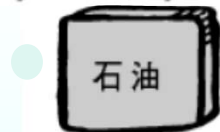
- 備蓄効果(エネルギー密度が高い、長時間エネルギーを出し続ける)
- 政情安定地域からの調達
- CO2削減効果

<高いエネルギー密度>

<ウランは政情の安定した地域に賦存>

<絶大なCO<sub>2</sub>削減効果>

1,430,000トン



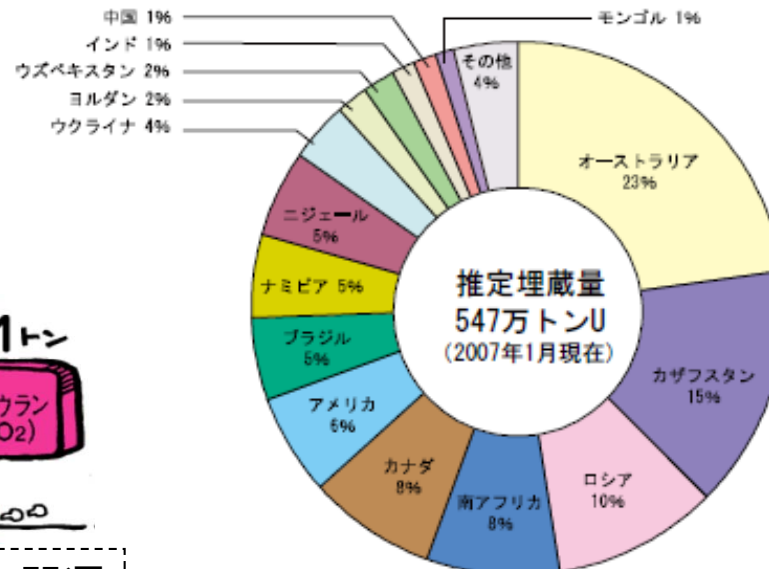
=

21トン  
濃縮ウラン  
(UO<sub>2</sub>)



100万kWの発電所を1年間運  
転するのに必要な燃料

出典：資源エネルギー庁「原子力2007」



出典:NEA「URANIUM2007」

原子力発電所(130万kW級)2基  
を停止、火力発電に置き換えると

年間1400万t-CO<sub>2</sub>が増加

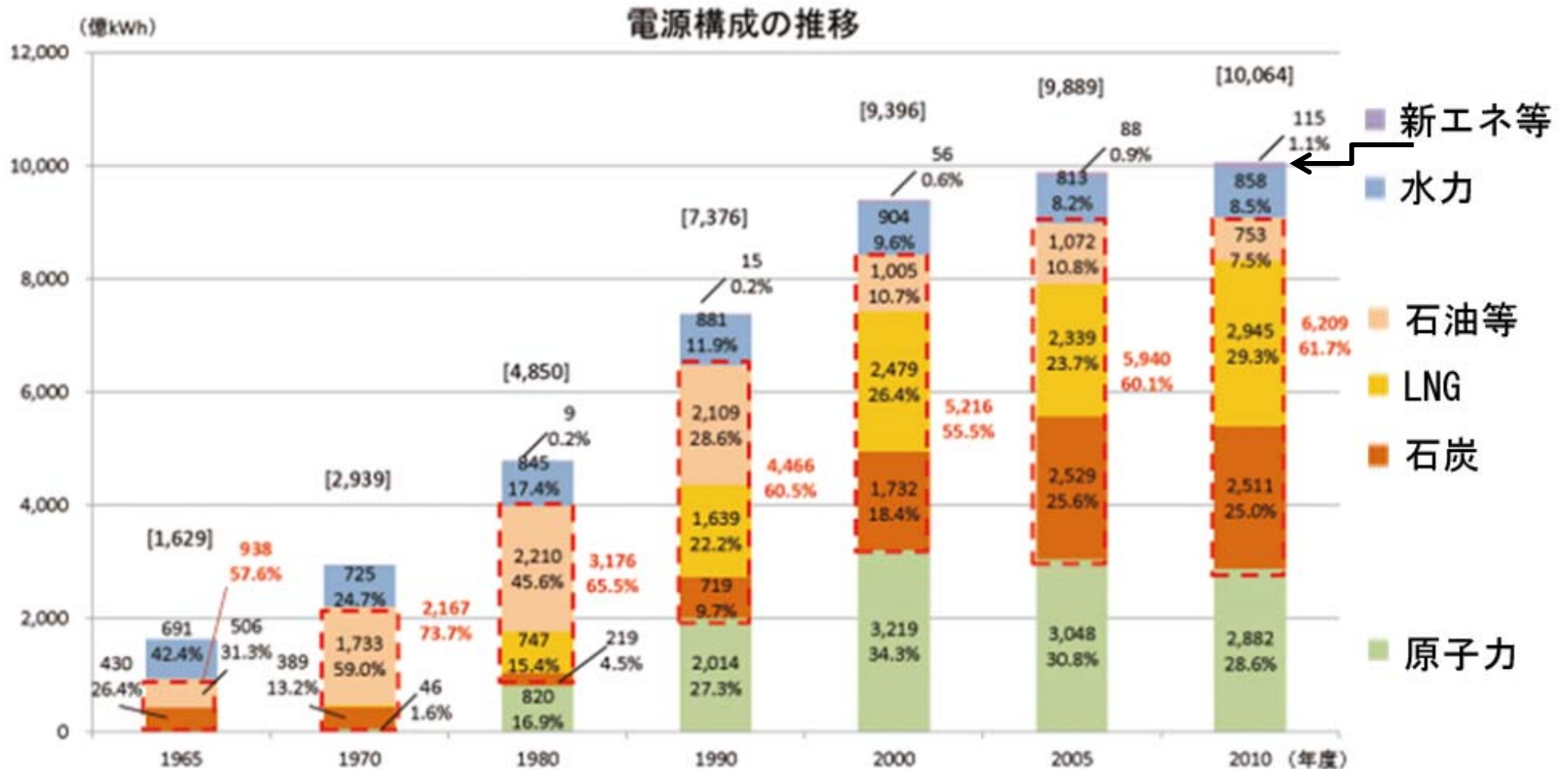
上記はブナの天然林約300  
万ha(四国の1.7倍の面積)  
が年間に吸収するCO<sub>2</sub>に  
相当。

出典:林野庁ホームページ



# 我が国の発電量の推移

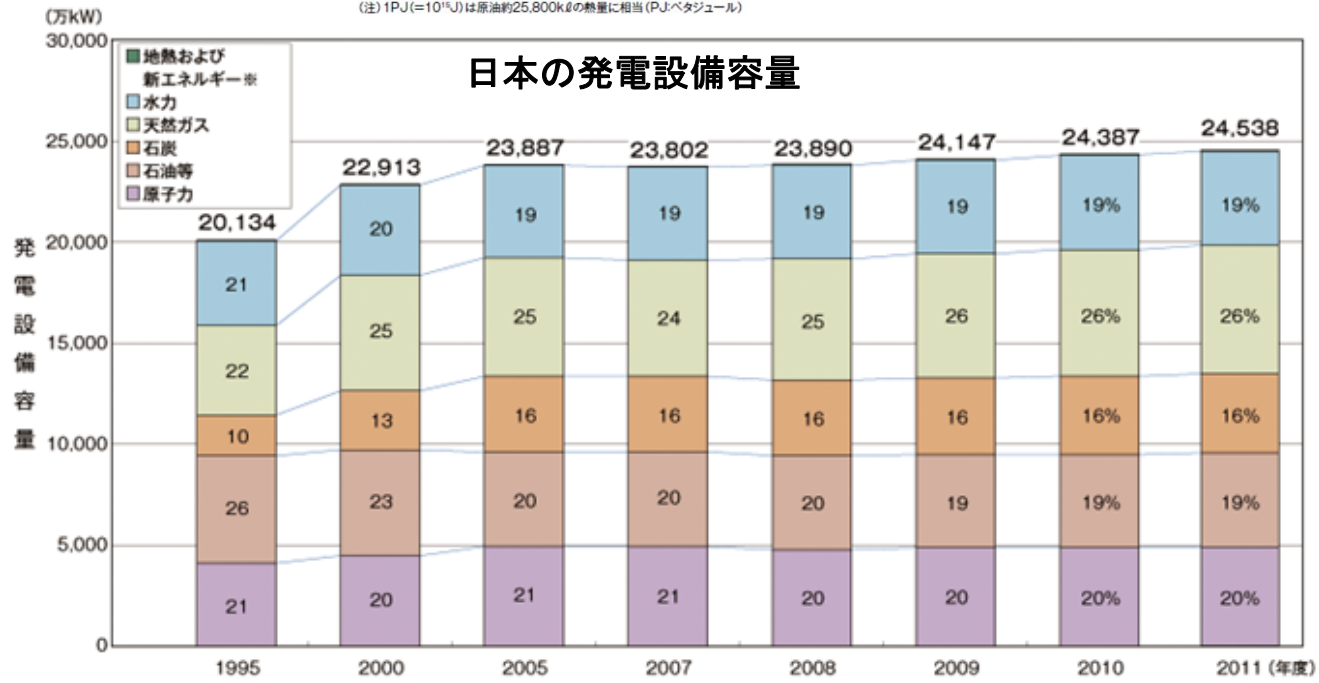
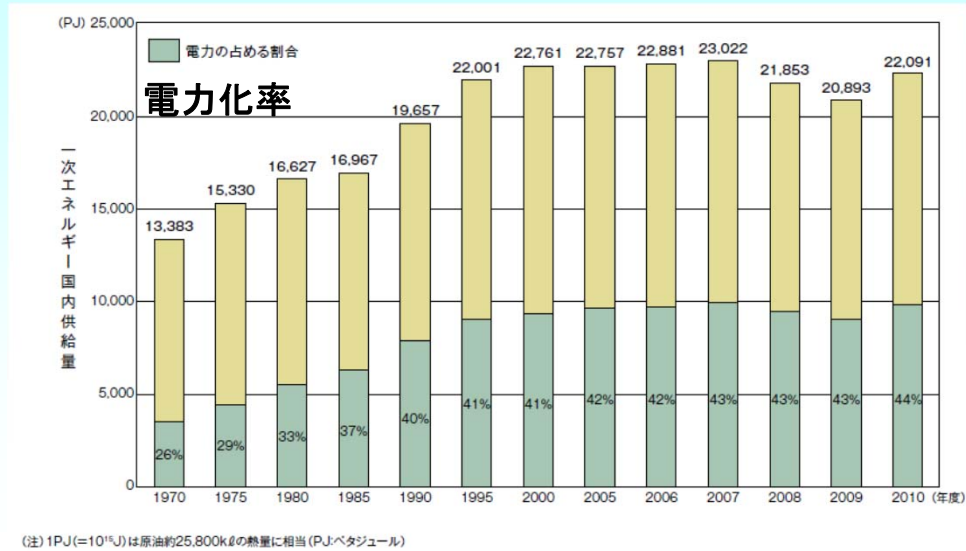
- 1940年代の電力不足の克服のための水力開発
- 1960年代の電力需要の急増に対応した石油火力の開発
- 1970年代のオイルショック。石油火力依存の見直し
- 1980年代からは原子力・LNG火力・石炭火力による電源構成へと変遷



# 電力化率と発電設備容量

- 電力化率は1970年26%より2010年44%に上昇。
- 今後も増加の見込み。

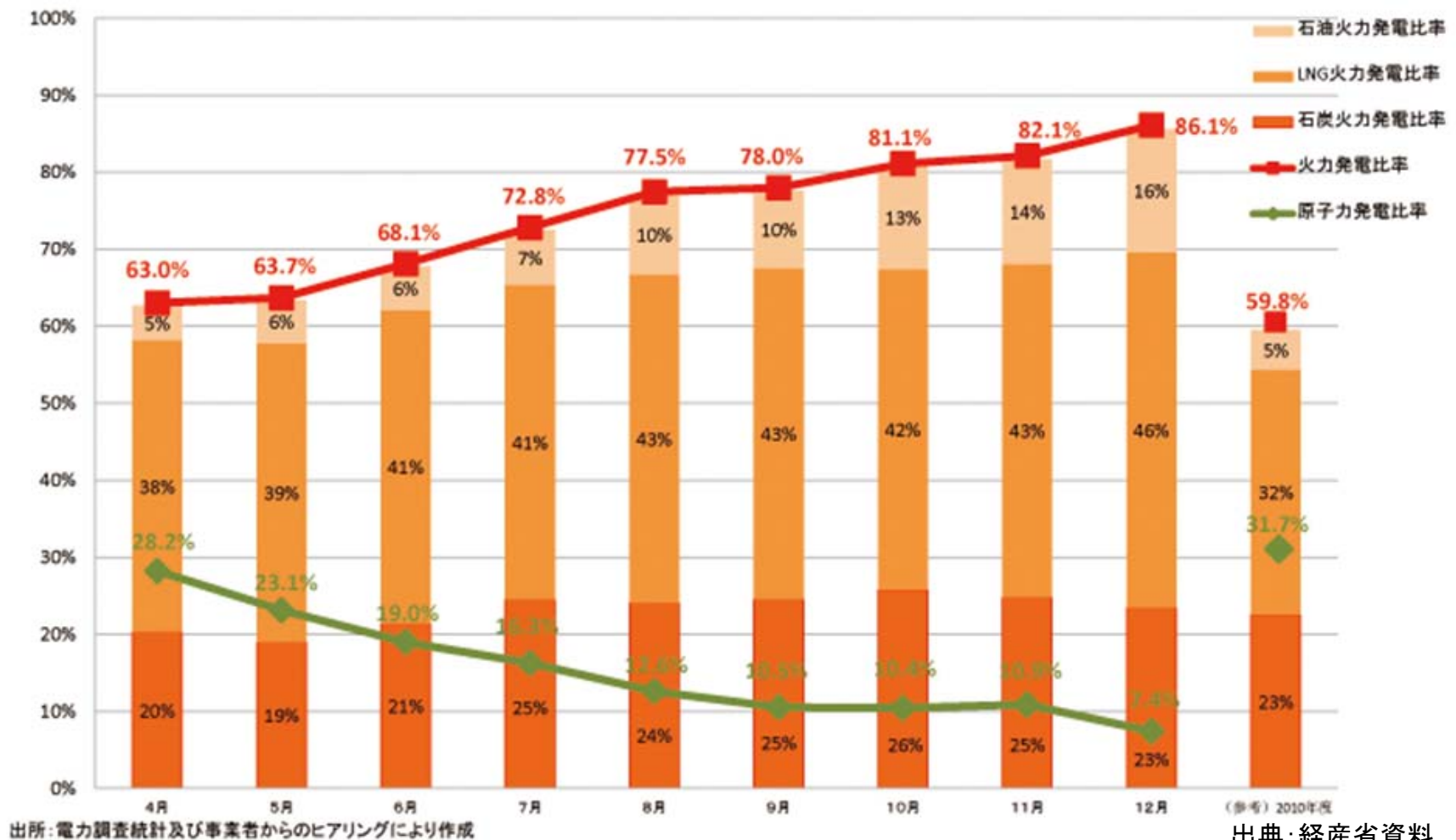
- 発電設備容量はエネルギーセキュリティの観点でバランス維持。



(注) 四捨五入の関係で合計値が合わない場合がある  
\*地熱および新エネルギーは1%未満

# 震災後の電源構成の変化

- 2011年3月11日東日本大震災が発生。津波被害により福島第一原子力発電所で重大事故。
- 震災後、各原子力発電所が順次定期検査入りした後、再稼働していない。
- 他方、原発停止に伴う火力発電比率は上昇し、90%に至っている。



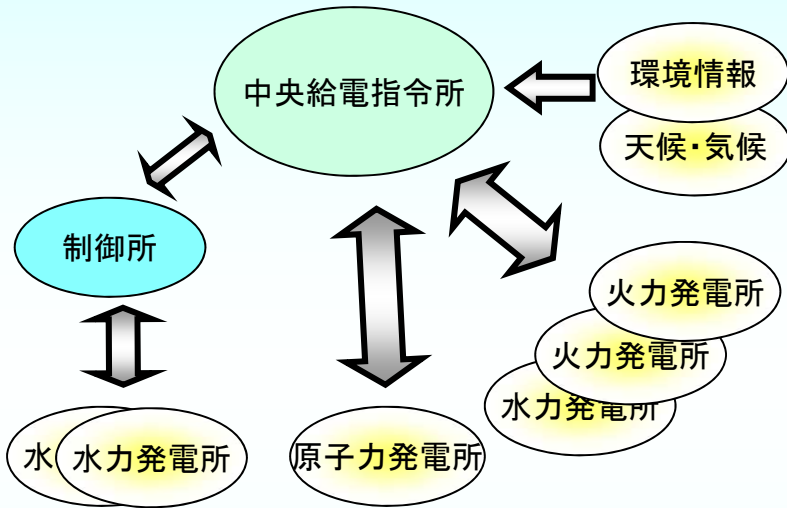
# 原子力発電の長期停止による経済的影響

- 原子力発電の長期停止により、**火力発電の燃料費が大幅に増加**。
- 平成25年度の燃料費増加額は、**約3.6兆円**となる見通し  
(H23年度からの累計は**9兆円**)

## <燃料費増加の見通し>

電力9社計	H22年度	H23年度	H24年度	H25年度(推計)
総コスト	14.6兆円	16.9兆円	18.1兆円	18.6兆円+ $\alpha$
燃料費	3.6兆円	5.9兆円	7.0兆円	7.5兆円+ $\alpha$
うち、原発停止による燃料費増(試算)	—	<b>+2.3兆円</b> 【内訳】 LNG +1.2 石油 +1.2 石炭 +0.1 原子力 ▲0.2	<b>+3.1兆円</b> 【内訳】 LNG +1.4 石油 +1.9 石炭 +0.1 原子力 ▲0.3	<b>+3.6兆円</b> 【内訳】 LNG +1.7 石油 +2.1 石炭 +0.1 原子力 ▲0.3
燃料費増が総コストに占める割合(%)	—	13.6%	17.1%	19.4%
原子力利用率	66.8%	25.0%	3.9%	2.3%

# 日本の電力システム

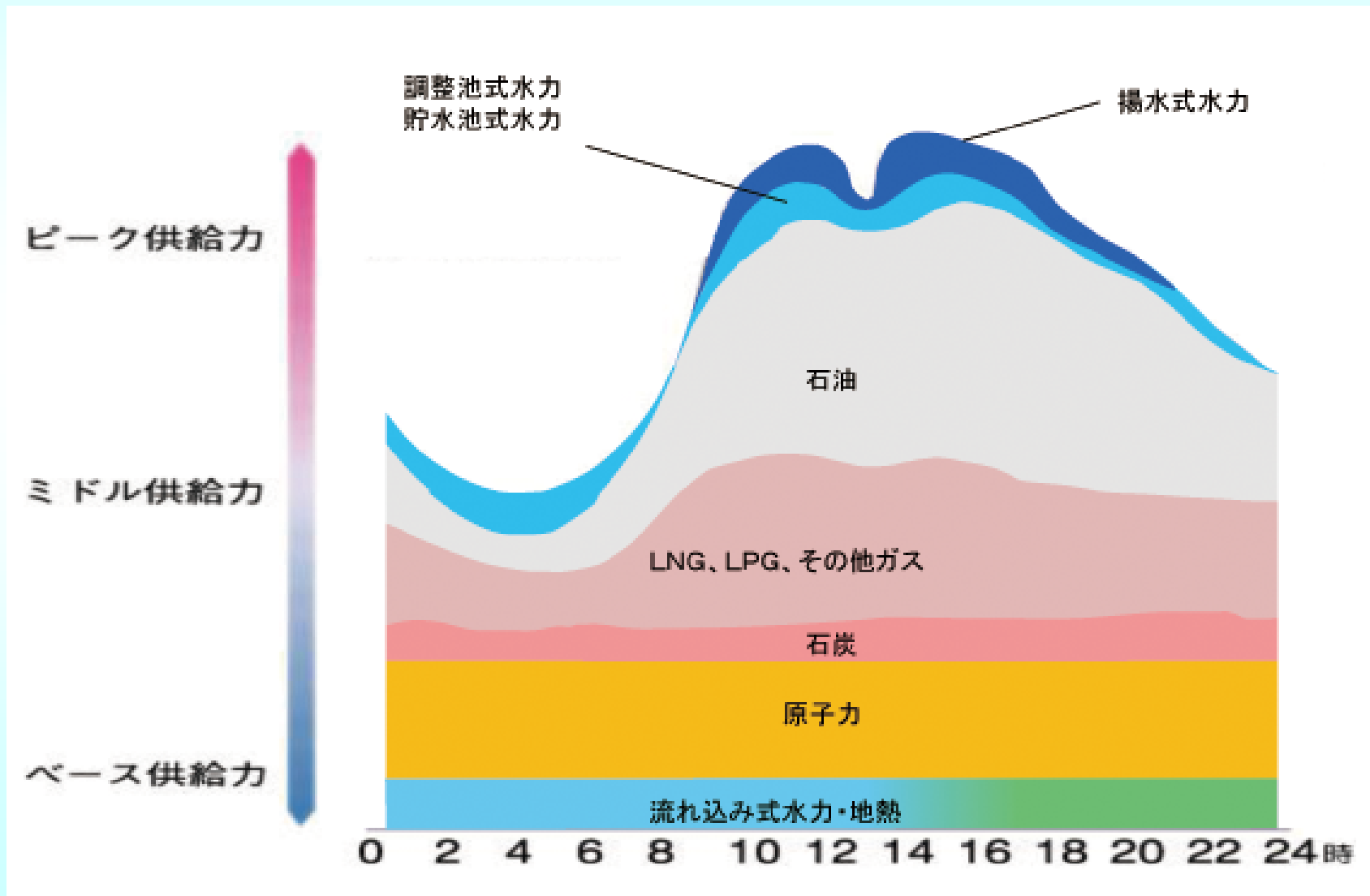


中央給電指令所にてリアルタイム需給運用を実施

- ・リアルタイム需要予測
- ・周波数制御
- ・発電機運用指令

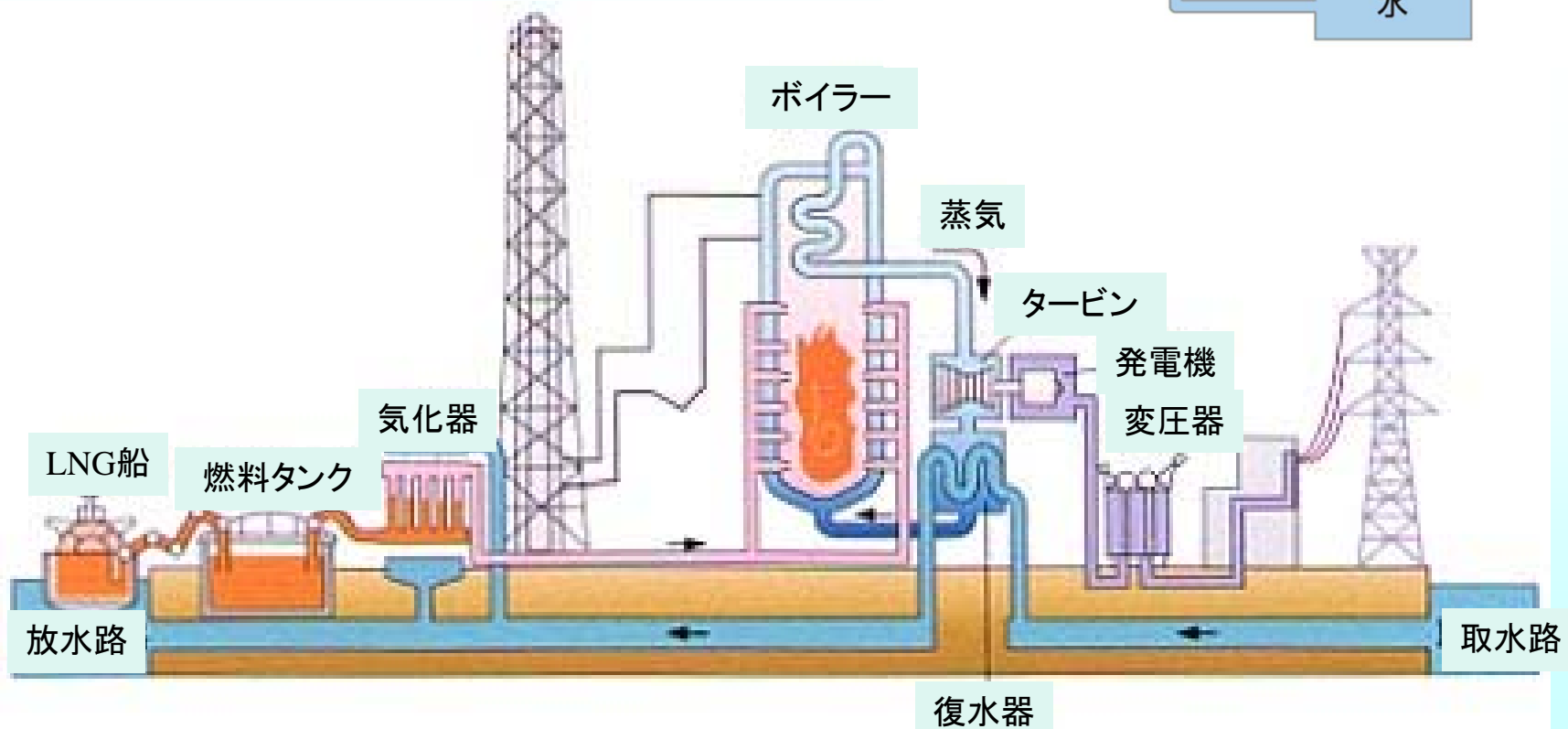
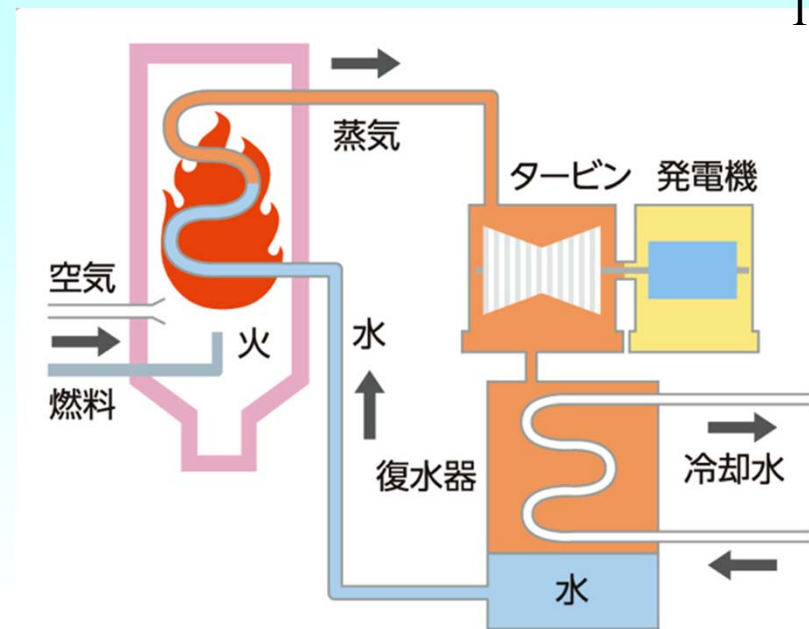


# 発電所の役割



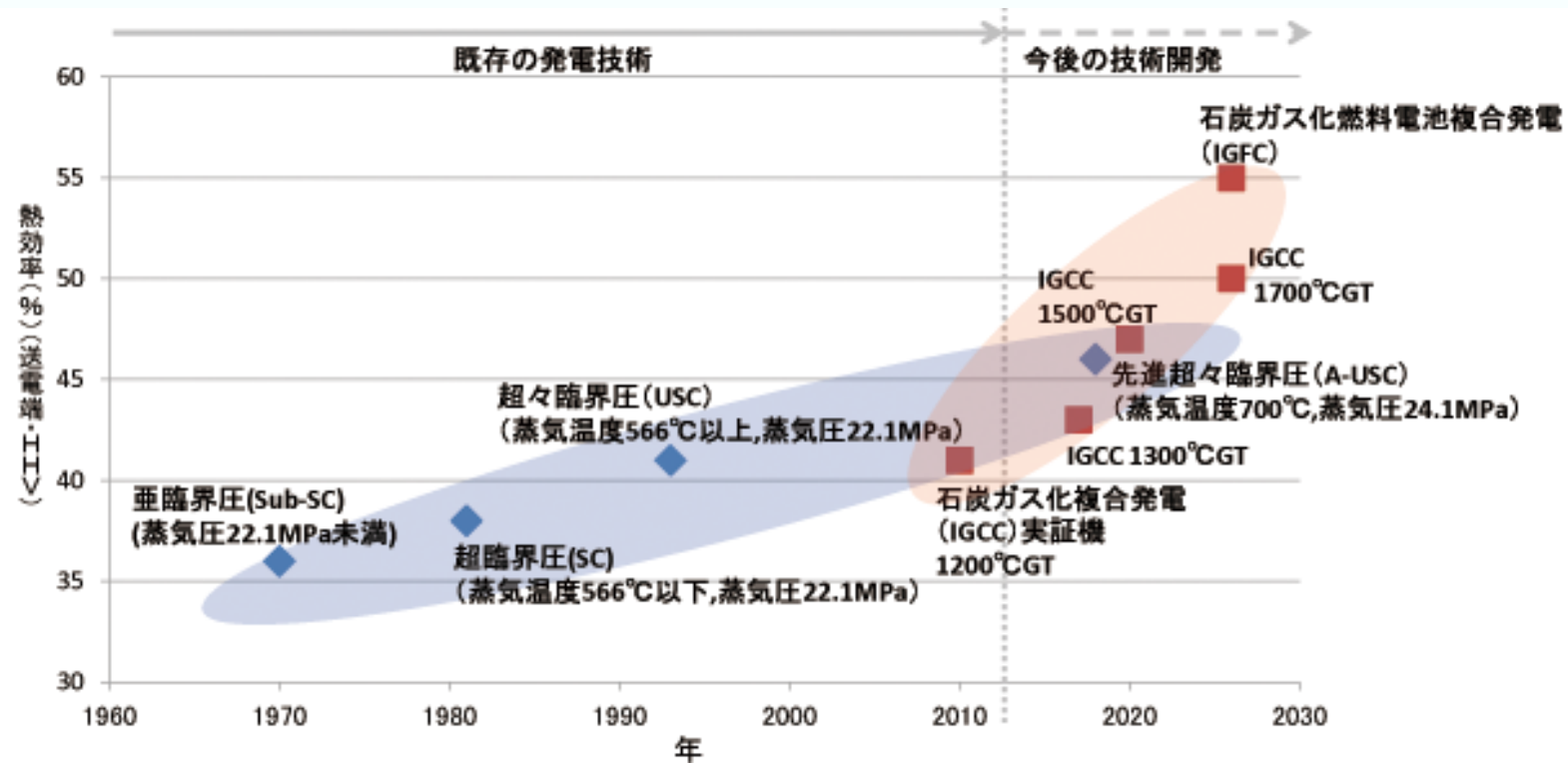
# 火力発電所

1. 水蒸気でタービンを回して発電。
2. 高温、高圧化による発電効率の向上。
3. 発電出力の急激な変化は不可。
4. 高度な環境への配慮は日本の特徴。  
(脱硫。SO<sub>x</sub>、脱硝。NO<sub>x</sub>)



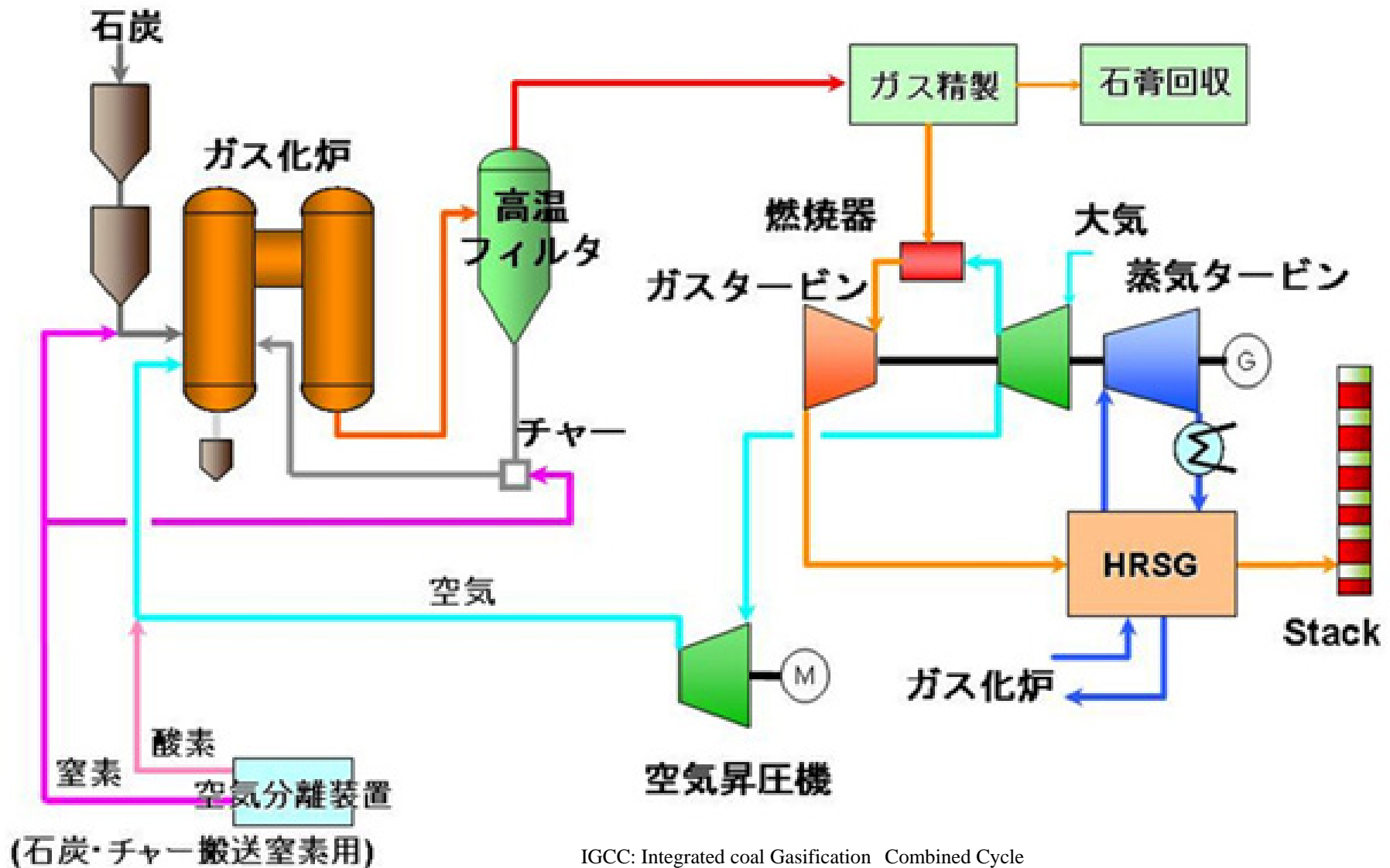
# 石炭火力発電 効率化の追求

1. 日本の石炭火力は**微粉炭火力の超々臨界圧(USC)**が最高効率技術として実用化された。
2. 今後、亜瀝青炭や褐炭も使用可能な**石炭ガス化火力‘IGCC、IGFC**の技術開発を進めることで更なる効率化が期待されている。**USC:25MPa,600°C効率42%三隅,IGCC:勿来,大崎**  
 Integrated coal Gasification Combined Cycle, Ultra-Super Critical steam condition  
 (超臨界圧:圧力22.1MPa、温度374.1°Cを超えた蒸気条件、超々臨界圧:圧力24.1MPa以上、温度593°C以上の蒸気条件)(1MPaは約10気圧) 資料はHHVに基づく効率





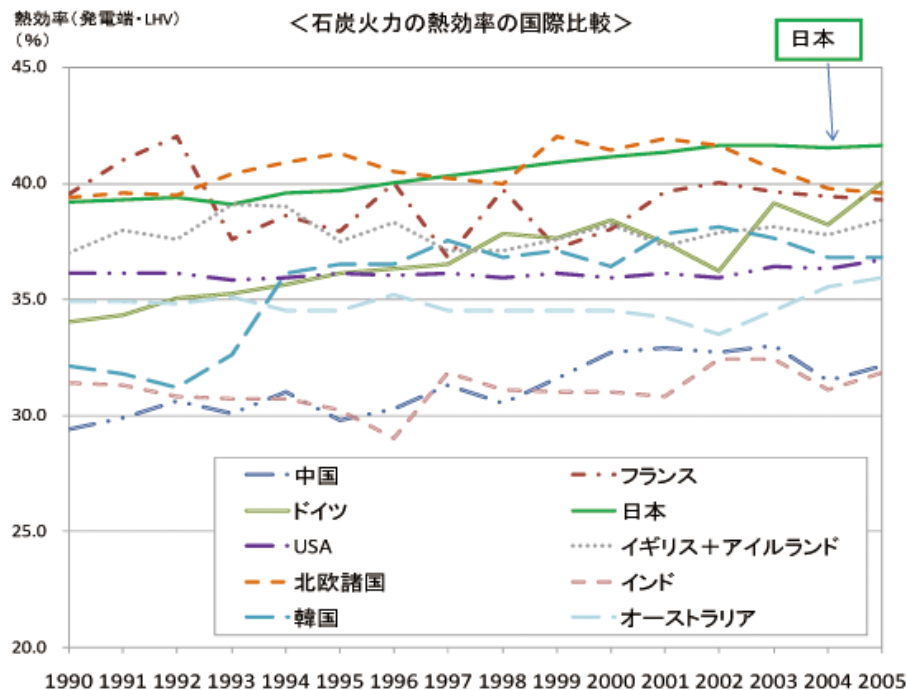
# 石炭ガス化複合発電 (IGCC)



# 石炭火力の推進

- 石炭火力の効率性は、**日本が世界の最先端**
- 今後は、**日本の利用技術を世界的に普及**させていくことで、**安定供給・環境適合を世界的に推進**していくことが期待されている

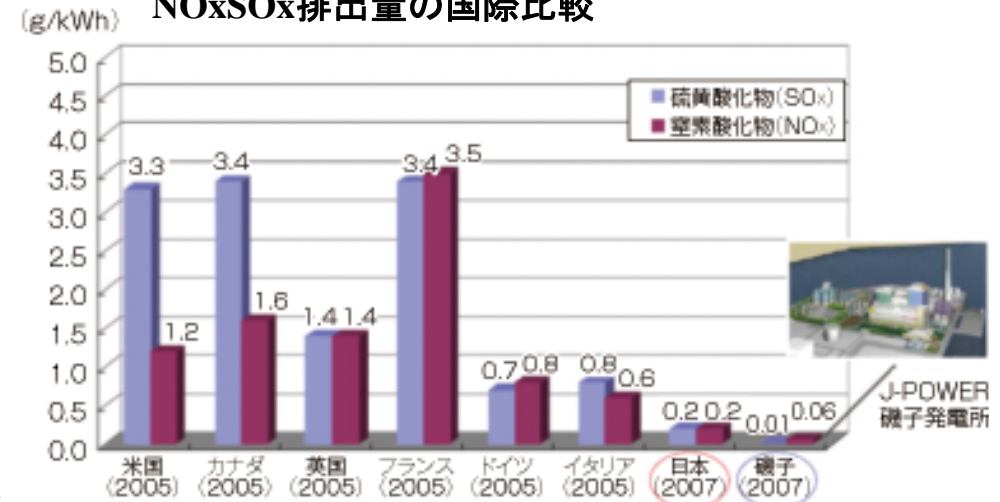
## 石炭火力発電所の熱効率の各国比較



出典: ECOFYS "INTERNATIONAL COMPARISON OF FOSSIL POWER EFFICIENCY"(2008)

仮に中国・インドで31%→日本:41%(+10%)に改善すれば、石炭消費量、CO<sub>2</sub>の排出量は約3割減になる見込み

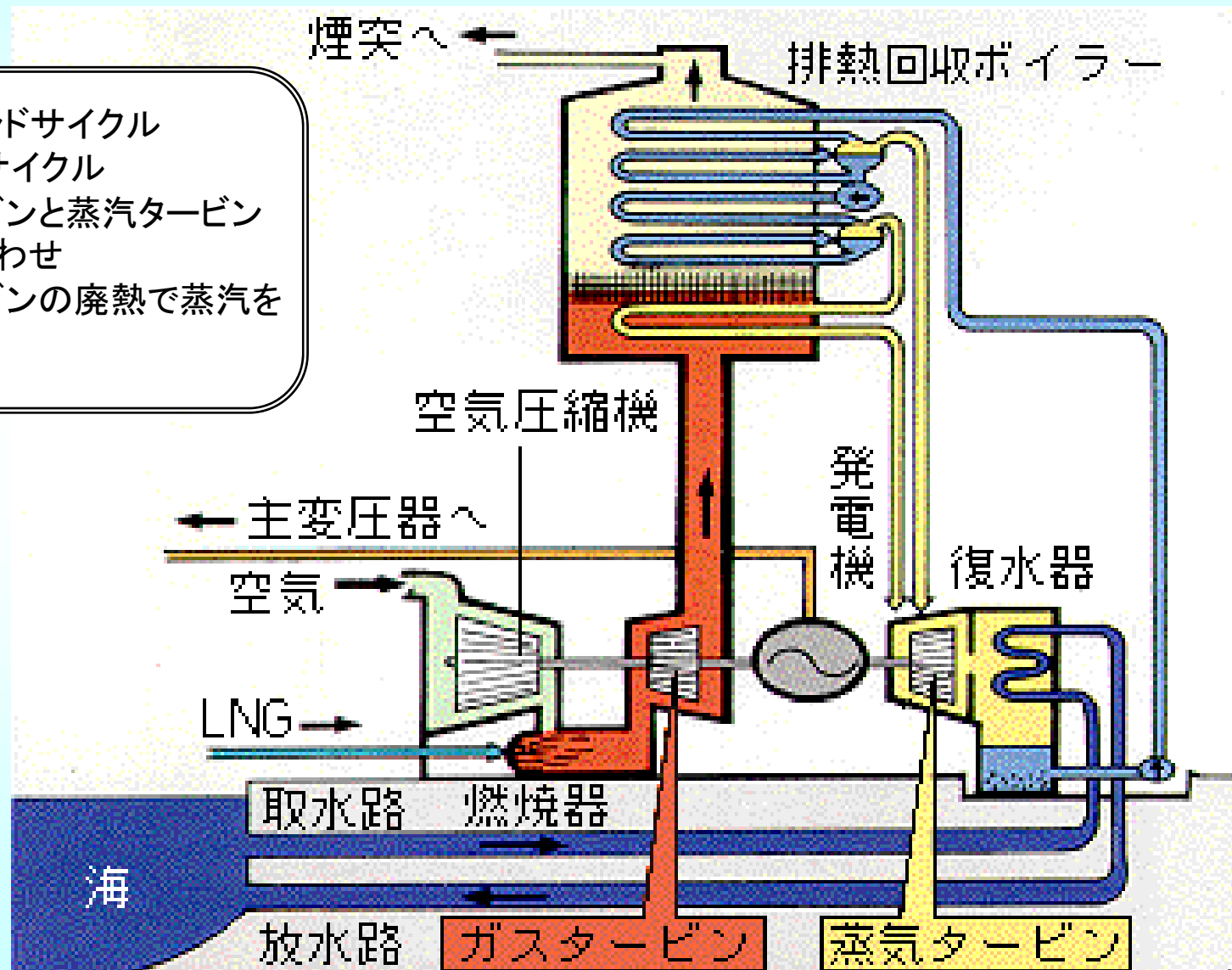
## 石炭火力発電からの電力1kWhあたりのNO<sub>x</sub>SO<sub>x</sub>排出量の国際比較



(出典) ゼロエミッション石炭火力発電ワークショップ (平成 23年 2月 23日) J-POWER発表資料

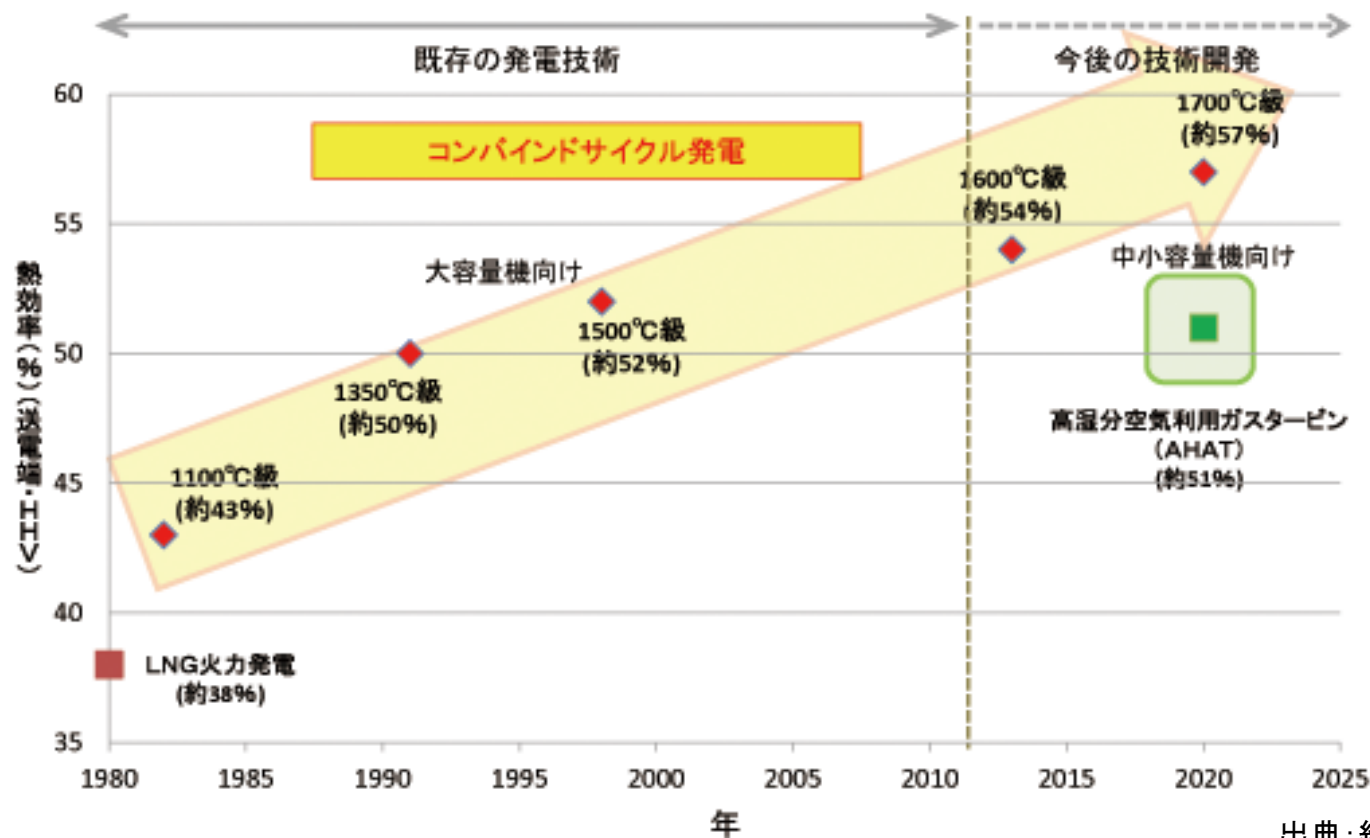
# 大型火力(コンバインドサイクル)

- コンバインドサイクル = 複合サイクル
- ガスタービンと蒸汽タービンの組み合わせ
- ガスタービンの廃熱で蒸汽を加熱する。



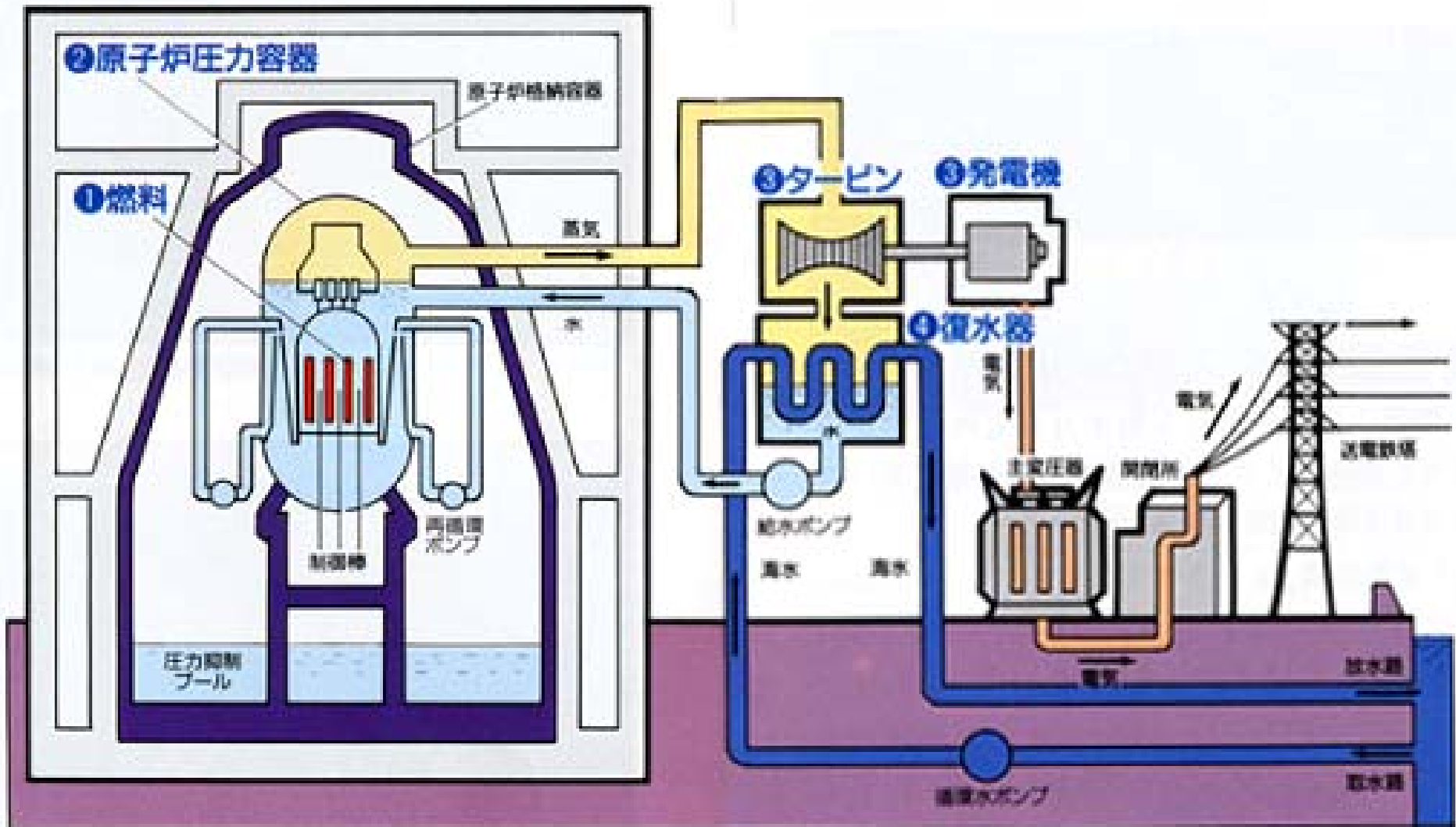
# LNG火力発電の効率向上

1. 日本では、世界に先駆けて、**1500℃級**のガスタービンを実用化し、**熱効率52%**を達成。
2. 大容量機向けには、**1700℃級**ガスタービンの技術開発に取り組み、**熱効率57%**の実用化を目指している。
3. 中小容量機向けには、ガスタービンのみでコンバインドサイクルの熱効率に匹敵する、**高温分空気利用ガスタービン(AHAT)**を開発し、実用化を目指している。

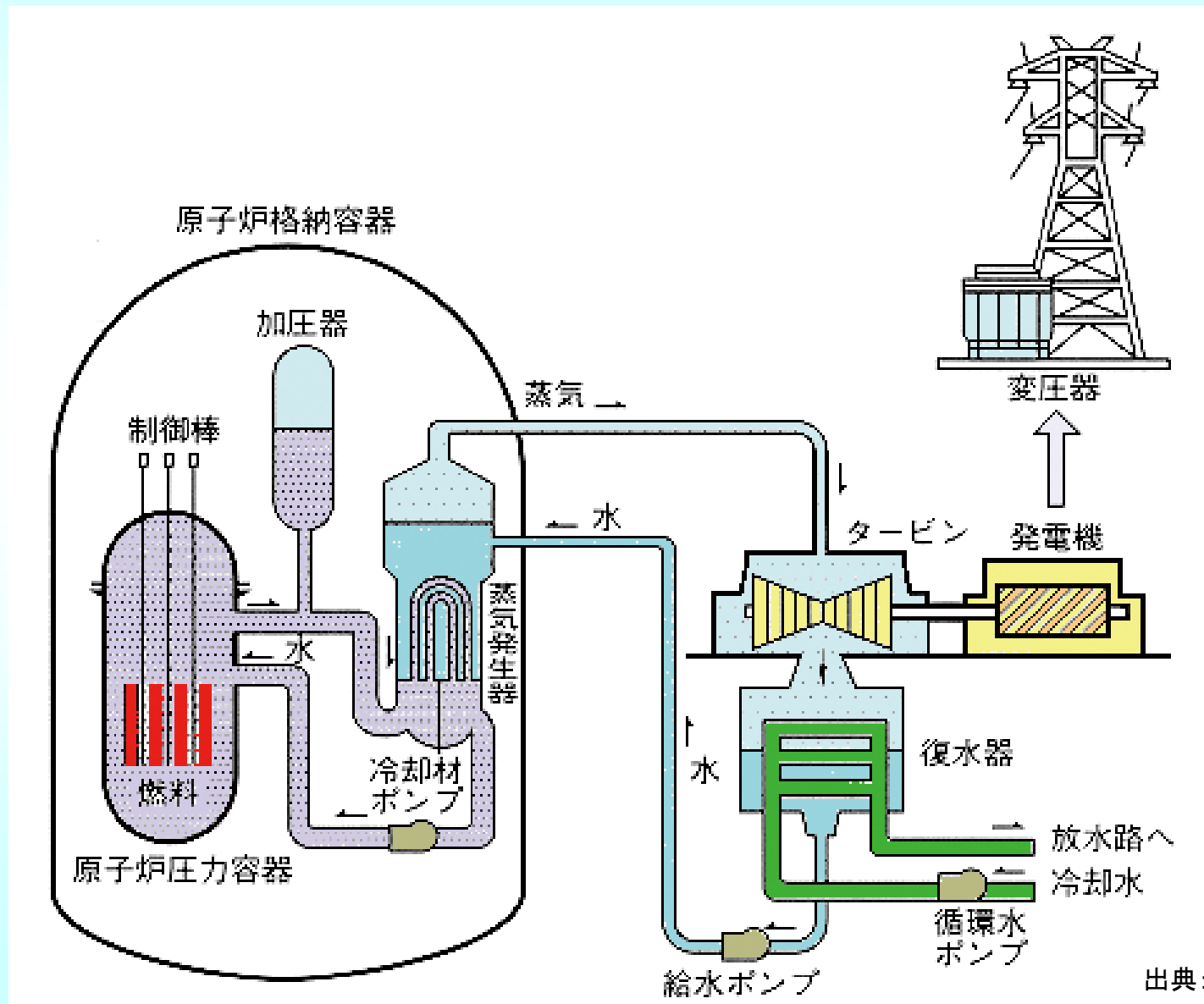


出典: 経産省資料

# 沸騰水型原子力発電(BWR)



# 加圧水型原子力発電(PWR)

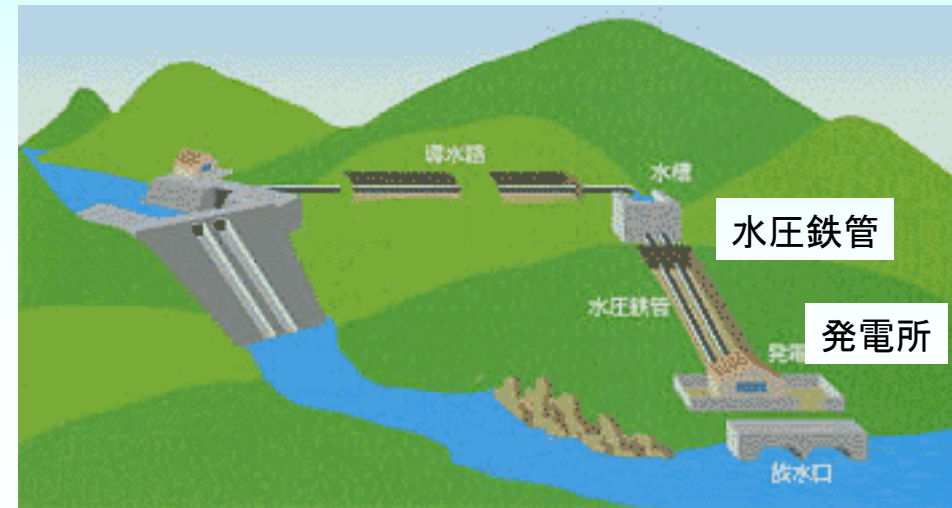


出典: 電気事業連合会

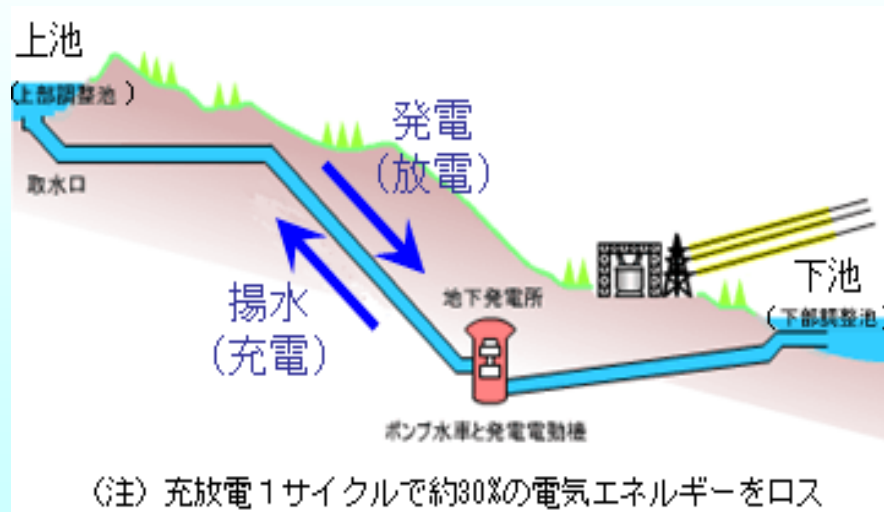
# 大規模水力発電

- 開発に適した地点はほぼ開発済み。
- 出力を急激に変化させることができる。
- 蓄電のための揚水発電は、30%ものエネルギーロスがある。

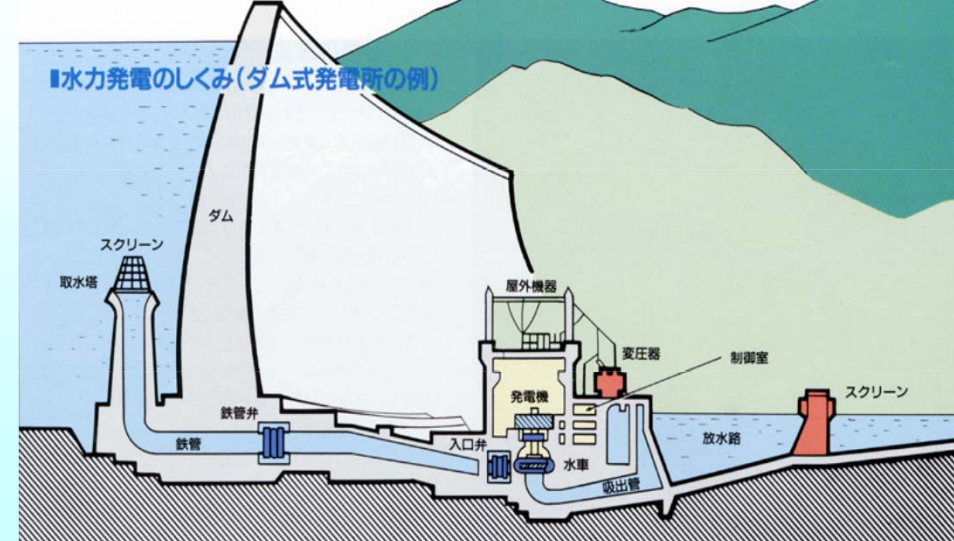
## 流れ込み式水力発電



## 揚水式水力発電



## ダム式水力発電



# 大規模太陽光発電 メガソーラー設置例

設置場所:大阪府堺市  
設置者 :堺市と関西電力  
設置容量:10MW (火力発電の1%)  
稼働日 :2011年9月7日  
使用パネル:約7.4万枚(シャープ株式会社薄膜型太陽電池モジュール)  
発電電力量:1年あたり約1100万kWh  
=11GWh 約3000世帯分  
面積:約21万㎡

太陽光発電は晴天時のみの発電であるため、**利用率は12%**と低い。  
また、エネルギー密度が低いため広大な土地が必要となる。





## 風力発電 設置例

### 日本最大のウインドファーム

名称：新出雲(しんいずも)風力発電所  
 設置場所：島根県出雲市  
 設置者：ユーラスエナジー  
 設置容量：78MW (MkW x 26基/Vestas社)  
 稼働日：2009年04月



写真：ユーラスエナジーホームページ

### 日本初の本格的洋上風力発電所

名称：ウインド・パワーかみす  
 (第1第2)洋上風力発電所  
 設置場所：茨城県神栖市  
 設置者：ウインド・パワー・いばらき  
 設置容量：14MW (2MW x 7基/ダウンウインド型、日立、富士重工)  
 16MW(同上、8基)  
 稼働日 2010年06月(第1)2013年3月(第2)

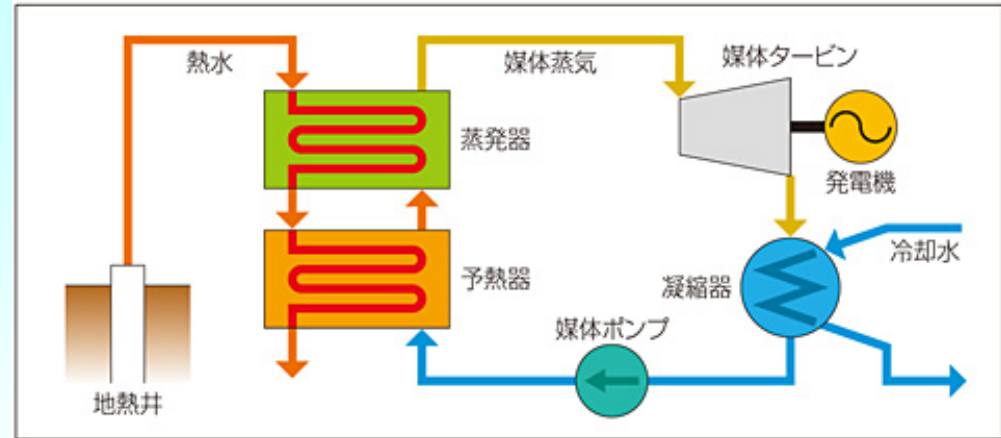


写真：経産省資料

# 地熱発電 設置例

## 大規模地熱発電所に バイナリー発電を併設

名称: 八丁原地熱発電所  
 設置場所: 大分県九重町  
 設置者: 九州電力  
 設置容量: 110MW、バイナリー2MW  
 稼働日: 1990年、バイナリー2006年



バイナリー方式とは、地熱流体の温度が低く、十分な蒸気が得られない時に、沸点の低い媒体(例:ペンタン、沸点36℃)を加熱し、媒体蒸気でタービンを回して発電する方式



バイナリー発電設備2,000kW



写真: 経産省資料

# バイオマス発電 設置例

## 鶏糞償却バイオマス発電所

みやざきバイオマスリサイクル(株)

設備容量 11.35MW

稼働日 2005年5月

全国1位のブロイラー生産、宮崎県において国内初の鶏糞を償却した熱の全量で発電を行い電力販売。

焼却灰は有効な肥料原料として活用する「バイオマス発電による循環型エコシステム」を構築し事業化している。



## 木質バイオマス発電所

日田ウッドパワー 12MW

大分県日田市




国内有数の木材生産地に立地し、木質チップを購入し発電。大量発生する樹皮(バーク)についても、ボイラ用燃料として受け入れを開始している。



# 太陽光・風力発電の特徴(敷地面, コスト面)

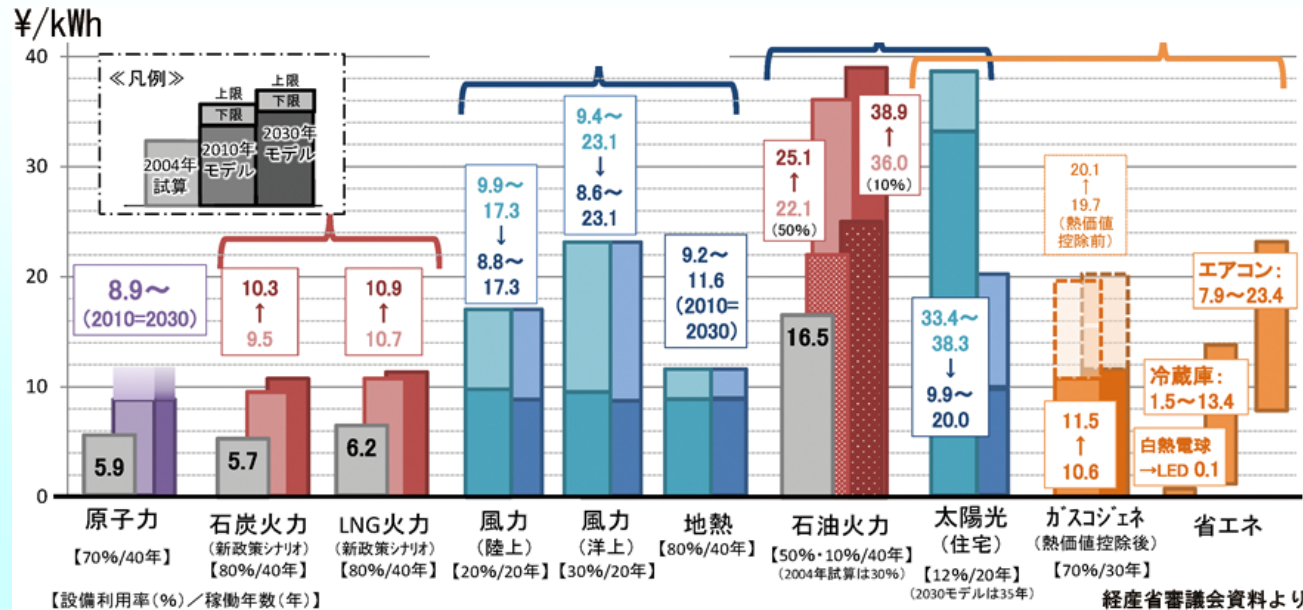
- エネルギー密度と設備稼働率が低い(スペースあたりの発電量が少ない)
- 発電コストが高価

【太陽光・風力・火力・原子力の比較(100万kW級の発電所1基分を代替する場合)】

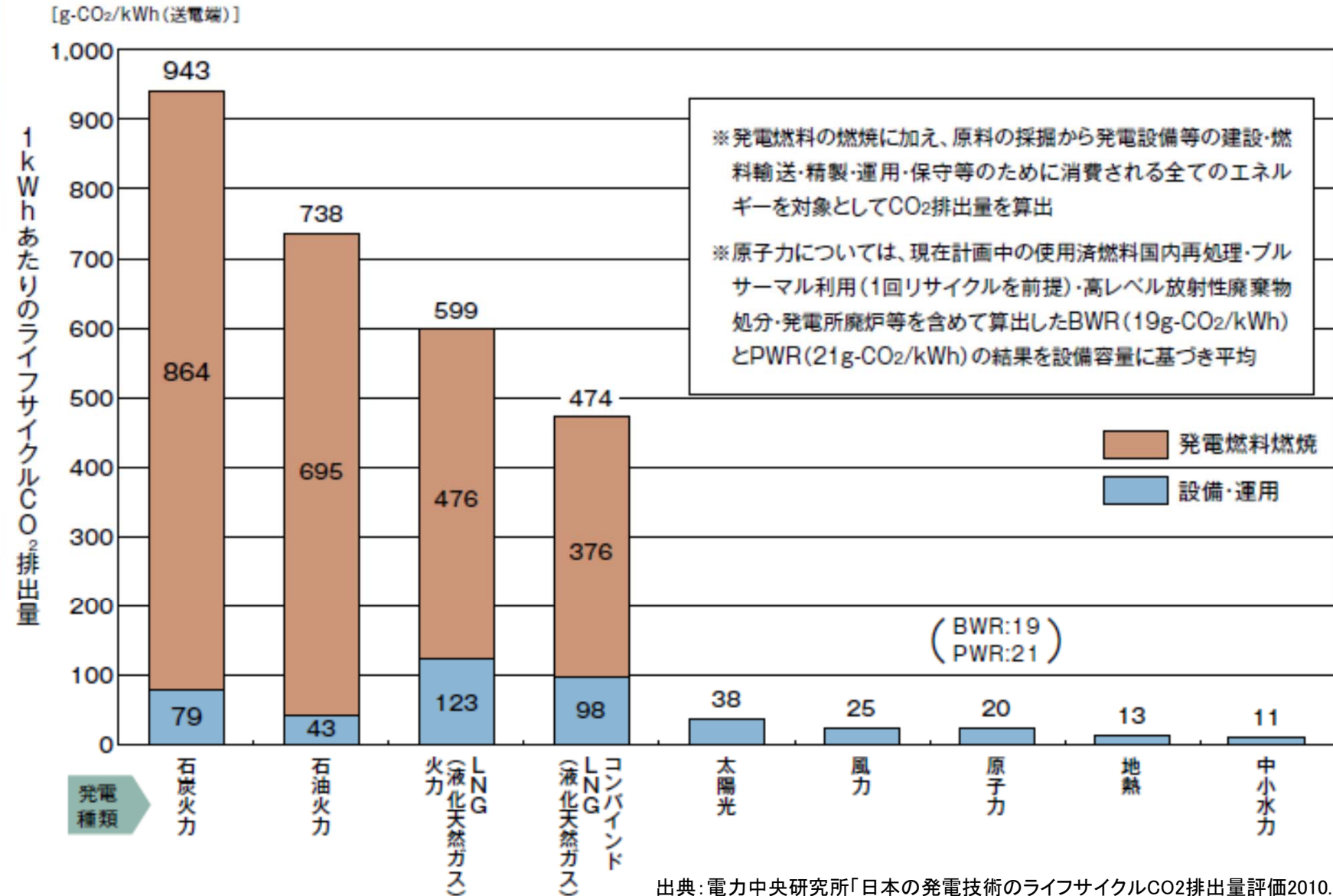
	太陽光	風力	火力・原子力
必要な敷地面積	・約58km <sup>2</sup> (100倍) (山手線内とほぼ同じ面積) 	・約214km <sup>2</sup> (360倍) (山手線内の3.4倍の面積) 	・約0.6km <sup>2</sup> (1倍) (700 mの正方形) 
設備稼働率	12% 夜間, 雨, 曇りは出力低下	20% 風況に依存	70~85% 点検等による停止

※1出典: 第一回低炭素電力供給システム研究会資料

※2出典: 資源エネルギー庁「日本のエネルギー2010」



# 各種電源毎のkWhあたりのCO<sub>2</sub>排出量



# 再生可能エネルギー固定価格買取制度の概要

平成24年7月1日 再生可能エネルギーの固定価格買い取り制度開始

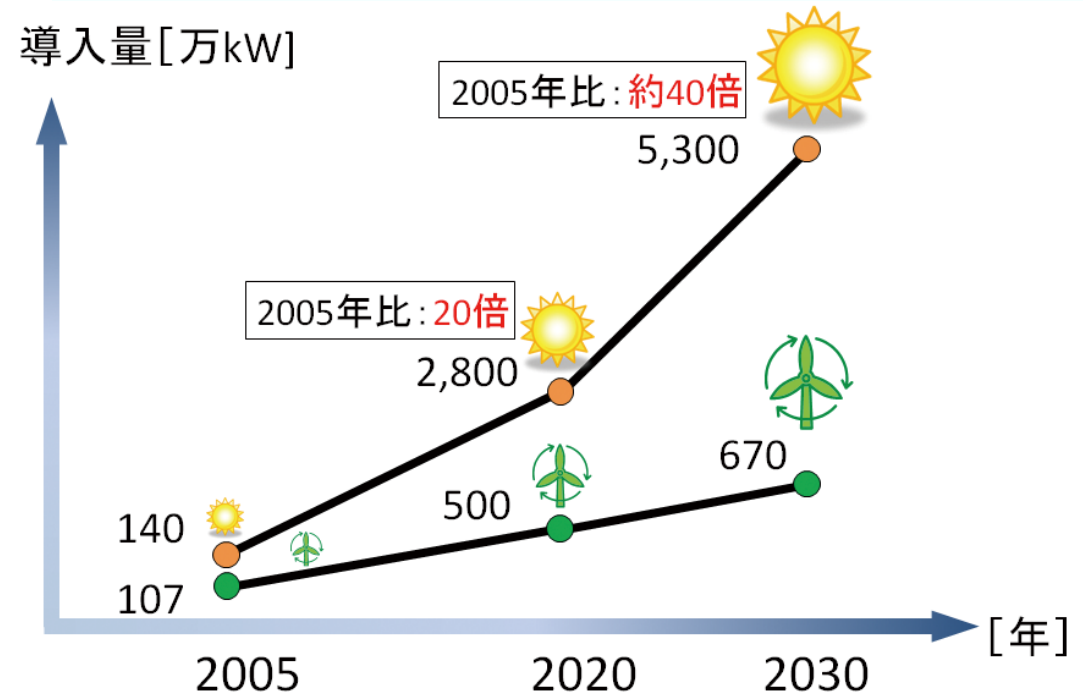
## ＜再エネの買取価格＞

(単位:円/kWh, 税込)

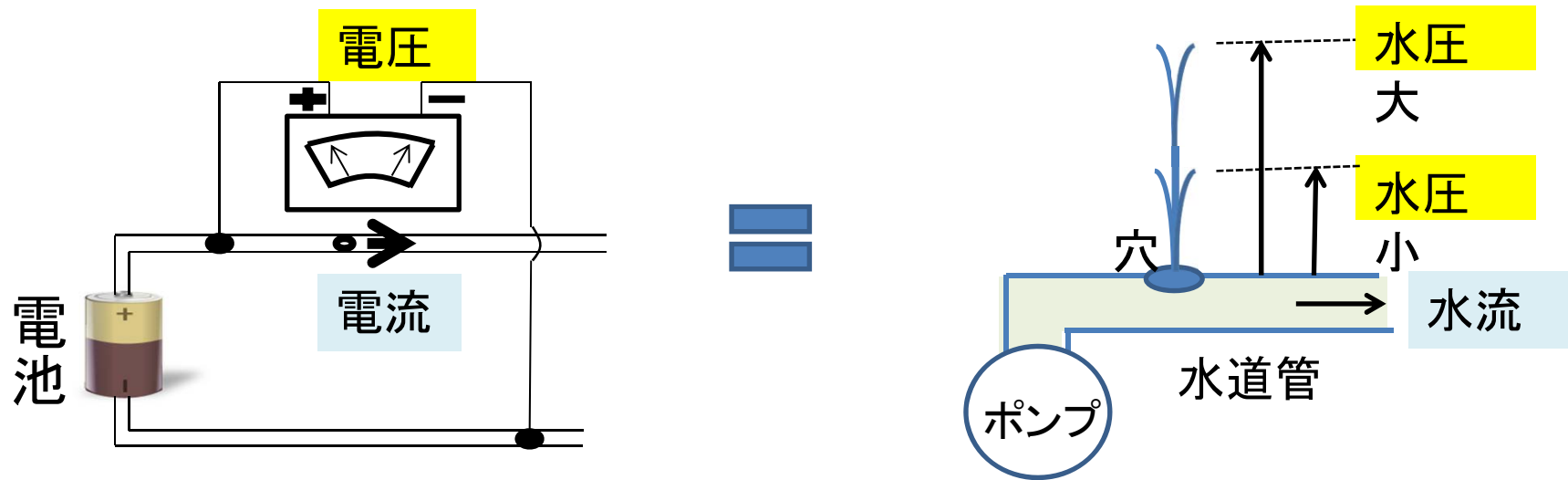
買取区分		買取価格		買取期間
		H24年度	H25年度	
太陽光	10kW未満	42	38	10年
	10kW以上	42	37.8	20年
風力		23.1~57.75	23.1~57.75	20年
中小水力		25.2~35.7	25.2~35.7	20年
地熱		27.3~42	27.3~42	15年
バイオマス		13.65~40.95	13.65~40.95	20年

# 再生可能エネルギーに起因する 技術的課題

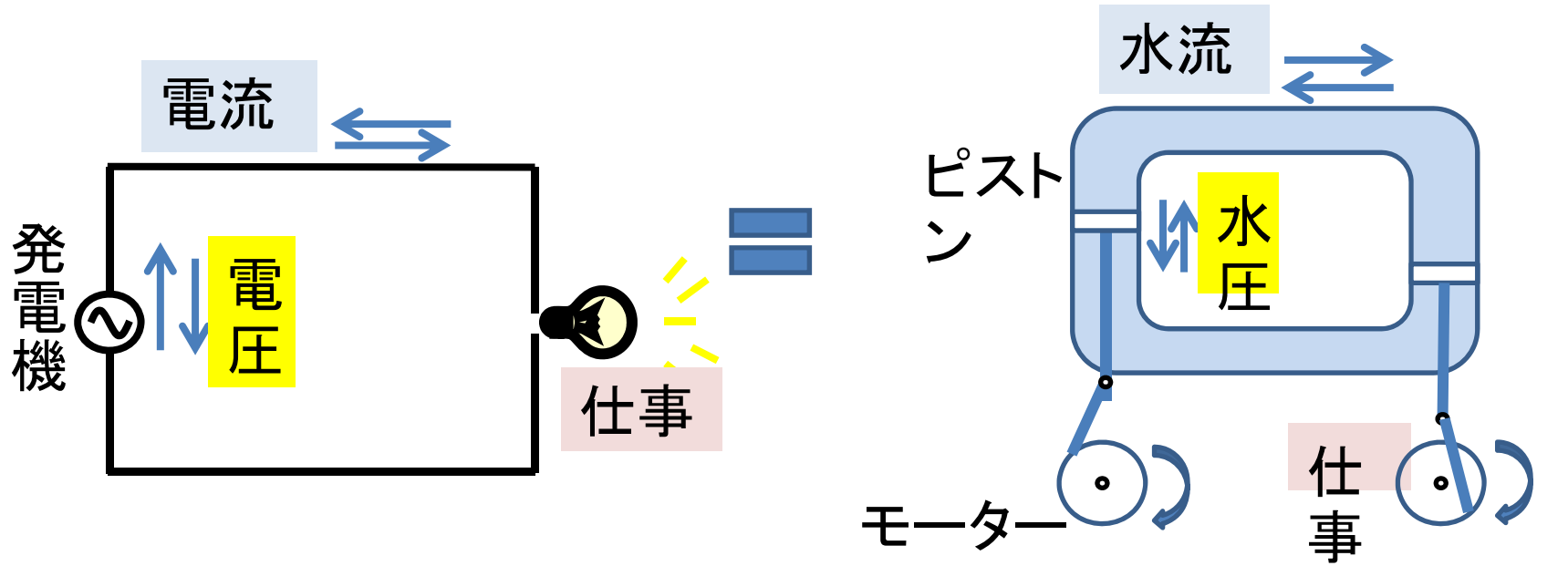
- 電圧問題
- 周波数問題  
(需給バランス問題)
- 信頼度問題  
(停電回避力の低下)



出典: 太陽光発電: 経済産業省 総合資源エネルギー調査会(H21)  
風力発電: NEDO長期エネルギー需給見通し(H21)の最大導入ケース



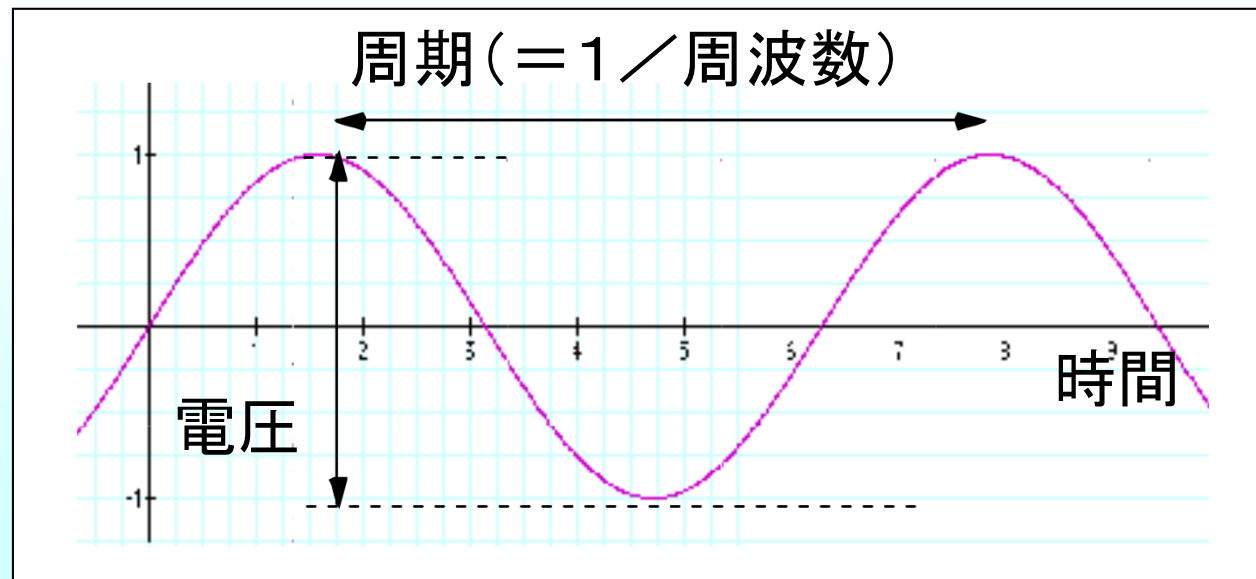
# 交流AC: 電圧と電流



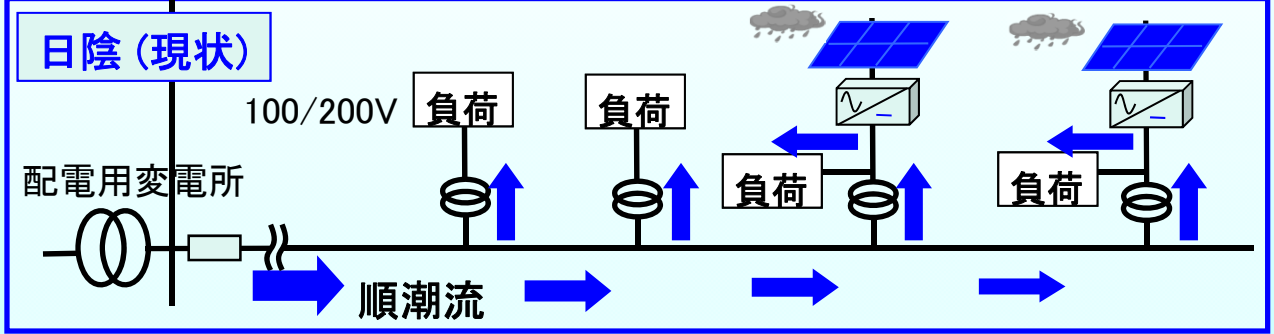
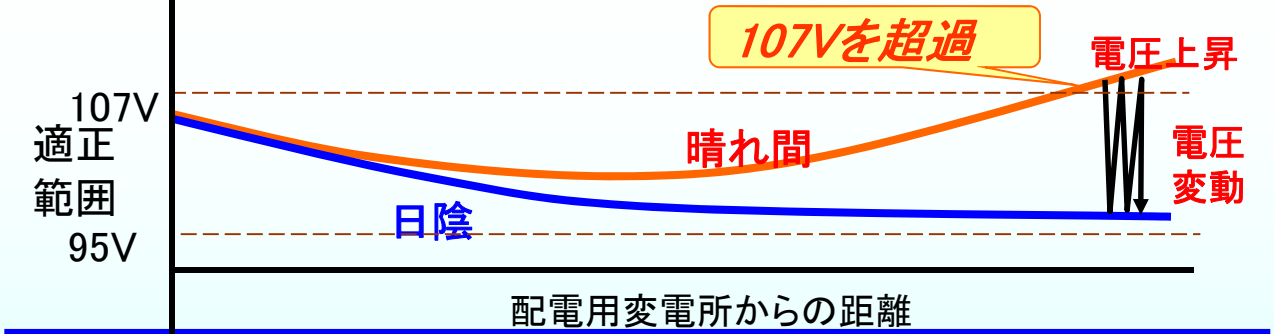
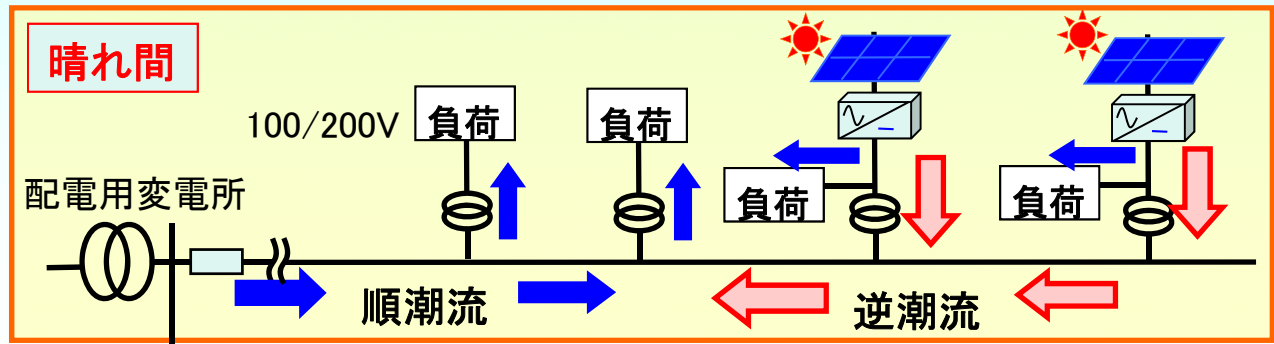
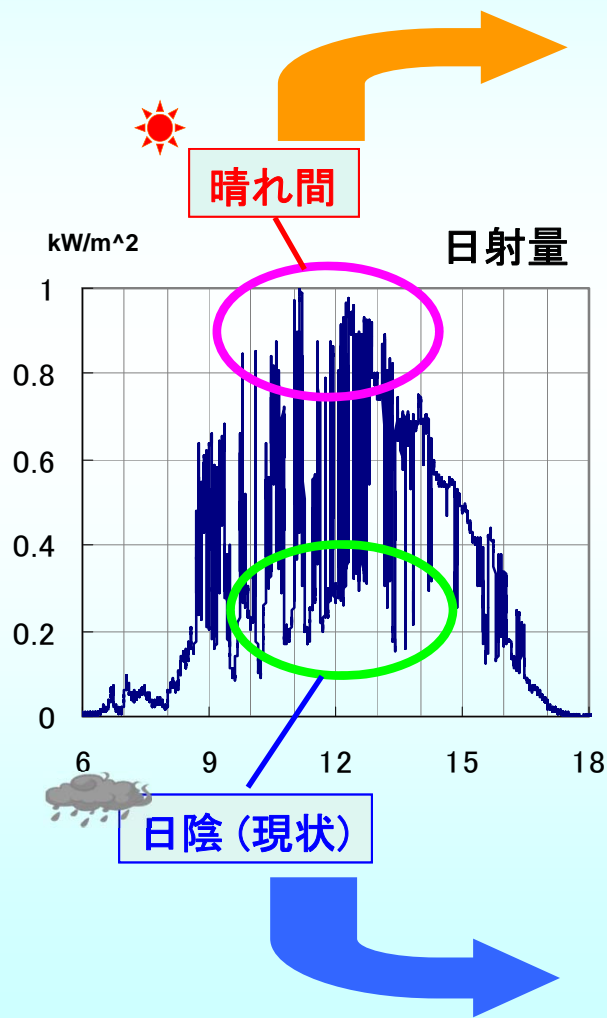


# 交流電気の品質

1. 電圧が一定  
⇔ 変動すると電気機器損傷、効率や寿命低下
2. 周波数(=1/周期)が一定  
⇔ 変動すると工場製品の品質低下、電力システムの健全性指標。  
大停電時には大変動。
3. 必要時に必要量が使える。(停電の頻度が小さい。)



# 配電系統の電圧問題



# 周波数問題とは調整力不足

- 発電と消費のバランスが崩れると周波数(回転数)が変動。
- 調整できる発電機が不足(調整力不足)。
- 調整しきれず電気が余る(電力余剰)。

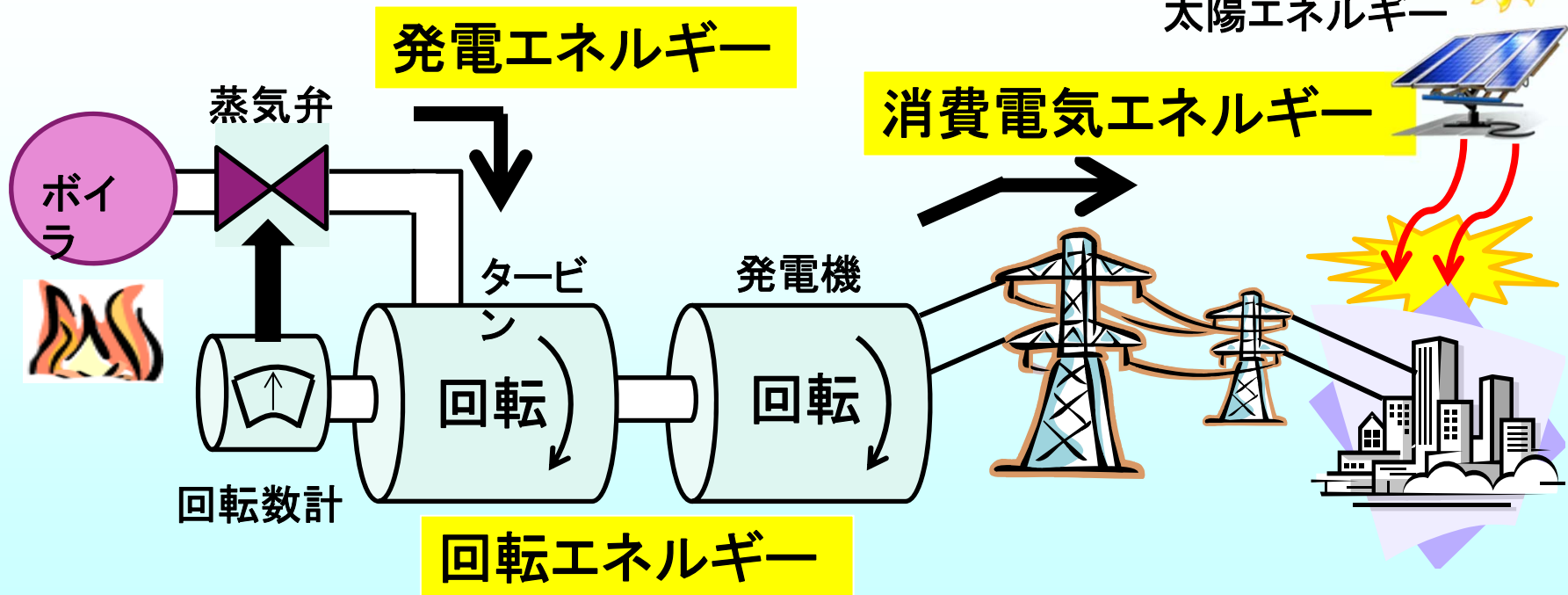
エネルギー保存則:

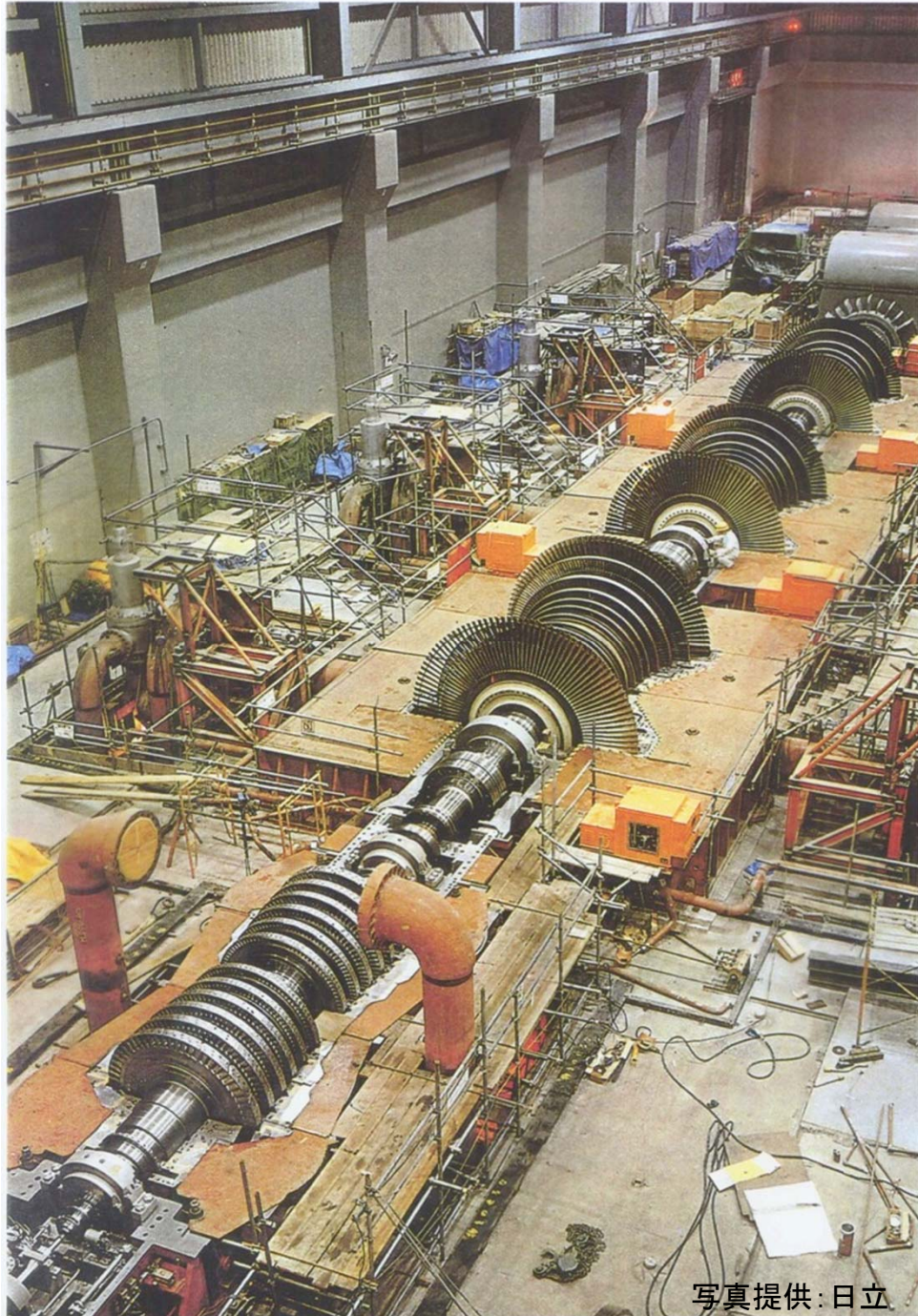
$$(\text{入力エネルギー}) = (\text{回転加速エネルギー}) + (\text{消費エネルギー})$$

発電 制御できる

周波数上昇率

負荷 制御できない





写真提供: 日立



タービンローター  
翼植え作業

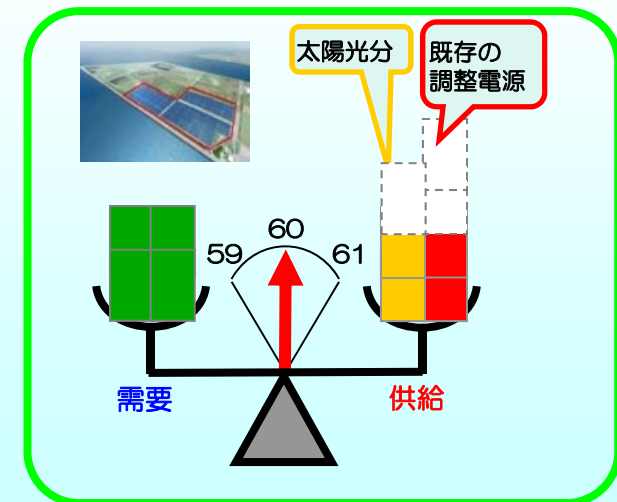
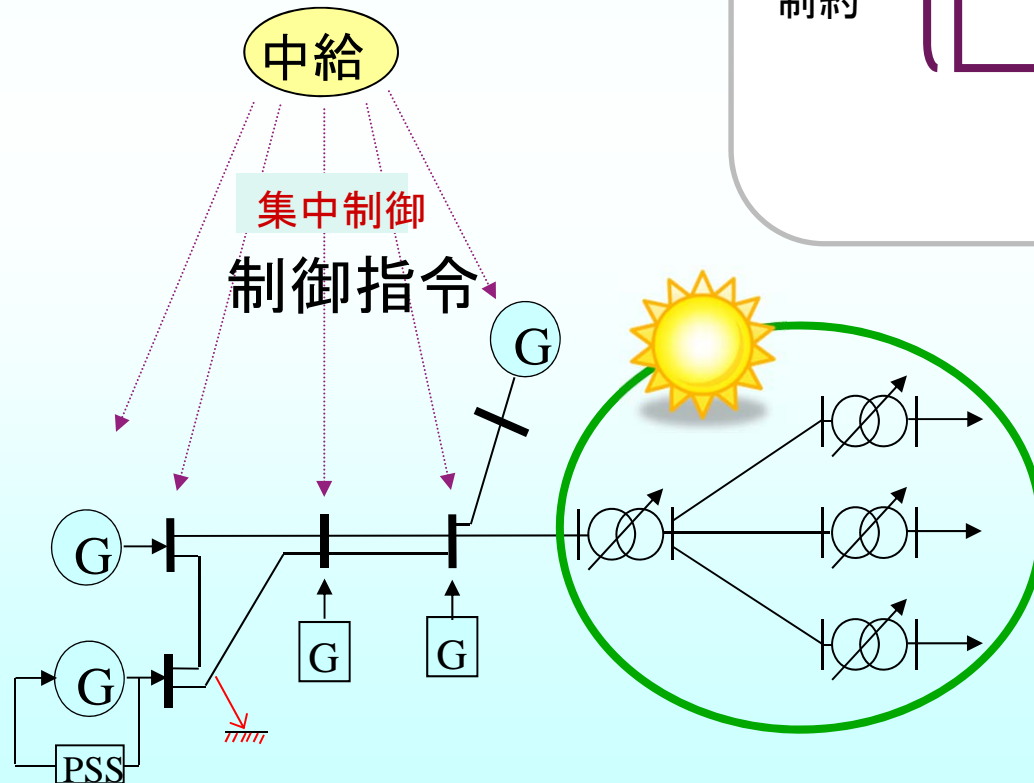
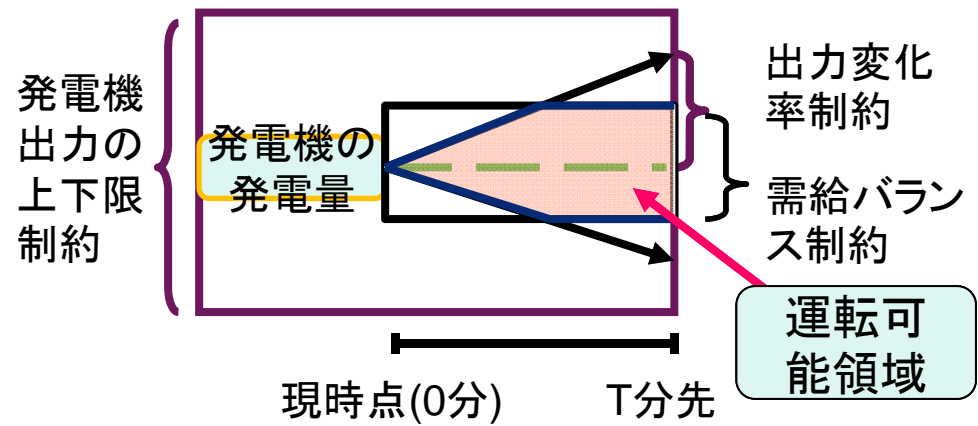


タービン回転子

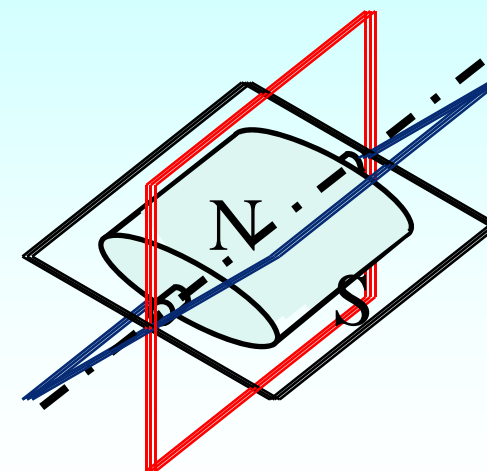
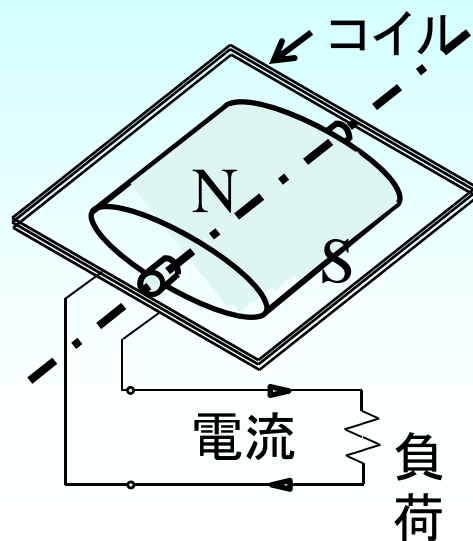
写真提供: 富士電機

# 需給制御の困難化

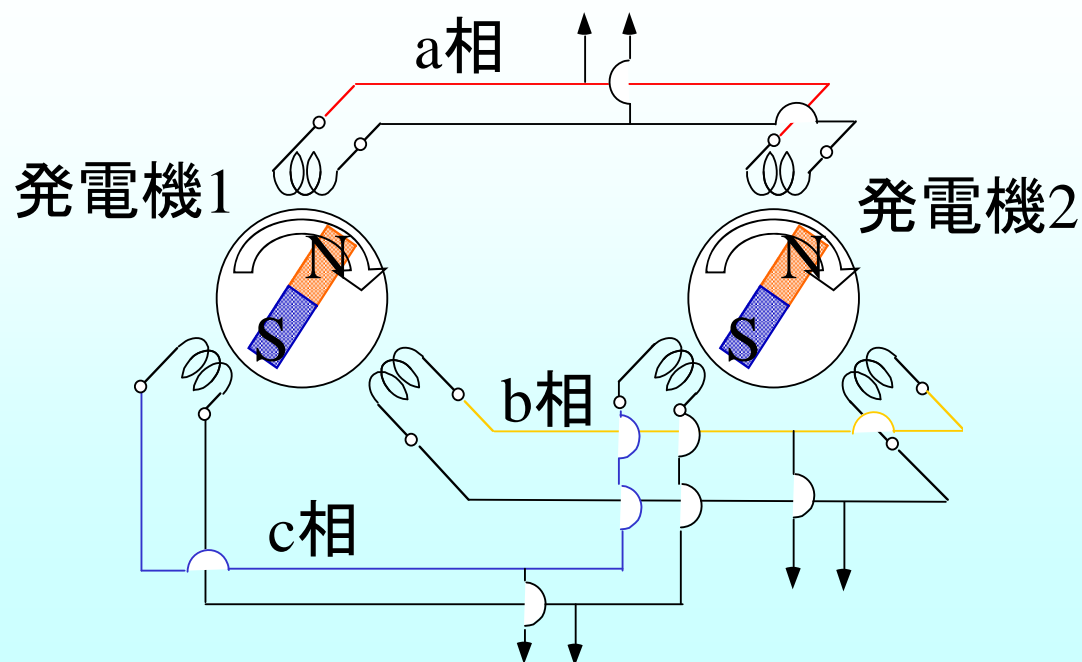
- 需給制御とは、発電機の出  
力範囲の制約をうまく考慮し  
た需要と供給のマッチング。
- 太陽光発電の出力変動によ  
り困難化。



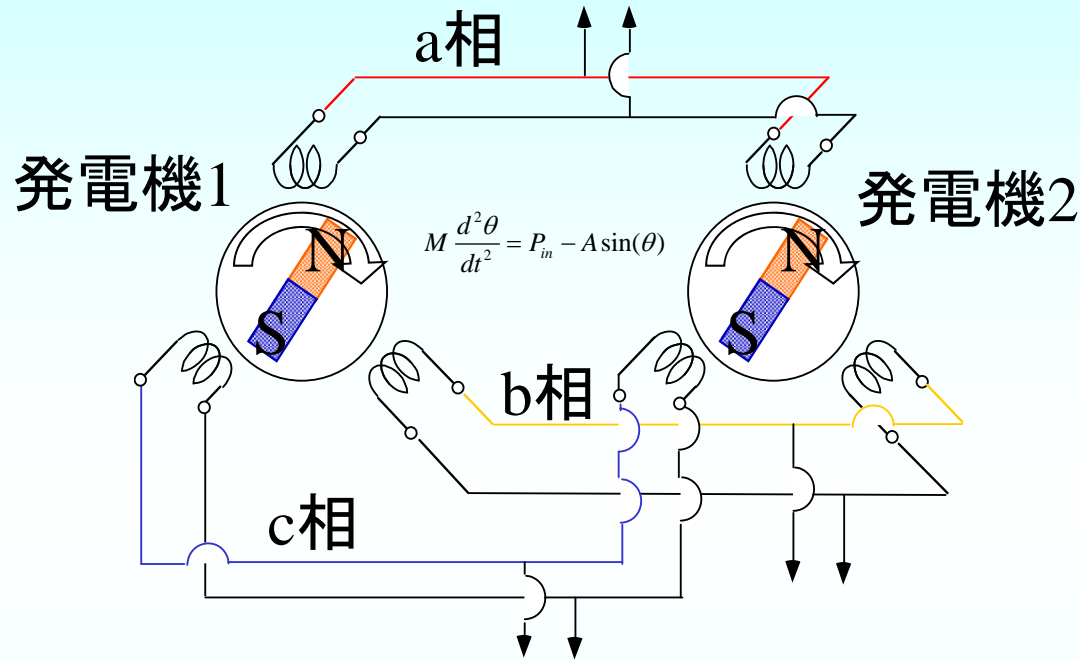
# 電力動揺と安定度



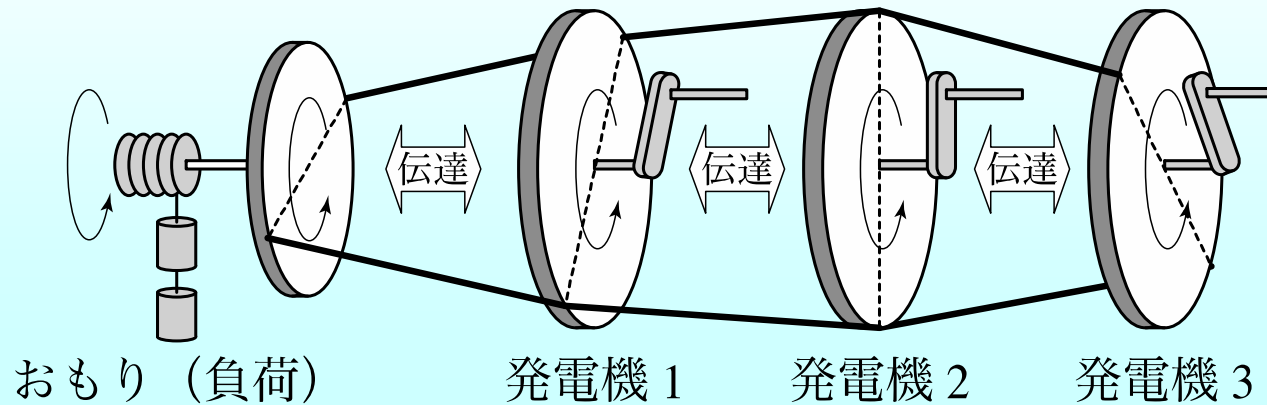
**三相交流発電の原理**  
 2つの磁石はバネで結ばれているかのように一緒に、引き合いながら回る。(同期)



# 安定度

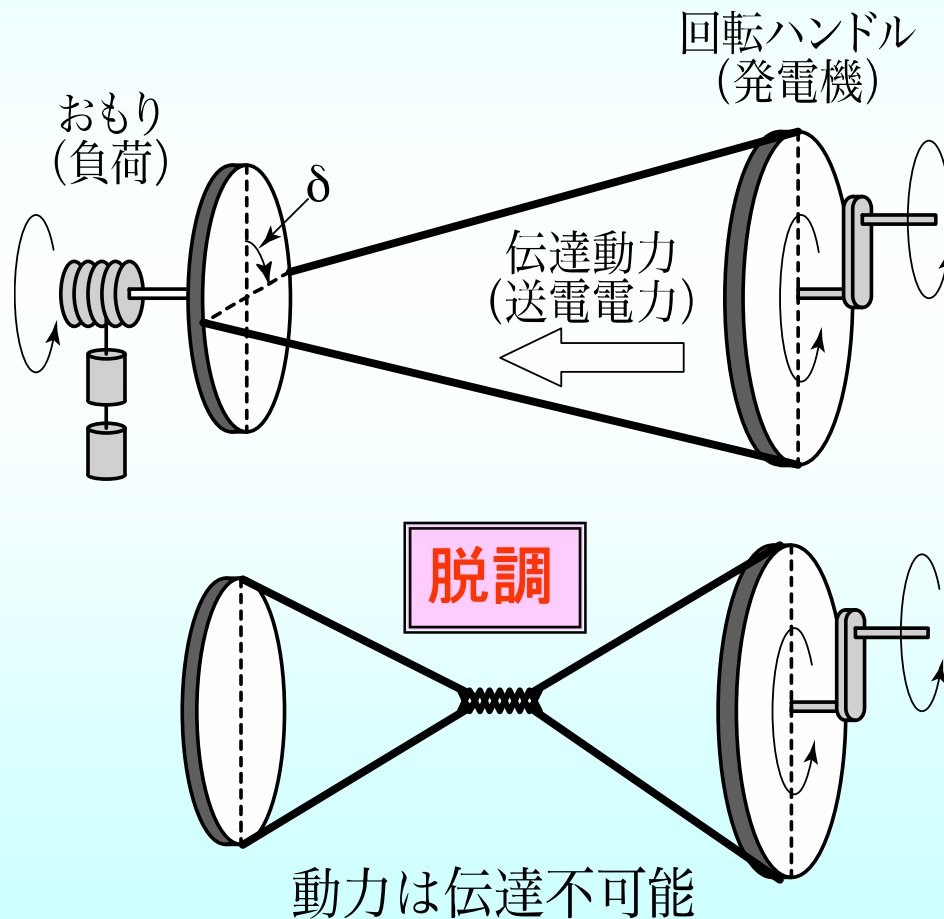


すべての発電機が同じ周波数(回転数)で回ることによって、送電が可能



# ゴムひもがねじれてしまうと 力が伝わらない(電気が送れない)

発電機1と2の間で、ねじれ振動がおきる



負荷が大きくなると、ゴムひものねじれが大きくなる。

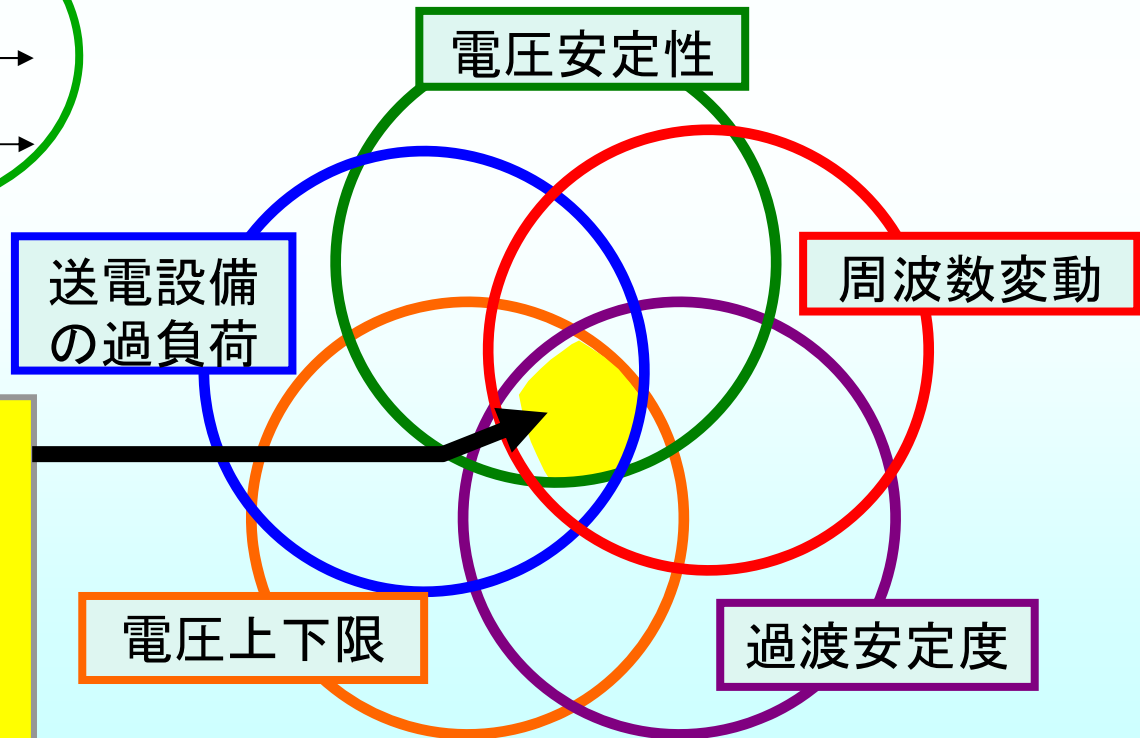
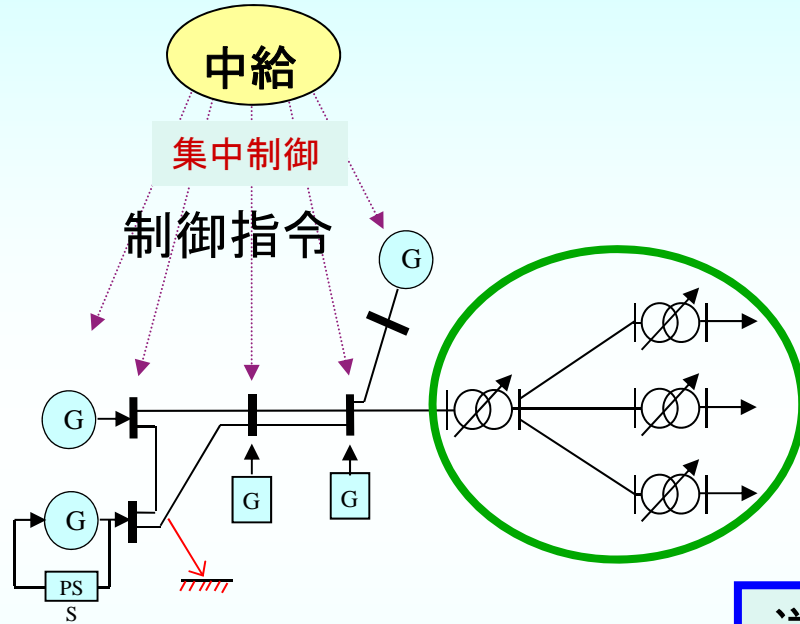
ねじれ角90度で送電能力最大

180度を超えると**脱調**



# 信頼度基準

世界共通の基準としてN-1基準がある



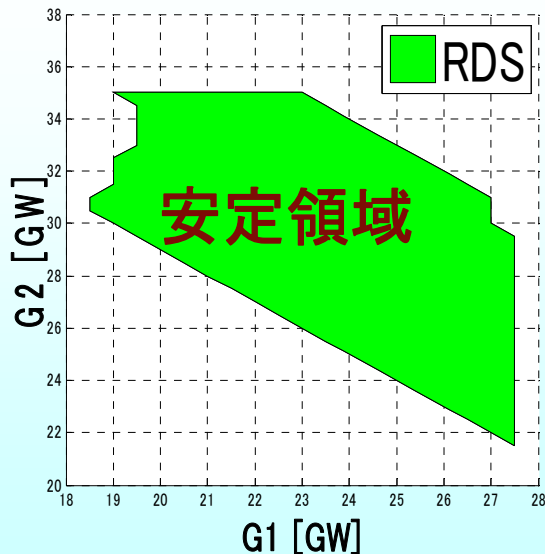
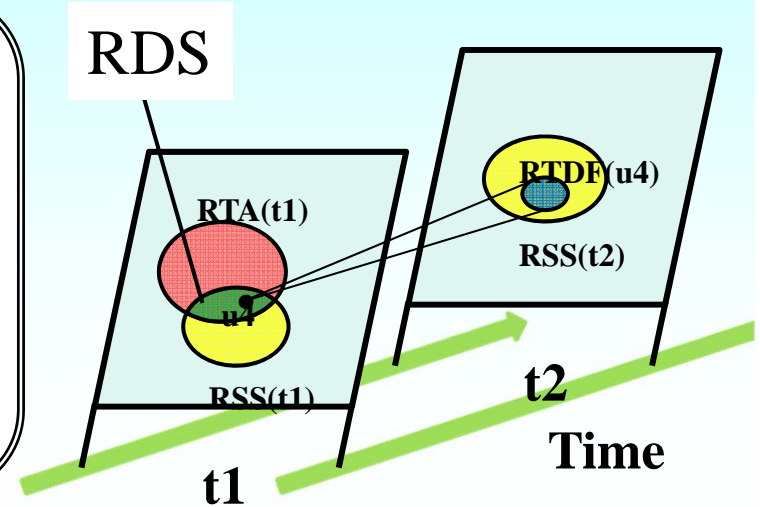
**N-1基準: 重要なN箇所の  
単一故障に対し安定な運  
用点を予防的に選ぶこと。  
中給でコントロール**

# 信頼度の低下

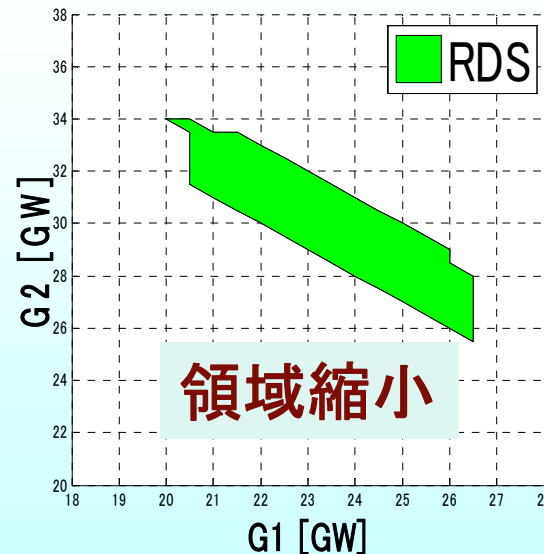
太陽光発電の不確定性が大きくなると、N-1信頼度を保つ運転領域(下図RDS)は狭くなる。

領域大 ⇒ 領域内で自由な市場取引が可能。

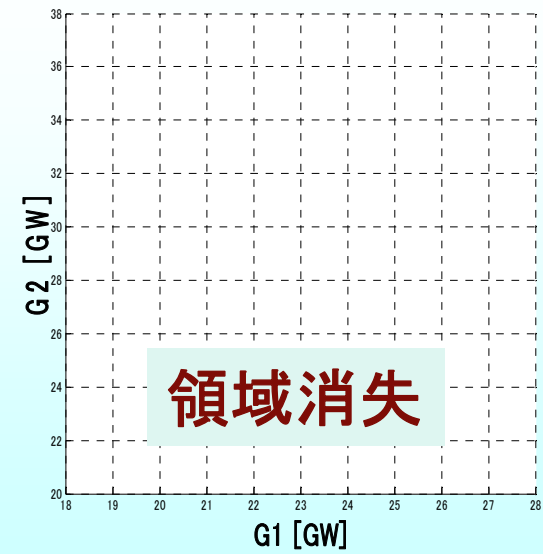
領域小 ⇒ 市場取引に制限。  
高度なシステム運用が必要。



PV予測誤差:0%

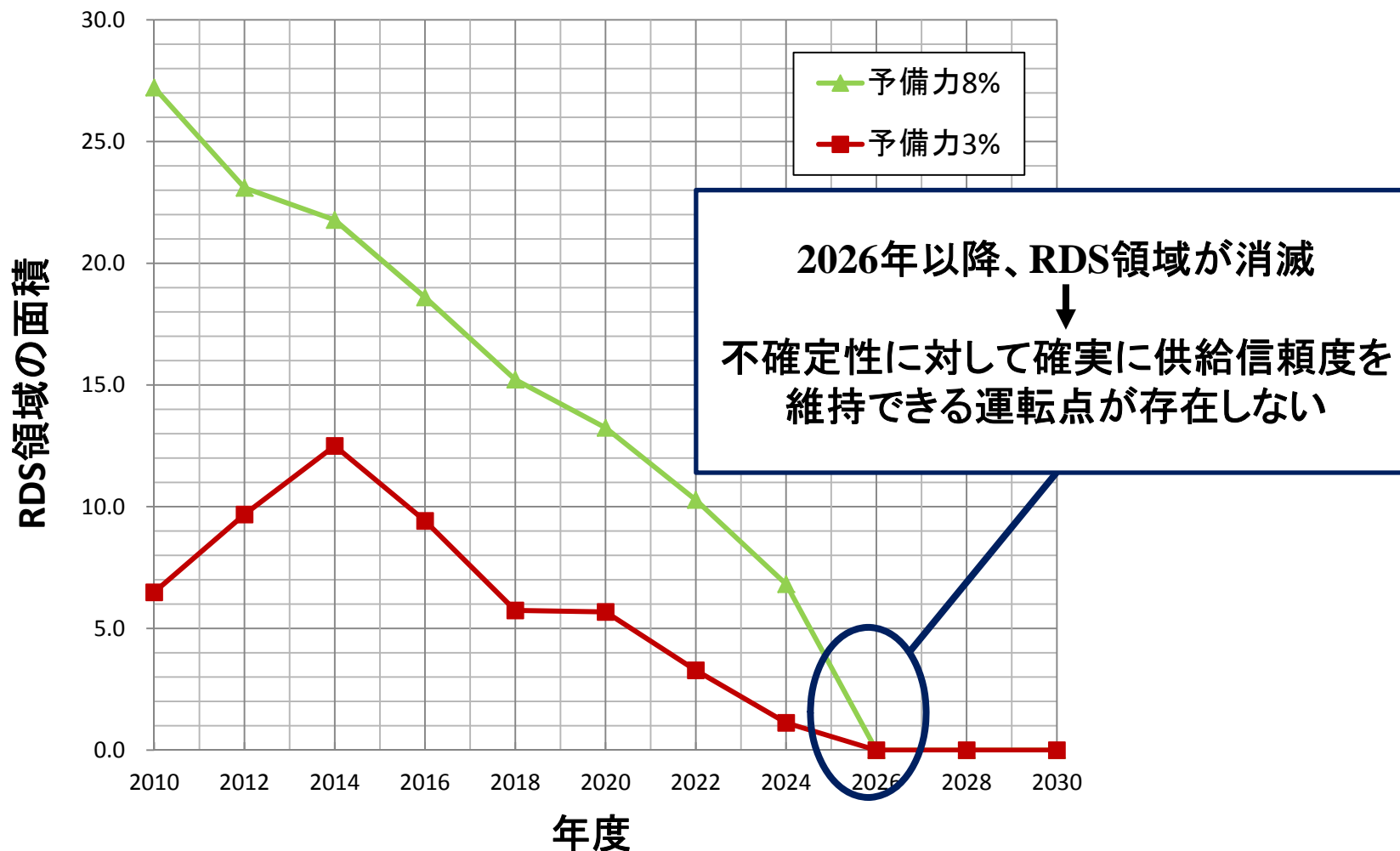


PV予測誤差:20%



PV予測誤差:40%

# RDS 領域の試算 2010-2030 (60Hz系統)

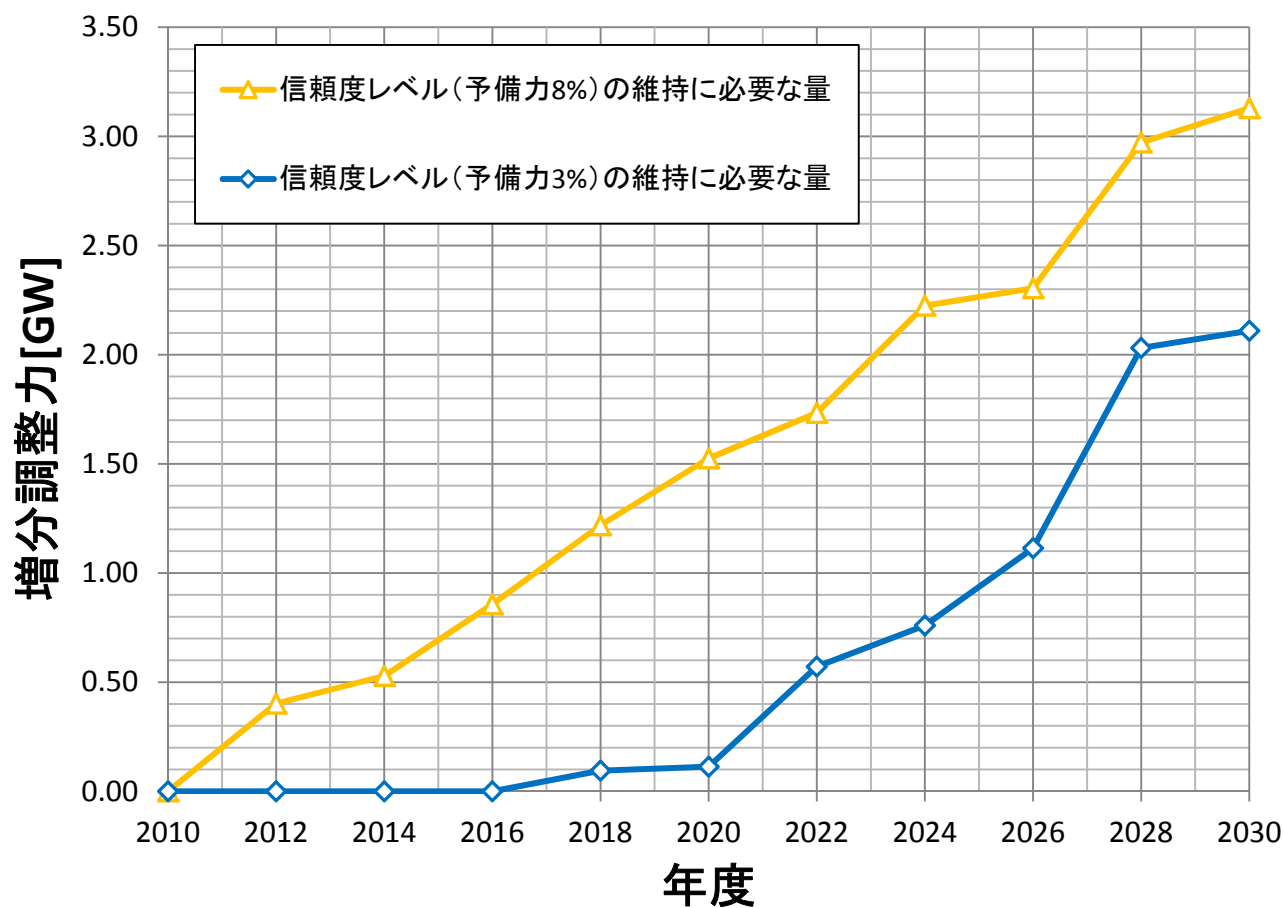


太陽光発電出力予測誤差 38% を仮定。太陽光発電は2030年において、全国54GWを仮定。この図は過渡安定度のみを考慮した非常に粗い試算だが傾向が見てとれる。



# 増分調整力の試算 2010-2030 (60Hz系統)

現状と同水準の信頼度を維持するために必要な増分調整力(供給力)

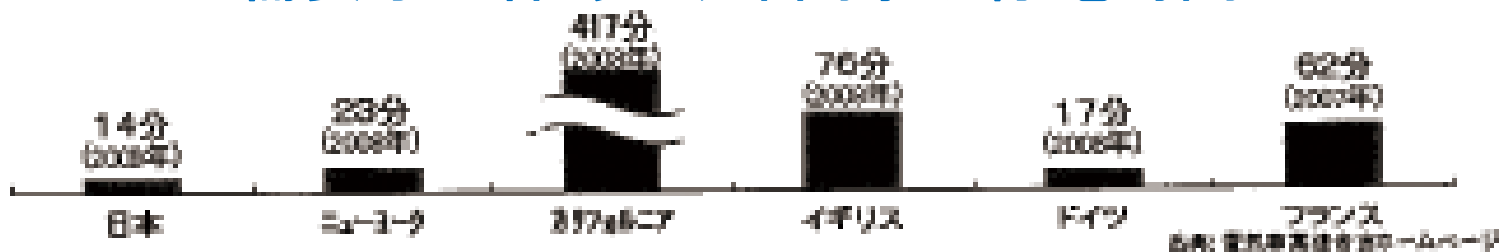


信頼度面から  
必要となる  
増分調整力  
(供給力)

# 社会インフラとしての信頼度維持

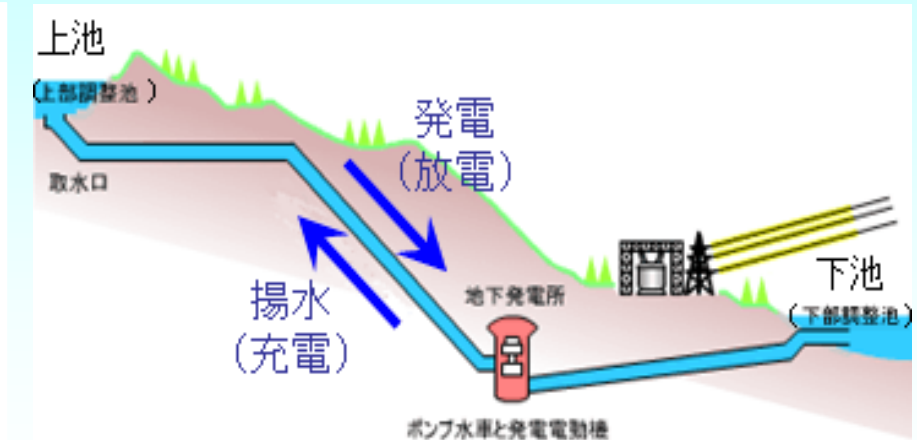
- 再エネ発電量の予測誤差電力によりロバスト信頼度の低下が拡大。信頼度を重視した**今まで通りの運用でも、停電が増加してしまう環境に移行中。**
- 現状は、周波数問題の将来対策で手一杯。信頼度問題への対応は今後の課題。
- 信頼度低下を防ぐためには**追加的供給力・調整力**の準備が必要。(物理条件)  
(周波数対策と異なり指定箇所に配置し中央制御に従う必要性)
  - 蓄電池**など集中制御に従う調整力
  - デマンドレスポンス**など追加的な調整力
  - 調整力不足分について**余剰供給力の確保**
- 確保した調整力を有効に利用するための**高度な運用・制御環境の構築**(必要条件)  
(**ICT利用、スマート化**による最適制御環境の実現)
- 全体システムの一体管理が可能な頑強な信頼度維持体制が必要

## 需要家一件あたり年間事故停電時間

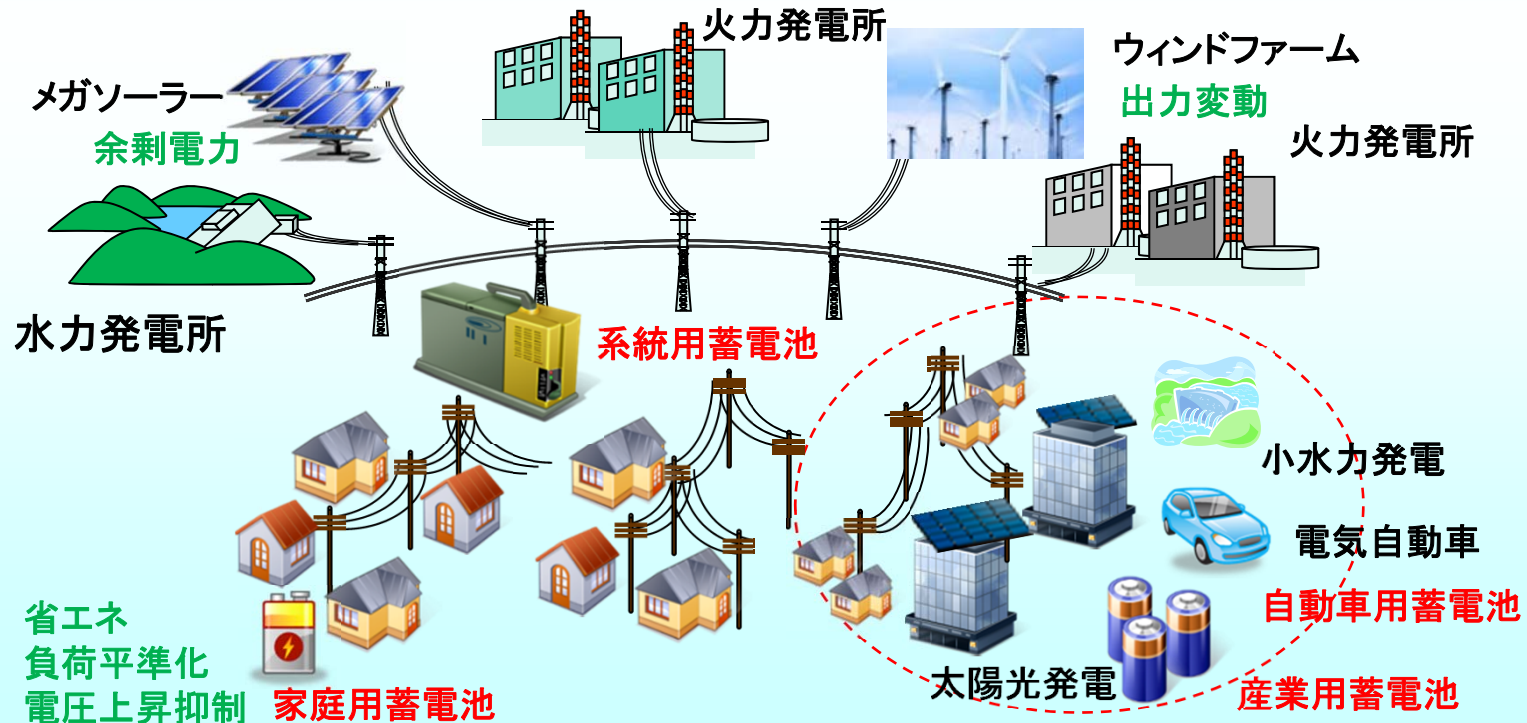


# 蓄電池の役割

- 系統用蓄電池:再生可能エネルギーの大量導入に起因する余剰電力対策, 周波数変動対策, **信頼性維持対策**
- 需要側定置用蓄電池:都市, 離島などの省エネ, 負荷平準化, 電圧上昇抑制
- 次世代自動車用蓄電池:クリーンな電気自動車の導入拡大, **周波数変動対策**



(注) 充放電1サイクルで約30%の電気エネルギーをロス



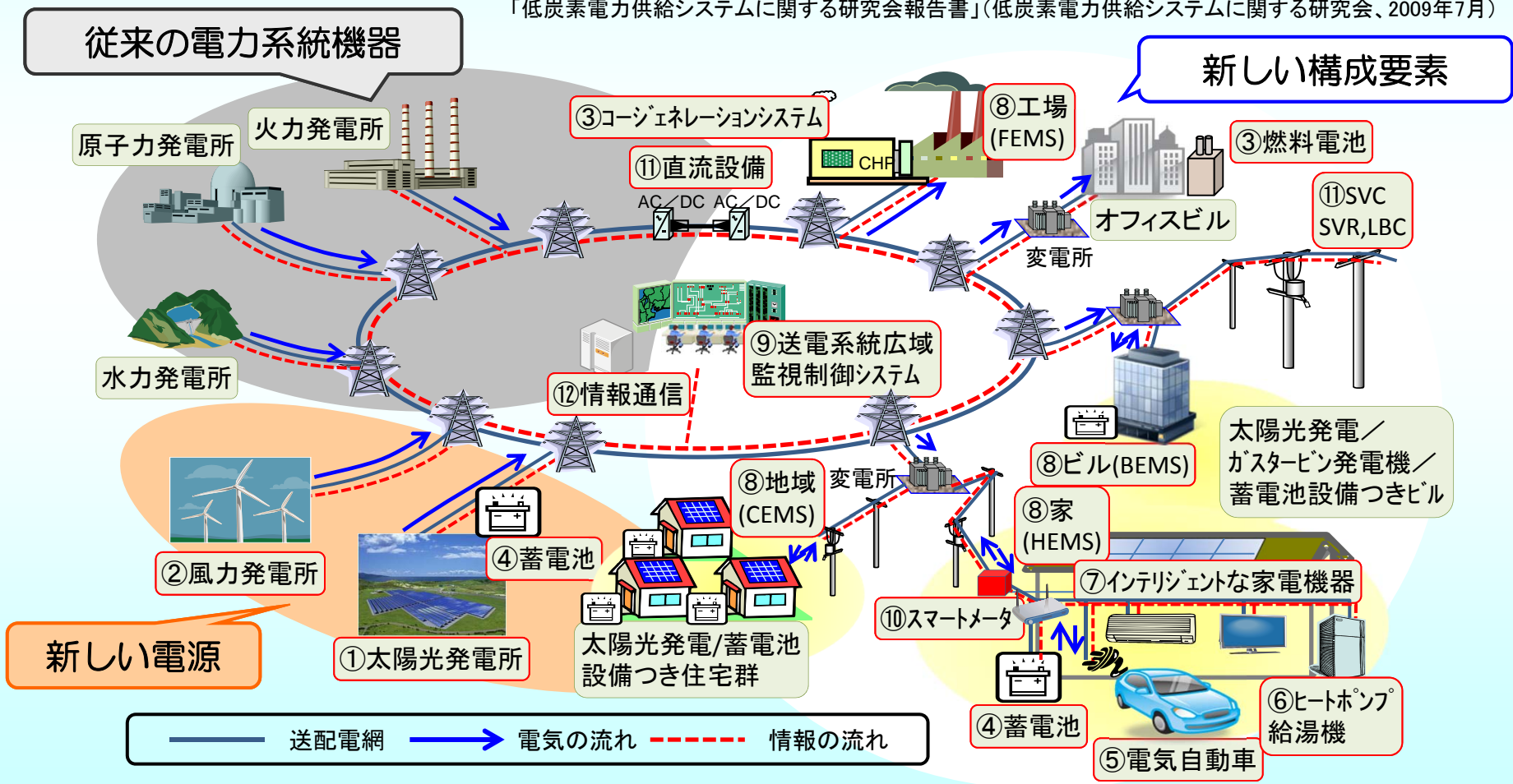
# 蓄電池の比較

電池の種類	鉛	ニッケル水素	リチウムイオン	NAS (ナトリウム硫黄)	レドックスフロー	溶融塩
コンパクト化 (エネルギー密度: Wh/kg)	× 35	△ 60	◎ 200	○ 130	× 10	◎ 290
コスト(円/kwh)	5万円	10万円	20万円	4万円	評価中	評価中
大容量化	○ ~Mw級	○ ~Mw級	○ 通常1Mw級 まで	◎ Mw級以上	◎ Mw級以上	評価中
充電状態の正確な計測・監視	△	△	△	△	◎	△
安全性	○	○	△	△	◎	◎
資源	○	△	○	◎	△	◎
運転時における 加温の必要性	なし	なし	なし	有り ( $\geq 300^{\circ}\text{C}$ )	なし	有り ( $\geq 50^{\circ}\text{C}$ )
寿命 (サイクル数)	17年 3,150回	5~7年 2,000回	6~10年 3,500回	15年 4,500回	6~10年 制限無し	評価中

# スマートグリッド

○従来からの集中型電源と送電システムとの一体運用に加え、情報通信技術の活用により、太陽光発電等の分散電源や需要家の情報を統合・活用して、高効率、高品質、高信頼度の電力供給システムの実現を目指すもの

「低炭素電力供給システムに関する研究会報告書」(低炭素電力供給システムに関する研究会、2009年7月)





ご静聴ありがとうございました。