

低炭素電力供給システムにおける火力・
水力発電等の役割と課題について

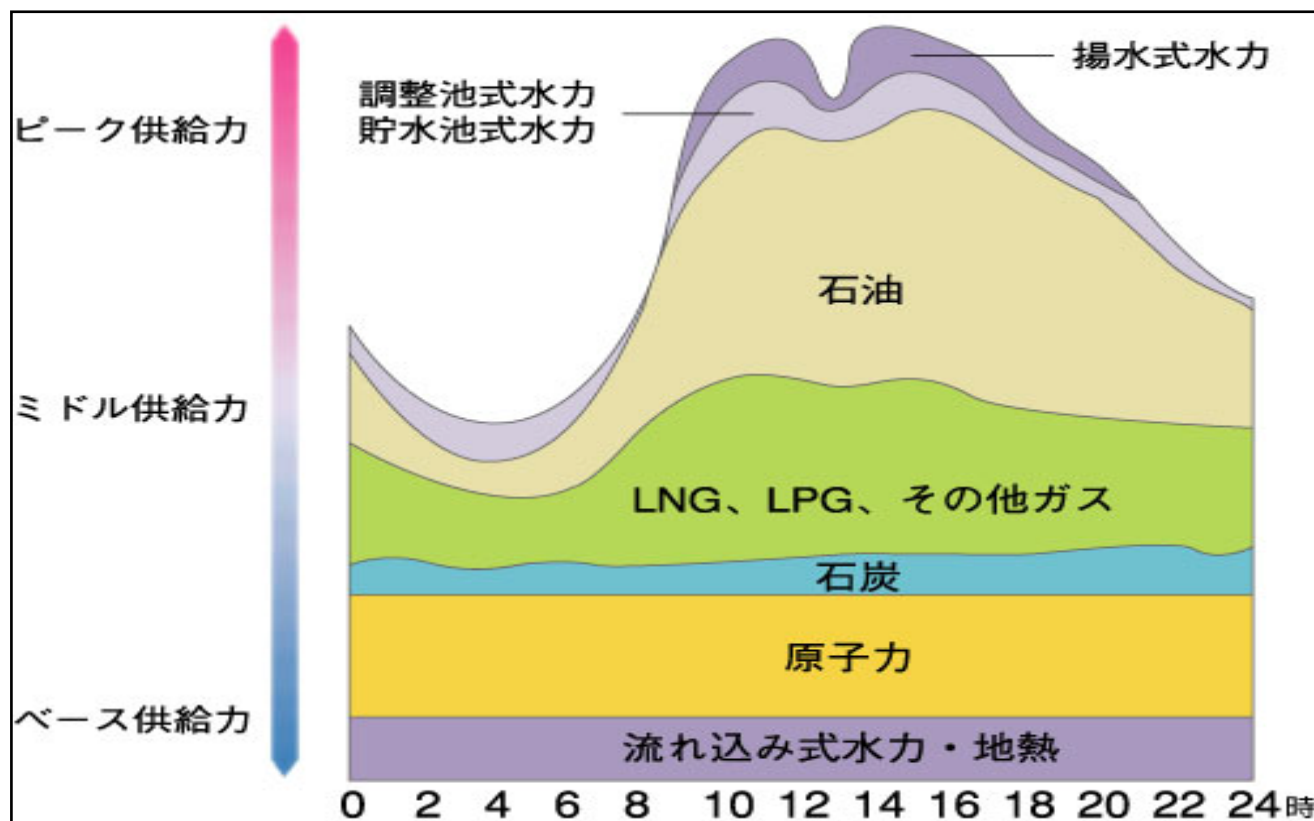
平成 21 年 1 月 26 日
資源エネルギー庁
電力・ガス事業部

<1. 電源のベストミックス>

一日の電力需給について

○ピークの電力需要に対しては、揚水式水力、石油火力、LNG火力等で対応。

【需給曲線(日負荷)】



出典：電気事業連合会

ピーク供給力：発電電力量の調整が容易な電源

ミドル供給力：ピーク電力とベース電力の2つの特徴を持つ電源

ベース供給力：一定量の電気を安定的に供給する電源

<1. 電源のベストミックス>

電源ごとのメリット・デメリット

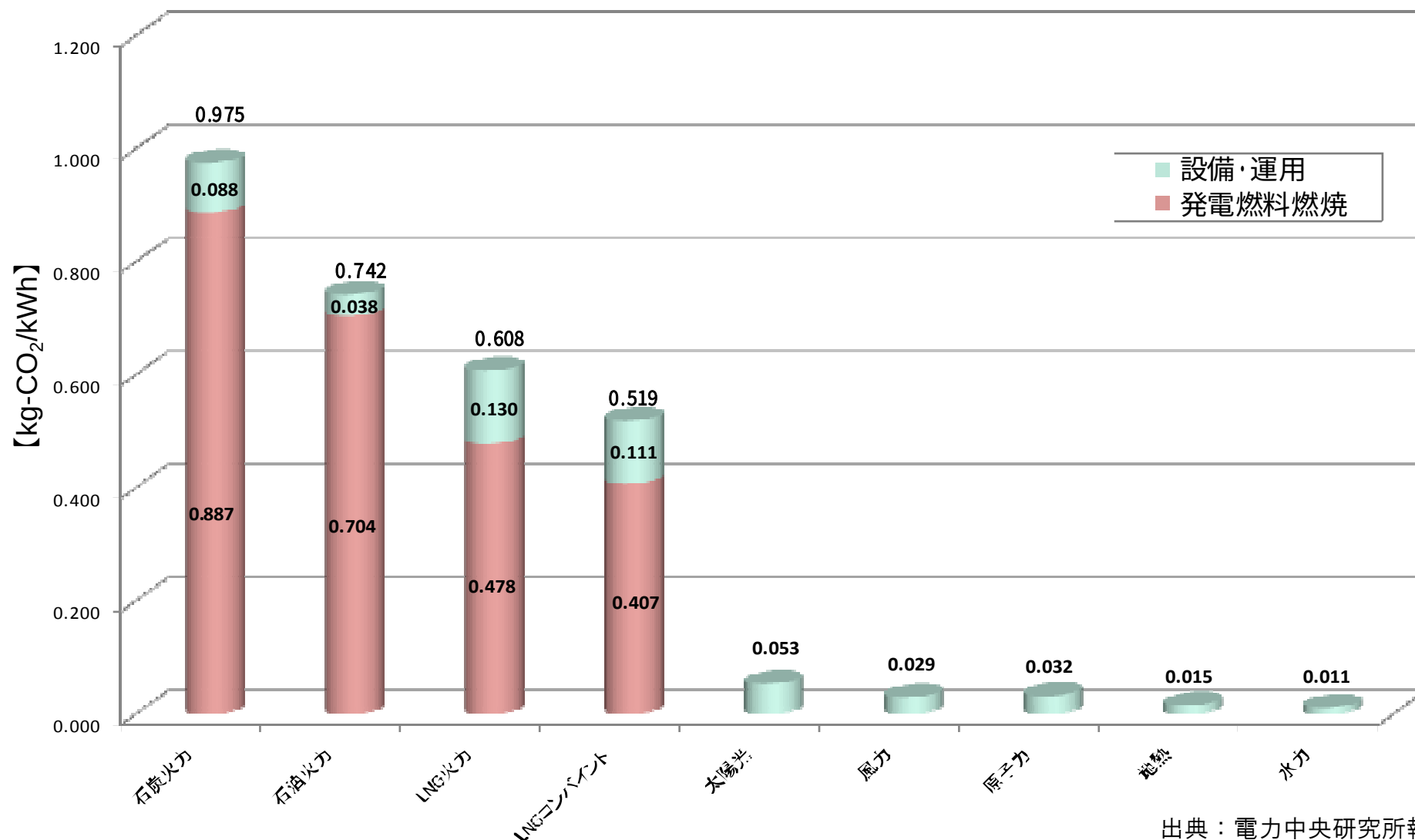
○供給安定性、経済性、環境特性、電源毎の運転特性等を踏まえた最適な構成（ベストミックス）を図ることが必要。特に出力の不安定な太陽光パネル等の新エネ電源が大量に導入された場合には、負荷追従性がより重要な要素となる。

電源種	メリット	デメリット
原子力	- ウラン資源が政情の安定した地域に賦存 - 核燃料サイクルにより準国産エネルギーとして活用可能。 - 発電過程でCO₂を排出しない	- 社会的受容性の問題など、将来の動向に不確実性がある - 共通原因により運転が制約される可能性がある
L N G	- 燃料の調達先が分散している。 - CO₂の排出量が少ない。 - 長期契約中心であり供給が安定。	- 燃料輸送費が高い - インフラ整備が必要 - 燃料調達が硬直的 - 価格は高め
石炭	- 資源量が豊富。 - 燃料の調達先が分散、安定している。 - 他の化石燃料と比べ低価格で安定している。	発電過程でCO₂の排出量が多い
石油	- 燃料貯蔵が容易。 - 供給弾力性に優れる。	価格は高めであり、燃料価格の変動が大きい
水力・地熱	- 純国産の再生可能エネルギー - 発電過程でCO₂を排出しない。	- 大幅な新規開発を見込むには限界 - 経済性は劣位
新エネルギー	発電過程でCO₂を排出しない	- 出力が不安定 - 経済性は劣位

<1. 電源のベストミックス>

電源種別のCO₂排出原単位

○ライフサイクル全体で発生するCO₂排出量は以下のとおり。

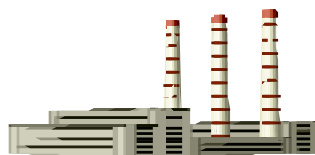
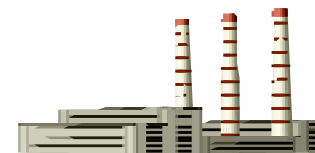


<1. 電源のベストミックス>

今後の石炭火力とLNG火力の建設計画

○平成20年度電力供給計画等によると、2017年度までに運転開始が予定されている石炭火力及びLNG火力は、以下のとおり。

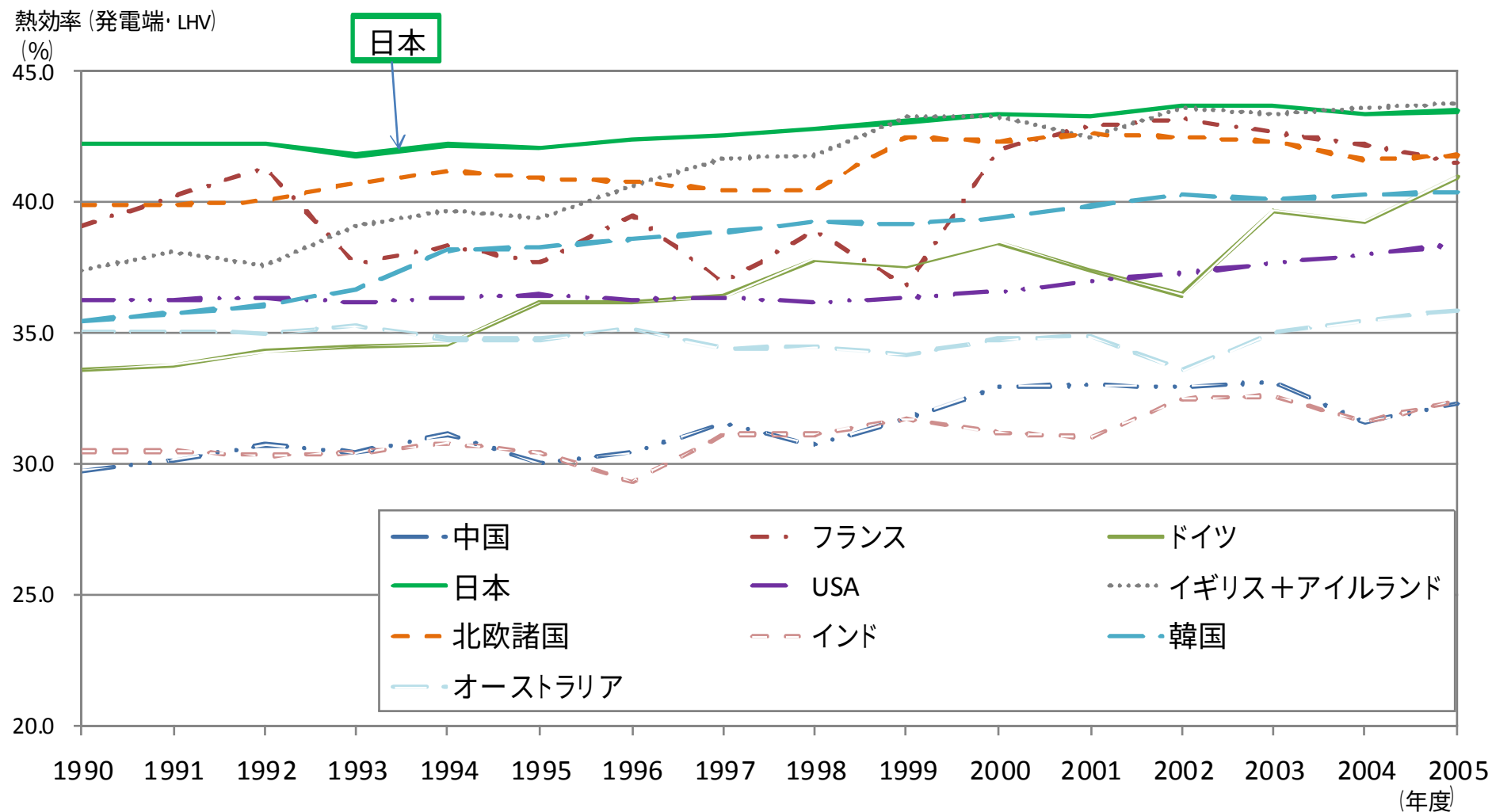
石 炭	➔	8 基	4 1 5 万kW
L N G	➔	3 2 基	1 1 8 6 万kW



< 2. 火力発電の高効率化等 >

火力発電効率の国際比較

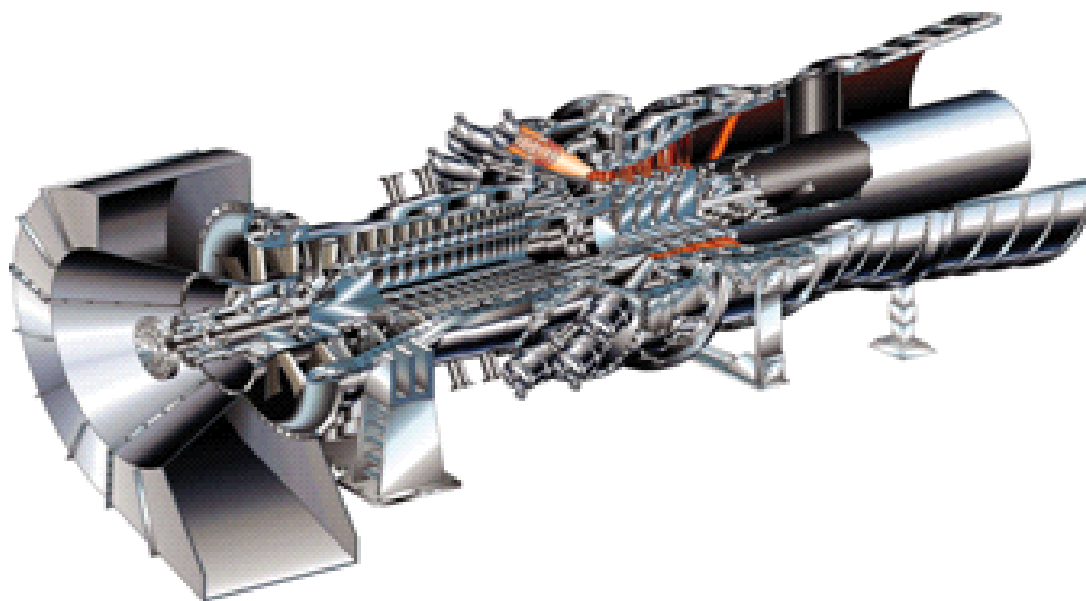
○日本の火力発電の熱効率は世界的にも高い水準。特に石炭火力の熱効率は世界で最も高い。



< 2. 火力発電の高効率化等 >

高効率ガスタービンについて

- 燃焼温度を高温化したガスタービンを用いた複合発電や高温分空気利用ガスタービン等による発電。
- ガスタービンの燃焼温度を1,500℃級から1,700℃級に高温化することで、発電効率（送電端、HHV）が52%から56%以上に向上することを期待。
- 1,700℃級ガスタービン、高温分空気利用ガスタービンは、2015年頃の実用化を目指し技術開発が行われている。

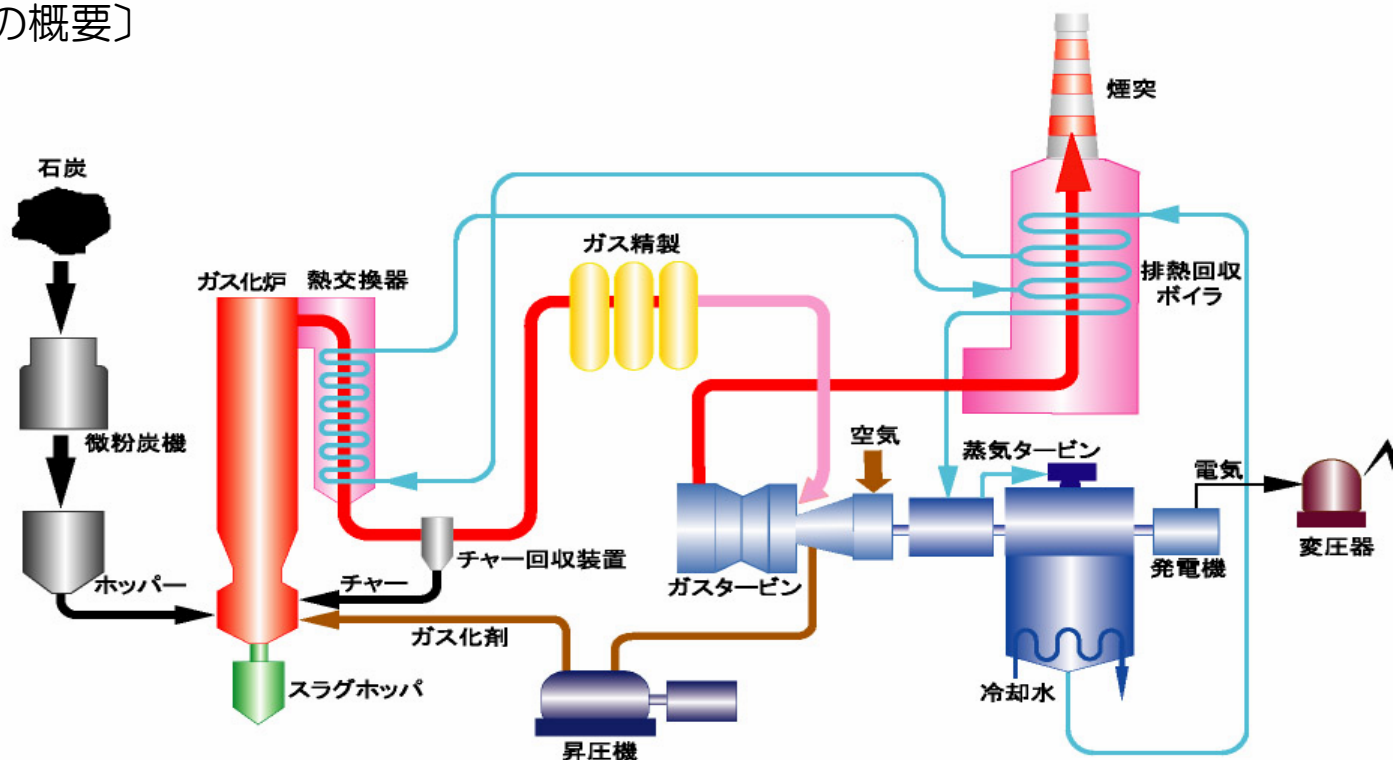


< 2. 火力発電の高効率化等 >

石炭ガス化複合発電（IGCC）について

- IGCCとは、石炭をガス化炉で可燃性ガスに転換させ、ガスタービンに導入して発電し、更にその排熱を蒸気にて熱回収し蒸気タービンに導入して発電する複合発電方式。
- IGCC（1,500℃級ガスタービン）の熱効率は46%（送電端、HHV）、CO₂排出原単位は既存の微粉炭石炭火力と比較して2割程度の改善を期待。
- 2017年頃の実用化を目指して技術開発が行われており、商用機の第1号は中国電力・三隅2号を予定。

〔IGCCの概要〕



出典：(株)クリーンコールパワー研究所HP

< 2. 火力発電の高効率化等 >

I G C C の技術的な課題について

- 既存の火力発電プラントと比較して運用上の課題があり、今後、既存の火力発電プラントとの運用面での課題を技術的にどこまで改善できるかの検討が必要。
- 将来的に太陽光等の新エネルギーが大量に普及した場合、火力発電所の要求性能として、負荷追従性の高さが重要となる可能性があるため、実用化に向けては更なる改善が必要。

< 運用上の課題（(株)クリーンコールパワー研究所の例） >

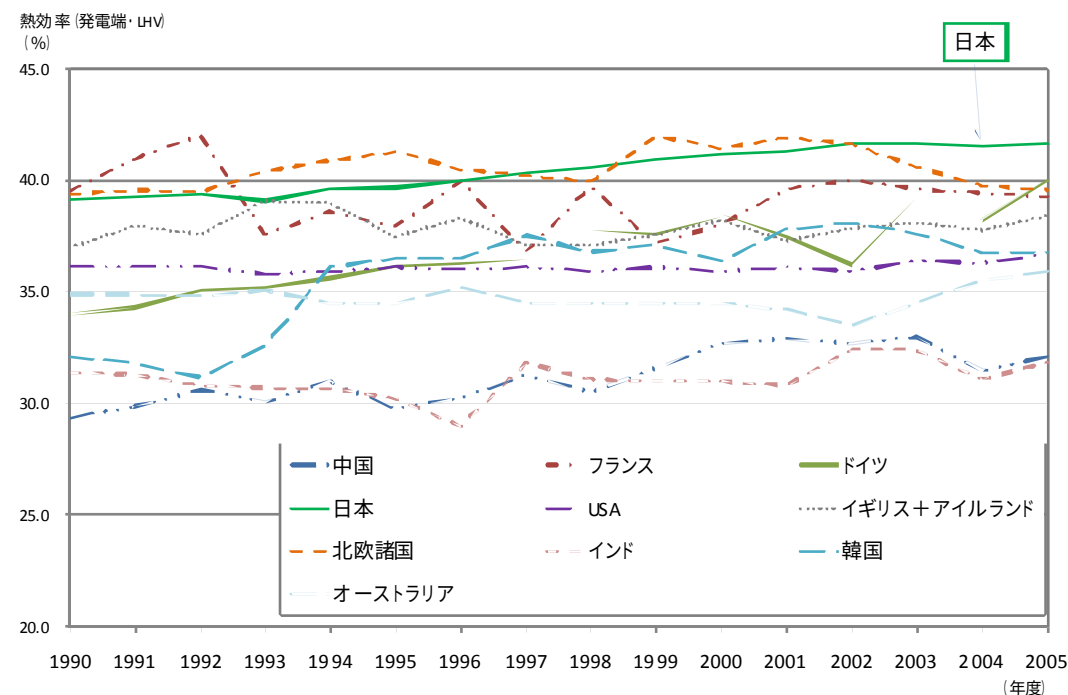
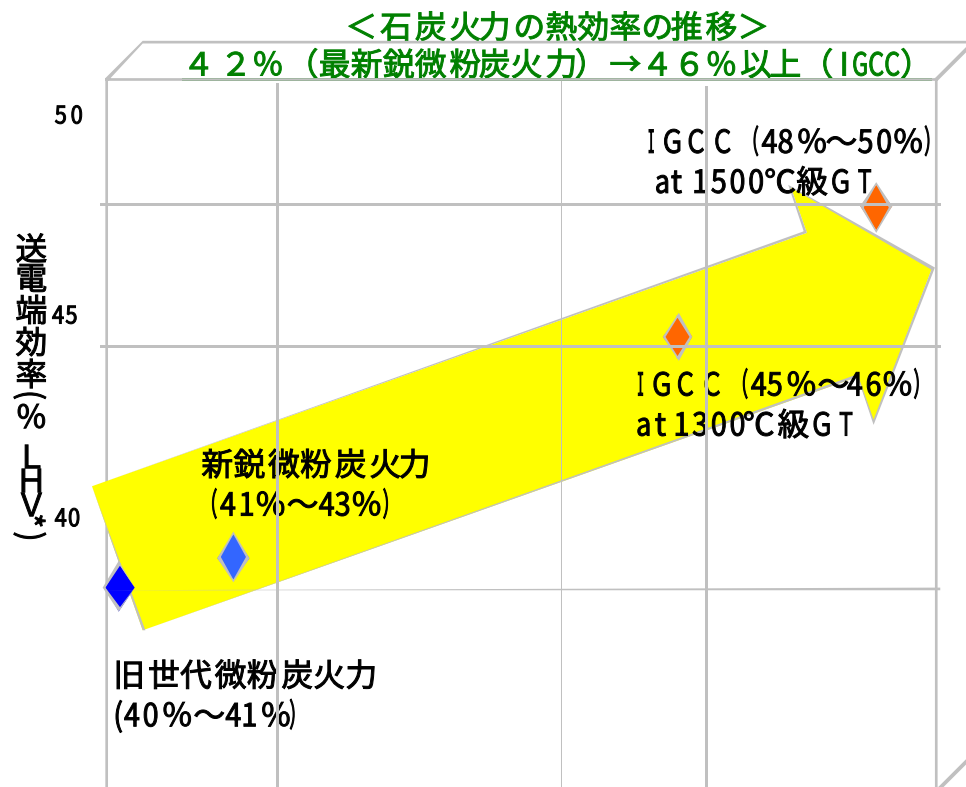
- 立ち上げ時間の短縮：起動に18時間、停止に6時間必要。現時点ではミドル運用は困難。
- 最低負荷の低減：既存火力は30%程度まで可能であるが、現時点では50%が限界。
- 出力変化速度の高速化：既存石炭火力は3%（7.5MW）／分であるのに対し、現時点は1.6%（4MW）／分。
- 使用可能炭種の拡大：現時点では灰の融点が高い中国炭（神華炭）のみ使用。今後、インドネシア炭や米国炭等について燃焼データ等を取り使用可能炭種を増やしていくことが必要。

< 2. 火力発電の高効率化等 >

石炭火力の発電効率

- 我が国の電力会社は、高効率なタービンの導入や蒸気条件の高温・高圧化などにより、石炭火力発電の熱効率の向上に取り組んできた。
- 石炭火力の更なる熱効率の向上を図るため、石炭ガス化複合発電（IGCC）の技術開発等に取り組んでいる。

石炭火力の熱効率の国際比較



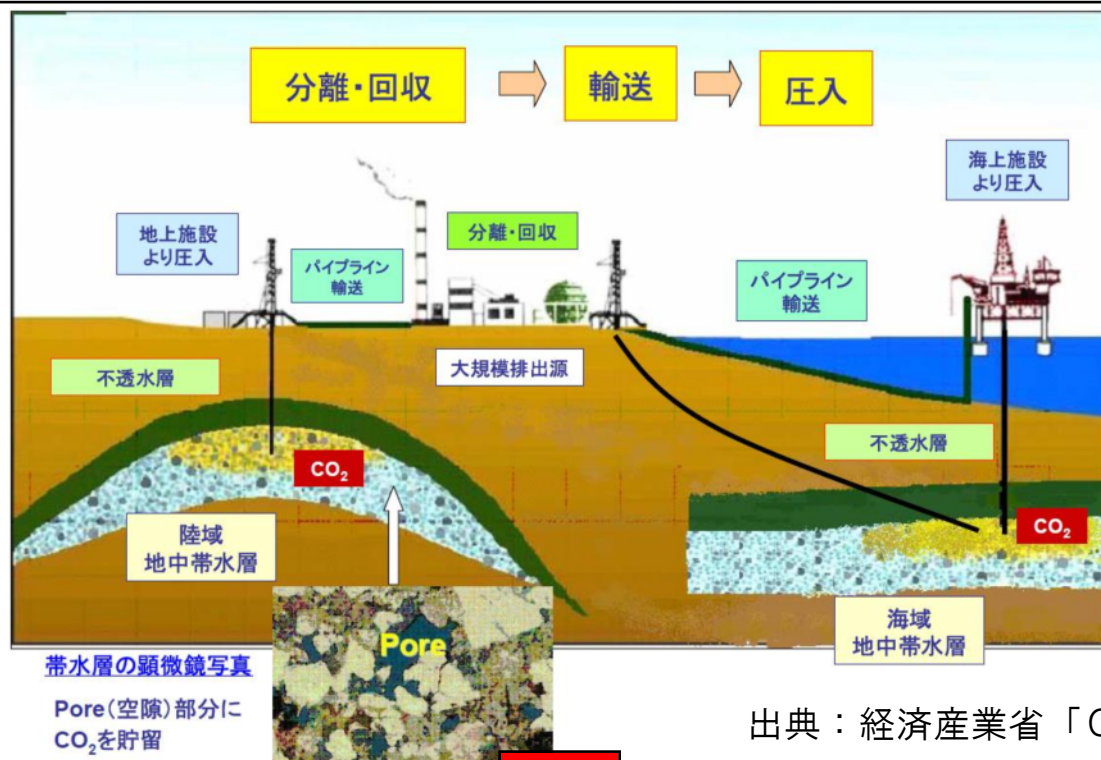
出典：ECOFYS "INTERNATIONAL COMPARISON OF FOSSIL POWER EFFICIENCY"(2008)

< 2. 火力発電の高効率化等 >

CCSについて

- CCSとは、火力発電所等の大規模排出源から排ガス中のCO₂を分離・回収し、長期間安定的に地下へ貯留、又は海洋へ隔離することで大気中へのCO₂放出を抑制する技術。
- 実用化に当たっては、低コストで効率よく分離回収する技術開発が鍵。貯留技術は、石油・天然ガス開発等で構築された技術を応用。

〔CCSの概要〕



出典：経済産業省「CCS 2020」

「低炭素社会づくり行動計画」によると、2020年までの実用化を目指すこととされている。

< 2. 火力発電の高効率化等 >

諸外国における C C S プロジェクト

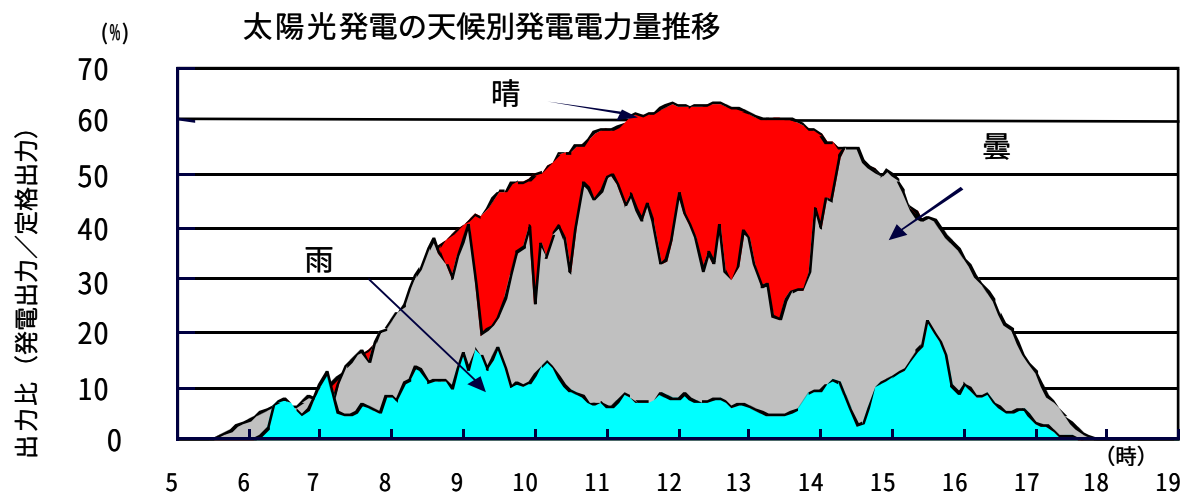
	Otway (豪)	Ketzin (ドイツ)	Snovit (ノルウェー)	Teapot Dome (米国)	Mountaineer (米国)
実施主体	CO2CRC	GFZ	Statoilhydro	ロッキーマウンテン油田試験センター (RMOTC)、Anadarko	AEP、Alstom、RWE、NETL、バテル
場所	ガス田	帯水層	ガス田	油層 (EOR)	帯水層
	陸域	陸域	海域	陸域	陸域
開始時期	2008年4月	2008年6月	2008年4月	2007年予定 (延期)	2009年半ば
注入レート	170トン/日	3万トン/年	70万トン/年	260万トン/年	10万～16.5万トン/年
C O ₂ 源	天然ガス随伴	水素製造	天然ガス随伴	天然ガス随伴	石炭火力発電
備考		2年間操業予定	2035年まで操業予定		3～5年操業予定

出典：N T T データ経営研究所資料

＜3. 火力発電・水力発電による太陽光パネルの出力変動対策＞

太陽光パネルの大量導入に伴う火力発電の役割

- 天候の変化により太陽光パネルの出力は変動することから、電力需要を賄って、瞬時の電力需給バランスを確保するためには、気象条件に左右されずに負荷追従が可能な火力発電の役割が重要。
- 負荷追従を行うための火力発電の性能としては、立ち上げ時間が短いことや出力変化速度が速いこと、最低負荷が小さいことなどが重要。



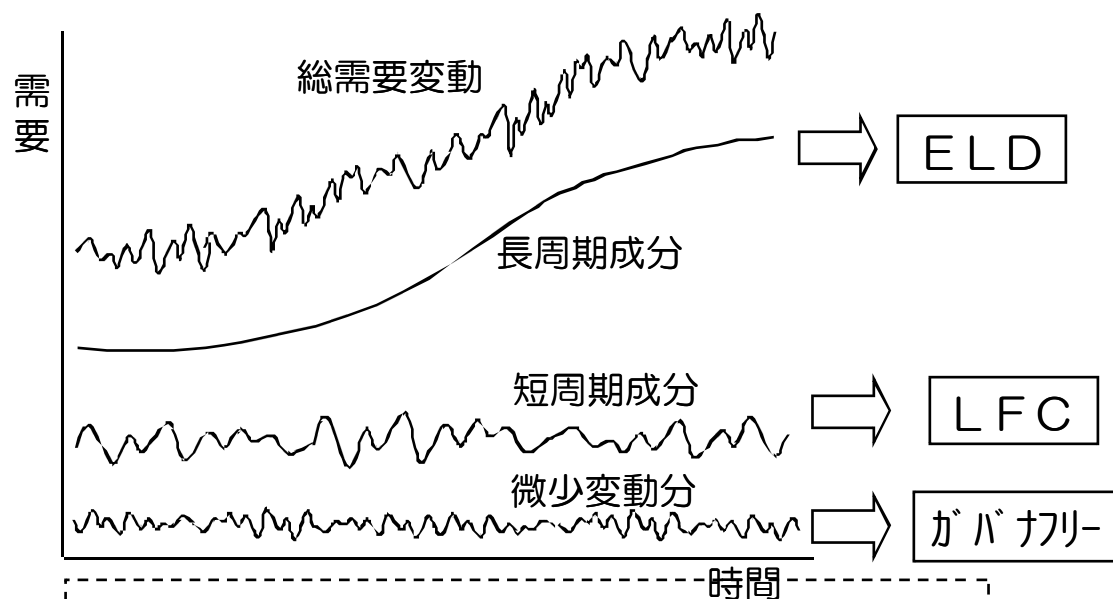
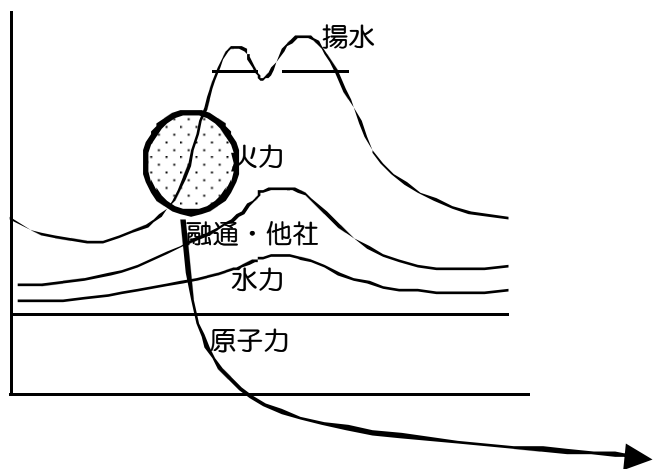
今後重視される火力発電の性能

- 急激な需要変動に対応可能な立ち上げ時間の短い火力
- 出力変化速度 (kW/分) が大きい
- 最低負荷の小さな電源 (下げ代が大きい)
- 低出力運転時でも効率の高い火力
- 十分なガバナフリー容量の確保
- 多様な燃料種への対応

< 3. 火力発電・水力発電による太陽光パネルの出力変動対策 >

出力調整と負荷追従について

- 数十秒から数分以内の短周期の負荷変動に対しては、ガバナフリー運転や負荷の自己制御特性で対応。
- 数分から十数分以内の負荷変動に対してはLFC、それ以上の負荷変動に対してELDにて対応。



ガバナフリー

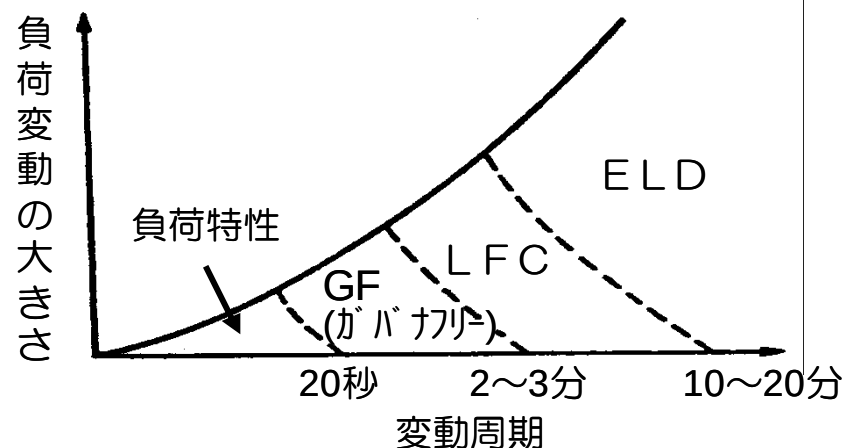
・発電機出力や周波数の増減に応じた回転数変化を検出し制御弁を開閉し、回転数を一定に制御させるもの

LFC (Load Frequency Control)

・給電指令所の自動周波数制御装置により周波数偏差を検出し、短周期の負荷調整する出力指令信号

ELD (Economic Load Dispatch)

・給電指令所より送信される出力指令信号



＜ 3. 火力発電・水力発電による太陽光パネルの出力変動対策＞

火力発電所の出力変動幅・変化率について

		火力発電方式						コンバインド発電方式	
		ドラム（35万kWクラス）			貫流（70万kWクラス）			1100℃級 (単軸15万kWクラス)	1300℃級以上 (単軸35万kWクラス)
タイプ		石油	LNG	石炭	石油	LNG	石炭	LNG	LNG
燃料種別		石油	LNG	石炭	石油	LNG	石炭	LNG	LNG
ガバナフリー運転		◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
LFC調整力		◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
出力調整力		○	◎	○	◎	◎	○	単軸△ 系列◎	単軸○ 系列◎
出力調整幅		30%～100%	20%～100%	30%～100%	15%～100%	15%～100%	30%～100	単軸 80%～100% 系列 20%～100%	単軸 50%～100% 系列 20%～100%
出力変化率		3%/分	3%/分	1%/分	5%/分	5%/分	3%/分	7%/分	10%/分
起動時間 (時間)	WSS	20～30時間			30～40時間			12時間	
	DSS	3～5時間			5～10時間		—	1(並列0.5)時間	

※ 上記数値は代表例であり、プラント毎に仕様は異なる。

DSS（日々停止：Daily Start and Stop）：電力需要の低い夜間に発電プラントを停止し、翌日の朝方に起動する運用。

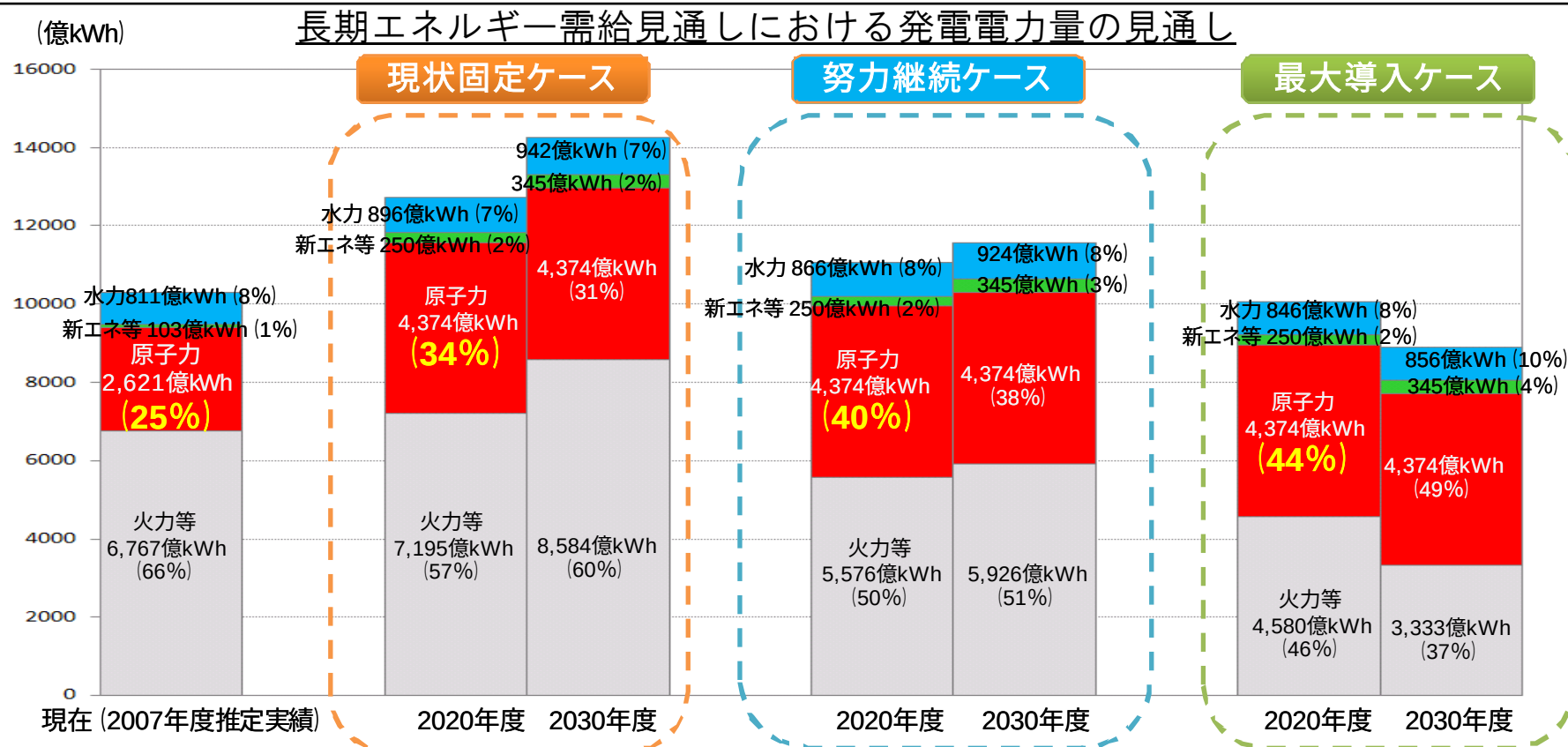
WSS（週末停止：Weekly Start and Stop）：電力需要の低い週末に発電プラントを停止し、週明けに起動する運用。

※WSSでの起動時間は発電プラントが冷機状態から起動した例

＜3. 火力発電・水力発電による太陽光パネルの出力変動対策＞

水力発電の位置づけ

- 水力発電は、我が国の電源構成の約8%を担う純国産エネルギーであり、発電過程においてCO₂を排出しないゼロエミ電源であり、長期固定電源であることから電力価格の安定に貢献。
- 長期エネルギー需給見通し(努力継続ケース)では、水力発電は2020年、2030年度において約8%程度を占める。
- 太陽光パネルが大量に導入された場合には、揚水式、調整池式と貯水池式水力については、立ち上げ時間が短く、出力の変化速度が速いため、水系の運用制約に留意しながら天候の急変時における初期段階のバックアップ電源としての役割を期待。



＜3. 火力発電・水力発電による太陽光パネルの出力変動対策＞

水力発電の方式の種類と調整能力

○調整池式、貯水池式、揚水式の水力発電所においては、出力調整やLFC調整、ガバナフリー運転が可能。

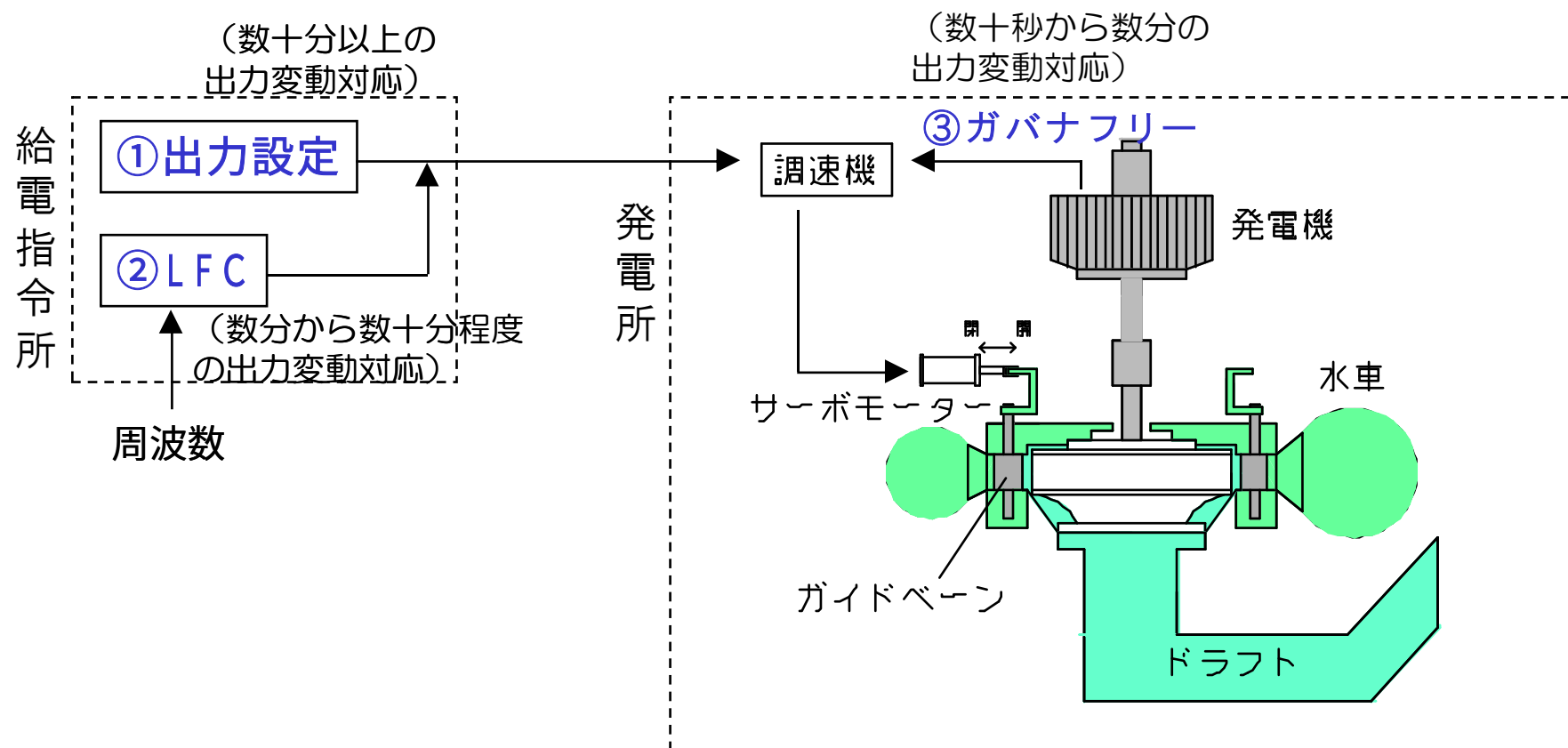
	流込式	調整池式	貯水池式	揚水式		
概要	河川の自然流量をそのまま利用する発電方式	1日～1週間程度の負荷の変動に対応できる調整池を有し、ピーク時に発電する方式	季節的な河川の流量変化を大貯水池で調整し発電する方式	上部池と下部池を有し、夜間若しくは休日などのオフピーク時に揚水し、ピーク時に発電する方式		
				発電運転	揚水運転	
					可変速機	定速機
ガバナフリー運転	×	△	○	○	○	×
LFC調整能力	×	△	○	○	○	×
出力調整能力	×	○	○	○	○	×
出力調整幅	—	50程度～100%			70程度～100%	—
出力変化	—	1分程度（出力調整幅内の出力変化）				—
起動／停止	—	3～5分／1～2分			5～10分／1～2分	
主な役割	ベース供給力	ピーク供給力調整力	ピーク供給力調整力	ピーク供給力調整力予備力	揚水動力調整力	揚水動力

＜3. 火力発電・水力発電による太陽光パネルの出力変動対策＞

水力発電プラントの出力調整機能について

○数十秒から数分以内の短周期の負荷変動に対し、水力発電機（調整池式、貯水池式、揚水式）のガバナフリー能力で対応が可能

＜揚水式、貯水池式、調整池式＞

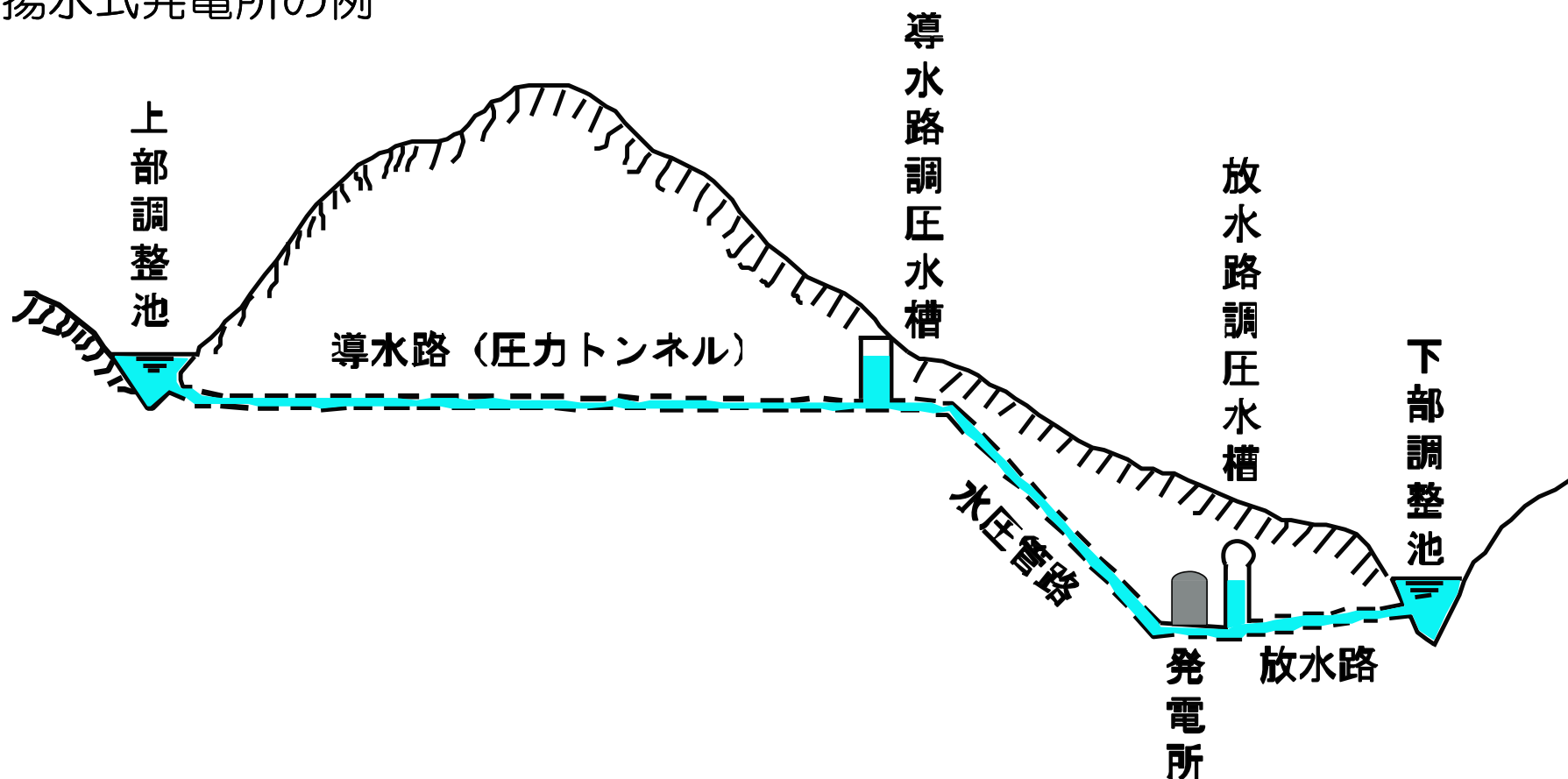


＜3. 火力発電・水力発電による太陽光パネルの出力変動対策＞

揚水式発電所の概要

- 電力需要の小さい時（夜間）の原子力の電力等を利用して、下部調整池から上部調整池に揚水し、電力需要の大きい時（昼間）に発電。
- 上部調整池に自流の流入のない純揚水、と流入がある混合揚水がある。

揚水式発電所の例



＜3. 火力発電・水力発電による太陽光パネルの出力変動対策＞

可変速揚水式発電所について

○可変速揚水発電は、発電機の回転数を変化させることで、揚水運転時の出力調整が可能などの特徴を有する。

〔可変速揚水発電の特徴〕

①揚水によるLFC調整運転が可能

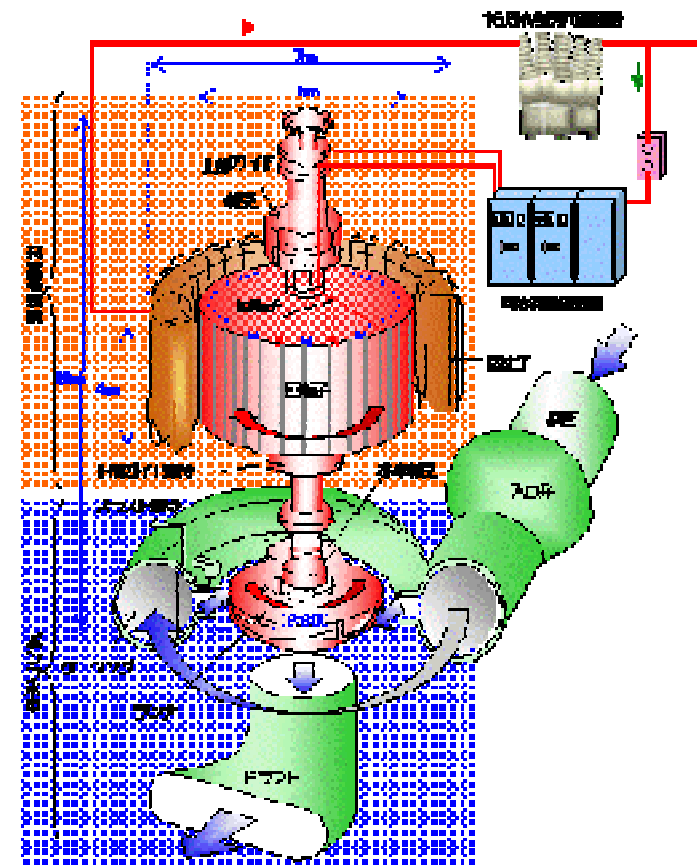
可変速機では、発電機の回転数を変化させることが可能であり、揚水運転時の入力電力の調整が可能。

②発電時の部分負荷効率が向上

可変速機は発電機の回転数を変化させることが可能であるため、水車の効率が最も良くなる回転数を選択することにより発電時の部分負荷効率が向上。

③系統への並列までの時間が短い

可変速範囲内の任意の回転速度で運転できるため、運転開始時の系統への並列までの所要時間を短縮可能。



＜ 3. 火力発電・水力発電による太陽光パネルの出力変動対策＞

可変速揚水式発電所について

○現在運転中の可変速揚水式発電所は 8 基（175万kW）。

〔現在運転中の可変速揚水式発電所〕

事業者名	発電所名	所在地	出力	運転開始年※
北海道	高見 2 号	北海道	10万kW	1993年
東 京	矢木沢 2 号	群馬県	8万kW	1990年
	塩原 3 号	栃木県	30万kW	1995年
関 西	大河内 3・4 号	兵庫県	64万kW	1992年
九 州	小丸川 4 号	宮崎県	30万kW	2007年
電源開発	奥清津第 2（2 号）	新潟県	30万kW	1996年
	沖縄やんばる海水揚水	沖縄県	3万kW	1999年
計	8 基 175万kW			

※可変速揚水機の運転開始年。

＜3. 火力発電・水力発電による太陽光パネルの出力変動対策＞

水力発電所の開発計画について

○平成20年度供給計画等によると、今後運開が予定される建設中の水力発電所は8地点（481.5万kW）。

事業者名	発電所名	所在地	最大出力※	着工年月	運転開始予定年月	備 考
北海道	京 極	北海道	60万kW	2001年9月	2015年10月（1号） 2018年度以降（2・3号）	揚水式 （可変速（1号））
東 北	森 吉	秋田県	1. 1万kW	2007年8月	2011年5月	
東 京	葛野川	山梨県	160万kW <80万kW>	1997年8月	2018年度以降 （3・4号）	揚水式 （可変速（3・4号））
	神流川	群馬県	282万kW <47万kW>	1997年2月	2012年7月 2018年度以降	揚水式 （定速）
関 西	大 滝	奈良県	1. 05万kW <1万kW>	1999年10月	2012年6月	
九 州	小丸川	宮崎県	120万kW <30万kW>	1999年2月	2009年1月 2010年7月 2011年7月	揚水式 （可変速）
中 部	徳 山	岐阜県	15. 3万kW	1997年2月	2014年度	
水力一括		1地点	0. 03万kW			
合計	8 地点 481. 5万kW					

※＜ ＞は既運転開始分

出典：平成20年度供給計画

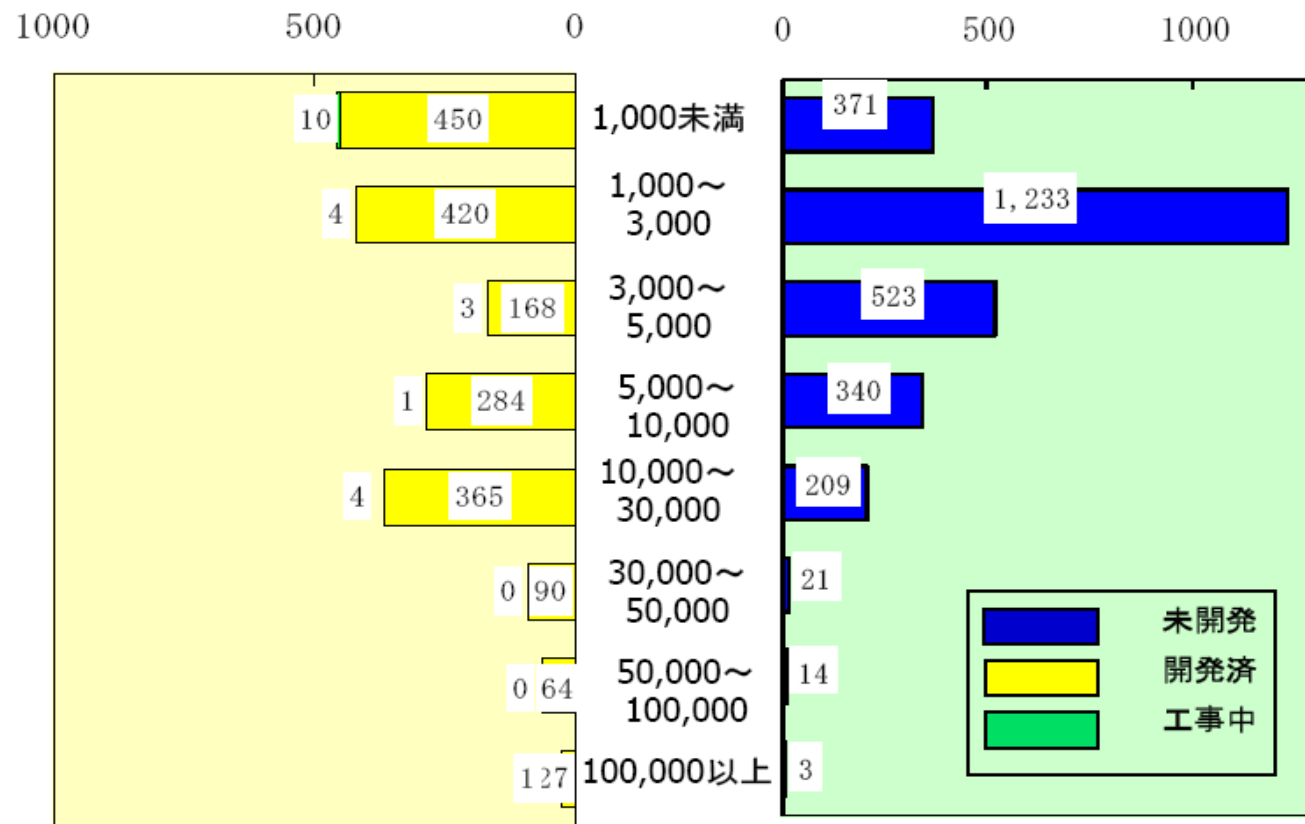
< 3. 火力発電・水力発電による太陽光パネルの出力変動対策 >

水力発電所の開発ポテンシャル

○水力発電所の開発可能地点は、3,000kW以下が多い。

○これは、新規開発地点の小規模化・奥地化等が主な理由。

水力の出力別分布(地点数)



(単位: kW)

出典: 資源エネルギー庁「包蔵水力」(平成20年3月31日)

< 4. 火力発電の低炭素化（バイオマス混焼）について >

バイオマス専焼と石炭混焼との比較

- バイオマス（木質チップ等）の導入量が同じ場合、バイオマス専焼に比べ石炭火力での混焼の方が熱効率が低い。
- バイオマスの調達に係る不確実性や既存設備の活用による初期投資抑制などの観点からも石炭火力での混焼の方が導入が容易。

< バイオマス混焼と専焼の比較（試算） >

	石炭とバイオマスの混焼 (5%、カロリーベース)	バイオマス専焼
出力	40万kW (20万kW×2)	1.3万kW
年間利用率	80%	
年間発生電力量 (全体)	28億kWh	0.9億kWh
年間発生電力量 (バイオマス)	1.4億kWh	
混焼時の熱効率 (発電端、LHV)	43.6%※	29%
所内率	10%	17%
混焼時の熱効率 (送電端、LHV)	39.2%	24%
年間木質バイオマス使用量	約11万t	
石炭消費削減量	約5万t	約3万t
CO ₂ 削減量	約11万t-CO ₂ (削減率5%)	約7万t-CO ₂ (削減率3%)

※石炭火力の熱効率を44%と仮定した場合、木質バイオマス1%の導入で熱効率は0.08%低下するため、5%混焼で効率は43.6% (Δ0.4%) に低下。

＜4. 火力発電の低炭素化（バイオマス混焼）について＞

石炭火力との混焼が可能なバイオマス

燃料種別		導入実績	備考
産業廃棄物	家畜排せつ物		
	下水汚泥	○	混焼運用中
	廃棄紙		
	食品廃棄物		
	製材工場等残材	○	国内賦存量のほぼ全量有効利用
	建設発生木材	○	実機混焼試験中
	農作物非食用部		
一般廃棄物（ゴミ）		○	実証試験中
林地残材			国内賦存量のほぼ全量(約98%)が未利用 340万 t /年※

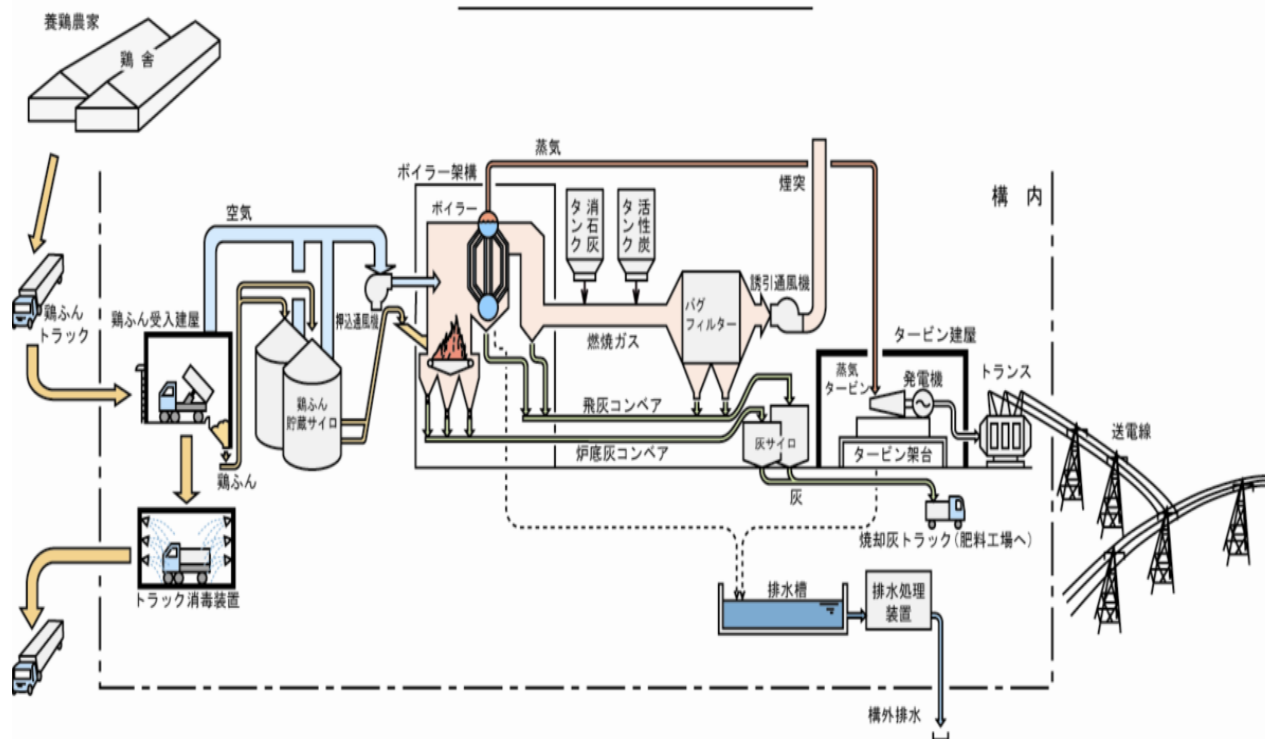
※ 農林水産省(第10回バイオマス・ニッポン総合戦力推進アドバイザリーグループ会合資料)より数量を推定。

< 4. 火力発電の低炭素化（バイオマス混焼）について >

バイオマス専焼発電所（宮崎鶏ふん焼却施設）の概要

- 養鶏農家から受け入れた鶏ふんを焼却ボイラで直接燃焼し、発生した蒸気により発電。
- 鶏ふんの焼却灰には、リン・カリウムが豊富に含まれていることから、肥料原料として販売。

宮崎鶏ふん焼却施設のしくみ



発電出力	発電端：11,350kW 送電端：9,000kW
年間発生電力量	約70,000MWh
燃料	鶏ふん
焼却容量	440 t / 日
年間燃料消費量	132,000 t / 年
熱効率 (発電端・LHV)	24%

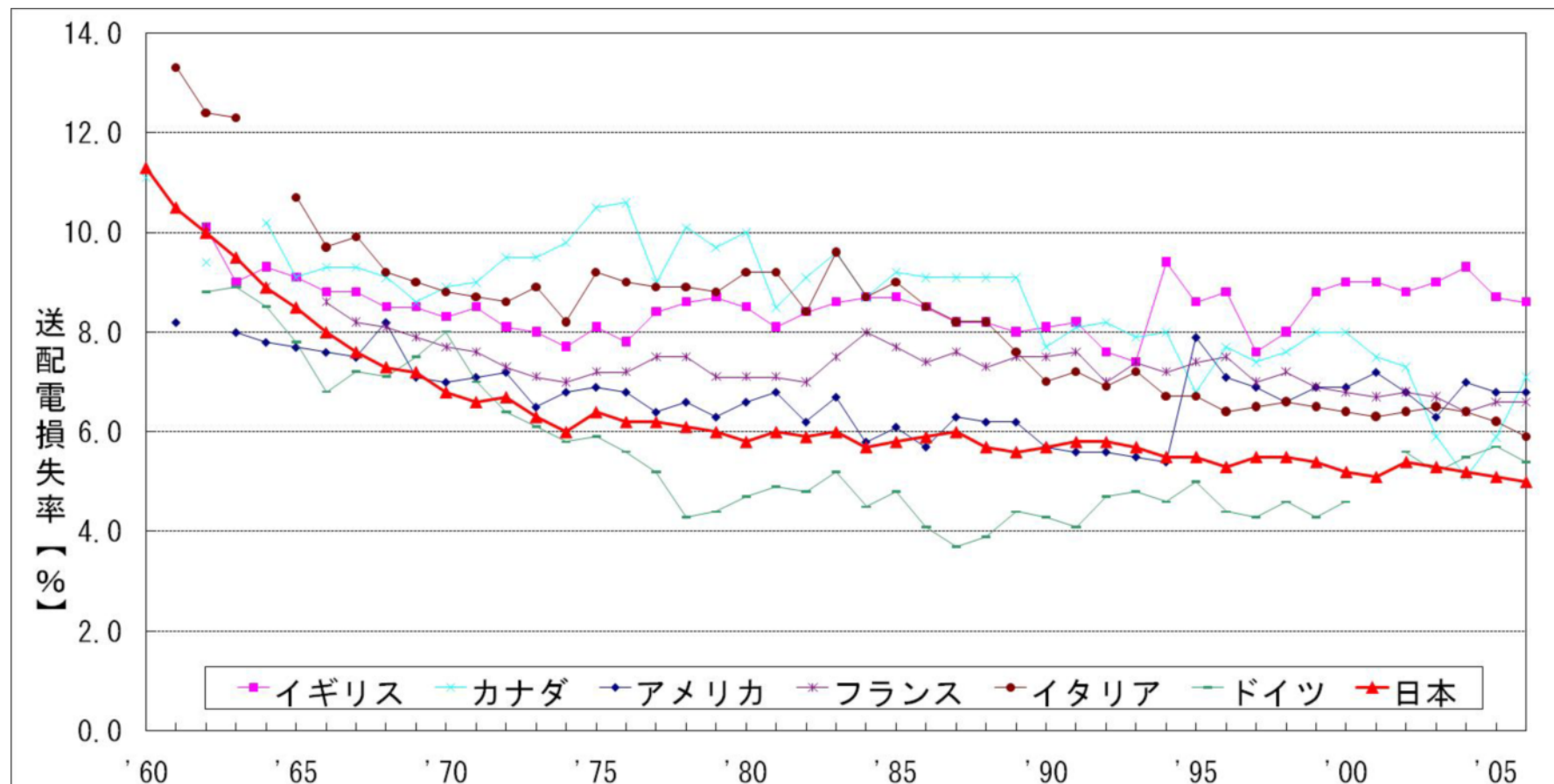
出典：みやざきバイオマスリサイクル(株)

<5. 送配電ロスの低減について>

送配電ロスについて

- 送配電ロス率の減少は、火力発電所の化石燃料使用量の低減やCO₂排出量の抑制につながるもの。
- 我が国の送配電ロス率は約5%程度と主要国の中で最も送配電ロス率が少ない。

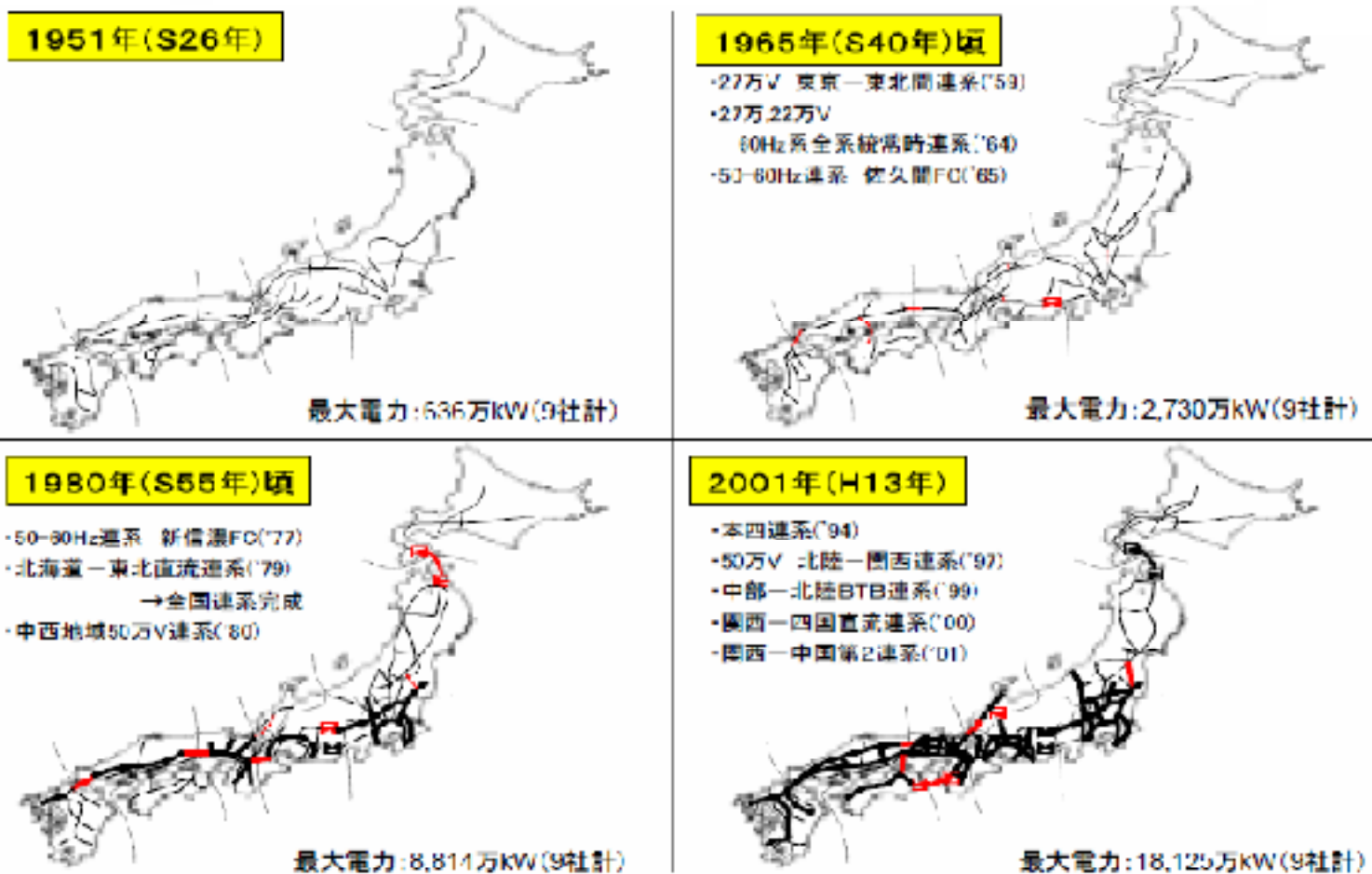
【送配電ロス率の国際比較】



出典：電気事業便覧を基に作成

< 5. 送配電ロスの低減について >

これまでの送電網の推移（送電電圧の高圧化）



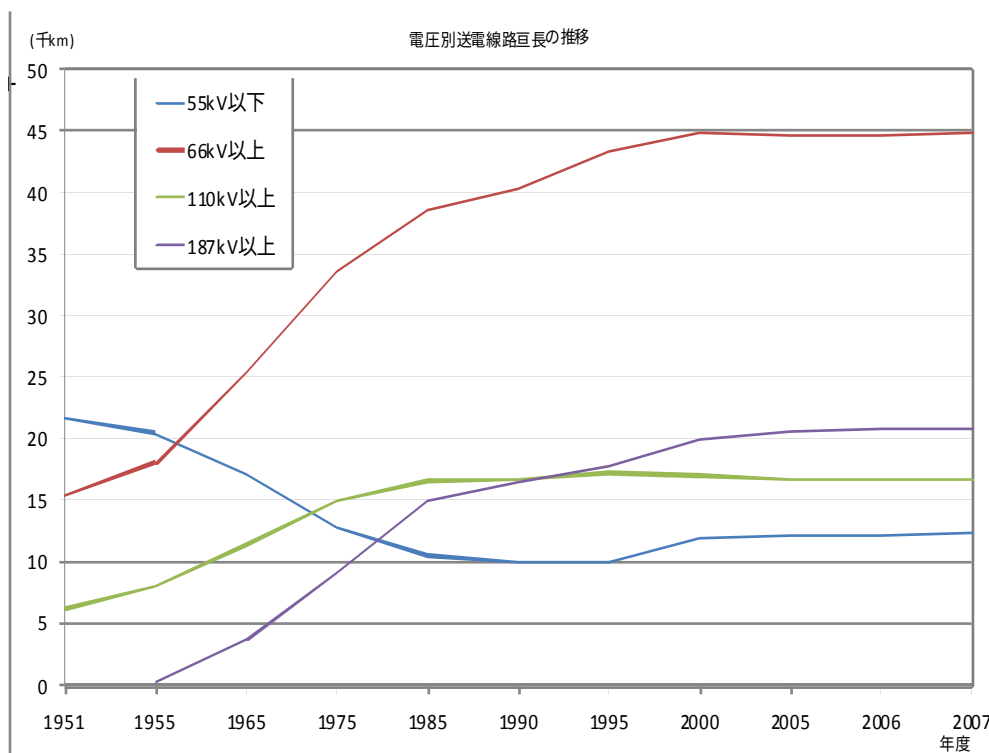
出所: 電力系統利用協議会「連系線整備(建設・増強)に関する勉強会とりまとめ報告書
電気事業便覧

<5. 送配電ロスの低減について>

送配電ロスの低減に向けた取組

- 送配電ロス率の更なる低減に向け、送電電圧の高圧化や低損失型の変電設備の採用などを行ってきたところ。
- 今後は、更なる送配電ロス率の低減に向け、超電導を活用した送変電設備の開発を行っているところ。

【送電電圧の高圧化】



出典：電気事業便覧（平成20年度版）より作成

【低損失型の変電設備】

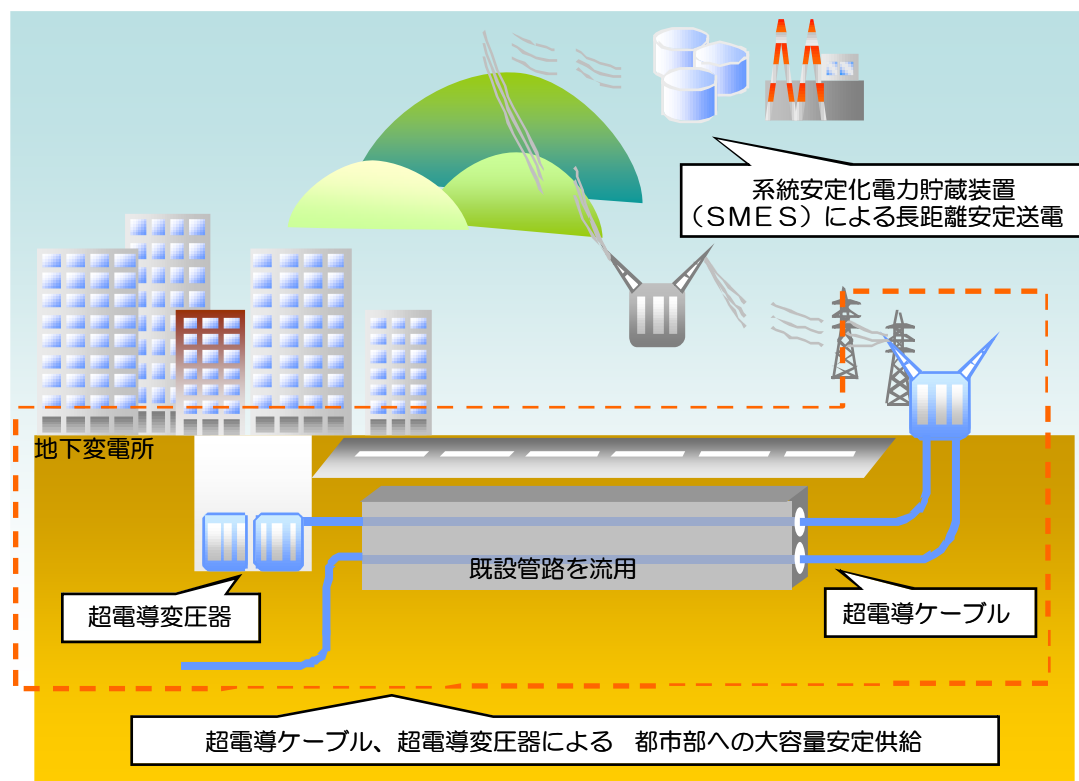
- ◆鉄心材料（けい素鋼板）の改善
無方向性⇒方向性⇒高配向性
- ◆電界解析高精度化（巻線抵抗損失減）
電流密度低減、鉄心径縮小化
- ◆導体構造改善（うず電流損失減）
転位電線・複合平角線の採用
- ◆磁界解析高精度化（漂遊損低減）
磁気シールド改善、構造材非磁性化

（出典：電気協同研究 第57号第4号）

<5. 送配電ロスの低減について>

超電導を活用した電力機器の技術開発について

- 超電導の活用によりコンパクトで大容量の電力供給が可能となり、系統安定化や送電ロスの飛躍的な低減が期待されている。
- 現在、イットリウム系超電導線材を用いた超電導電力機器として、超電導電力貯蔵装置（SMES）、電力ケーブル、変圧器について、2020年の実用化を目標に技術開発が行われている。



<効率向上によるCO₂低減効果> (10³ t-CO₂)

	2020年	2030年	2040年
大電流型ケーブル (66kV)	1	64	164
高電圧型ケーブル (275kV)	2	38	116
変圧器	2	120	306
合計	5	222	586

(注) ケーブルは既存の約69%損失低減、39km/年導入、変圧器は既存の約60%損失低減、年間10%置換されるものとして試算。