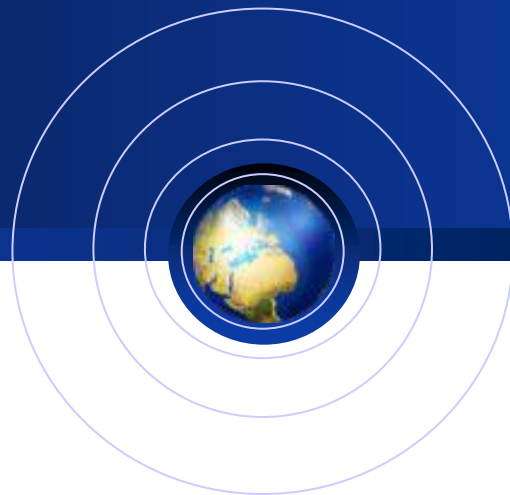


# 石炭利用高效率発電



2012年2月10日

東京大学生産技術研究所

特任教授 金子 祥三

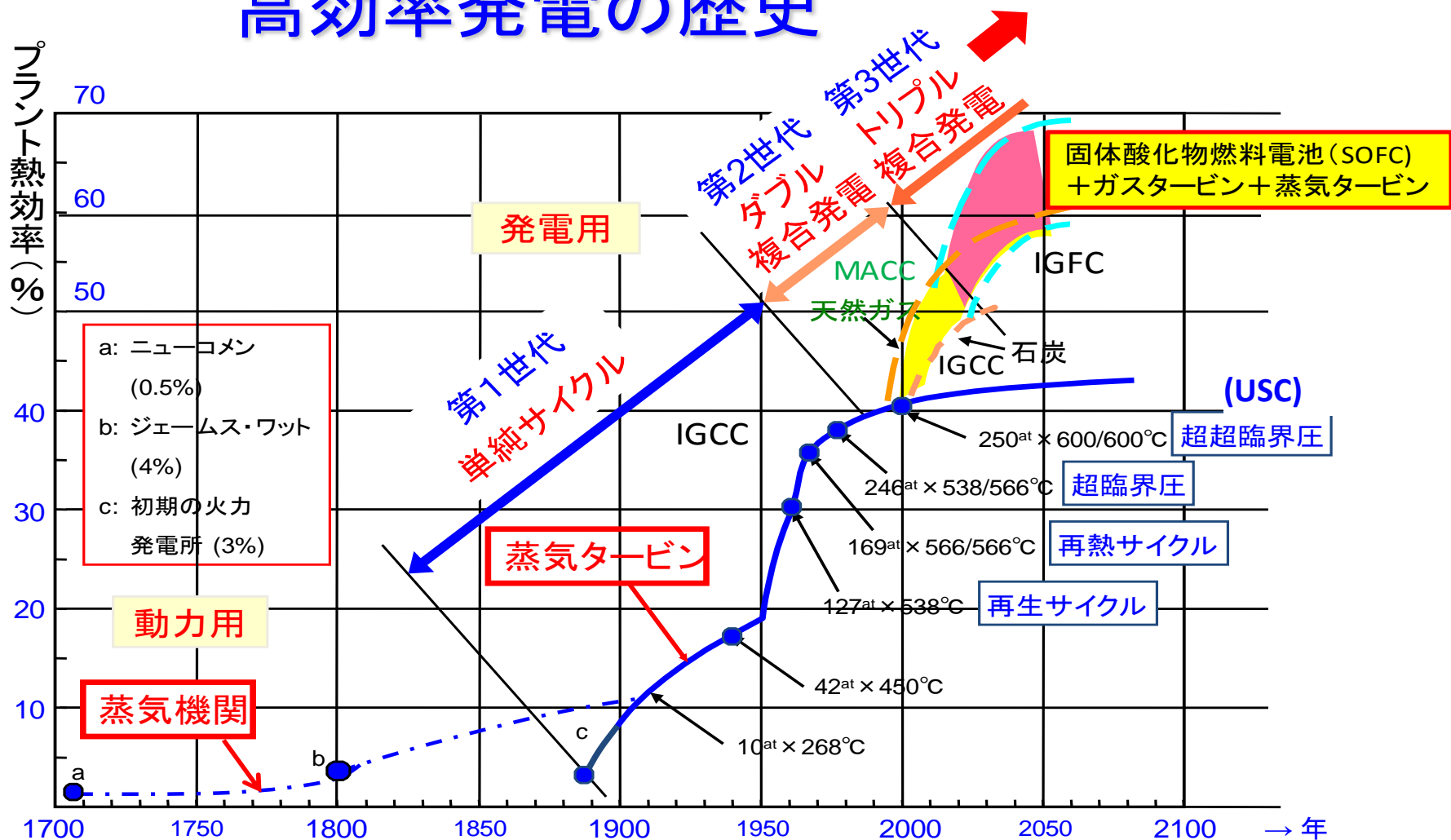
# 目次

1. 高効率発電の歴史と展望
2. エネルギー政策における  
石炭の重要性
3. 温暖化対策対応
4. 国際展開の打ち手

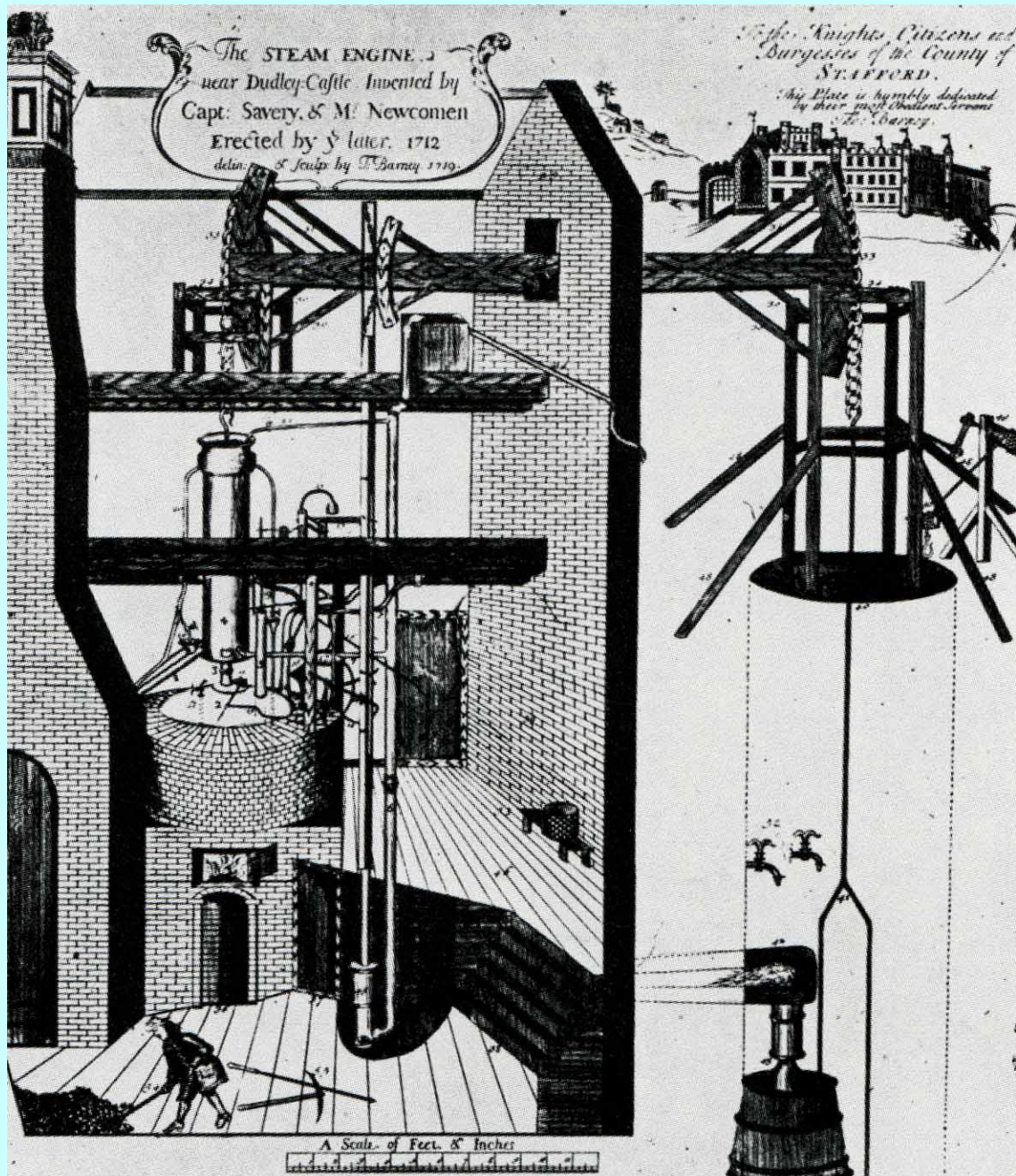
# 1. 高効率発電の歴史と展望

# 火力発電の高効率化の動向

## 高効率発電の歴史







## ニューコメンの 蒸気機関(1712)

ダドリー城近く  
スタッフォードシャー  
(1712)

ボイラー:

直径:5'-6"

高さ:6'-1"

円筒部:4'-4"

容量:約3.9m<sup>3</sup>

シリンダー(真鍮製):

直径21"、高さ7'-10"

パイプ径:4"

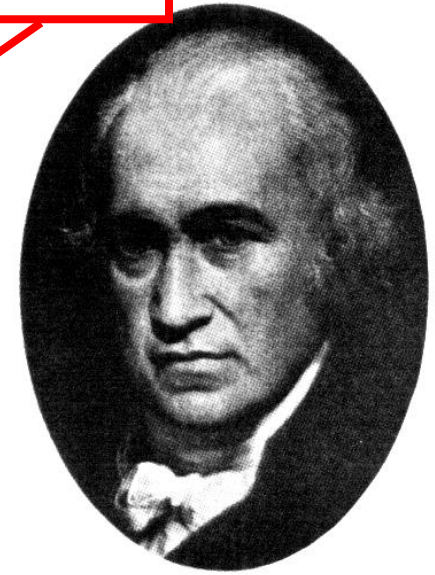
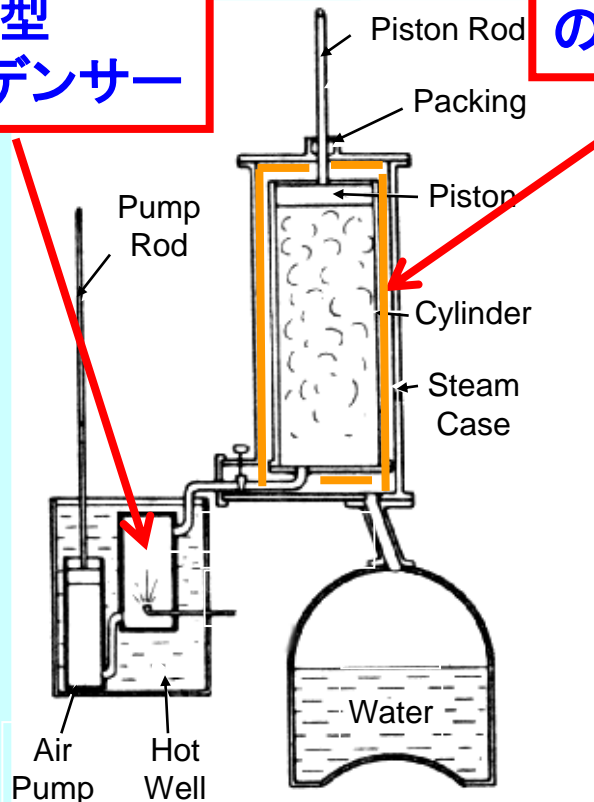
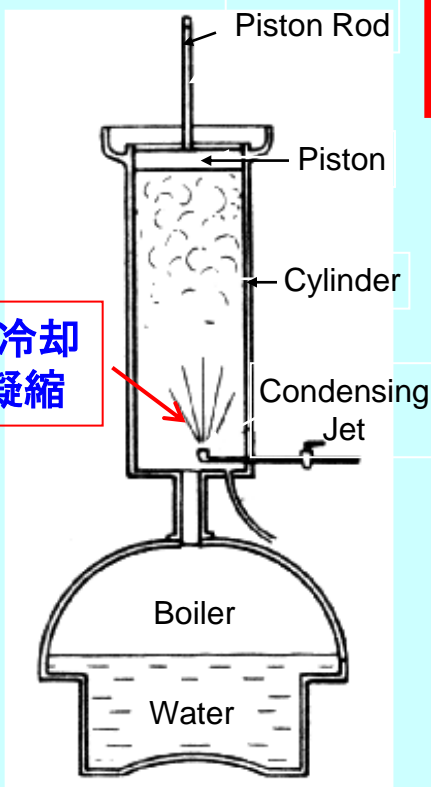
Thomas Barneyが1719年  
に製作した銅版画より

# 蒸気機関の改良

分離型  
コンデンサー

シリンダー  
の保温

直接冷却  
— 凝縮



James Watt  
(1736 – 1819)

## ニューコメンの蒸気機関

1712年 熱効率 : 0.5%  
1750年 頃 : 1.0%

## ワットの蒸気機関

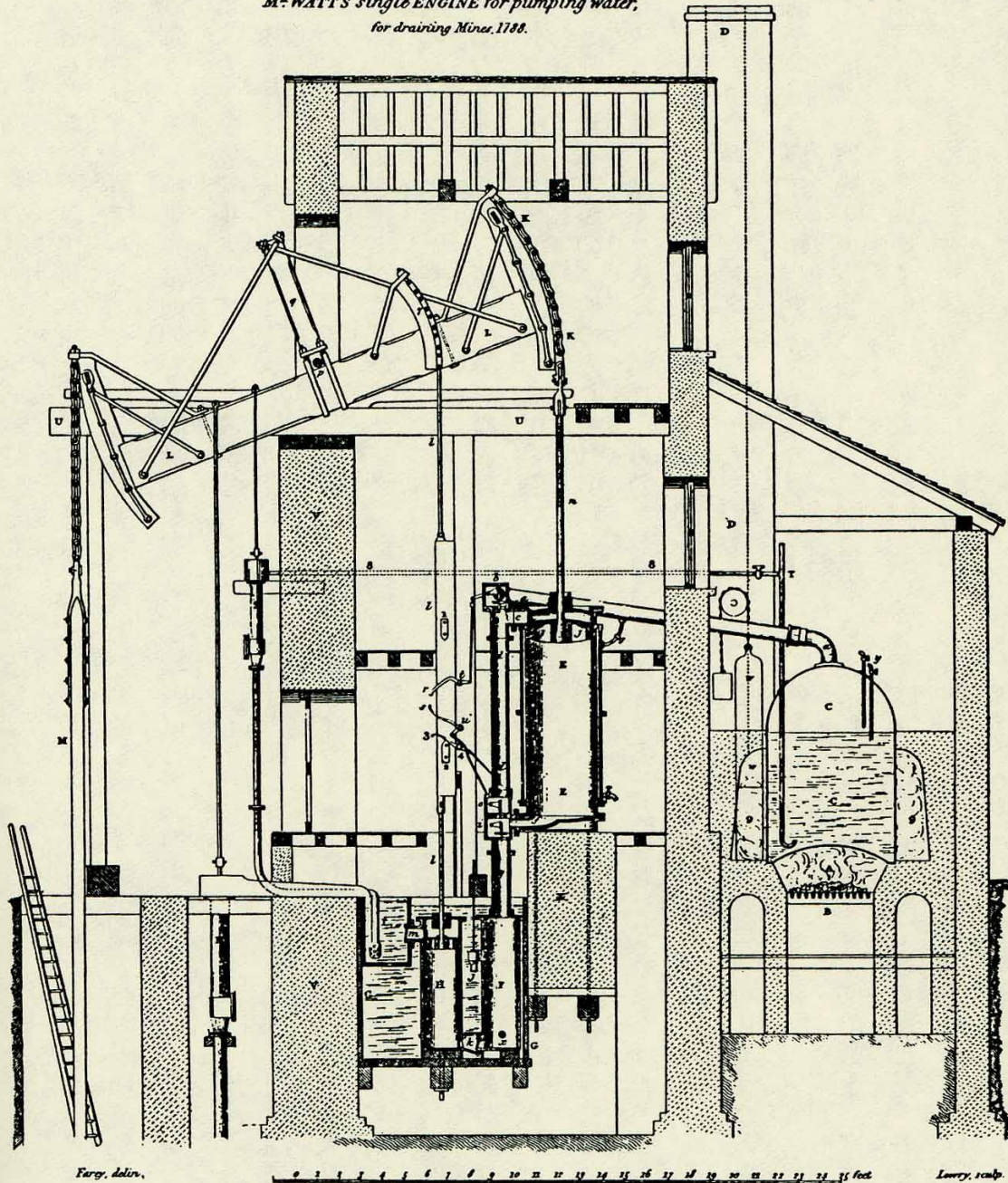
1769年 熱効率 : 2%  
1800年 : 4%

特許成立 : 1769  
特許延長 : 1775  
特許失効 : 1800

“ 熱効率を4倍に向上! ”



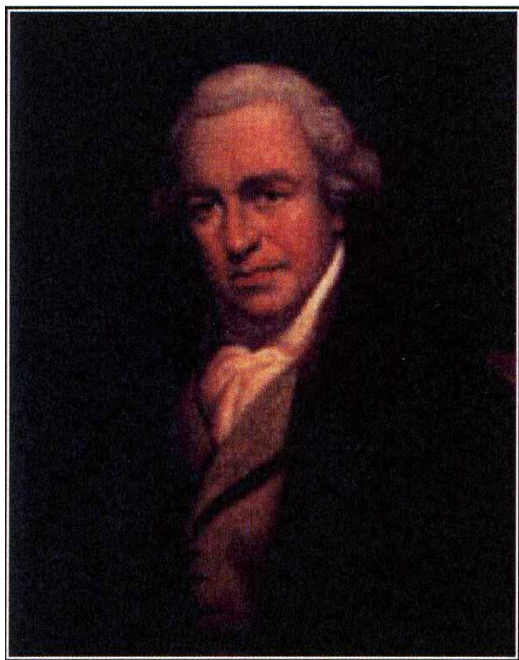
M<sup>r</sup> WATT'S single ENGINE for pumping water,  
for draining Mines, 1788.



# ワットの単動式 ポンプ機関 (1788) 炭鉱排水用



## Glasgow駅前 の Wattの記念碑



## Strathclyde大学の Wattの像







ジェームス・ワットの思い出 (1765年冬のできごと)

*I had gone to take a walk on a fine Sunday afternoon.*

.....

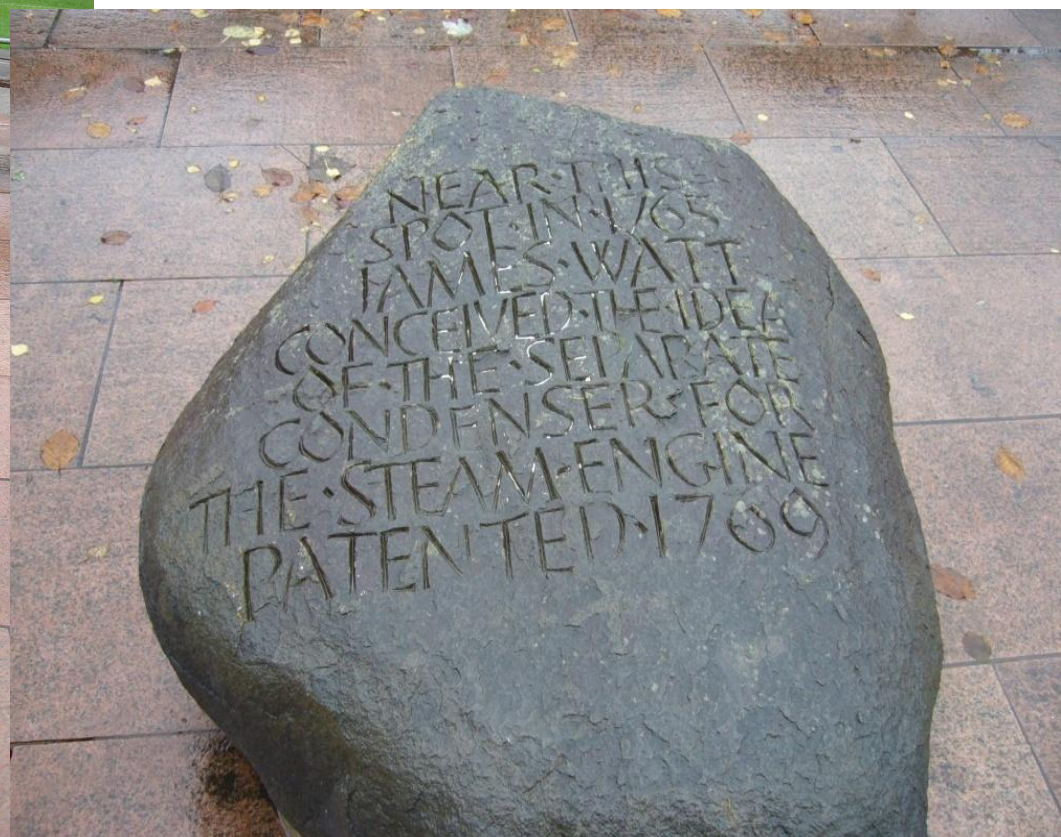
.....

*I had not walked farther than the Golf-house  
when the whole thing was arranged in my mind.*





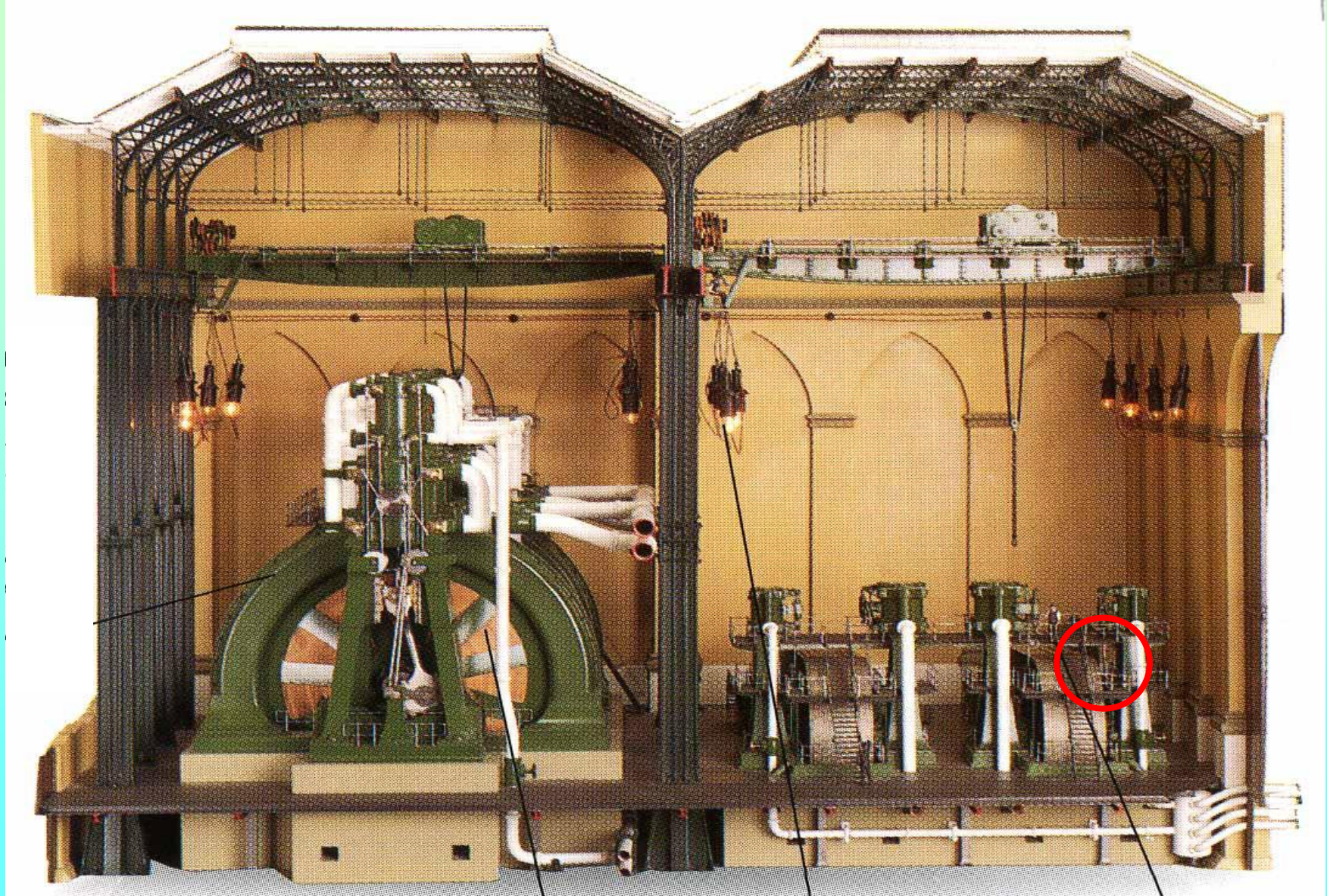
1965 別置型コンデンサーの考案  
1969 Patent取得





# 往復動蒸気機関発電所

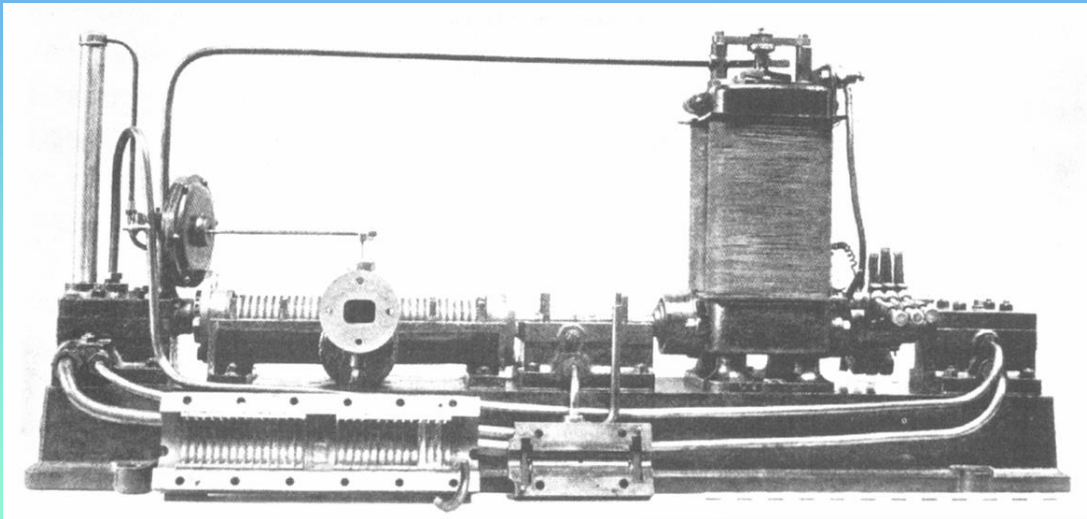
Deptford Power Station  
London, 1889





# パーソンズの蒸気タービン

- 1884年の特許：軸流多段蒸気タービン
- 1896年の特許：棒鋼より翼を大量生産しロータに掘った溝に植込む



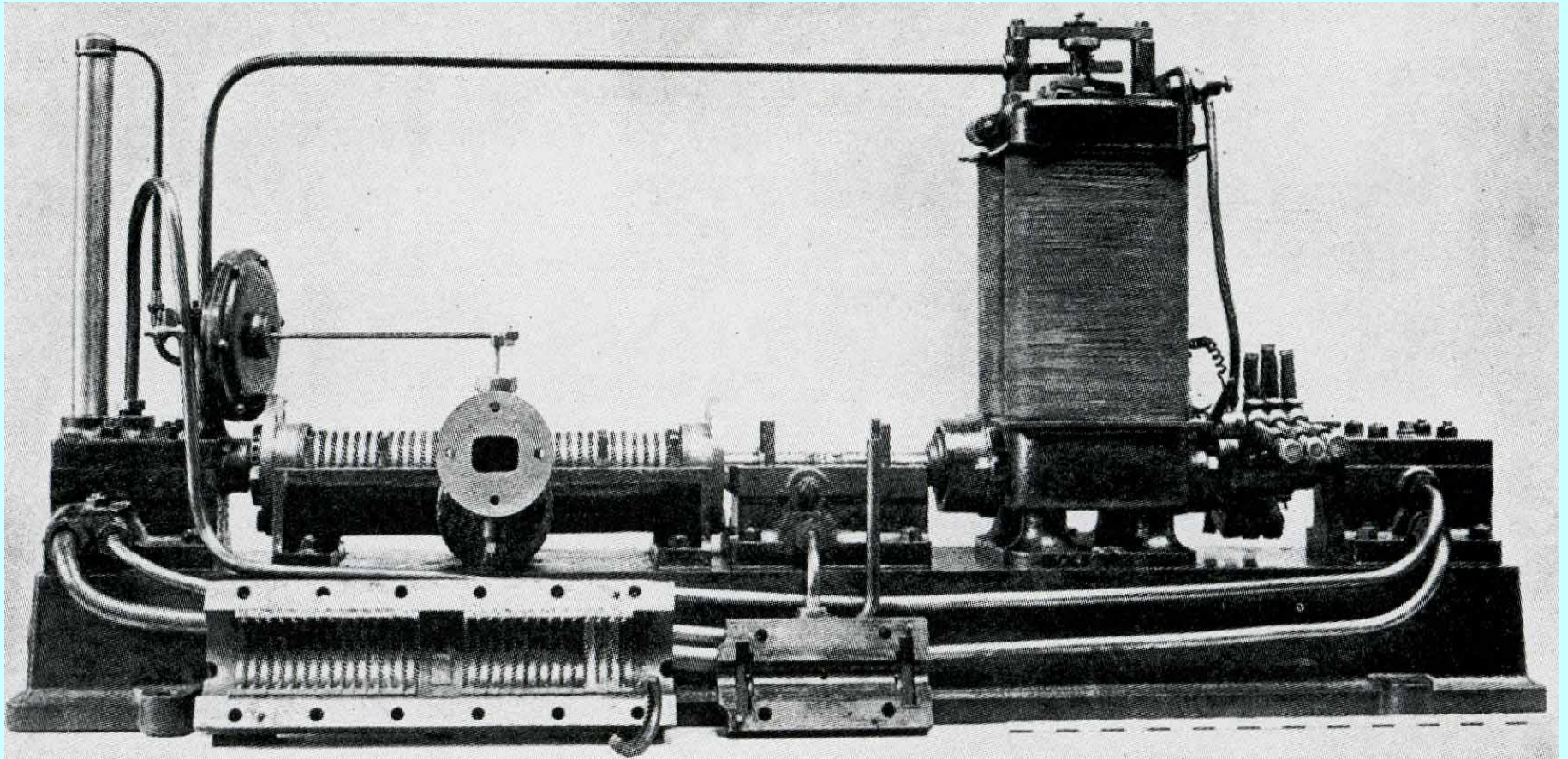
2極発電機付パーソンズ蒸気タービン



Charles A. Parsons

Cited from : H.W. Dickinson, “ A Short History of Steam Engine “

# パーソンズの最初の蒸気タービンと発電機 (1884年)

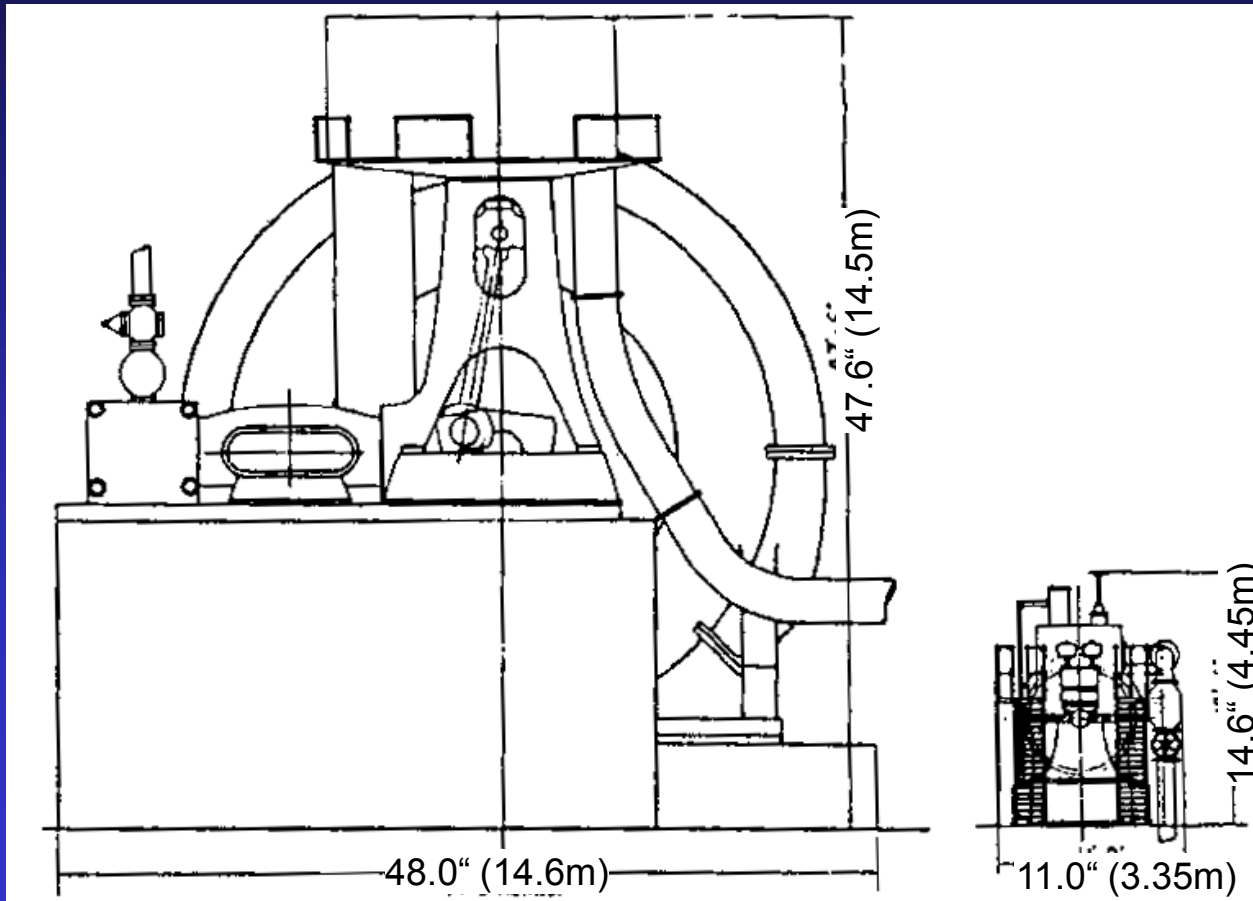


# 所要容積の比較

## 蒸気機関と蒸気タービン

### Greenwich Power Station - London ( 1906 )

ユニット出力 : 4500 kw



蒸気機関

蒸気タービン

面積: 1/20

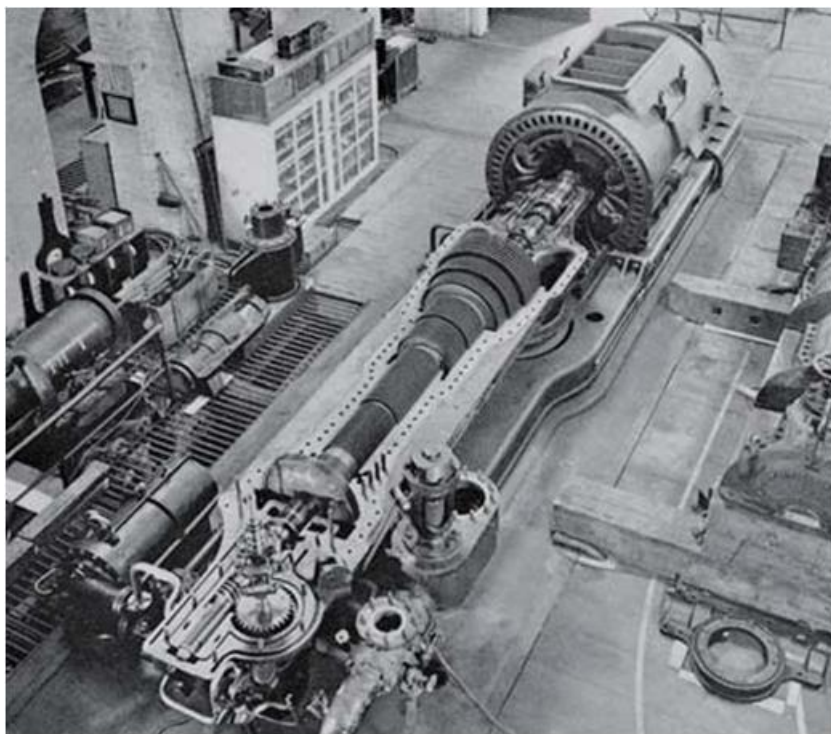
容積: 1/60



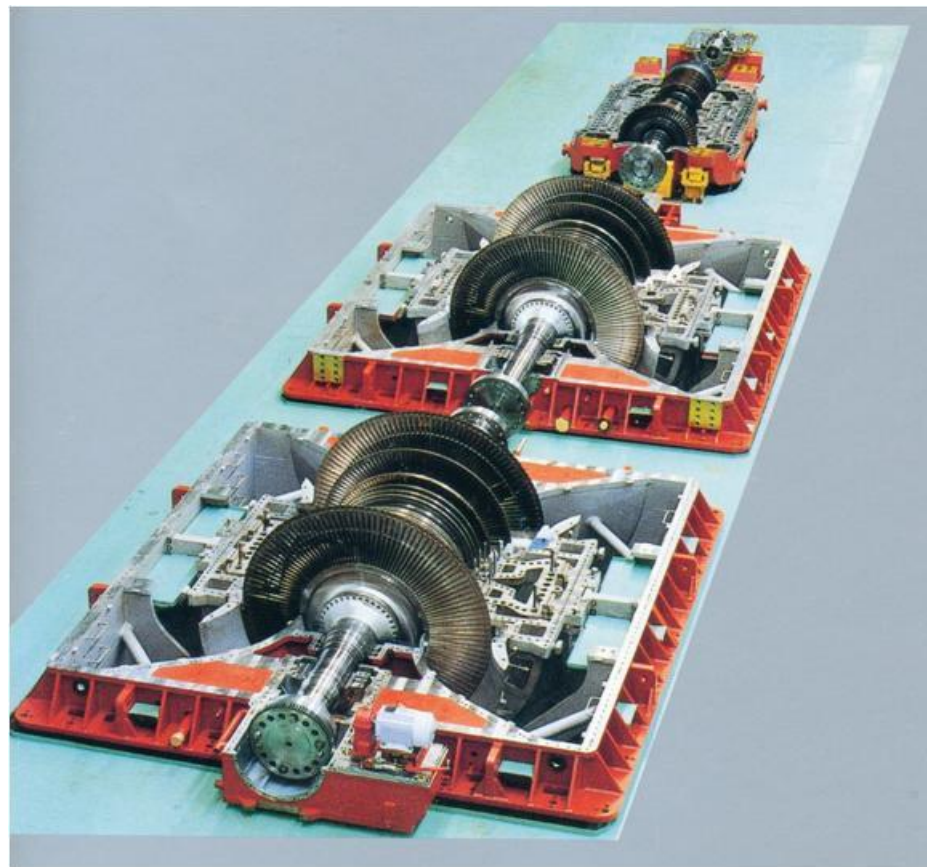
*The Rede Lecture in 1911  
on the “The Steam Turbine”  
by Sir Charles A. Parsons, K.C.B.*

*“In conclusion, I would venture to predict that the use of the land and marine turbine will steadily increase, and that the improvements that are being made to still further increase its economy will for a long time enable the turbine to maintain its present leading position as a prime mover.”*

# 日本の蒸気タービン

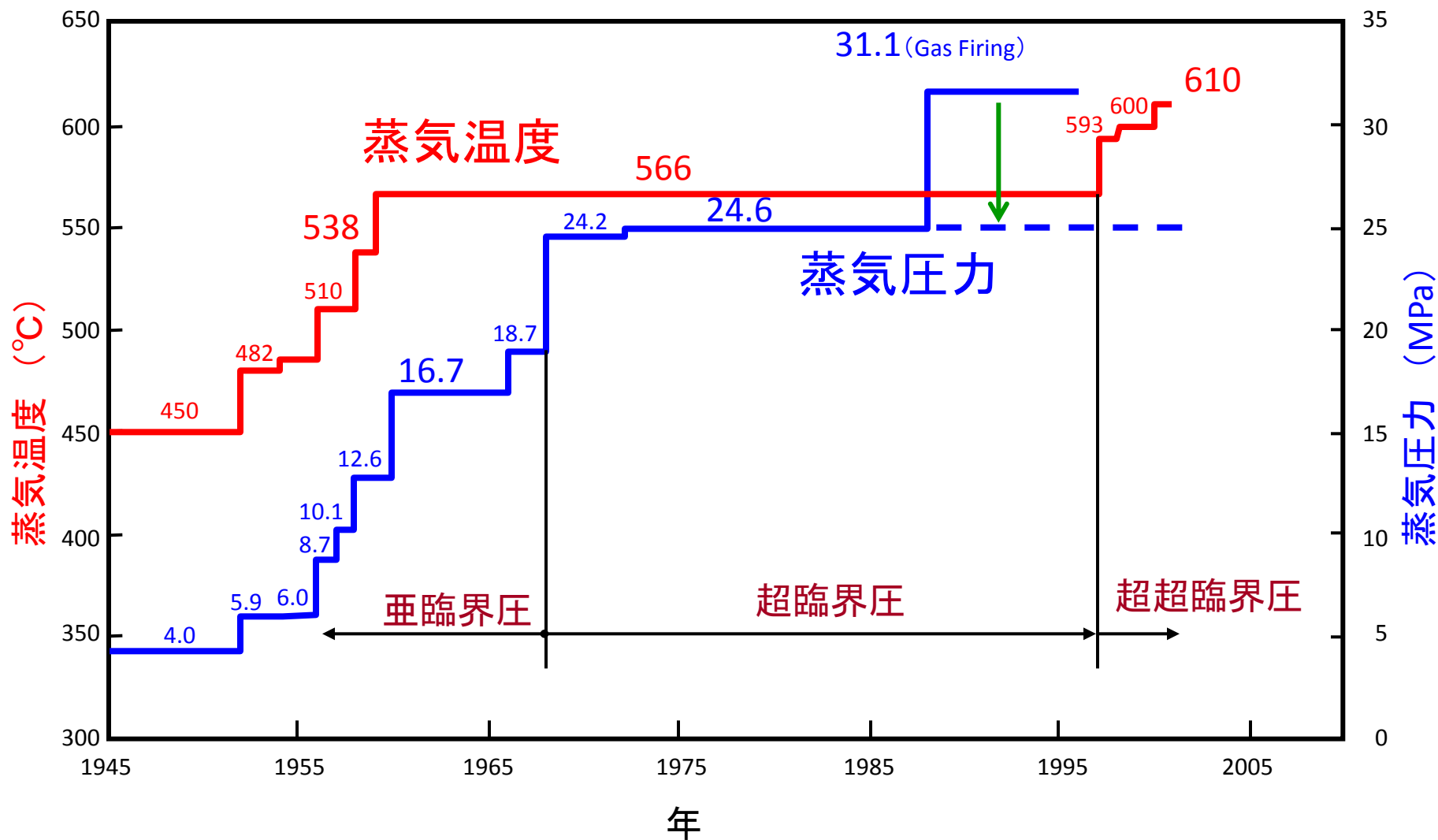


最初の発電用蒸気タービン: 500KW  
(1905年)



最近の発電用蒸気タービン: 700,000KW  
(1995年)

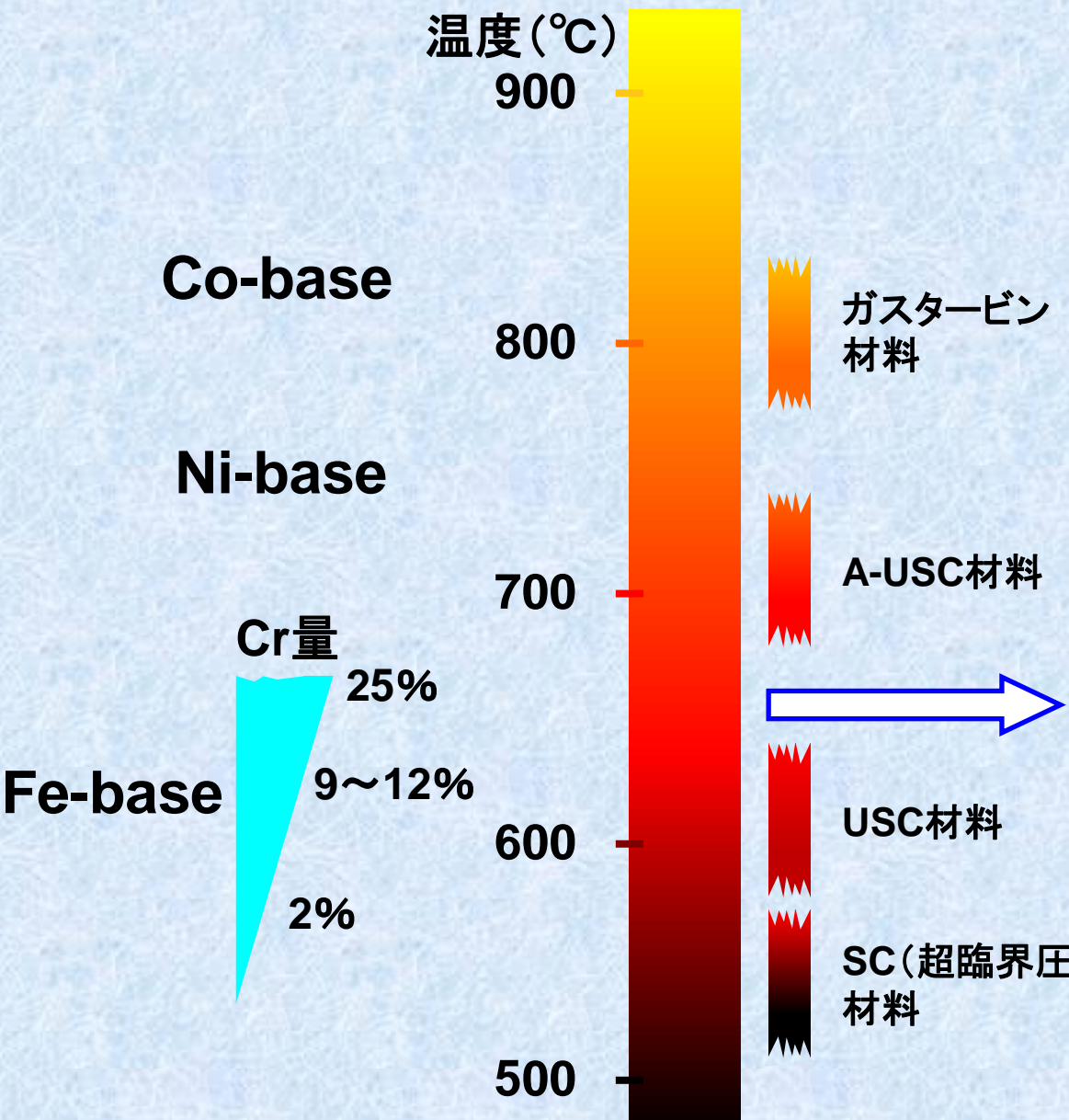
# 火力プラントの蒸気条件





# 耐熱高温材料

許容応力のベースは  
10万時間クリープ強度



# A-USC開発の課題

- 700°Cに耐える新材料の開発
- Ni基の新材料の開発

## 蒸気タービン側

- 700度に耐える新材料の開発  
(ケーシング→鋳物; ロータ→段造材)
- 機械加工性の確認
- 溶接性の確認
- 熱処理法の確立

## ボイラ側

- $(700+\alpha) \approx 735^{\circ}\text{C}$ に耐える新材料の開発
- 管の製作(引き抜き材, 板曲げ材)
- 機械加工性の確認(特に曲げ加工)
- 溶接棒開発
- 熱処理法の確立

## 共通

- 高温クリープデータの取得(10万時間)
- 材料・強度の規格化
- 疲労のデータ

# ジェットエンジンの進歩とガスタービンの進歩

## 単純サイクル

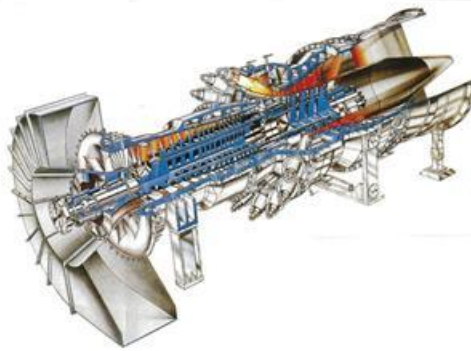
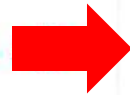
[ボイラ+蒸気タービン+発電機]



・蒸気タービン



・航空用ジェットエンジン



・発電用ガスタービン

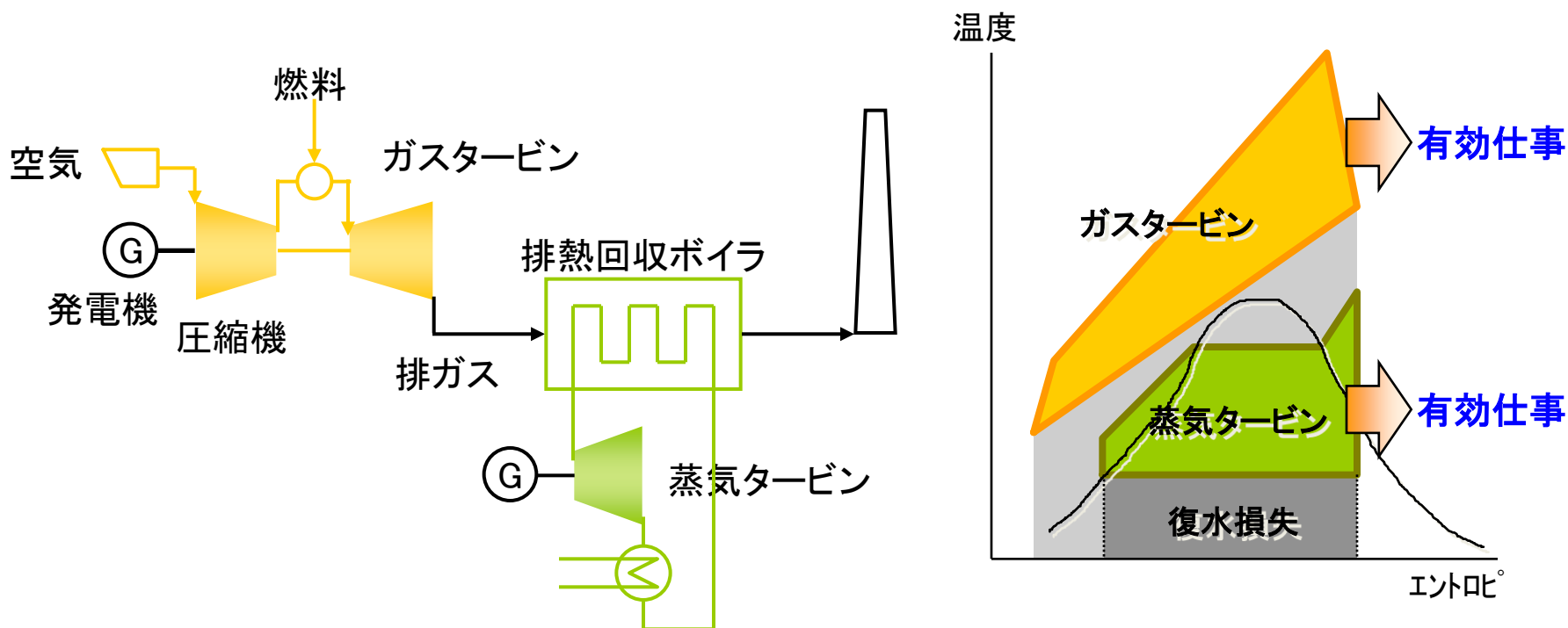
## 複合サイクル

[ガスタービン+排ガスボイラ+蒸気タービン+発電機]



複合発電

# 複合発電サイクル



一粒で二度おいしい！

# 天然ガス複合発電は日本が世界に先駆け 実質的に実用化した

- 試行は欧米が先行
- しかしもともと高価な天然ガスは夏季ピーク用で  
通年連続運転の実績無し
- 従って機器も信頼性に欠けるもの多し
  
- 日本が成功したことで米国、欧州で逆に採用が進む
- 現在のダブル複合発電全盛時代へ



# 東京電力富津火力発電所



ダブル複合発電の黎明期

1984年より運開

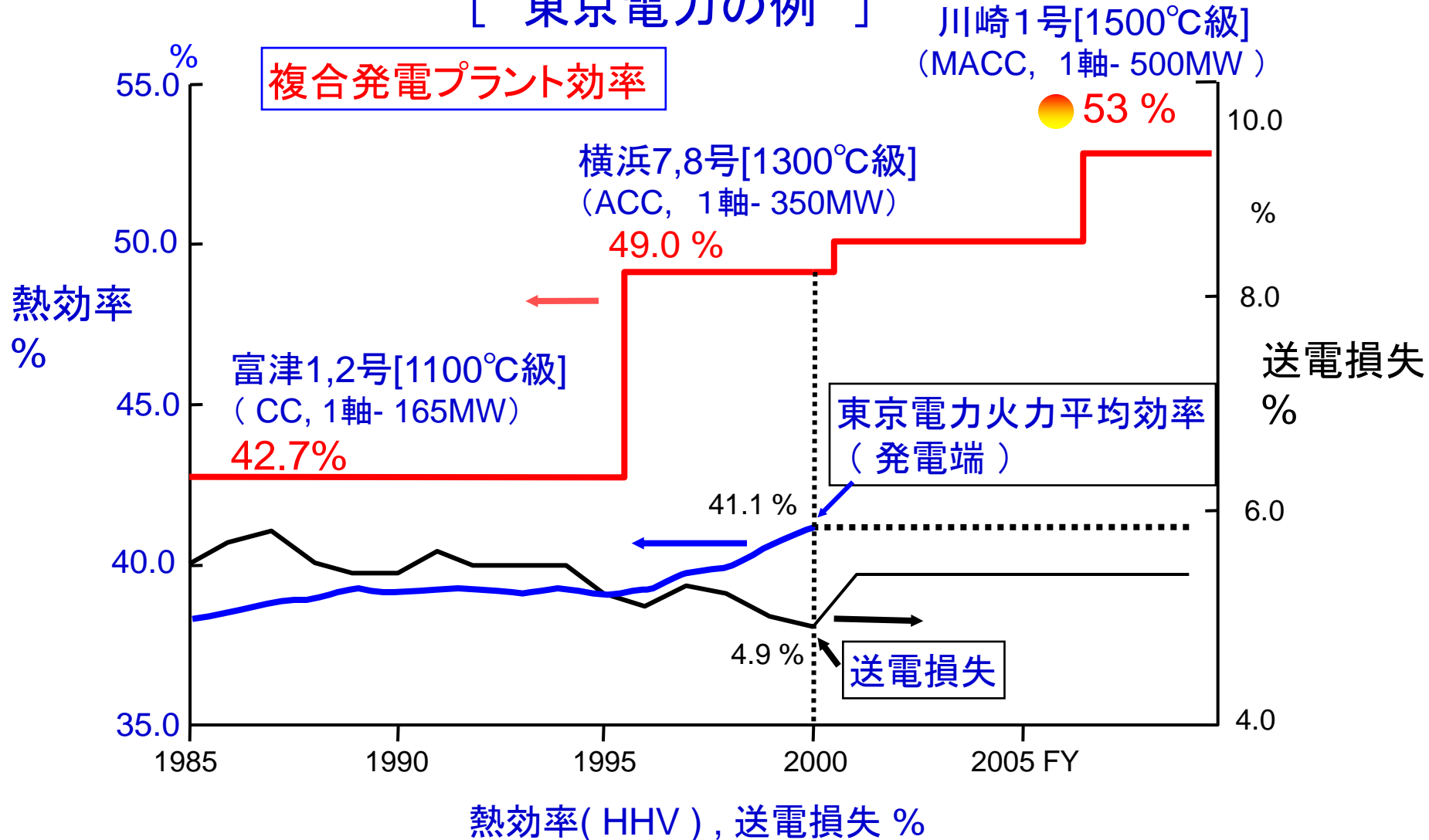
# 東北電力東新潟発電所





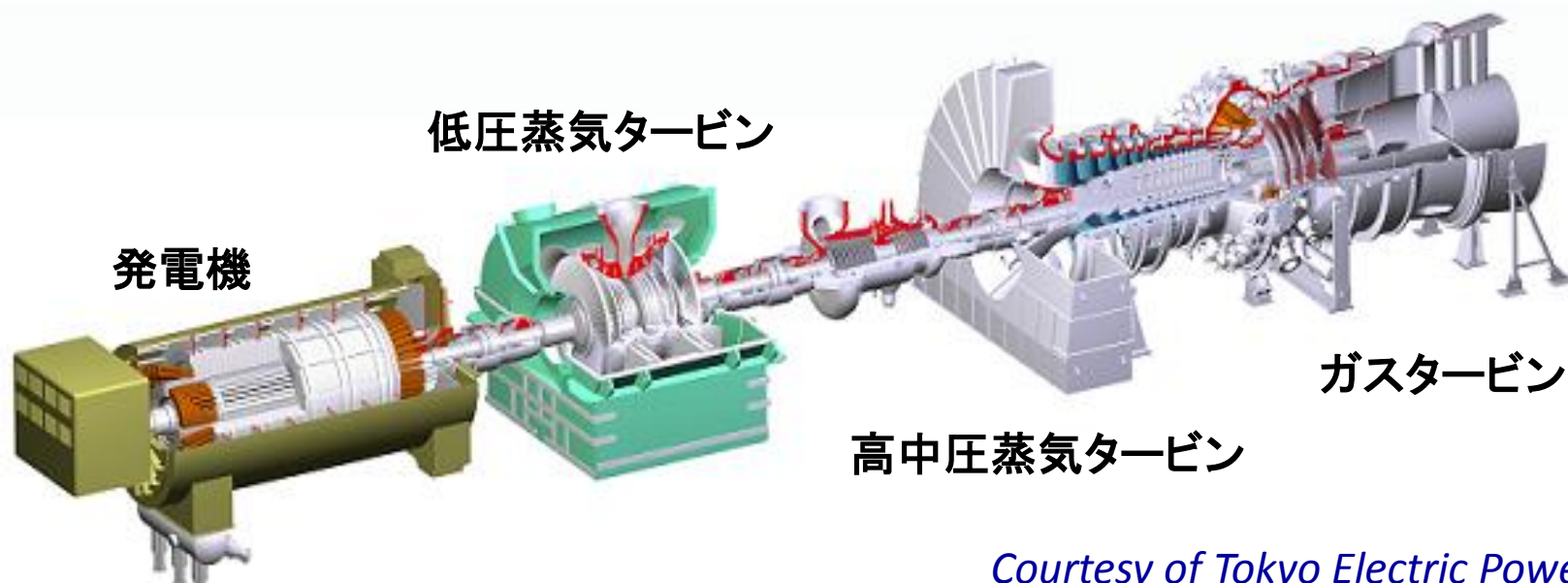
# ダブル複合発電 (LNG)

[ 東京電力の例 ]



出典 : 東京電力環境行動計画報告 2001年, p.30

# 1,500°C級コンバインドサイクル発電設備主要機器



*Courtesy of Tokyo Electric Power Co.*

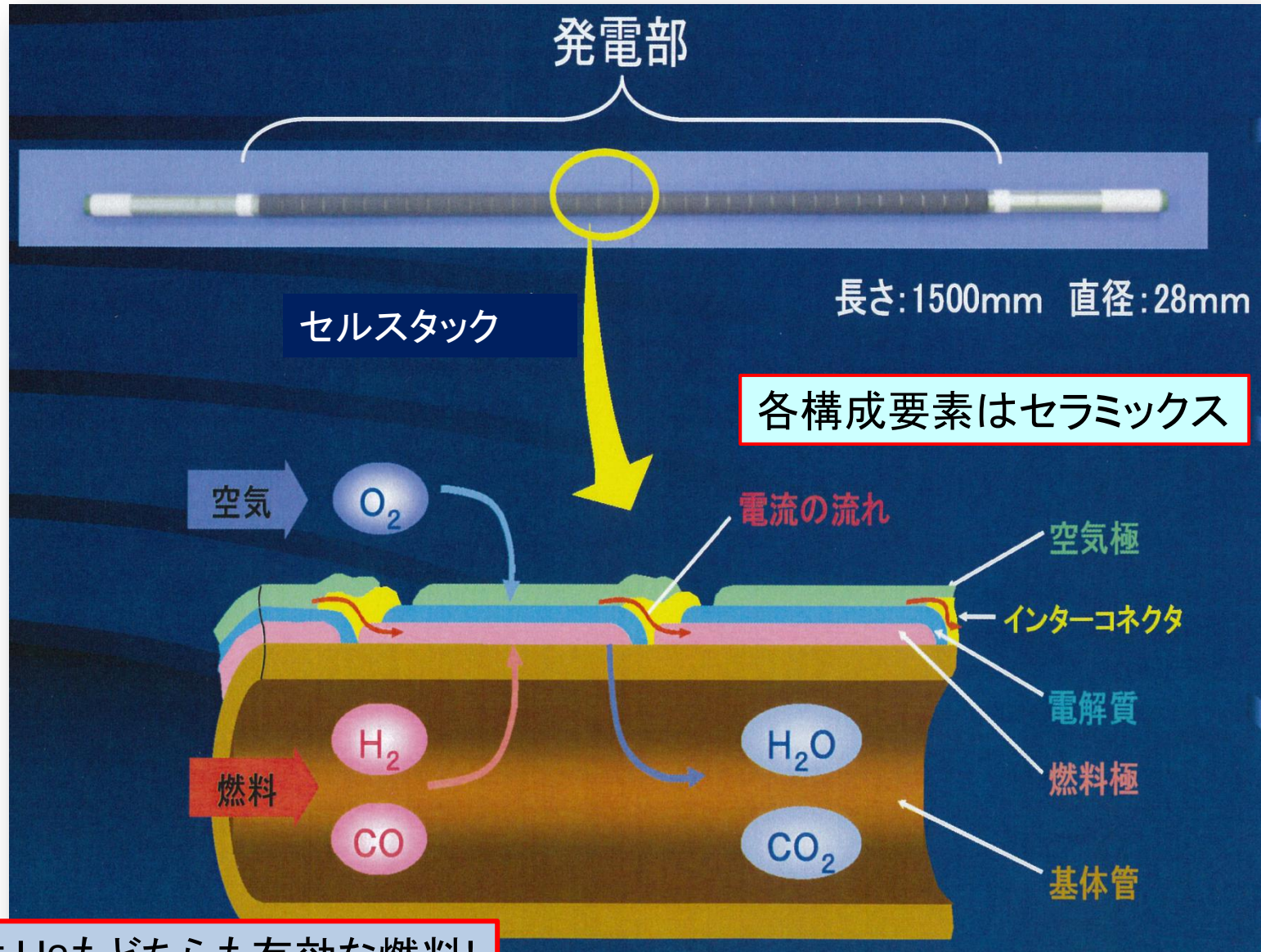
# 火力発電の今後

ダブル複合発電からトリプル発電へ！





# 高温型燃料電池：固体酸化物型 (SOFC) の構造



COもH<sub>2</sub>もどちらも有効な燃料!

# SOFC: 第3世代の火力発電 の切り札!





# 燃料電池の種類

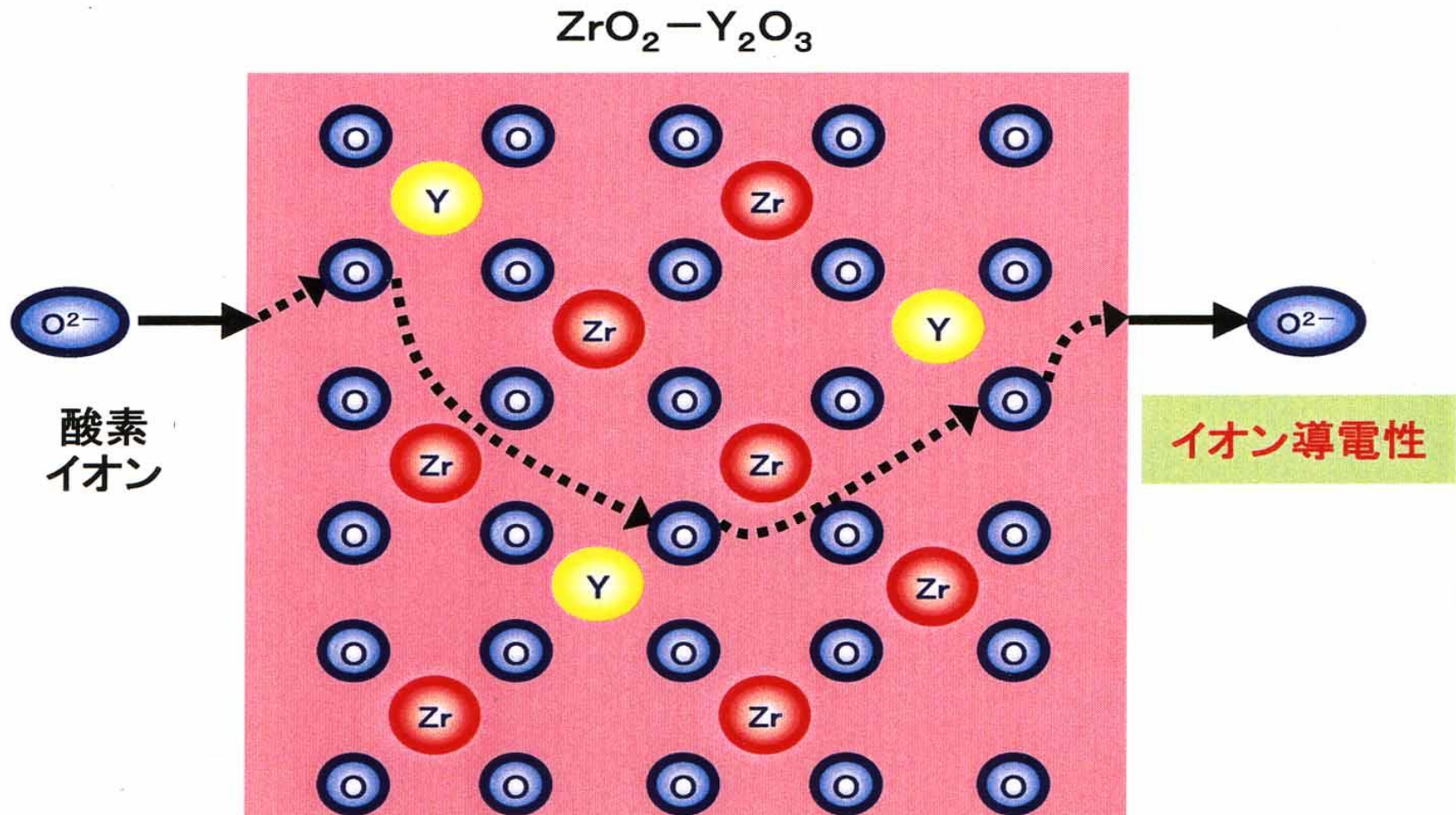
		固体高分子形 (PEFC)	りん酸形 (PAFC)	溶融炭酸塩形 (MCFC)	固体酸化物形 (SOFC)
発電部		高分子膜	リン酸	溶融炭酸塩	セラミックス
イオン		H <sup>+</sup>	H <sup>+</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	O <sup>2-</sup>
燃料		水素	水素	ガス,石炭等	ガス,石炭等
運転温度(°C)		60~100	150~200	600~650	900~1000
発電 効率 (%)	電池単体	45~55	約40	約40	約40
	システム	40~50	35~40	50~60 ※	55~65 ※
用途		自動車用、 家庭用	分散電源用	分散電源用、 事業用	分散電源用、 事業用

PEFC: Polymer Electrolyte Fuel Cell  
 PAFC: Phosphoric Acid Fuel Cell  
 MCFC: Molten Carbonate Fuel Cell  
 SOFC: Solid Oxide Fuel Cell

※複合発電における効率



# SOFC電解質の特徴



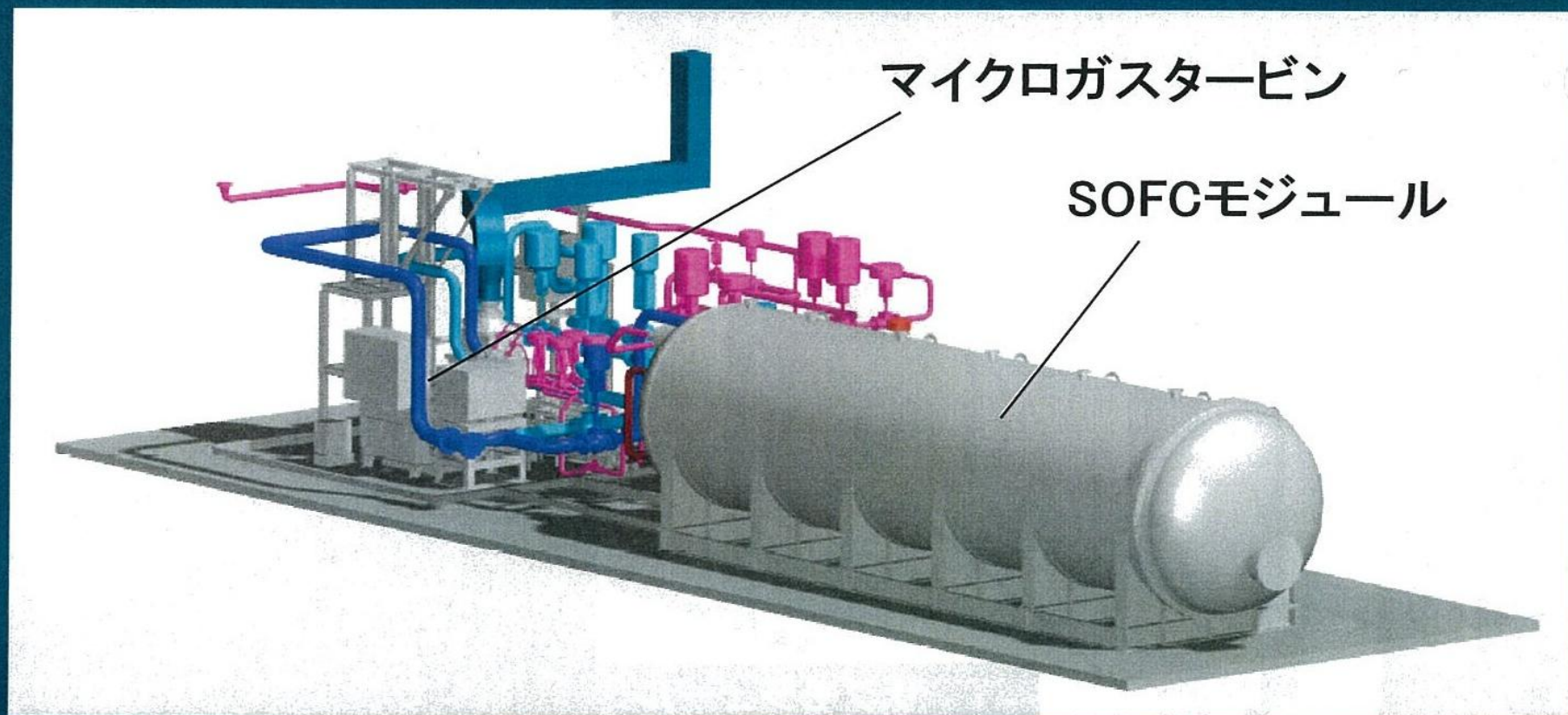
Zr(4価)とY(3価)の差で格子欠陥→分圧差で $\text{O}^-$ が移動



種類	固体高分子型燃料電池 (PEFC)	固体酸化物型燃料電池 (SOFC)
燃料	H <sub>2</sub> のみ	H <sub>2</sub> , CO
作動温度	~80°C	~1,000°C
特徴	<ul style="list-style-type: none"> <li>●低温のため複合発電不可</li> <li>●低温のため活性化にPtが必要</li> <li>●電解質は高分子膜</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●高温のため複合発電可能</li> <li>●燃料がメタンCH<sub>4</sub>などの場合エクセルギー再生により効率2割UP CH<sub>4</sub>+H<sub>2</sub>O→CO+3H<sub>2</sub>-205kJ/mol</li> </ul>
		
用途	<ul style="list-style-type: none"> <li>●燃料電池自動車</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>●大型火力発電所</li> <li>●エネファームもSOFCに</li> </ul> 

# 200kW級SOFC-MGTコンバインドサイクルシステム

[CO<sub>2</sub>削減]



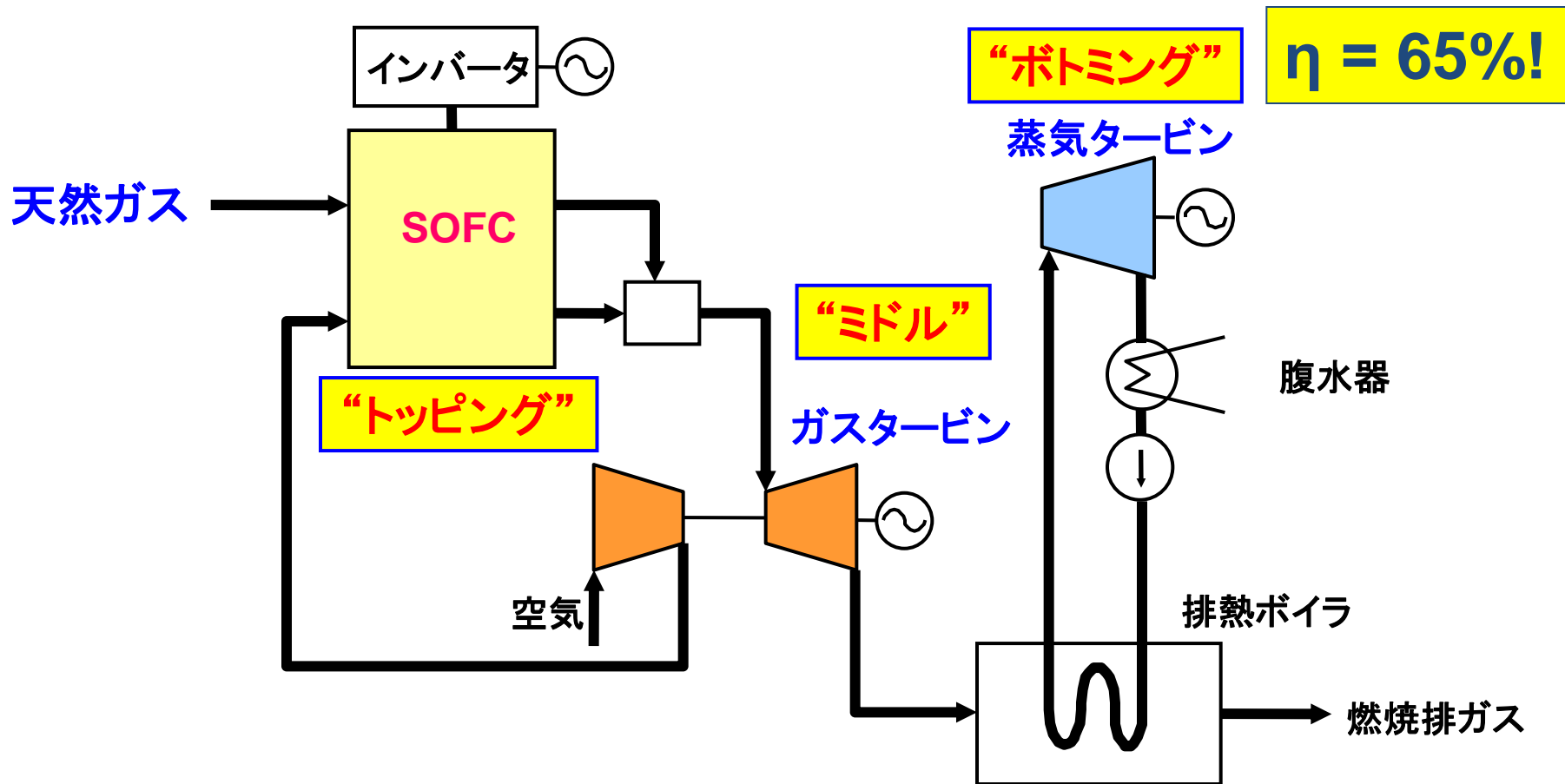


# 火力発電の今後

ダブル複合発電からトリプル発電へ！



# トリプル複合発電 ( LNG )



トリプル複合発電：  
高温燃料電池 ( SOFC ) とガスタービン・蒸気タービンの組み合わせ

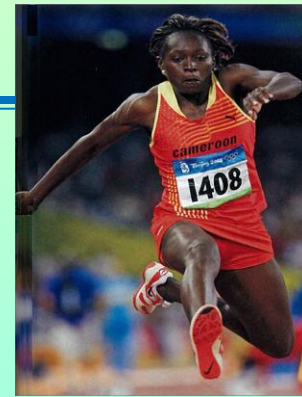
Source : Thermal & Nuclear Power ( vol.52, No.10 ), 2001, p.129



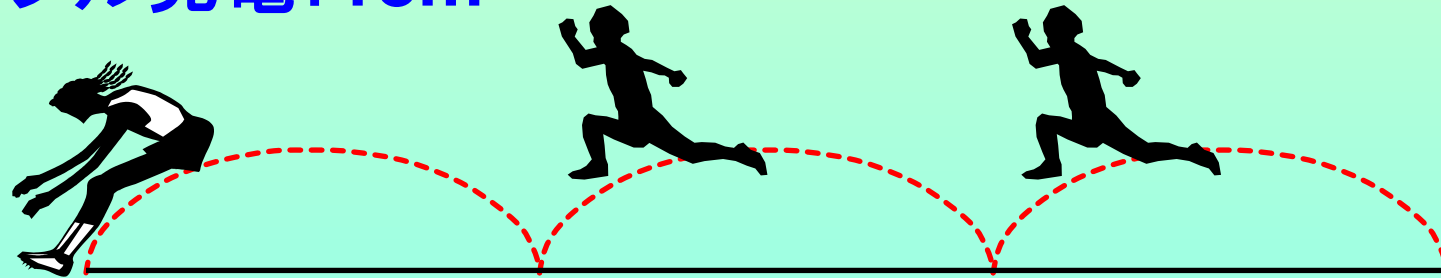


走り幅跳びのオリンピック  
優勝者でも、三段跳びの  
中学生に勝てない！

# トリプル発電は三段跳び

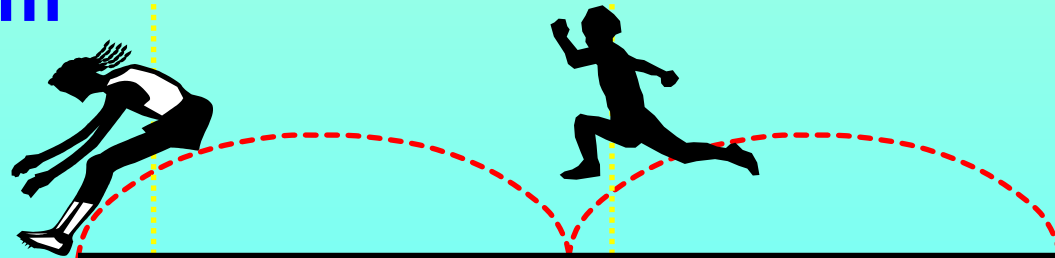


トリプル発電: 18m



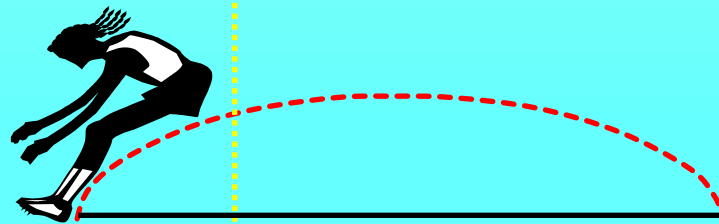
3段跳び

ダブル発電: 13m



2段跳び

シングル発電: 8m

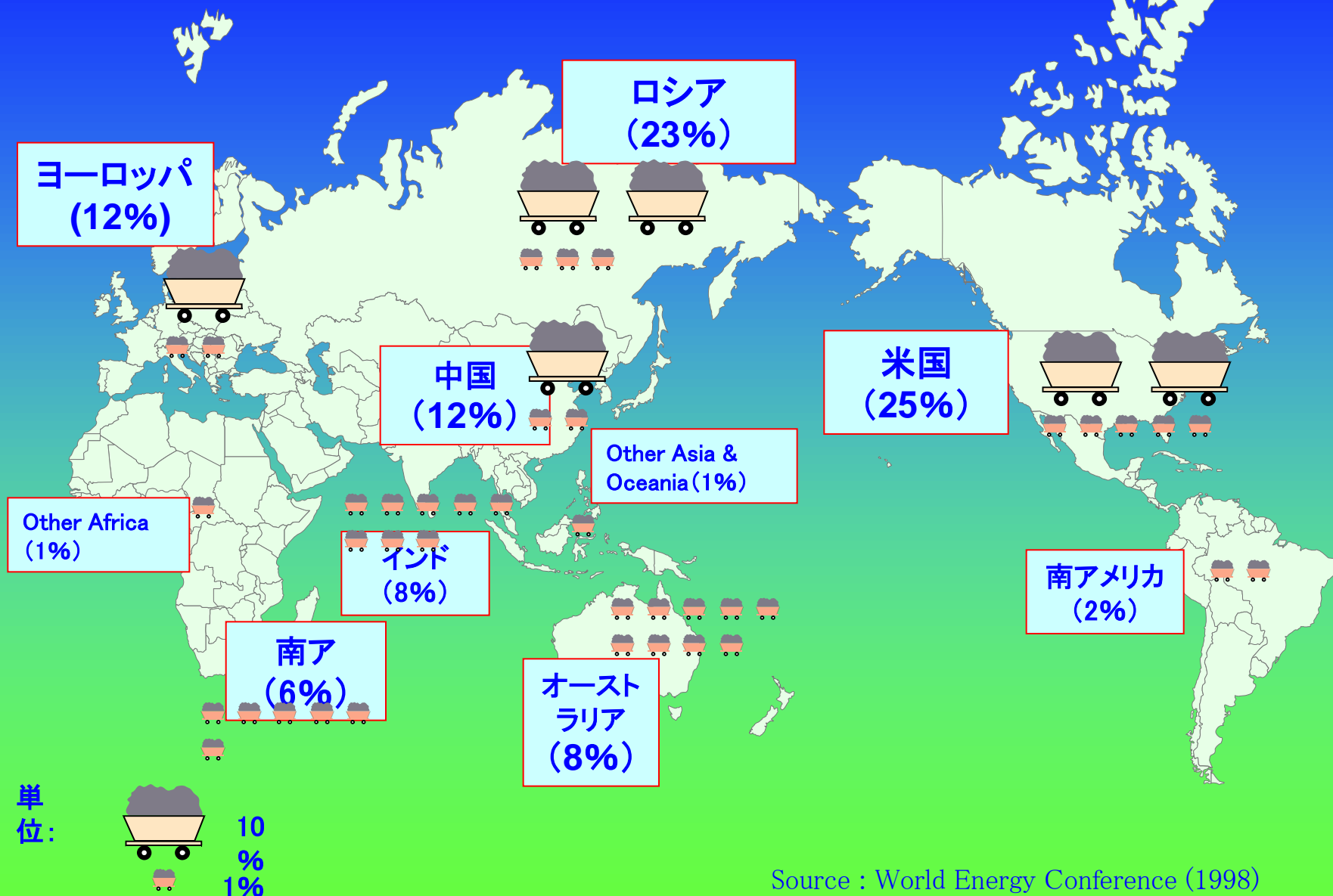


1段跳び  
(走幅跳び)



## 2. エネルギー政策における 石炭の重要性

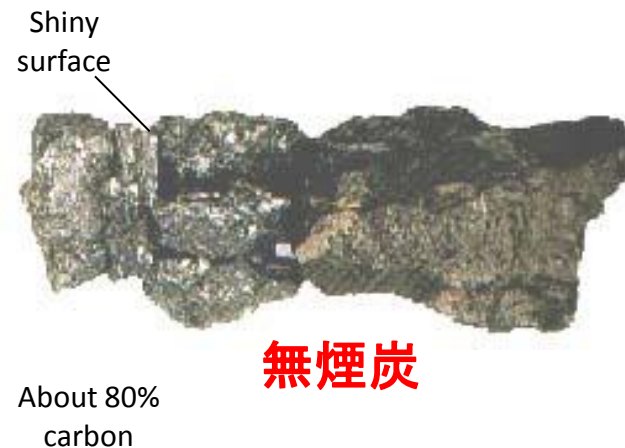
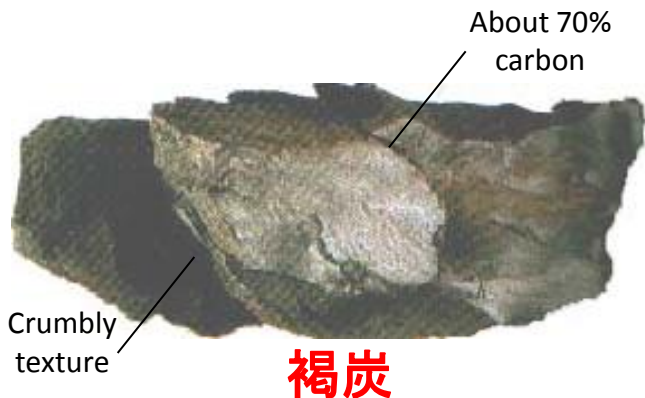
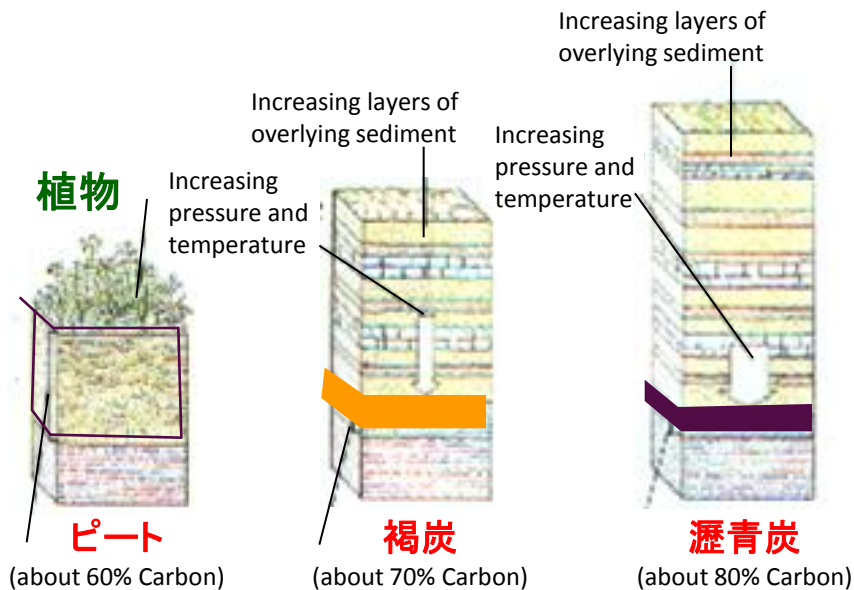
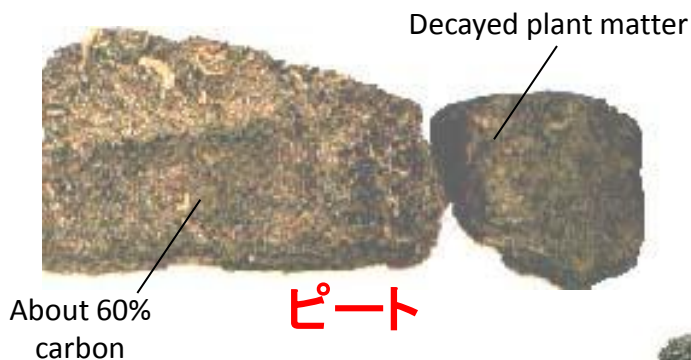
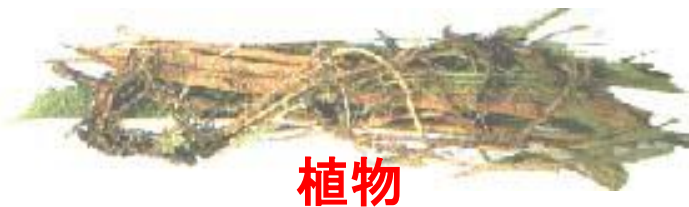
# 世界の石炭可採埋蔵量 ( 全体 1 兆トン )



Source : World Energy Conference (1998)

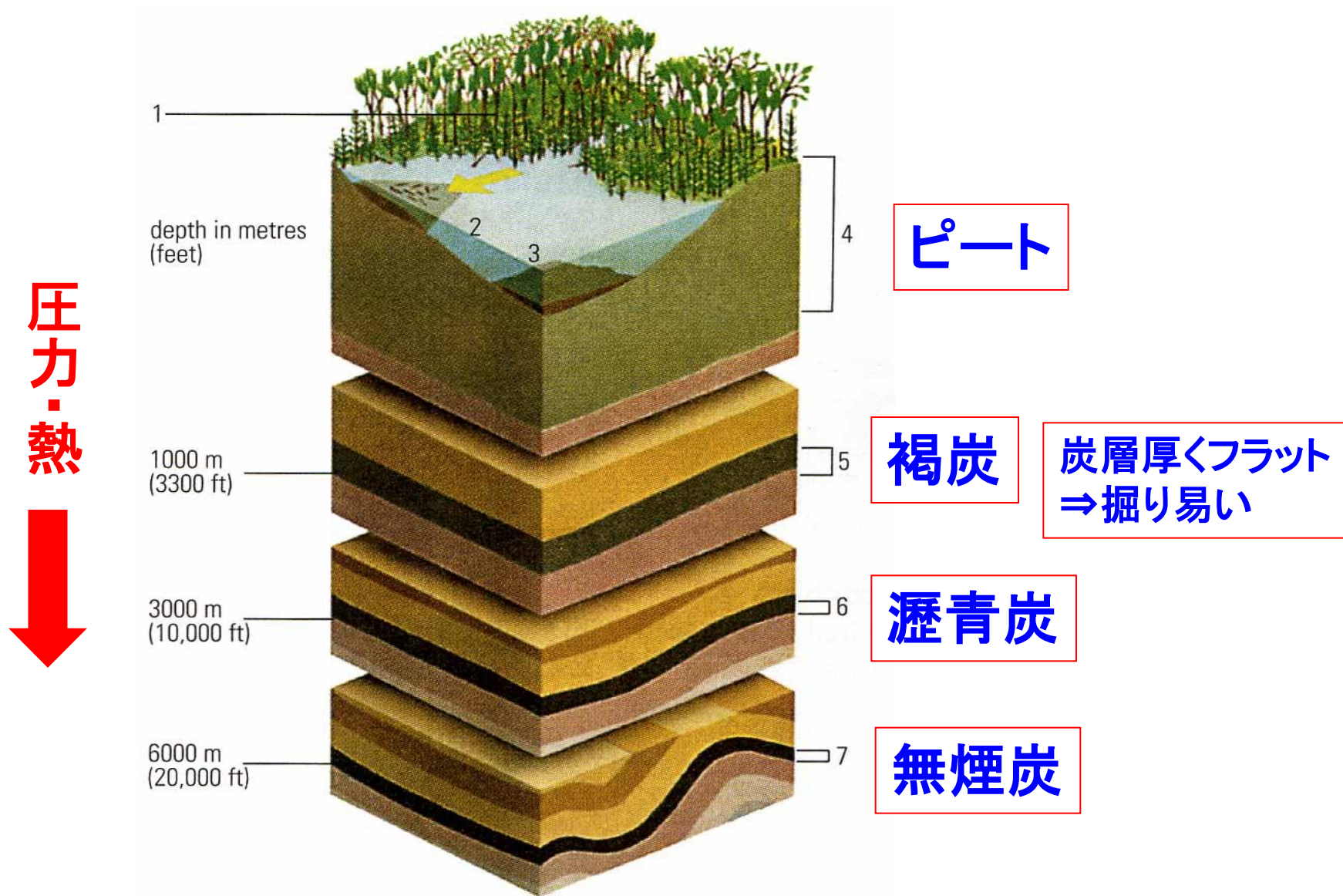


# 石炭の生成



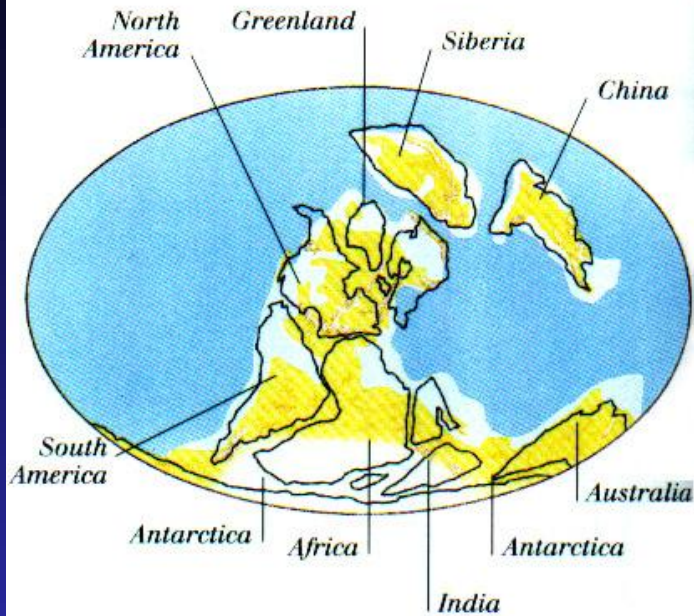
Source: VISUAL ENCYCLOPEDIA, p.280

# 石炭の生成

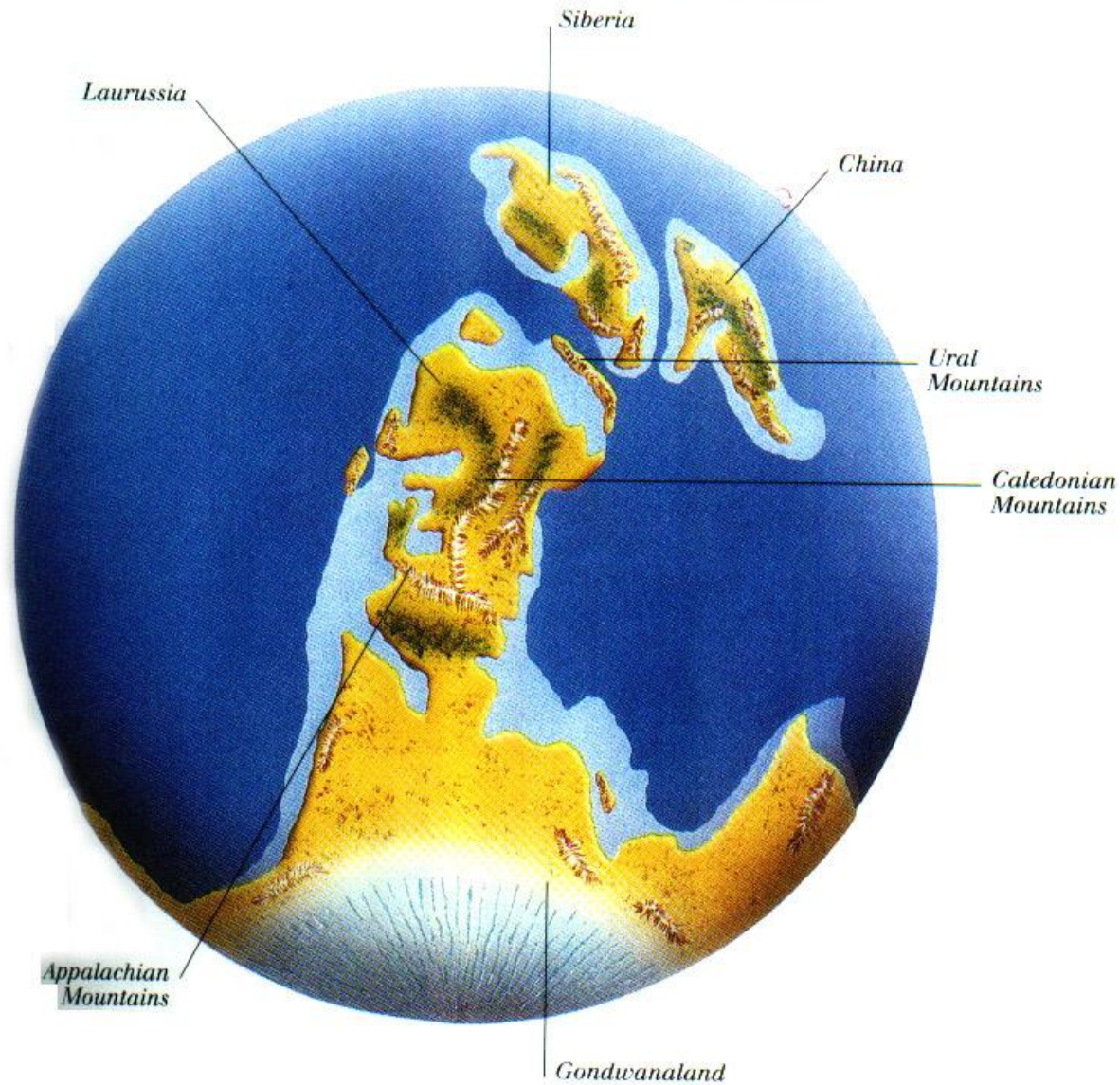




LATE CARBONIFEROUS POSITIONS OF PRESENT-DAY LAND-MASSSES



THE EARTH DURING THE LATE CARBONIFEROUS PERIOD



石炭紀後期の地球

# 石炭資源

1. 石炭の生成は石油とは根本的に異なる。

元は植物であり地上至る所に生育。“移動と集積”の必要無し。

2. 資源が比較的公平に分布。基本的に土地の面積に比例。

資源量第1位 ---- 米国 ( 25 % )

資源量第2位 ---- ロシア( 23 % )

資源量第3位 ---- 中国 ( 12 % )

資源量第4位 ---- ヨーロッパ( 12 % )

資源量第5位 ---- オーストラリア ( 8 % )

---- 上位5ヶ国で世界資源量の **80%** を占める。

3. 最も豊富な化石燃料 ---- 200 年以上の寿命あり。

4. クリーンで容易に利用可能な技術の開発が必要。



# アリとキリギリス

▶天然ガスには  
セキュリティ上  
代替燃料が必要

キリギリス  
-天然ガス?

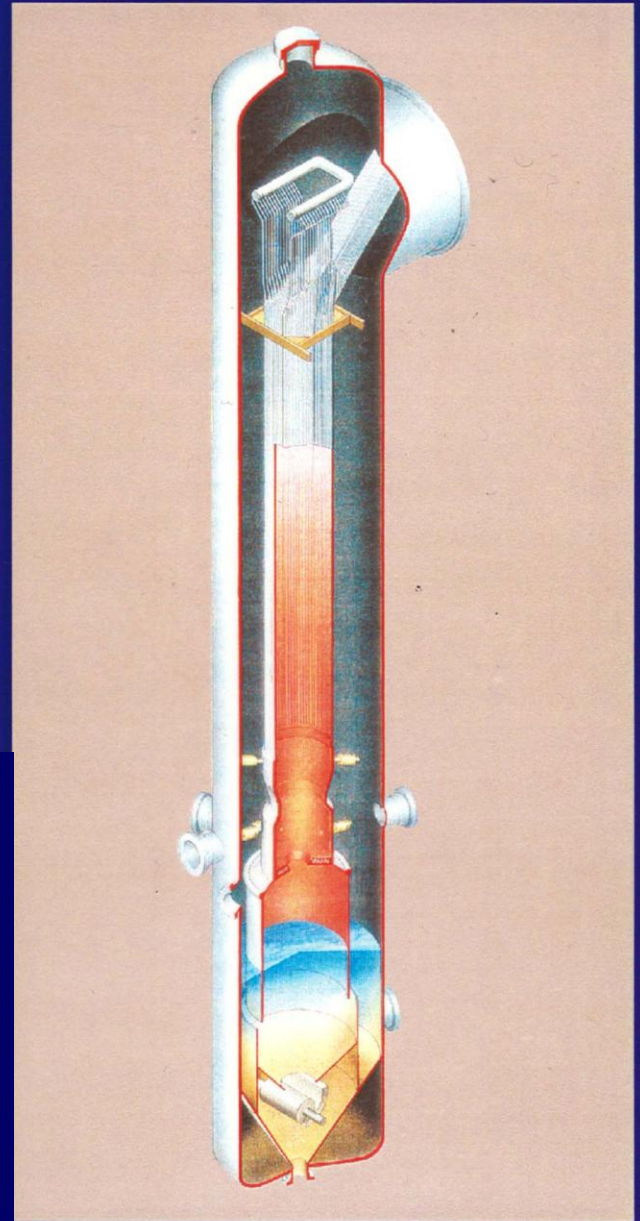


アリ  
-石炭?  
-原子力?

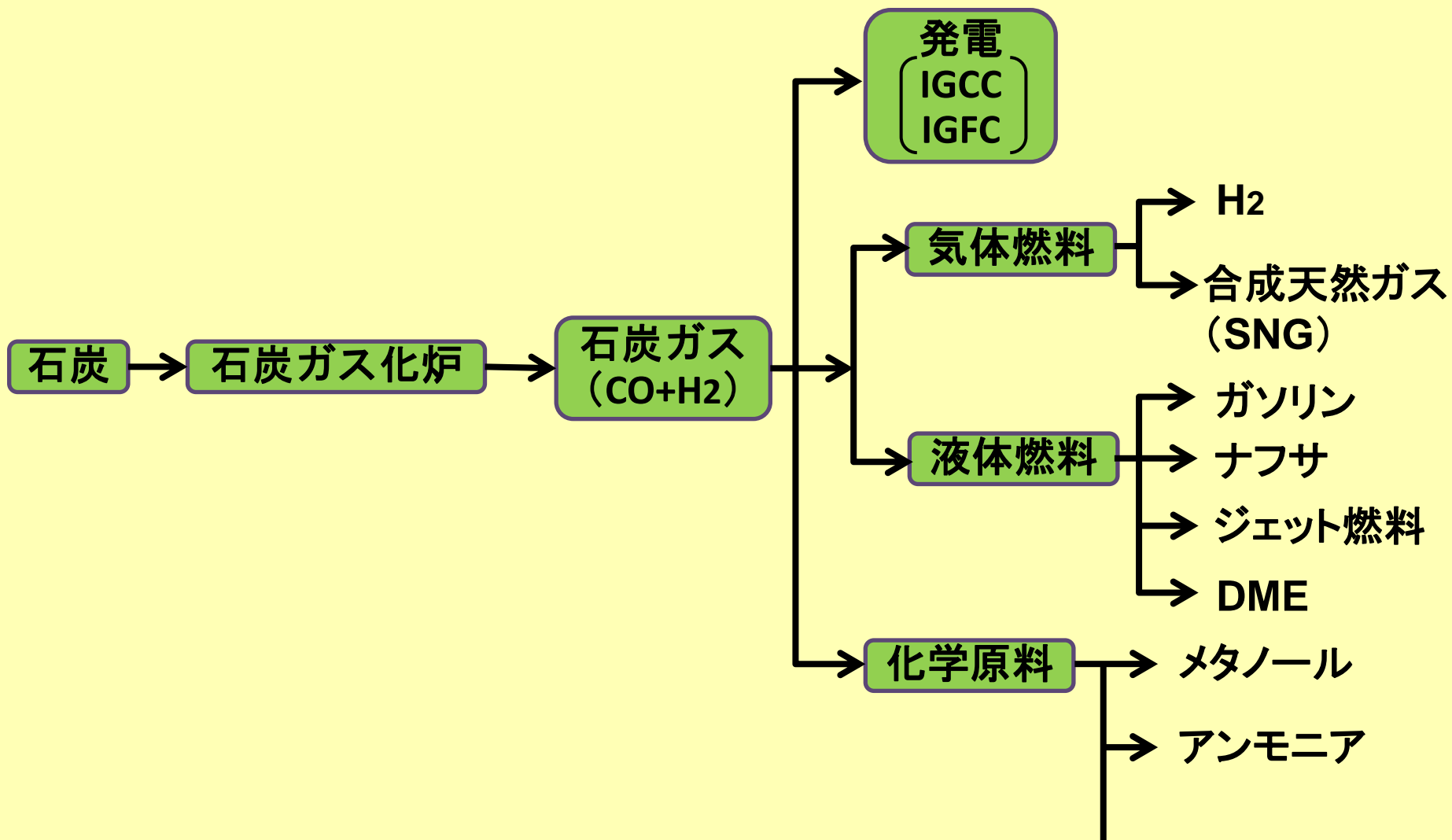
*The Ants and the Grasshopper*

# 石炭ガス化の効用 →天然ガスとの互換性

液体燃料の製造も可能

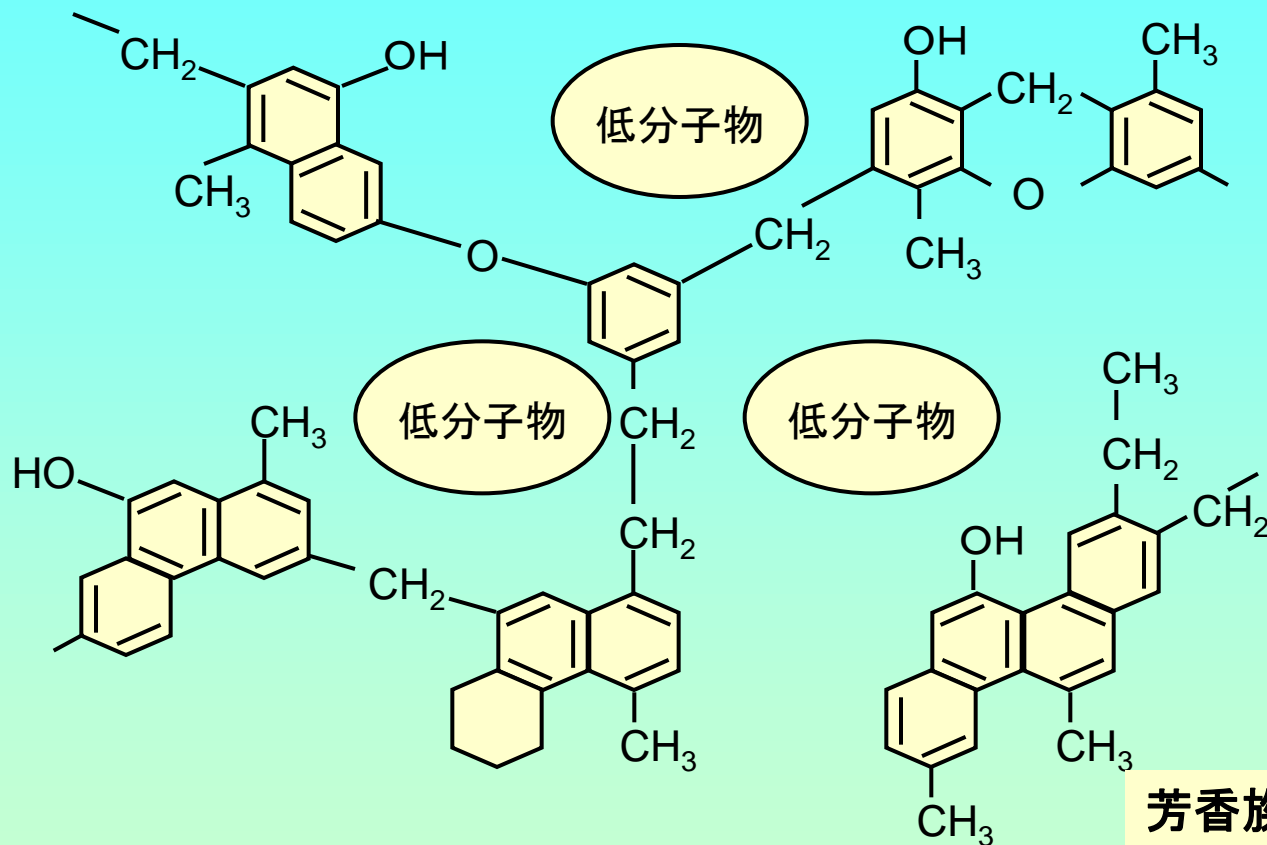


# 石炭ガス化の用途





# なぜ液化ではなくガス化か？

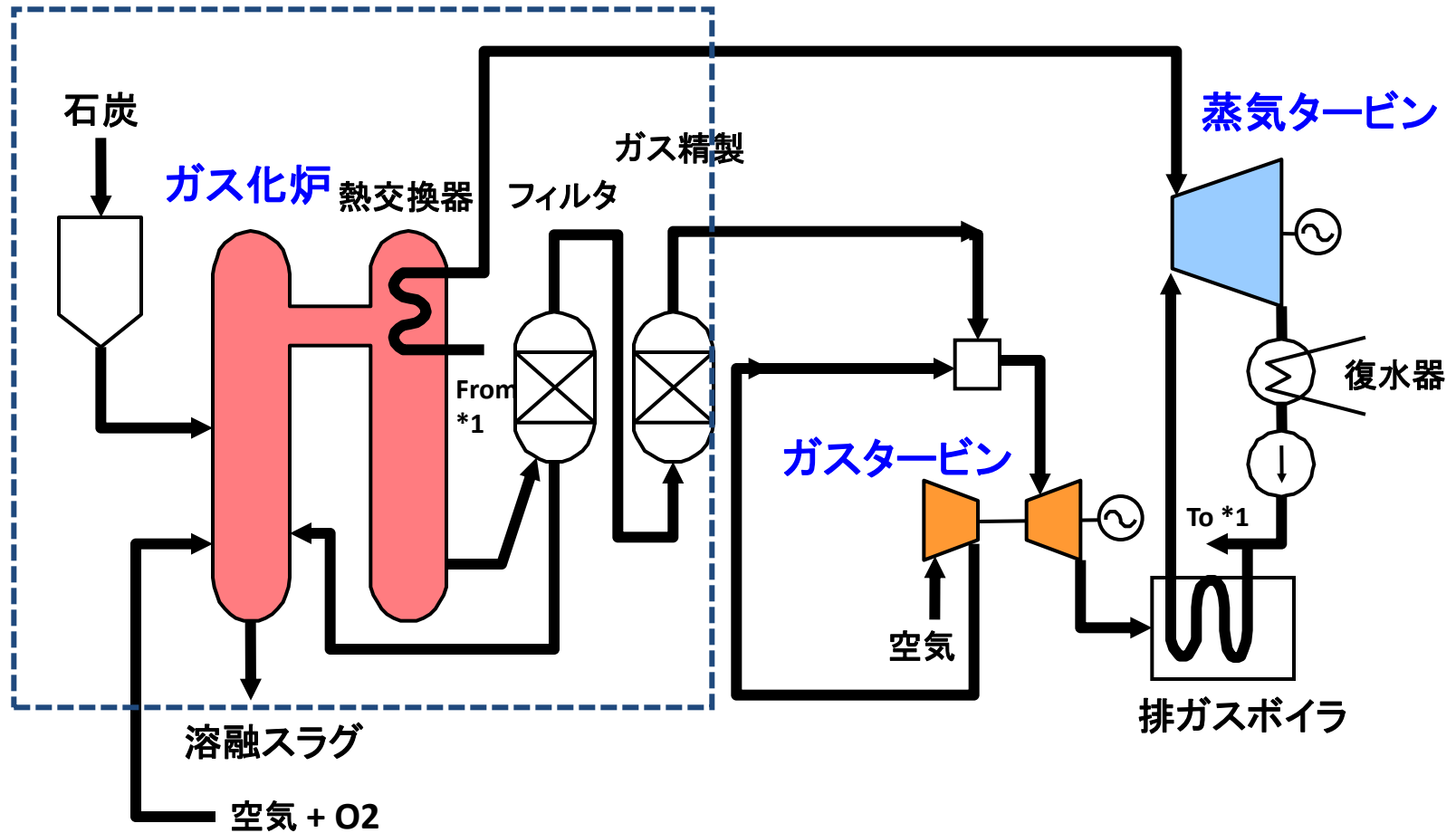


1. 高温による高速反応
2. 無触媒で安定した反応

芳香族環個数	
無煙炭	: 8~12個
瀝青炭	: ~4個
亜瀝青炭	: 2~3個
褐炭	: 1個

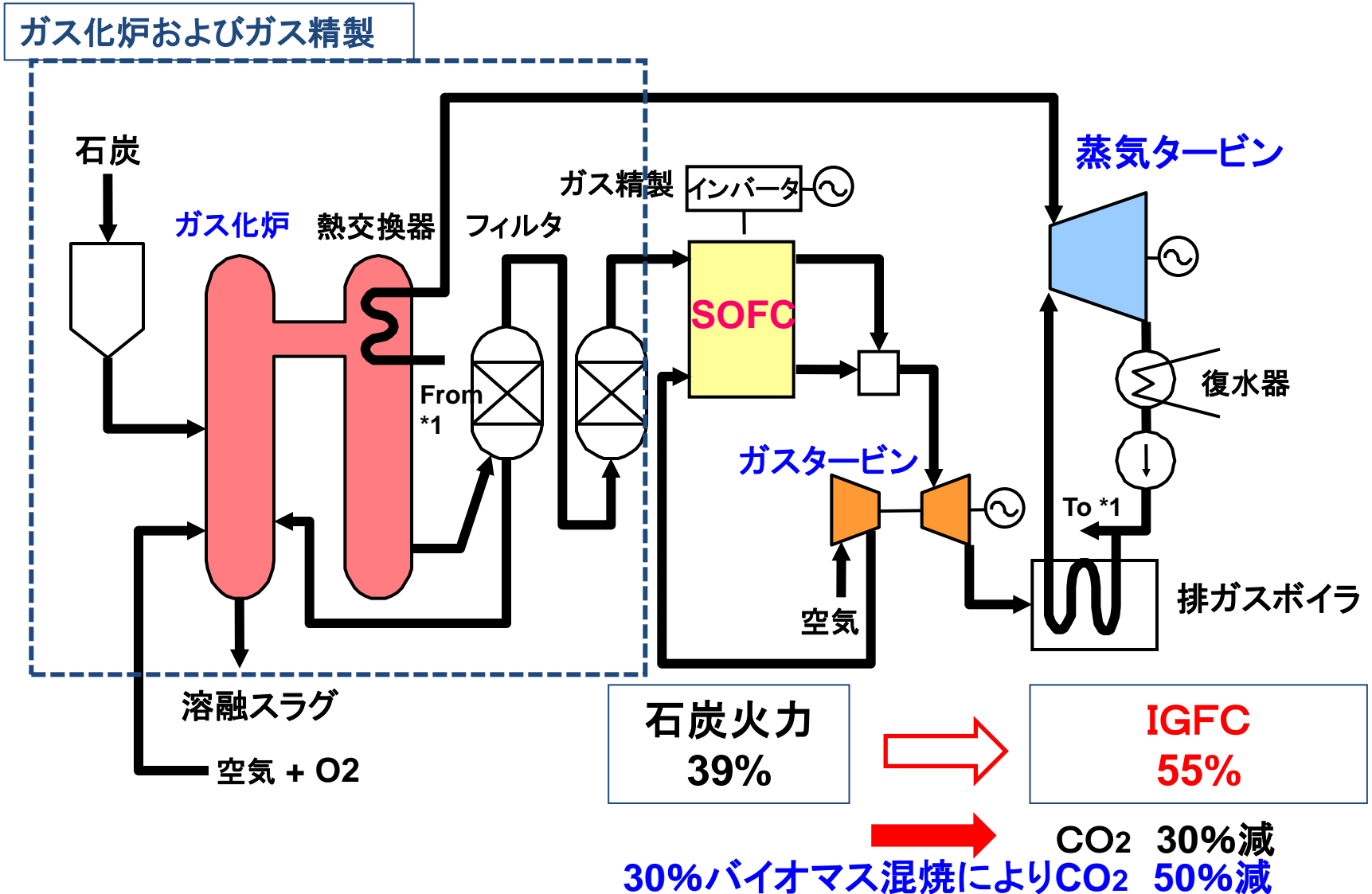
# 石炭ガス化複合発電 (IGCC)

## ガス化炉およびガス精製



# 石炭ガス化トリプル複合発電 (IGFC)

## (石炭 ガス化とSOFCの組合せ)

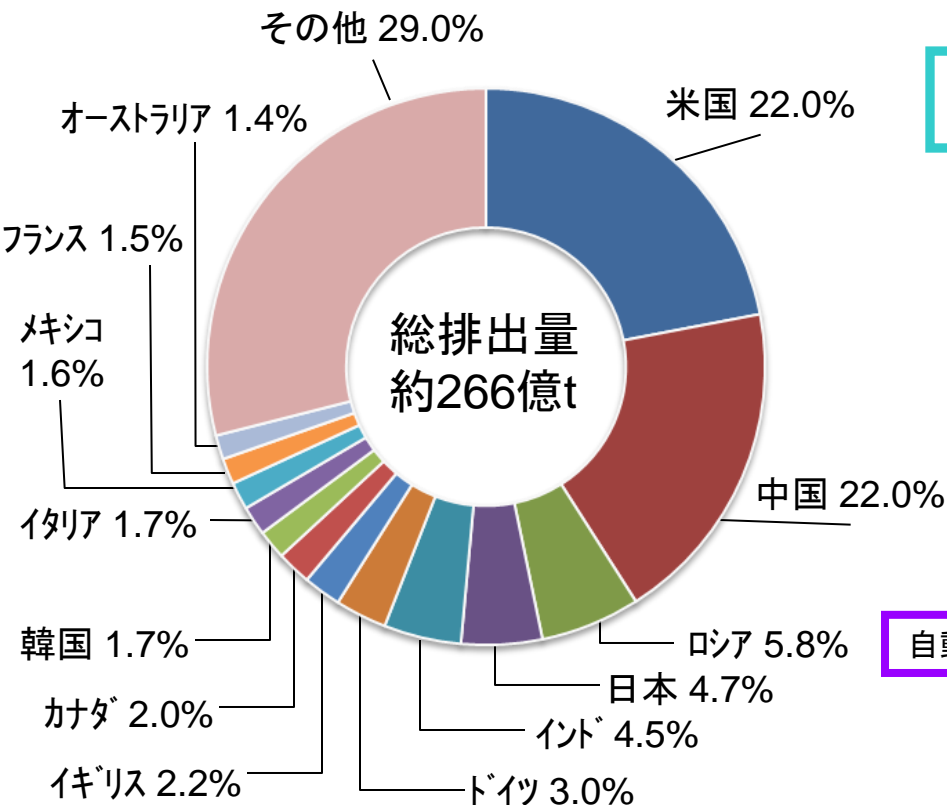




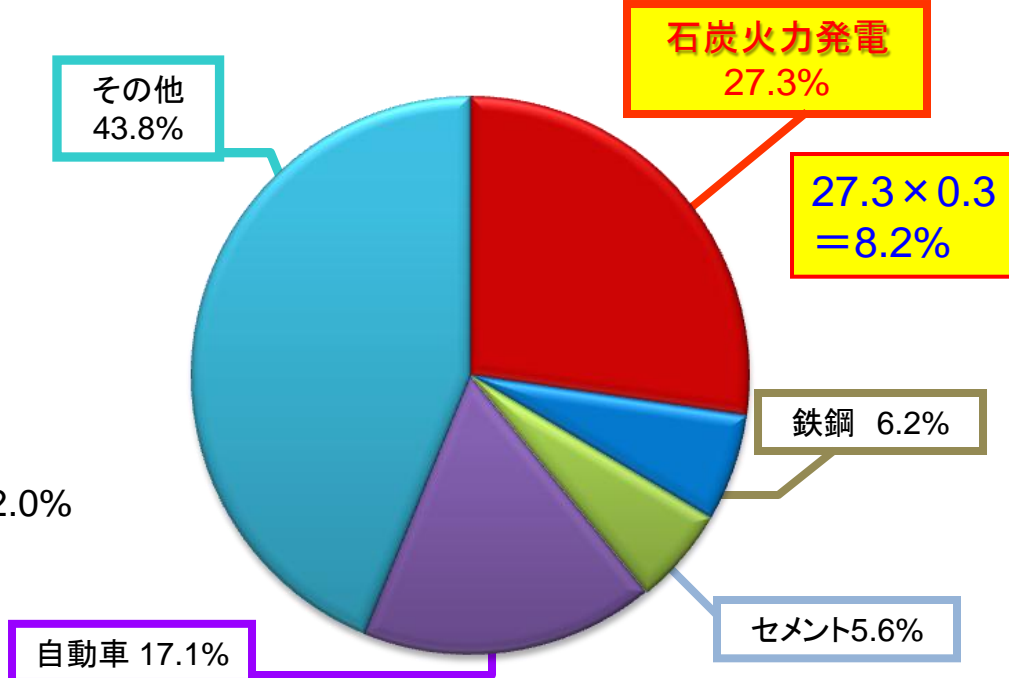
# 3. 温暖化対策対応

# 世界のCO<sub>2</sub>排出量

## 国別排出量内訳



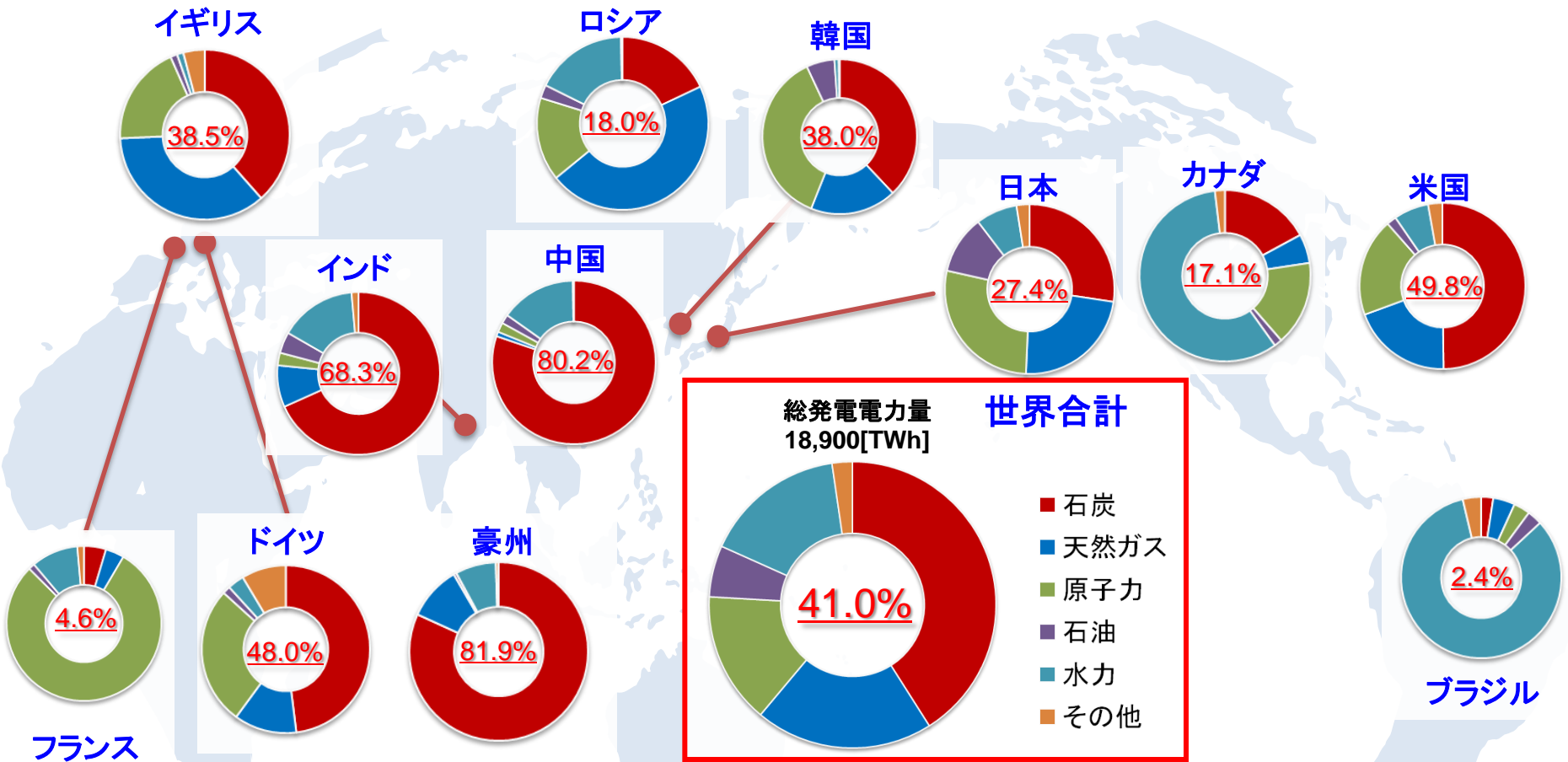
## エネルギー起源CO<sub>2</sub>排出内訳



※出典：IEA CO<sub>2</sub> Emission from fuel combustion

- 石炭火力発電の割合が多い米国、中国等はCO<sub>2</sub>排出量も多い
- 世界のCO<sub>2</sub>の約30%は石炭火力から排出
- 石炭火力の効率を30%向上できれば、日本の総排出量の2倍が減らせる

# 世界の主要国電源構成



ENERGY BALANCES OF OECD COUNTRIES 2008 Edition  
ENERGY BALANCES OF NON-OECD COUNTRIES 2008 Edition  
IEA World Energy Outlook 2006  
より作成

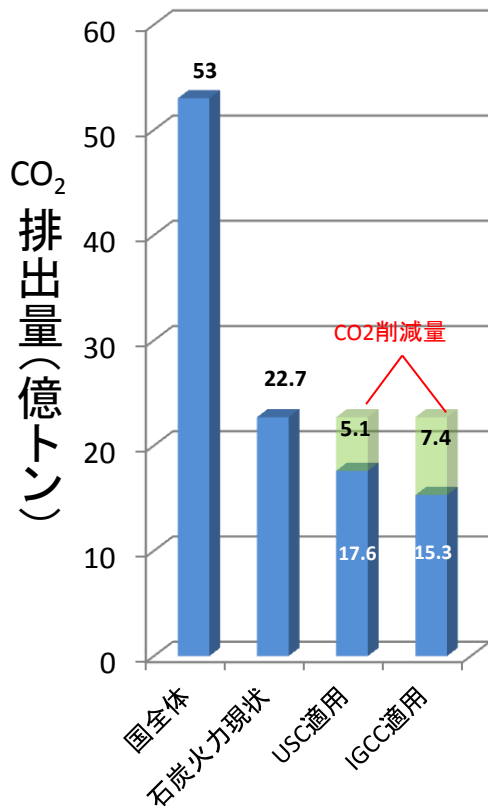
- 世界の電源構成に占める石炭火力の割合は40%
- 日本でも27%が石炭による発電
- 特に米国、豪州、中国、インドでは大半が石炭による発電



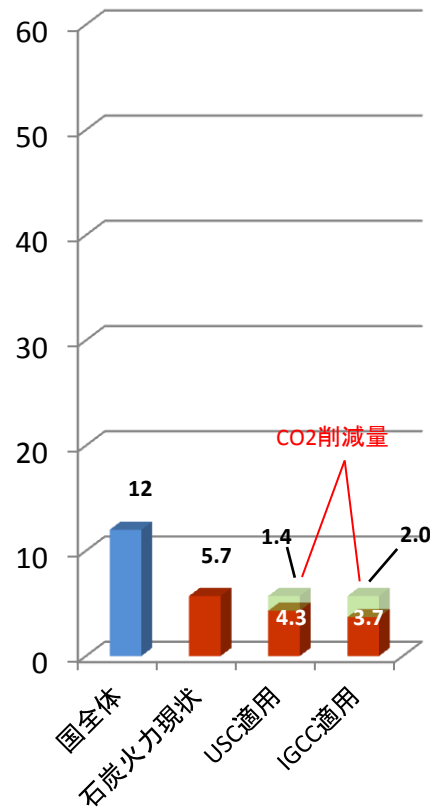
# 日本の石炭技術によるCO<sub>2</sub>削減の可能性

石炭高効率化の国際技術協力はIGCCさらにはIGFCが中心になる

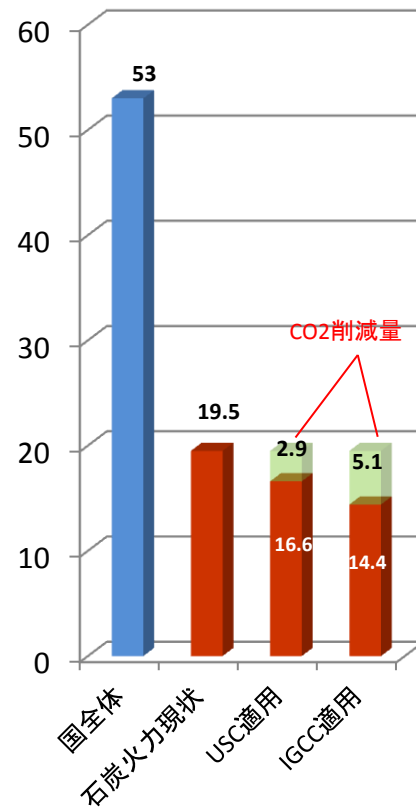
中国



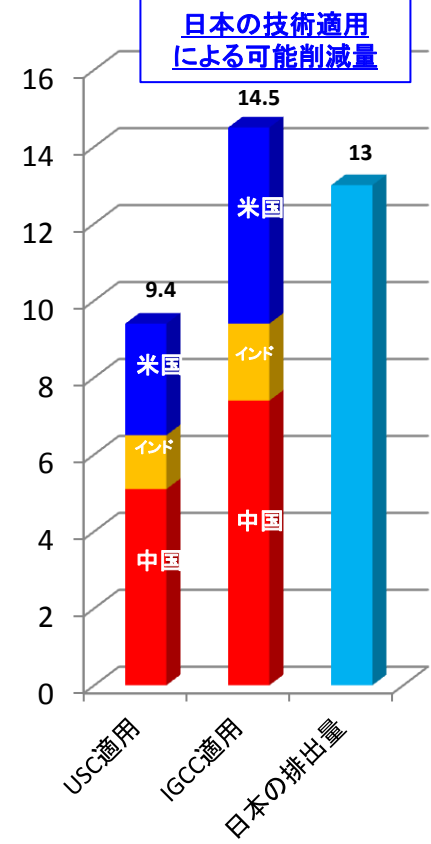
インド



米国



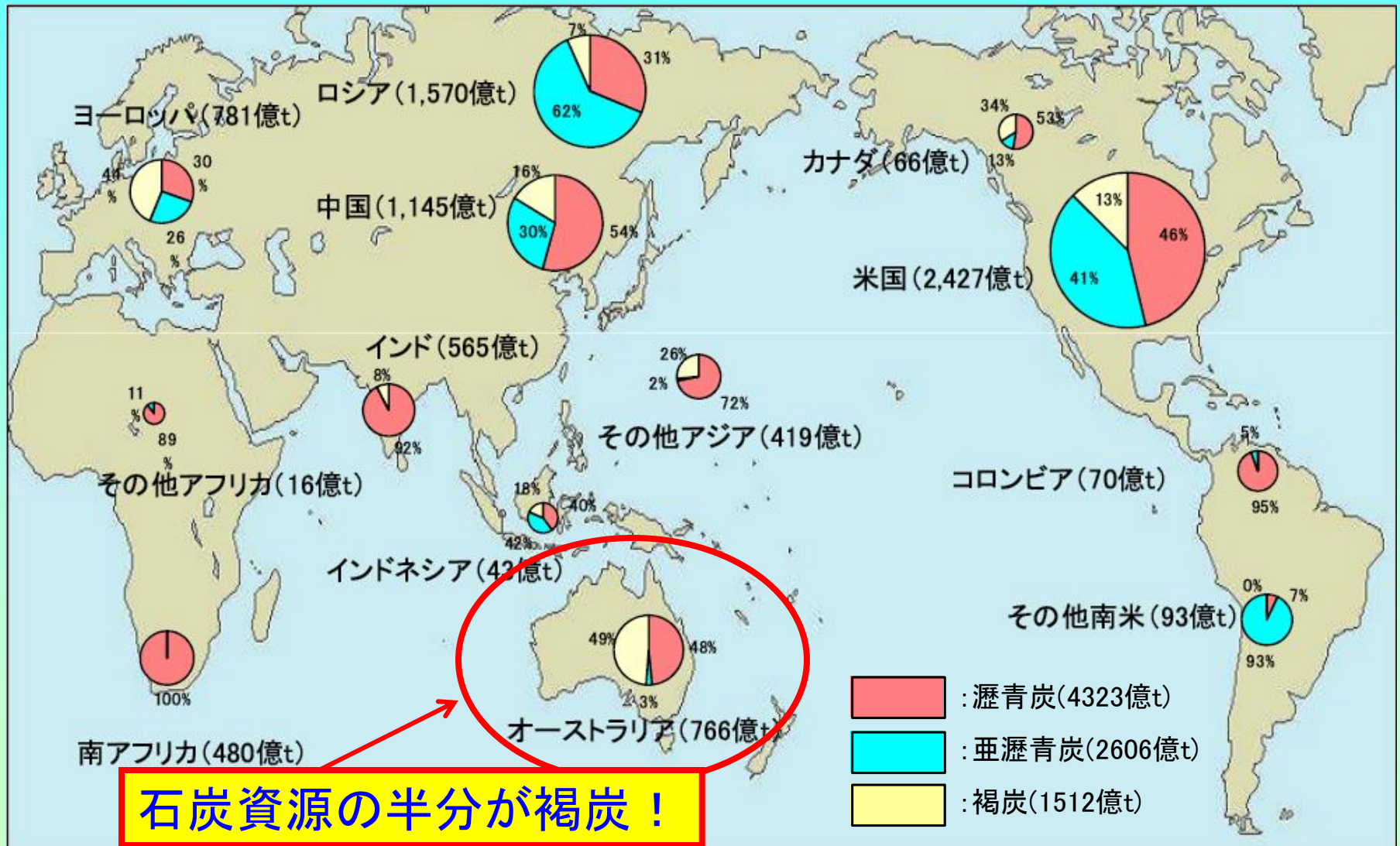
可能削減量



IGCCは高効率・低灰融点炭の多い中国・米国・豪州・インドネシアなどとの協力が有効!

# 4. 国際展開の打ち手

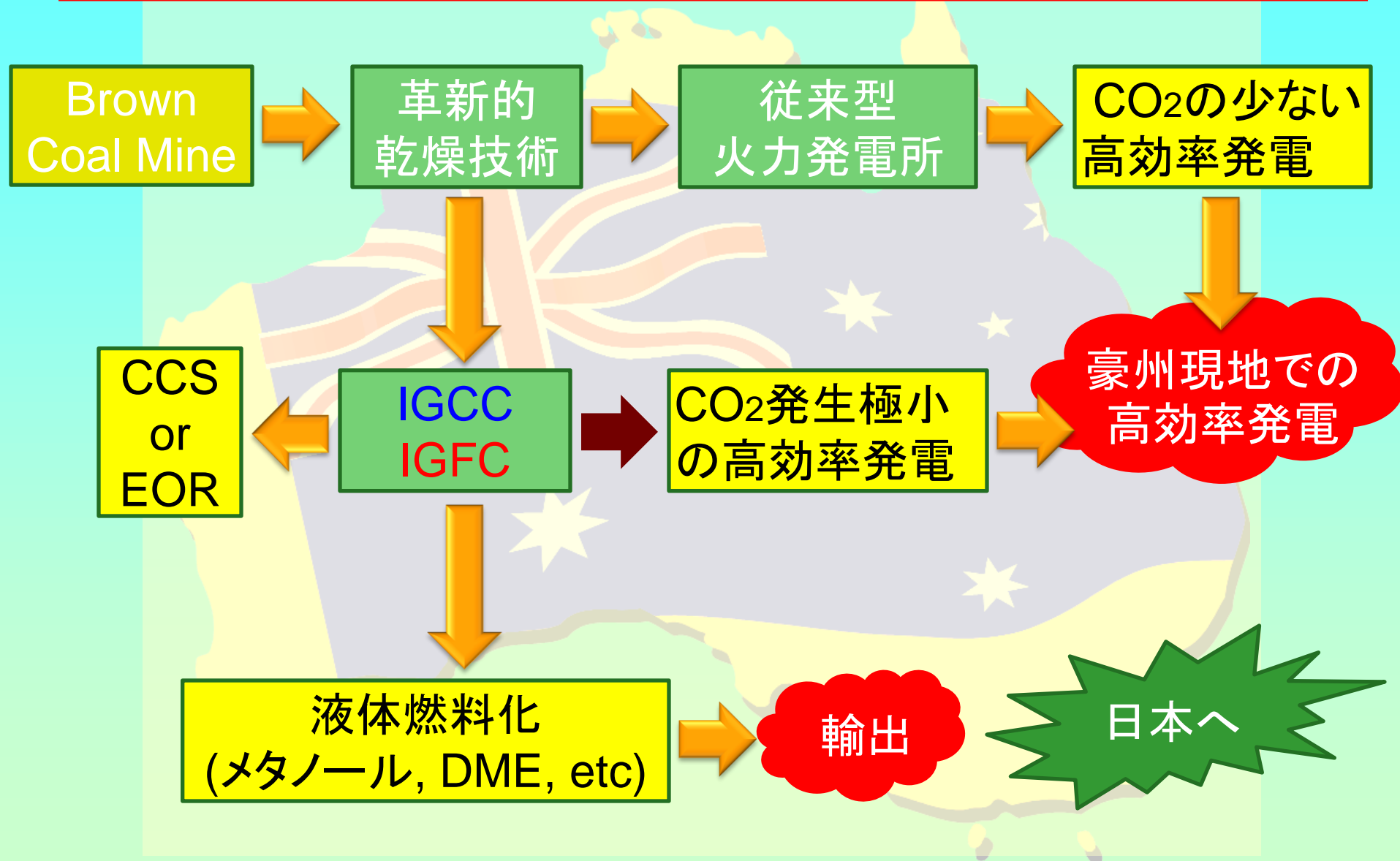
# 世界の褐炭・亜瀝青炭資源



出所：WEC Survey of Energy Resources 2008、BP統計2008



# 褐炭・亜瀝青炭の国際協力にはガス化が不可欠



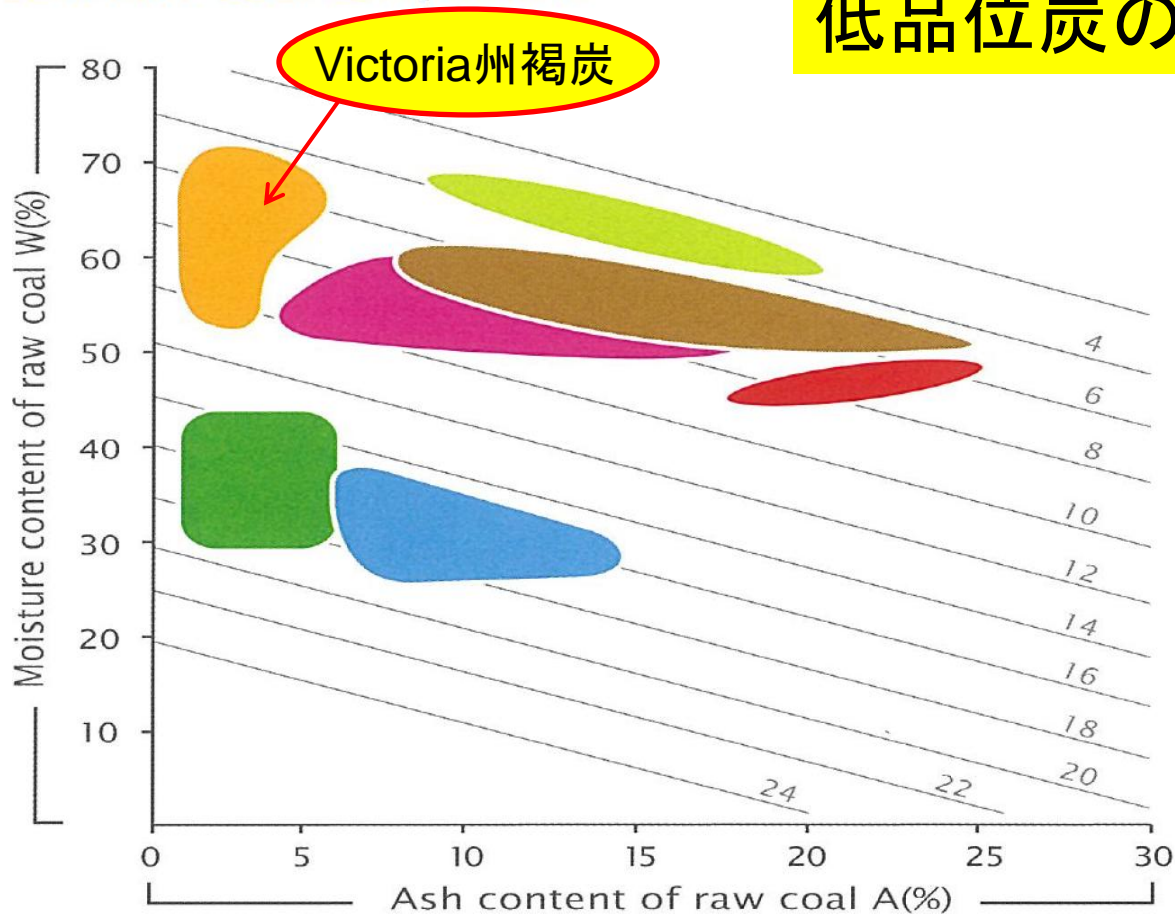
# なぜ褐炭乾燥技術が重要か？

1. 世界の石炭資源の約半分が褐炭。しかし殆ど未利用の状態にある。
2. 褐炭の最大の欠点は水分が50～60%と多いこと。この熱損失のために瀝青炭に較べて10%ポイントほど効率が低くなる（これは微粉炭焚でもIGCCでも同じ）。
3. 従ってこの熱損失を大幅に削減できれば、効率向上による経済性向上のみならず、発生CO<sub>2</sub>を大幅に削減できる。
4. なお、この技術が成功すると、バイオマス（やはり水分含有量50～60%）にもそのまま適用でき、用途は更に広がる。

Low rank coal comparative

低品位炭の性状比較

水分



Key

灰分

- Latrobe Valley
- Megalopolis Greece
- Ptolemais Greece
- Neurath D, Germany
- Puentes Spain
- Dakota Texas U.S.A
- Indonesian Low Bank
- Net Specific Energy=2MJ/Kg

Source: Allardice Consulting Ltd



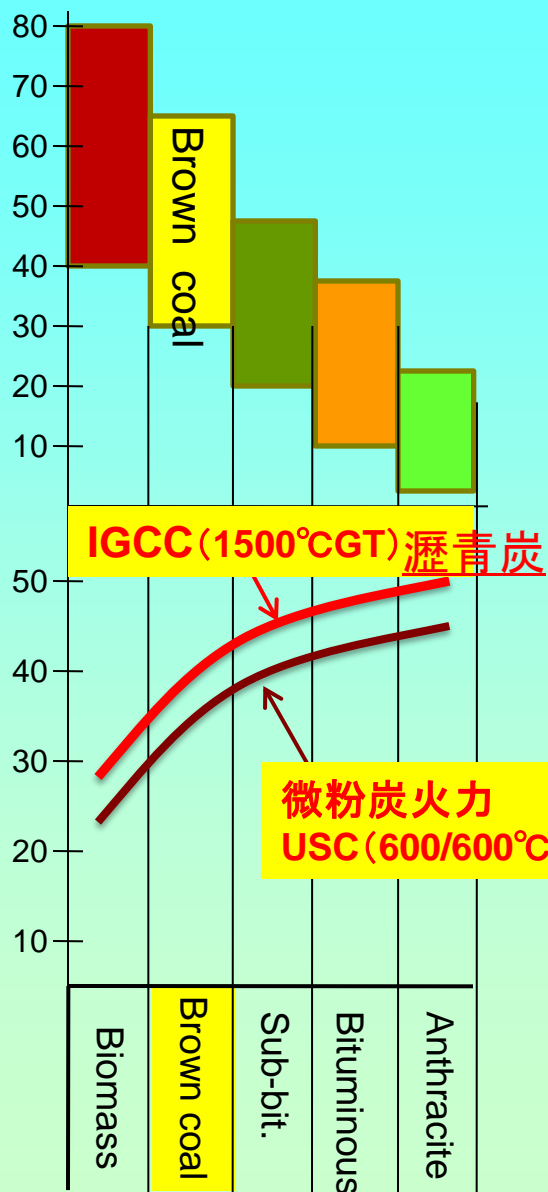
# 水分量と効率の関係

燃料中水分量  
(重量%)

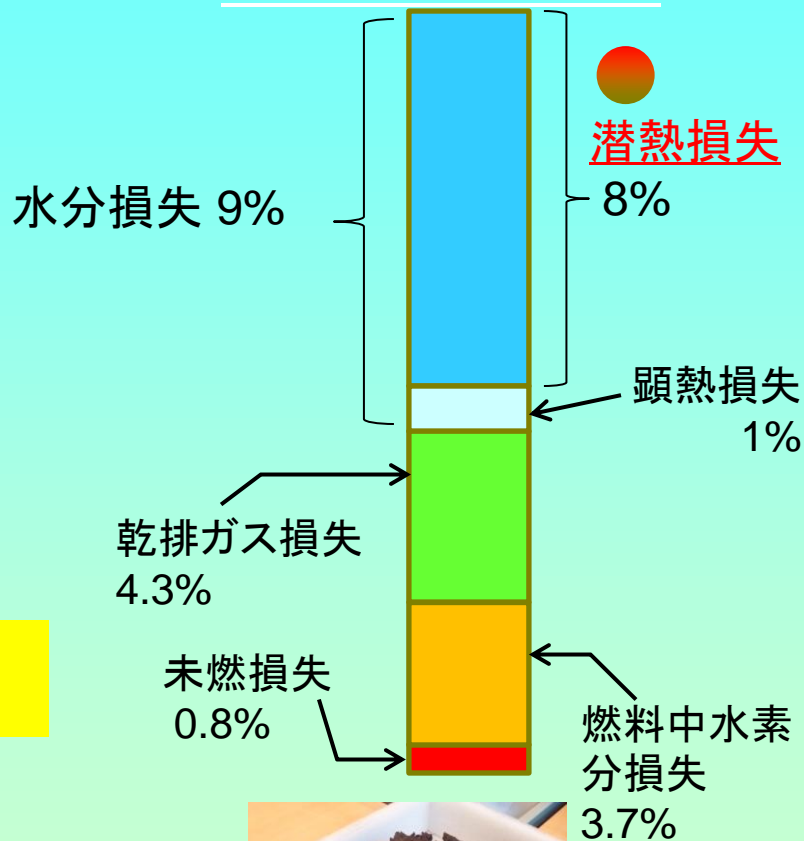
プラント熱効率%  
(送電端, HHV 基準)



瀝青炭



## 全損失 17.8% Heat Losses



褐炭

# 褐炭焚き火力発電所



Przemysł i Energetyka Konwencjonalna SA  
Elektrownia Bełchatów

# CCS (CO<sub>2</sub>回収・貯留)の可能性

CCS : Carbon Capture & Storage

日本で本当にCCSができるか？

- 適当な場所があるのか？
- 住民の理解は得られるのか？
- 経済的負担はどれくらい厳しくなるのか？

➤ 海外でのCCSを二国間協力にする方法がある!





# Otway実証プラント : CCS





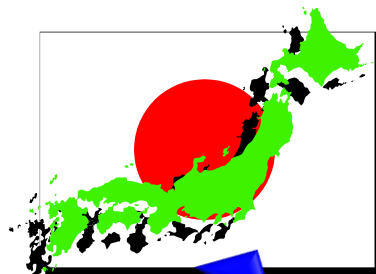
2010.05.01



# 国際協力例



低炭素社会の中でVictoria州の褐炭を如何に有効活用するか？



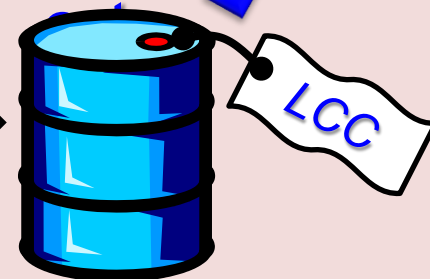
輸出

褐炭

革新的乾燥システム

ガス化

液体燃料化

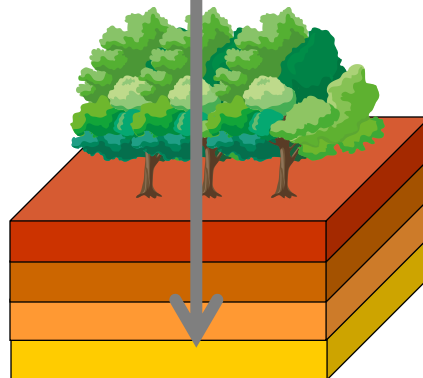
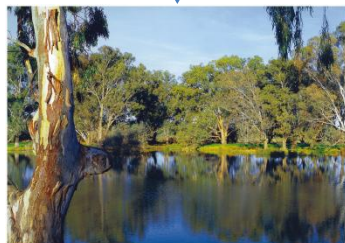


低炭素証明書付きの液体燃料

水分回収

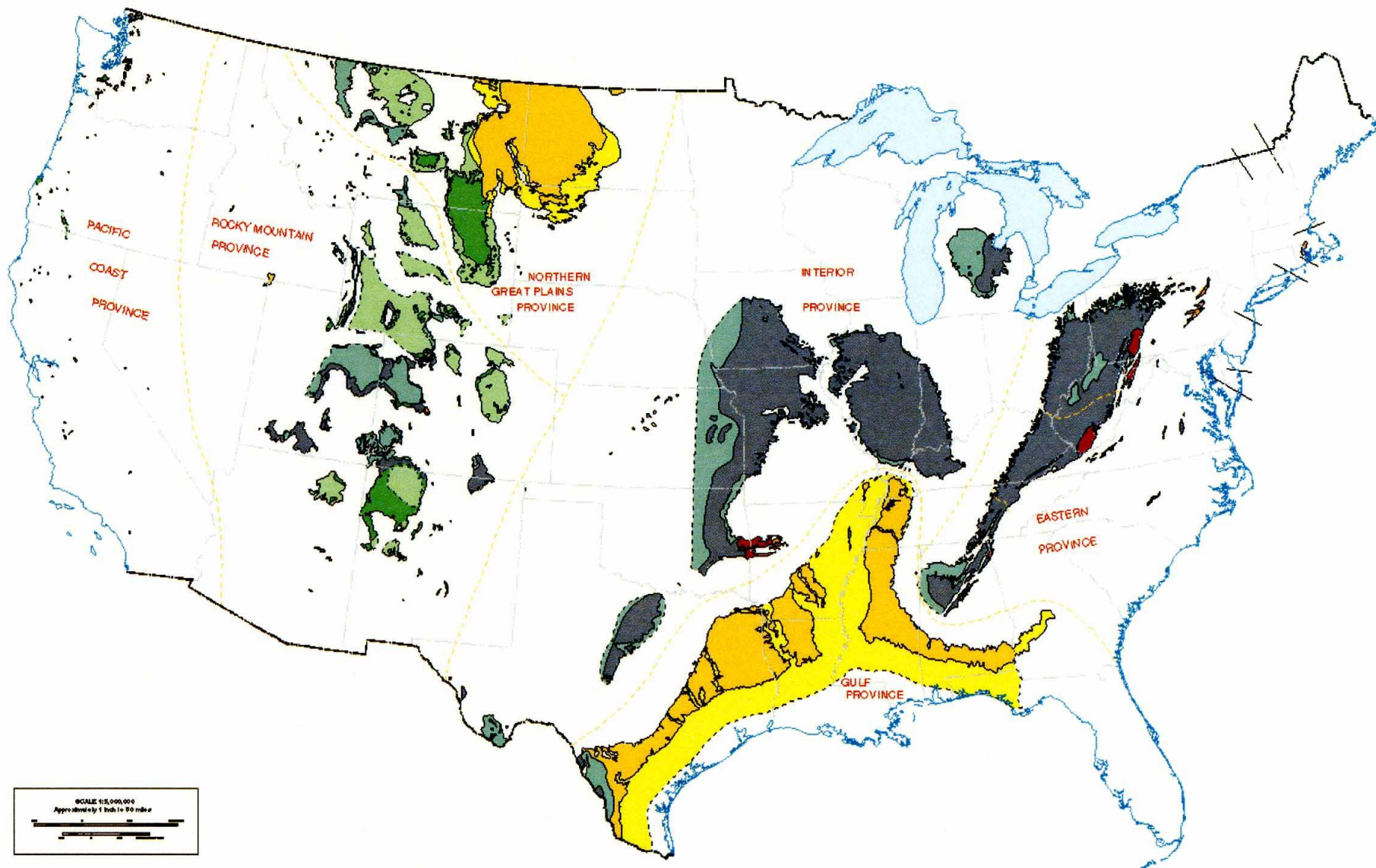
CO<sub>2</sub> Capture

CO<sub>2</sub> Storage

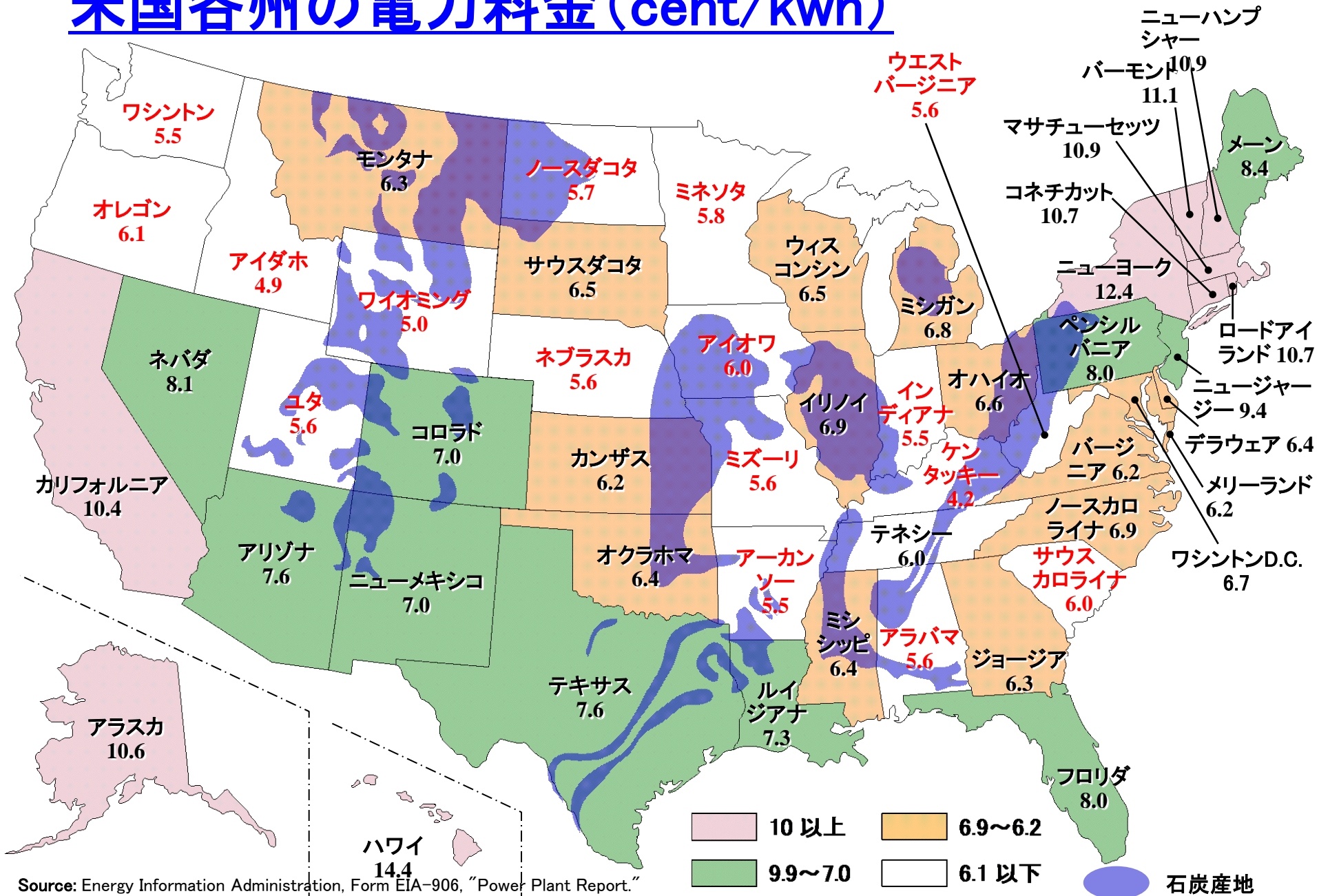




# 米国の石炭資源分布図



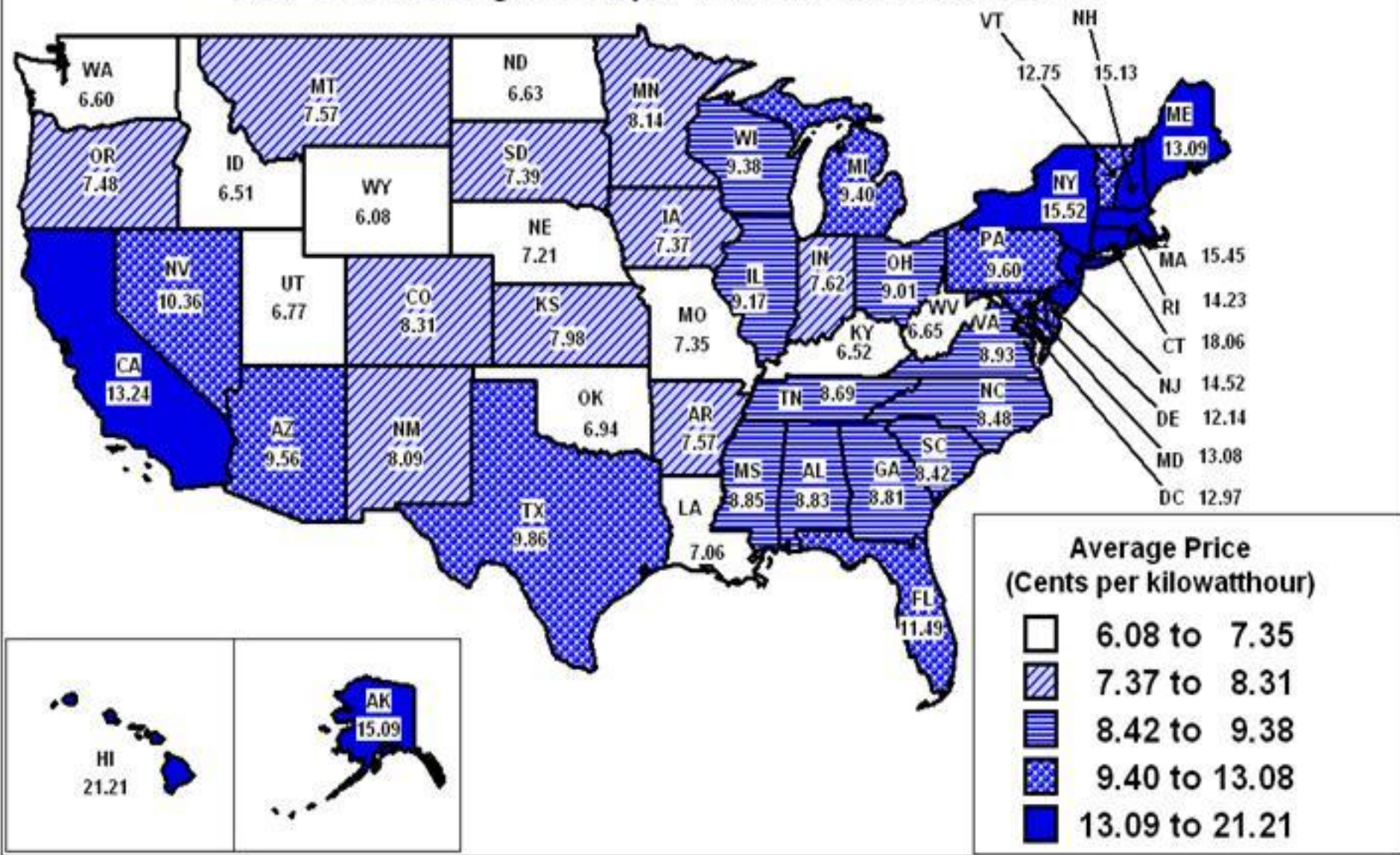
# 米国各州の電力料金 (cent/kwh)



Source: Energy Information Administration, Form EIA-906, "Power Plant Report."



# U.S. Total Average Price per kilowatthour is 9.83 Cents

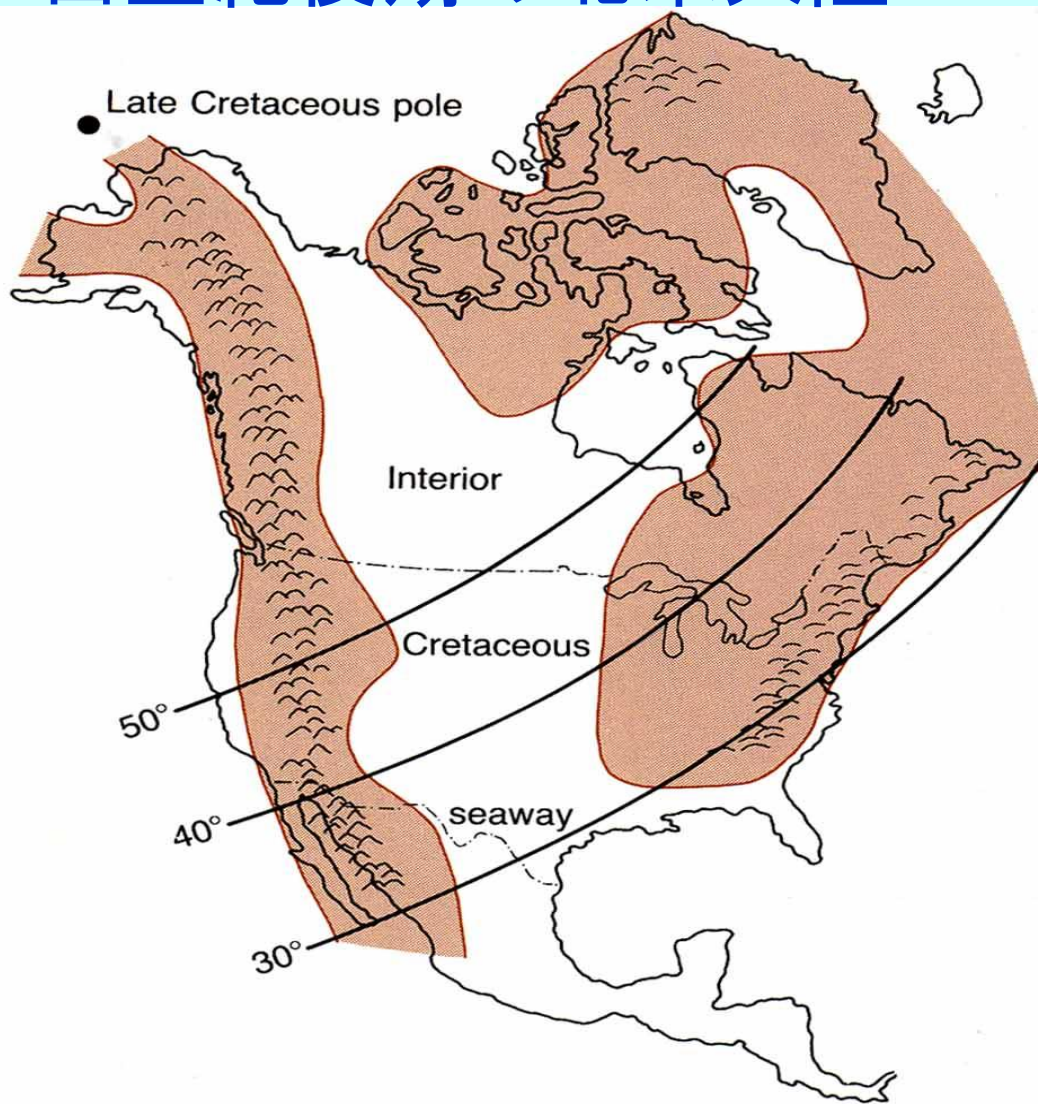


Note: Data are displayed as 5 groups of 10 States and the District of Columbia.

Source: U.S. Energy Information Administration, Form EIA-861, "Annual Electric Power Industry Report."



# 白亜紀後期の北米大陸



**Figure 12-50.** Generalized Late Cretaceous paleogeography of North America showing extent of interior Cretaceous seaway. (Data from several sources)





Big Horn River

Powder River

PRB炭産地

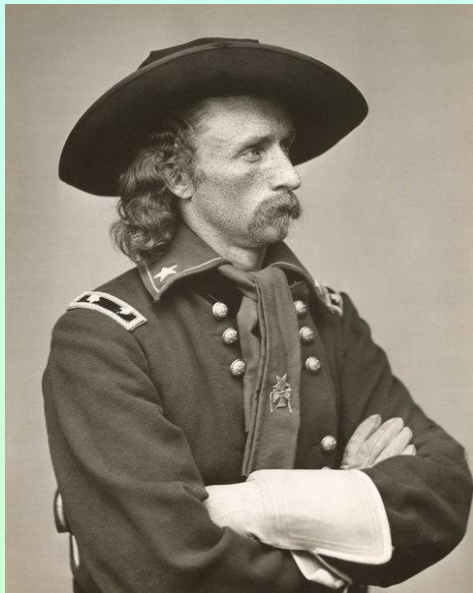




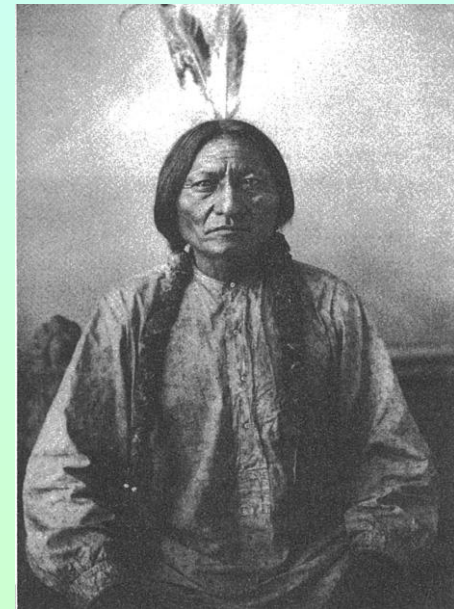
# LITTLE BIG HORNの戦い

Sitting Bull、Crazy Horse  
率いる1800人のCheyenne・  
Sioux連合軍に敗れる

1876年6月25日



George A. Custer



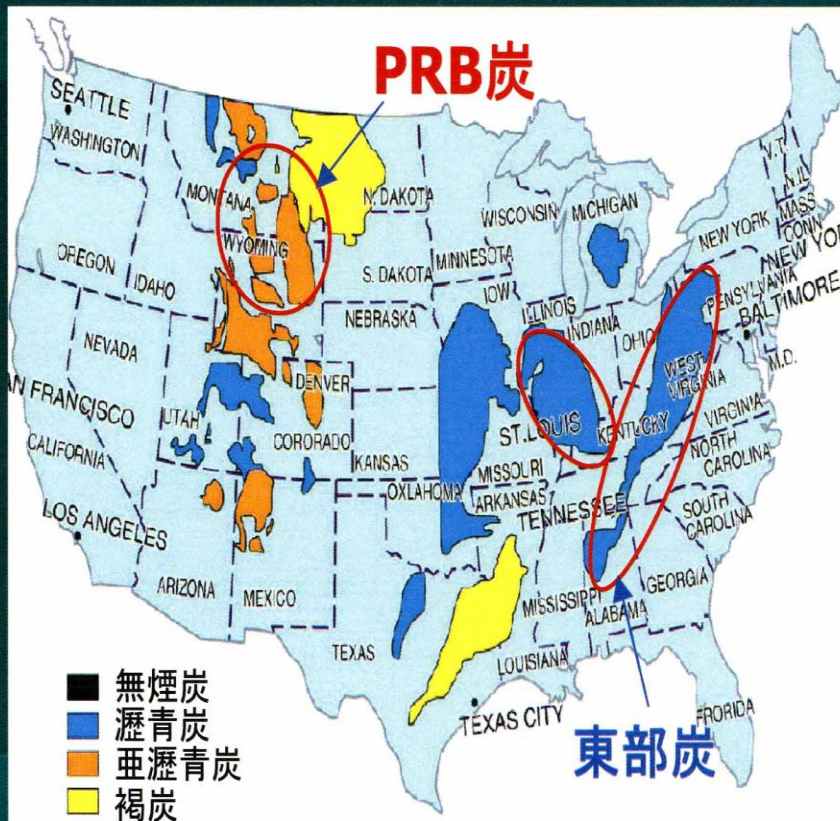
Sitting Bull



# 米国PRB炭 (Powder River Basin Coal)

埋蔵量	5,200億トン〔米国の石炭埋蔵量:1兆2000億トン〕		
炭坑	大半が連邦政府所有でリースを受けて石炭会社が生産。表層が薄く、炭層は30m以上と厚い。露天掘りも多い。		
生産量	<ul style="list-style-type: none"> <li>・1970年頃生産開始。</li> <li>1970年            700万トン</li> <li>2000年   3億4000万トン</li> </ul>		
特徴	①低硫黄 ②燃え易い ③灰融点低い ④比較的水分多い		
価格		PRB炭	アパラチア東部炭
	山元価格で <b>1/4</b>	山元渡し 6\$/t	28\$/t
	輸送費込でも <b>1/2</b>	輸送費込 19\$/t	38\$/t

# 東部炭とPRB炭の比較



項目	単位	東部炭	PRB炭
高位発熱量	kcal/kg	7,000	5,000
全水分	wt%	10以下	20-30
灰分	wt%	10以下	5以下
全S分	wt%	2-4	0.5以下
灰融点	°C(還元)	1,350	1,100-1,250

# 中国における石炭の重要性

- ① 全世界の石炭埋蔵量の12%。
- ② 唯一の自給可能な化石燃料。
- ③ 中国の発電電力量の80%は石炭による。
- ④ 中国で生産する石炭の50%は発電用。



# 中国





# 中国の有望な石炭例

埋蔵量	2,000億トン〔中国の石炭埋蔵量：9,500億トン〕								
炭坑	中国 陝西省・内モンゴル黄河流域。 坑内掘りながら低コスト（水平掘削可能）。 炭層3～5m、傾斜4度以下。								
生産量	<table> <tr> <td>2001年</td> <td>4000万トン</td> </tr> <tr> <td>2002年</td> <td>5000万トン</td> </tr> <tr> <td>2005年</td> <td>1億2000万トン</td> </tr> <tr> <td>2006年目標</td> <td>2億トン</td> </tr> </table> <p>・炭坑、鉄道、積出港などを急ピッチで整備中</p>	2001年	4000万トン	2002年	5000万トン	2005年	1億2000万トン	2006年目標	2億トン
2001年	4000万トン								
2002年	5000万トン								
2005年	1億2000万トン								
2006年目標	2億トン								
特徴	①低硫黄 ②低灰分 ③灰融点低い ④水分量普通								
	<p>2005年 輸出実績 : 2,300万トン(生産量の19%)</p> <p>2005年 主な輸出先 : 韓国、台湾、日本、香港 フィリピン、インド、トルコ</p>								

# 歴史の教訓に学べ

◎油断！ ⇒ オイルショックの教訓を忘れるな！

◎ガス断！ ⇒ LNGの備蓄を！

⇒ 石炭の有効利用

◎電断！ ⇒ 停電になって初めて分かる電気の有難さ！

➤ “そのうちに……” で結局やらず

➤ いざその時になって “あの時やっておけば……”

“歴史に学んで強い意志で実行” して初めて “真の賢者” に！



➤ 今こそイノベーションの時!

➤ 日本の将来のみならず  
世界に貢献できる技術を!

*Thank you!*

2006.09.28

➤ 単なる従来からの延長ではなく飛躍を!

