

地球環境科学(第4回)

CO₂回収型燃焼とNO_x, SO_xの同時低減 CO₂の隔離技術

岡崎 健
機械制御システム専攻
(機械科学科)

2004年11月11日(木)



地球温暖化問題を取り巻く最近の情勢

京都議定書の発効へ (2004年秋、ロシアが批准、2005.2発効)
第1期約束期間2008-2012年にCO₂排出量6%削減 (1990年基準)

高効率化だけでは到底対応できない削減量

原油価格の高騰 原子力安全性への懸念
石炭火力の増加

(石炭: 低価格、長期安定調達、日本の高度なCCT)

水素利用技術の急進展

(燃料電池自動車、水素供給ステーション、燃料電池コジェネ)

CO₂隔離技術(海洋、地中)への取り組みの展開

CO₂回収・隔離型石炭火力(酸素燃焼)の建設決定 2006-2008
(IHI, CCUJ – Australia, Queensland, CS Energy, 30 MW)

石炭・水素・CO₂隔離の統合化(CO₂-free CCT)への展開

再生可能エネルギー時代(2030-2050)までの中間シナリオの切り札？

化石燃料に依存しつつCO₂を排出しないエネルギーシステム

京都議定書

1997年12月の京都会議(COP3)で採択

○先進国の温室効果ガス排出量

先進国全体で少なくとも5%の削減を目標

各国毎に法的拘束力のある数値目標設定

対象ガス	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, HFC, PFC, SF ₆
吸収源	森林等の吸収源によるCO ₂ 吸収量を算入
基準年	1990年(HFC、PFC、SF ₆ は1995年)
目標期間	2008年～2012年
数値目標	日本－6%, 米国－7%, EU－8%等

日本の温暖化対策(COP3対応)

6%の削減目標達成に向けた地球温暖化対策の方針

▲2.5%	CO ₂ 、メタン、亜酸化窒素の排出抑制
±0%	エネルギー起源の CO ₂
▲0.5%	エネルギー起源以外(工業過程、廃棄物等から)の CO ₂ 、メタン、亜酸化窒素に係る対応
▲2.0%	革新的技術開発、国民各界各層の更なる努力
▲3.7%	土地利用の変化と森林活動による吸収
+2.0%	代替フロン等3ガス(HFC,PFC,SF ₆)の排出抑制
▲1.8%	京都メカニズム(排出量取引、共同実施、CDM)の活用

(CO₂の回収・隔離は含まれていない)

温暖化対策技術の相互比較

省エネルギーとエネルギー変換・利用効率の向上

複合発電、IGCC, IGFC, コジェネ (水素システム)

炭素分の少ない軽質燃料への燃料転換

石炭・石油→天然ガス(枯渇進行) (水素化)

再生可能エネルギーの大量導入

現状は極微量、長期的には必須 (水素:キャリア)

原子力エネルギーの利用拡大

社会的受容性が必要 (原子力→水素)

CO₂の人工的隔離(分離・回収・貯留隔離)

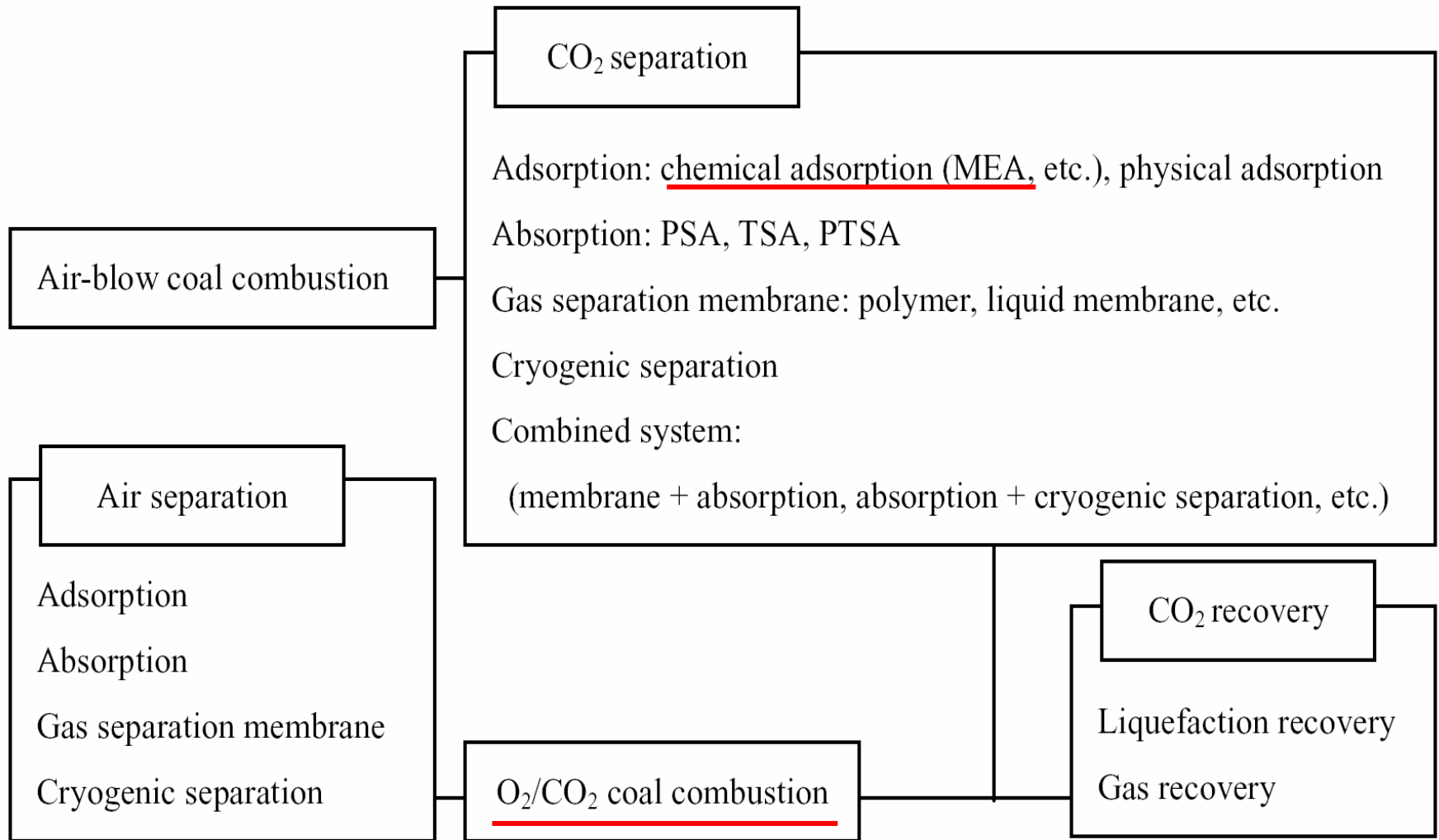
一見華麗ではないが、顕著な量的寄与
各種技術との統合化 (水素製造とCO₂隔離)

総合科学技術会議(2003年4月21日)

温暖化対策技術分類

大分類	中分類	小分類
省エネルギー	製造工程	
	製品	輸送機器
		産業機器
		電子機器（弱電）
		電力機器
		住宅・建築
新エネルギー	風力	
	太陽光	
	バイオマス	
	廃棄物	
	燃料電池	
	その他	
燃料転換	水素	
	アルコール	
原子力		
非エネルギー起源CO ₂ 、CH ₄ 、N ₂ O		
代替フロン等3ガス（HFC, PFC, SF ₆ ）		
<u>回収貯留</u>	分離回収	
	隔離	
吸収源	森林	
	その他	
その他		

Coal-fired Power Plant with Active CO₂ Recovery



CO₂ Recovery Plant by Chemical Absorption Method using MEA



*CO₂ Recovery Plant in Malaysia
(Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.)*



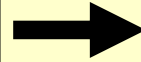
Main operation parameters

- 1) CO₂ Purity: More than 99.9 vol.%
(Dry base) Impurities are nitrogen and oxygen.
- 2) CO₂ Recovery Ratio: 90% at normal operation, however more than 97% CO₂ recovery was attained by increasing steam consumption.
- 3) Steam Consumption: 1.5 ton L.P. Steam / ton CO₂ recovered.
- 4) Amine Loss: 0.35 kg/ton CO₂ recovered.
- 5) Degradation: Degradation of KS-1 solvent is very slow. The plant has been operated for more than 5,700 hours, without the need to reprocess.



Conventional pulverized coal combustion

CO₂ concentration
in flue gas is about
13 %



Great energy consumption
to separate CO₂

O₂/CO₂ pulverized coal combustion

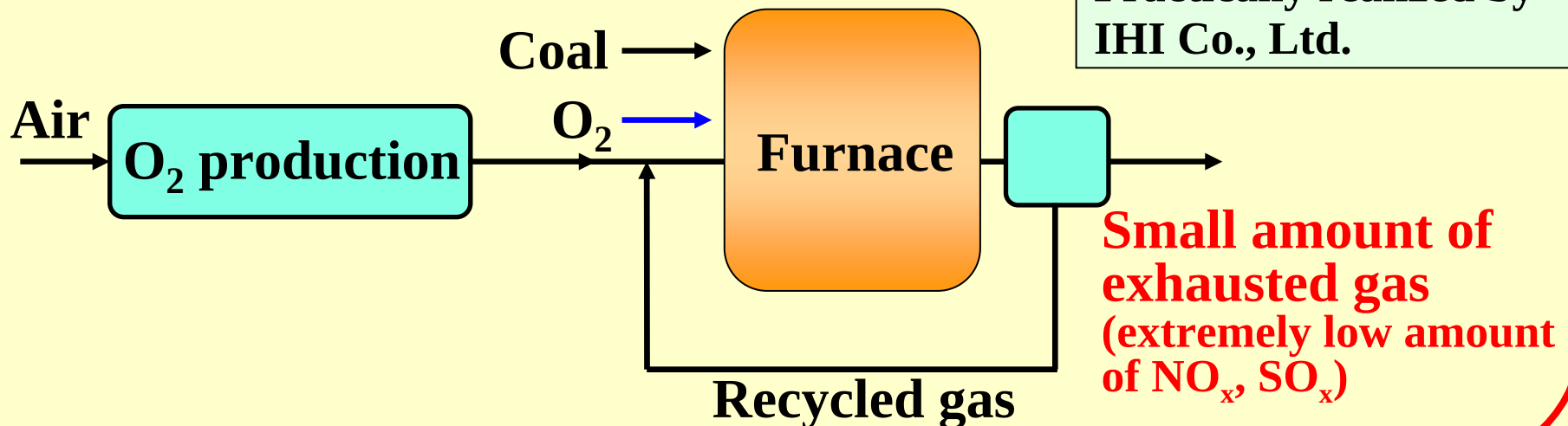
CO₂ concentration in
flue gas is enriched
up to 95 %



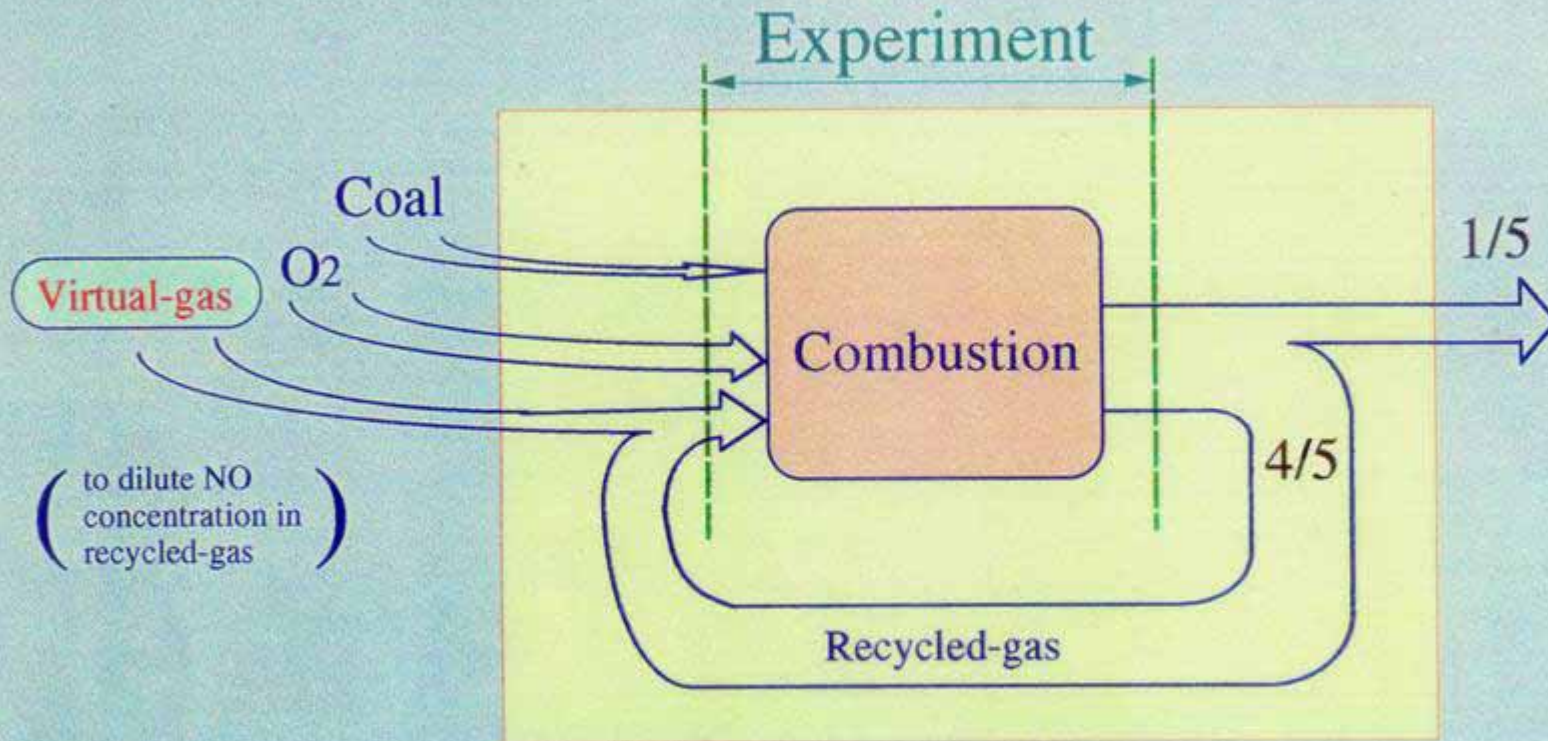
Easy and efficient CO₂
separation, recovery



Practically realized by
IHI Co., Ltd.



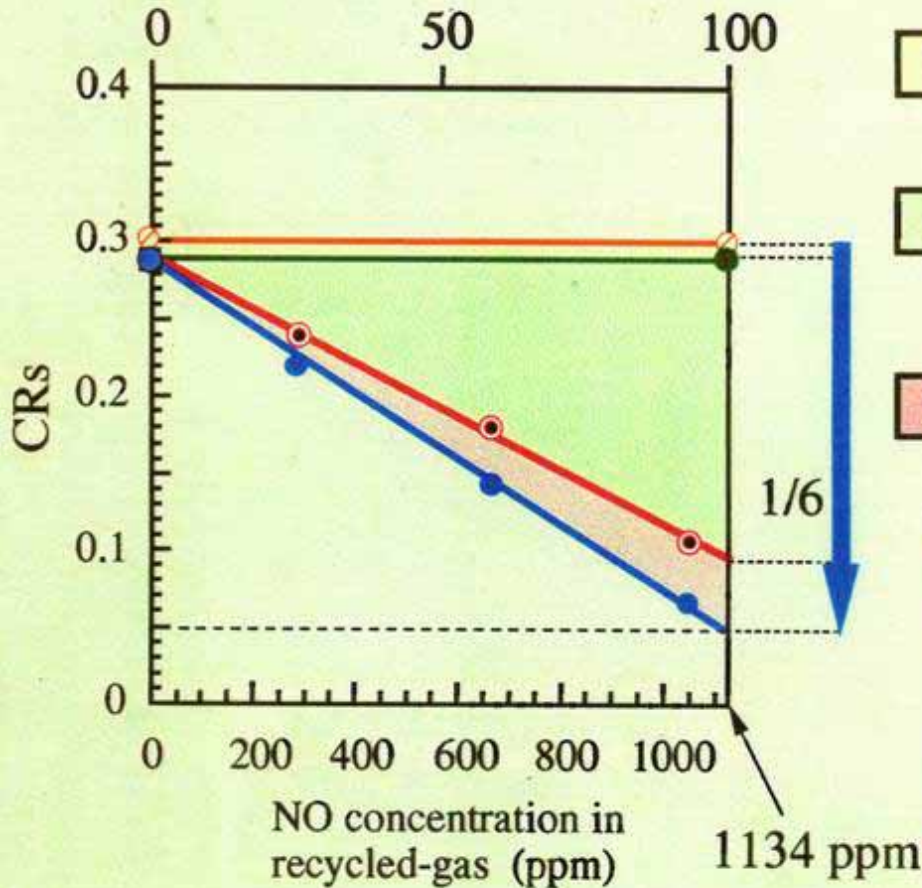
Gas flow diagram in CO₂ recycled coal combustion



$$\text{CRs} = (\text{NO in Recoverd gas}) / (\text{Fuel N})$$

(N atom mass)

Gas recirculation ratio (%)



- Decrease of system conversion ratio due to increase of CO₂ concentration **3.6%**
- Decrease of system conversion ratio due to the reduction of Recycled-NO in the furnace **78.1%**
- Decrease of system conversion ratio due to the interaction between Fuel-N and Recycled-NO **18.3%**

$$\lambda = 0.7$$

$$\beta = 0.2$$

$$T_{\max} = 1453 \text{ K}$$

$$\text{Fuel-N} = 1.22 \text{ wt\% (N atom mass)}$$

$$\text{CO}_2/(\text{CO}_2 + \text{Ar}) = 0.48 \text{ (vol.)}$$

Separation of the three NO reduction effects on the decrease of CRs from conventional air combustion to CO₂ recycled combustion

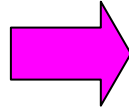
Summary of CR^* values for O_2/CO_2 coal combustion

λ (oxygen-fuel stoichiometric ratio)	0.7	1.0	1.2
NO concentration in exhaust gas	1130 ppm	1710 ppm	1490 ppm
CR^*	0.05	0.12	0.13
Ratio of CR^* to that of air combustion	17 % (1/6)	25 % (1/4)	26 % (1/4)

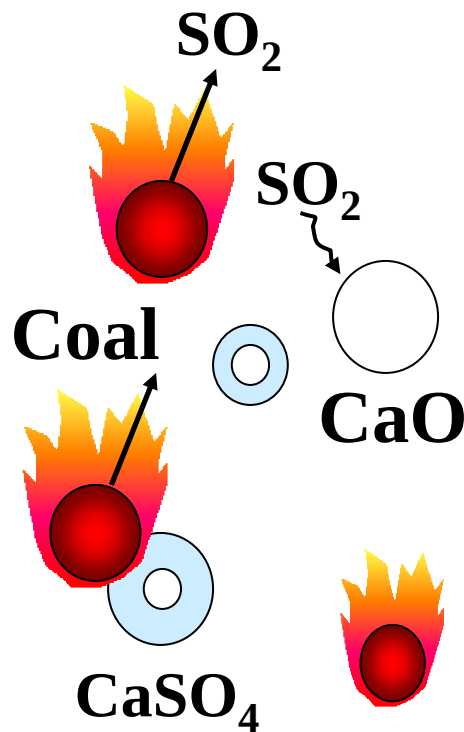
CR^* : conversion ratio from fuel-N to exhausted NO

$$\text{Ratio of } CR^* \text{ to that of air combustion} = \frac{CR^* \text{ in } O_2/CO_2 \text{ coal combustion}}{CR^* \text{ in conventional coal combustion in air}}$$

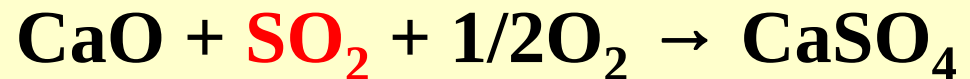
What is in-furnace desulfurization?



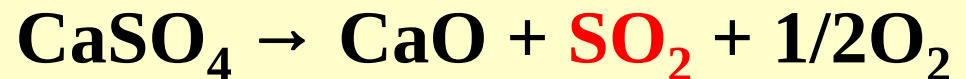
A very economical method of SO₂ removal through sorbent (脱硫剂, CaCO₃) injection into the furnace



Desulfurization reaction:

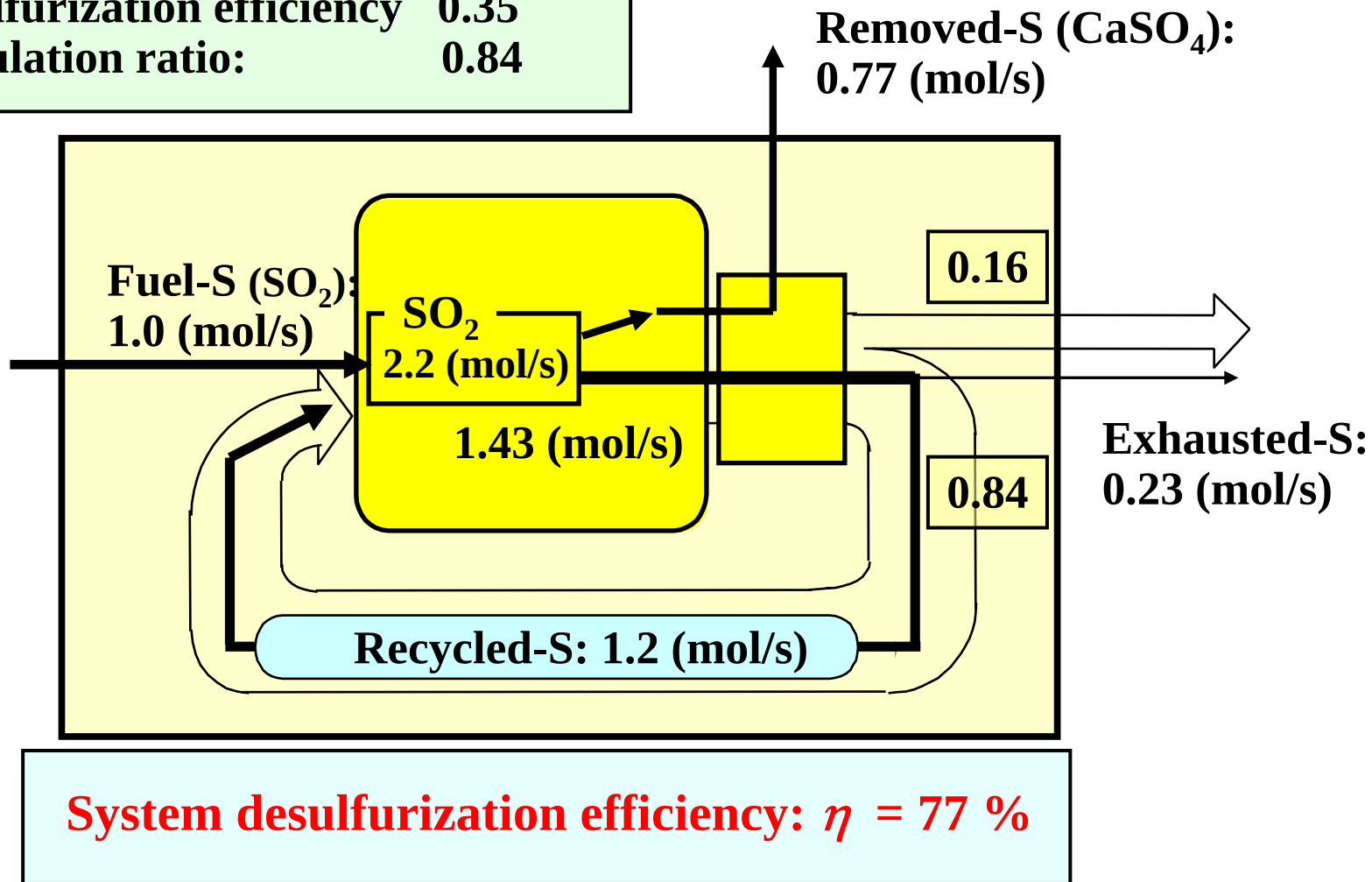


CaSO₄ decomposition:



The cause of decrease in desulfurization efficiency at high temperature

Local desulfurization efficiency 0.35
Gas recirculation ratio: 0.84



Coal property (wt. %, dry)

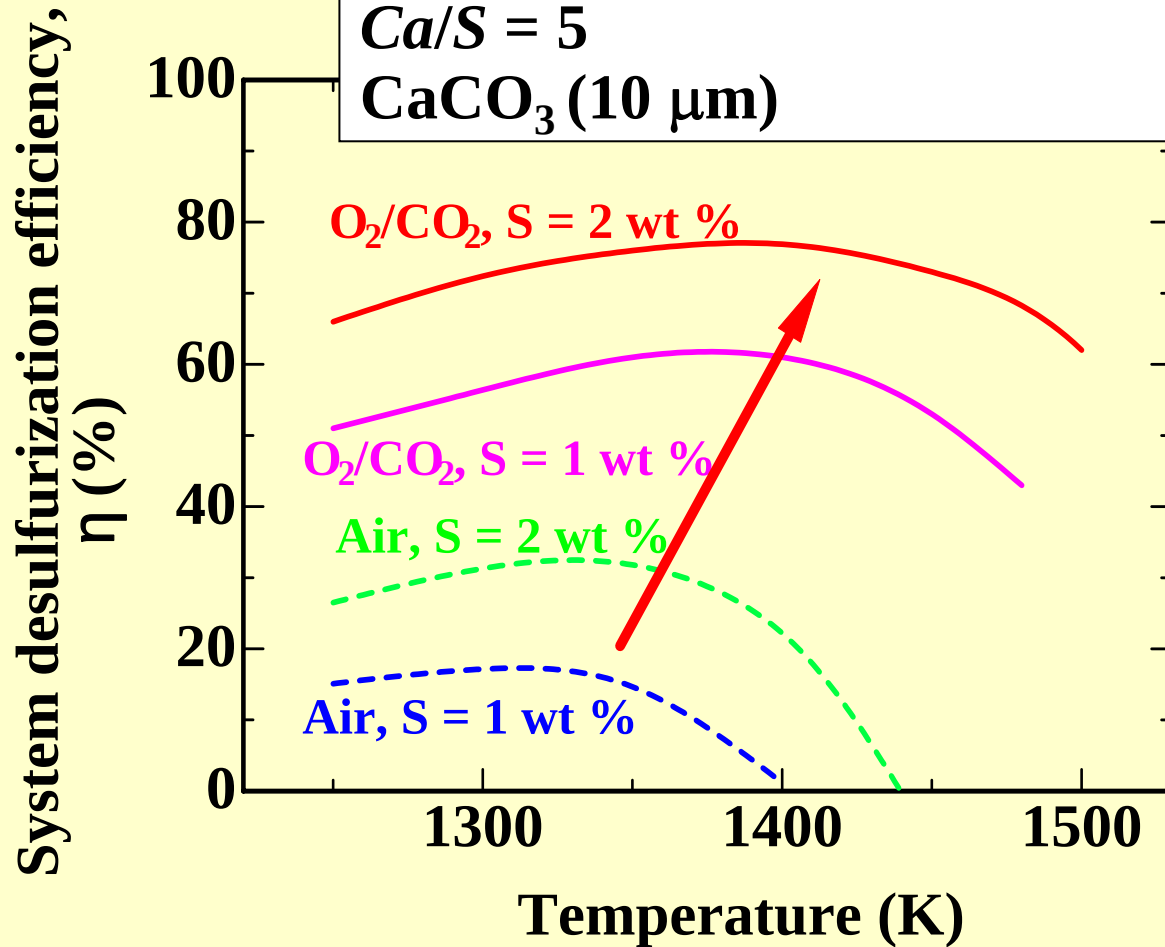
C: 71.1 O: 8.86
H: 4.23 N: 1.76
S: 2.00

Calculation conditions

Oxygen-fuel ratio = 1.2, Temperature = 1400 K
one pass residence time = 8 s, $\text{Ca}/\text{S} = 5$, CaCO_3 (10 μm)



Oxygen-fuel ratio = 1.2
One pass residence time = 8 s
 $Ca/S = 5$
 $CaCO_3$ (10 μm)



η at S = 1 wt %
six times higher

In-furnace
desulfurization
at high
temperature



Air: impossible

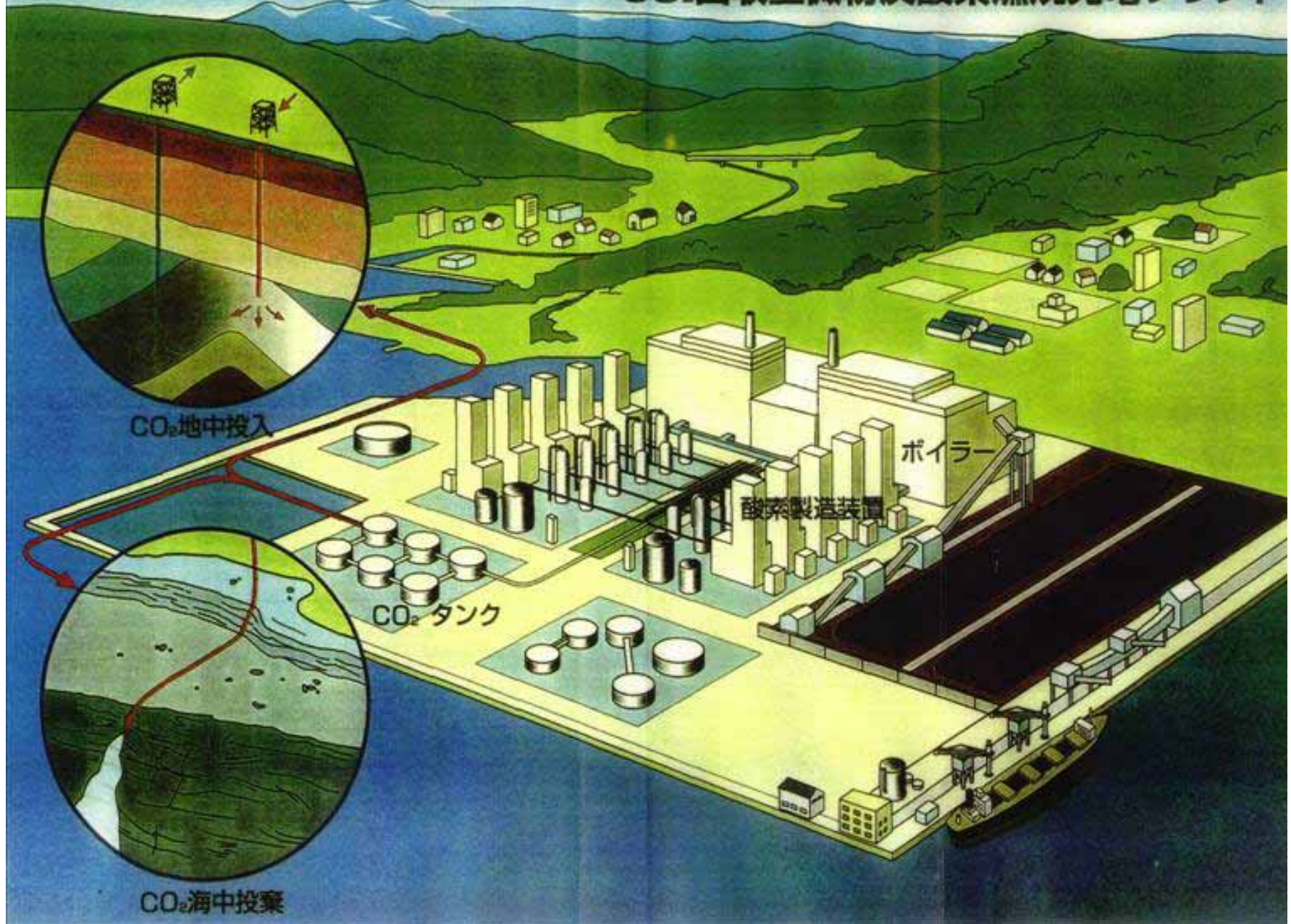


O₂/CO₂: **can
be realized**

η in O₂/CO₂ $\Rightarrow$ about four times higher
 $\Rightarrow$ high in a wide temperature range

Effect of temperature on system desulfurization efficiency

CO₂回収型微粉炭酸素燃焼発電プラント



石炭火力発電所のCO₂

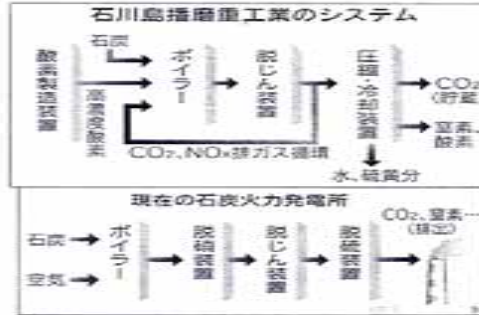
全量を埋設・貯蔵

石播など新技術

豪州にプラント

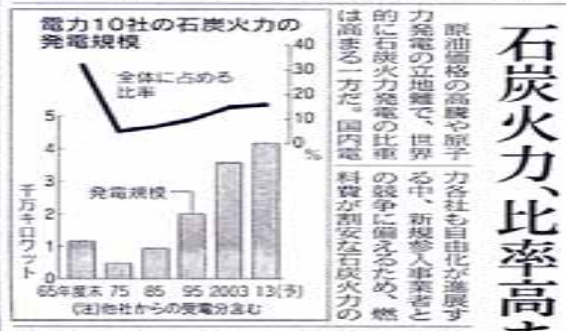
石川島播磨重工業と財団法人・石炭利用総合センター(東京・新宿)は、石炭火力発電所から大量に排出される二酸化炭素(CO₂)を効率的に回収する新技術を開発した。発生するCO₂の全量を回収し、液状にして地中に埋め込み、大気中への排出をゼロにする。第一号プラントを二〇〇六年のオーストラリアで建設する。先進国に二酸化炭素の削減を義務付けた京都議定書の発効を控え、CO₂固定化は国内排出量の三割近くを占める電力業界などの需要が見込めると判断。内外での普及を目指す。

新技術は「酸熱法」の最適システムとしてとられる手法を取り入れ、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)と、石炭火力発電所のCO₂回収プラントを建設するオーストラリアのブラントは、現地電力会社CSエナジー・タインスラ



▼二酸化炭素(CO₂)の固定化 石油や石炭などの燃やした際に生じるCO₂を排ガスから分離して溶解・吸収させたり、回収した後、大気中に

▼酸熱法 CO₂固定化法の一つで、ハロゲン化炭素化合物(HFC)とCO₂を反応させて、CO₂を吸収する。吸収したCO₂は、脱炭酸装置で回収できるため、脱炭酸装置も必要。



原油価格の高騰や原子力発電の立地難で、世界的に石炭火力発電の比率が高まる一方だ。国内電力料金が割安な石炭火力の

石炭火力、比率高

石炭火力発電所から発生するCO₂を地中に貯蔵する。石炭に埋め込まれる炭素が酸熱法と結びついてCO₂濃度が七〇%以上に高まり、回収が容易となる。回収したCO₂は大気中に排出せず、水で冷却して大気中の約二倍程度のCO₂を吸収し、パイプラインで地中や海中に隔離・貯蔵する。

排ガスの捕獲過程で炭素化合物(N₂O)が空気に変わるので、脱炭酸装置が必要。炭素化合物(SO₂)も主成分・冷却過程で回収できるため、脱炭酸装置も必要。

新技術の採用を働きかける。改修などの初期投資や運用費などの合計額は、年換算で三十八億円程度(二〇〇四年の日本電力会社平均)と見られる。CO₂固定化の手続きは、CO₂固定化の手法で有力視されている。石炭火力発電所の場合、酸熱法に比べて、約三分の一のコストで済むと試算されている。

国内の巨額投資の石炭火力発電所の場合、酸熱法に比べて、約三分の一のコストで済むと試算されている。

日本経済新聞
2004年10月16日

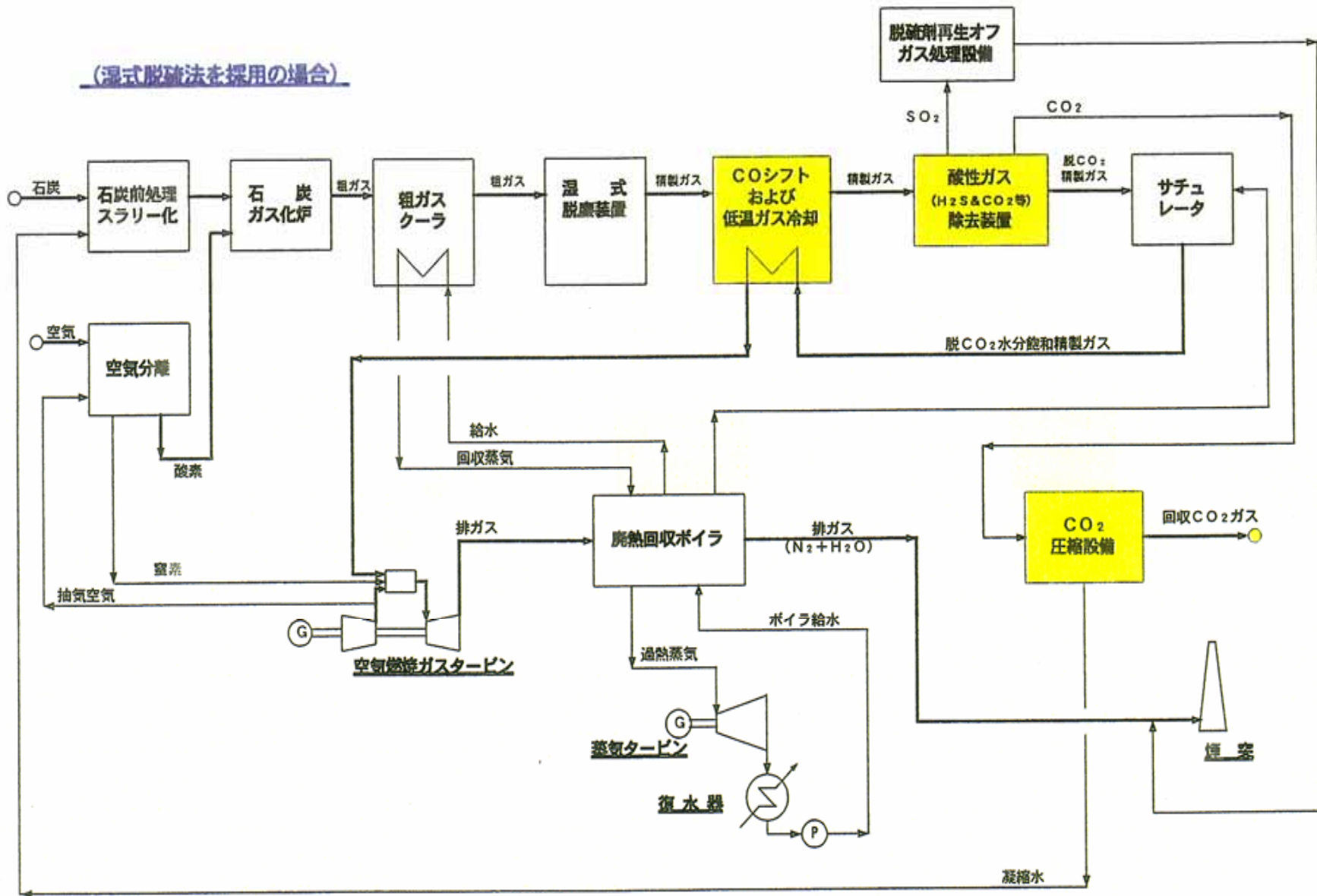
	Conventional combustion		O_2/CO_2
	Without CO_2 recovery	MEA*	
CO ₂ recovery rate	-	90 %	90 %
Gross capacity	1000 MW	840 MW	1000 MW
Net capacity	946 MW	672 MW	720 MW
Gross efficiency	41.4 %	34.7 %	42.9 %
Net efficiency	39.1 %	27.8 %	30.9 %
O ₂ production / CO ₂ liquefaction	-	-	147 / 108 MW
CO ₂ adsorption / CO ₂ liquefaction	-	38 / 72 MW	-
Other utilities	54 MW	58 MW	25 MW

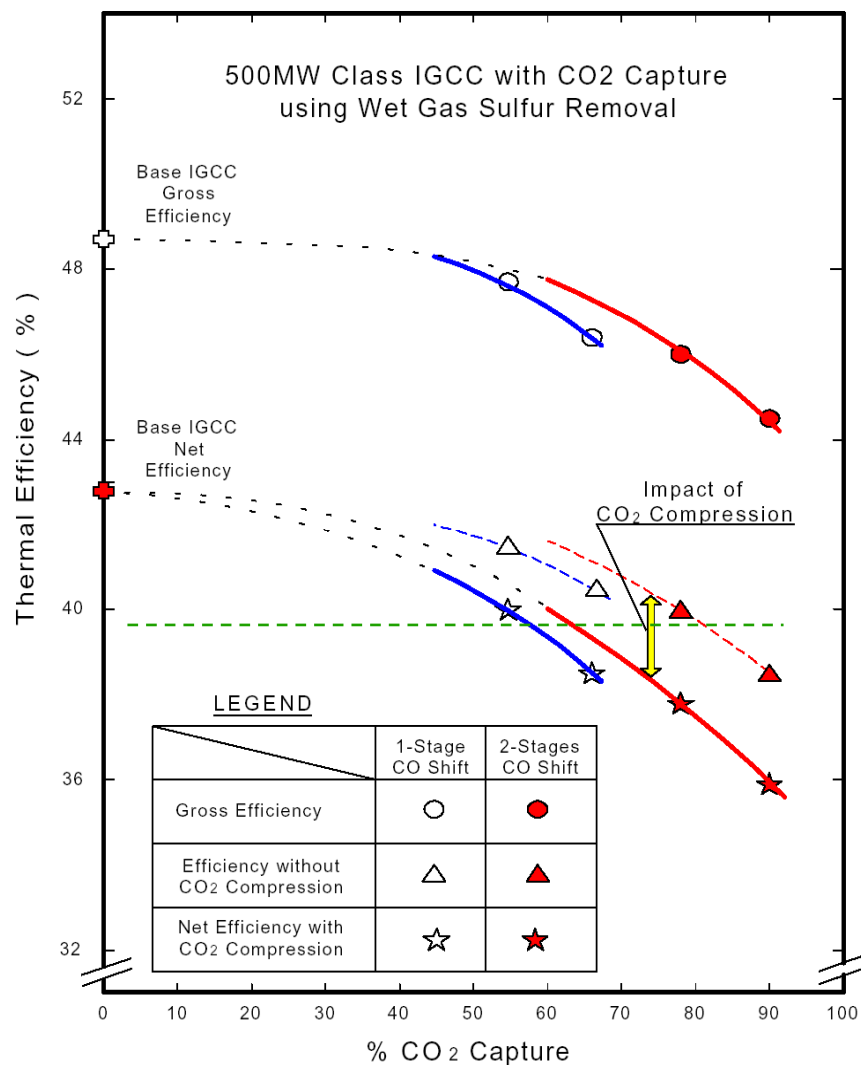
•MEA: Monoethanolamine, a typical absorbent used for CO₂ recovery in conventional coal combustion

Energy efficiency of O₂/CO₂ pulverized coal combustion

(the largest energy loss: oxygen production) ← (electrolysis for hydrogen)

(湿式脱硫法を採用の場合)



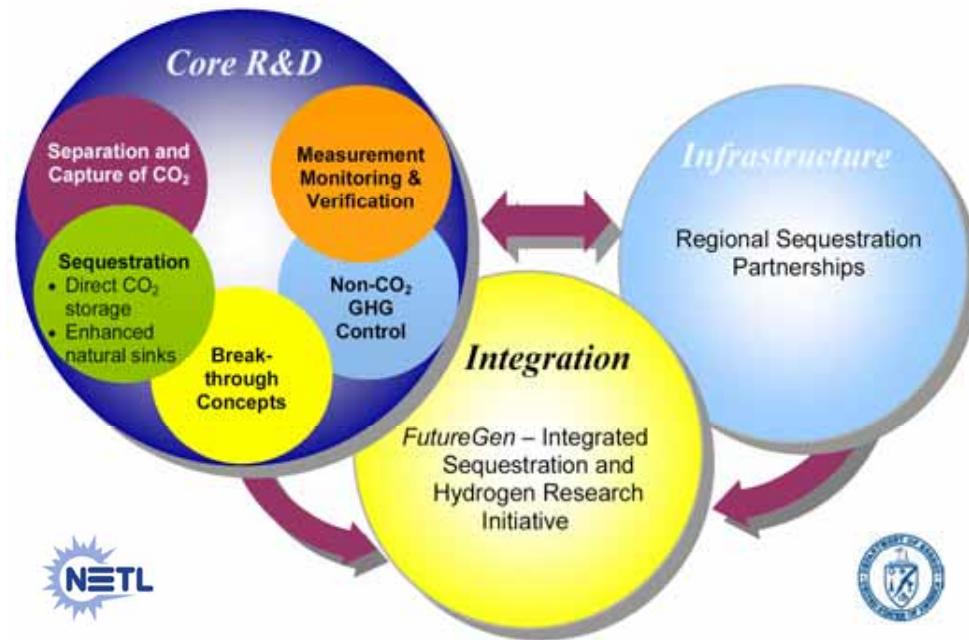


CO₂回収型IGCCの正味効率

発生するCO₂の70%を回収して、従来の微粉炭火力並みの効率を維持

CO₂ Sequestration (US strategy)

Technology Roadmap and Program Plan (March, 2003)



US's Share of Fossil Fuel Reserves

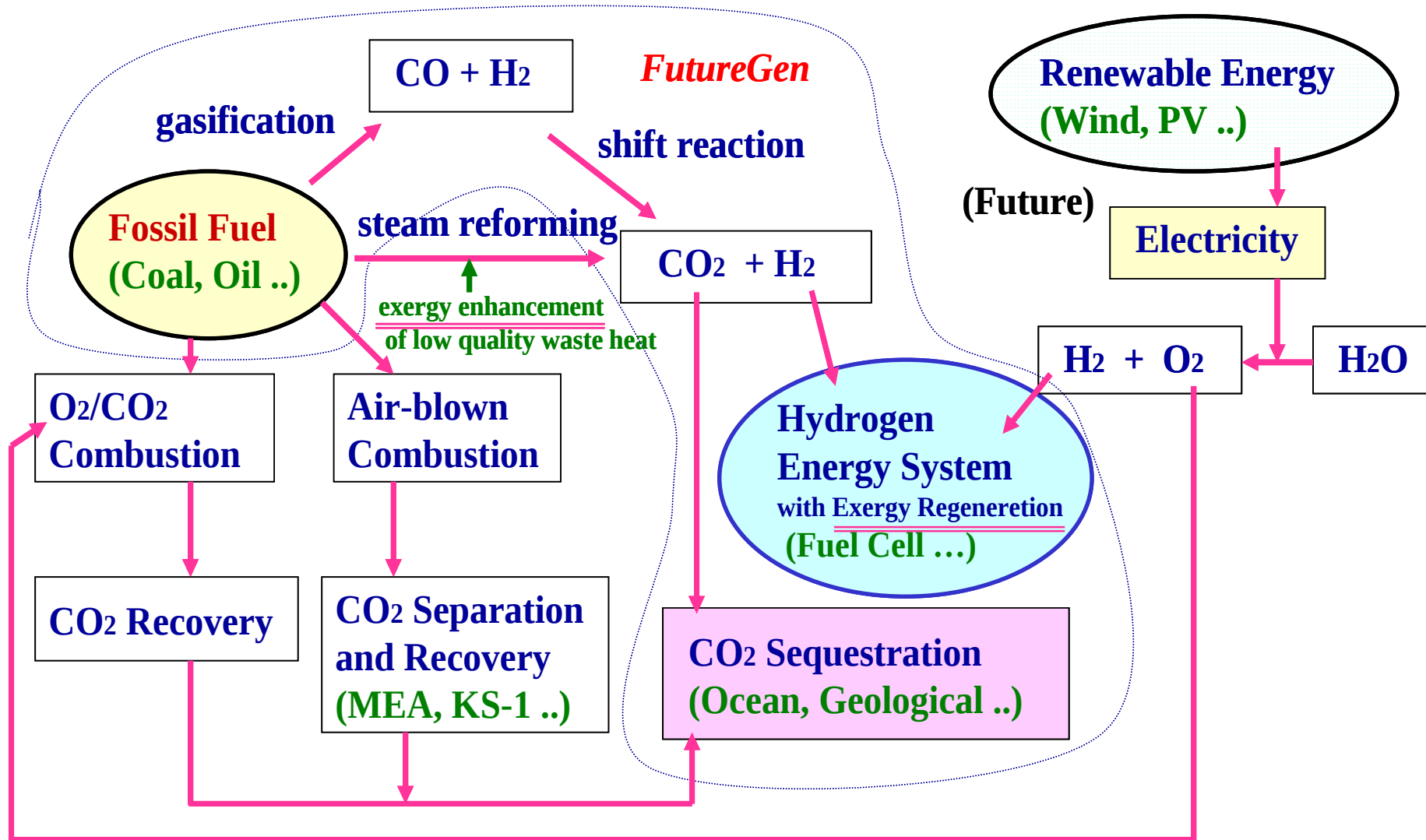
• Coal	: 25 %
• Oil	: 3 %
• Natural Gas	: 3 %
	(Russia : 30 %)

US's Energy Consumption/head

- five times of world average

- **The Vision 21 Program** : The President Clinton, 1999
(gasification, CO₂ separation-recovery-sequestration, production of hydrogen alcohol, etc.)
- **Climate Change, Hydrogen Initiative** : 1.2 B\$/5years, The President Bush, Jan. 28, 2003
- **FutureGen Project** : 1.0 B\$/10years, DOE, Feb. 27, 2003
(prototype coal plant combined with CO₂ recovery-sequestration and hydrogen (275MW))
- **International Carbon Sequestration Leadership Forum** : signed, June 25, 2003
(14 countries : USA, China, Russia, Japan, India (main 5) and others)





石炭・水素・CO₂隔離統合型地球温暖化対策

我が国における関連プロジェクト (相互リンクほとんど無し)

・CO₂回収型石炭利用技術開発

環境調和型石炭燃焼技術(酸素燃焼技術)

(O₂製造ネック)

NEDO-CCUJ:1996年度 ~ 1999年度

CO₂/O₂燃焼、IGCC+CO₂回収・水素リッチ化

・CO₂海洋隔離技術開発

二酸化炭素の海洋隔離に伴う環境影響予測技術研究開発

NEDO-RITE I:1997年度 ~ 2001年度、II:2002年度 ~

中層溶解、深海底隔離、海洋環境影響、国際共同実験

・水素利用技術開発

(電解:O₂有効利用)

WE-NET(水素利用国際クリーンエネルギーシステム技術)

NEDO-IAE・ENAA I:1993年度 ~ 1998年度、II:1999年度 ~ 2002年度

・水素燃料電池自動車・水素ステーション実証試験

JHFC (Japan Hydrogen and Fuel Cell Development Project)

METI-JARI:2002年度 ~

Various IGCC Related Projects in Japan

- **Entrained Flow Coal Gasification Pilot Plant (1985 -1995)**
200 ton/day, Air-blown, at Nakoso
- **Entrained Flow IGCC Plant (now under construction)**
250 MW, Air-blown, Efficiency:43-44 %, at Nakoso
- **Entrained Flow Gasification Pilot Plant (HYCOAL) (1988-1994)**
50 ton/day, Hydrogen Production, Oxygen-blown
- **IGFC Pilot Plant (EAGLE) (1995-2006)**
150 ton/day, Oxygen-blown, at Wakamatsu
- **ICFG Pilot Test (at Sodegaura)**

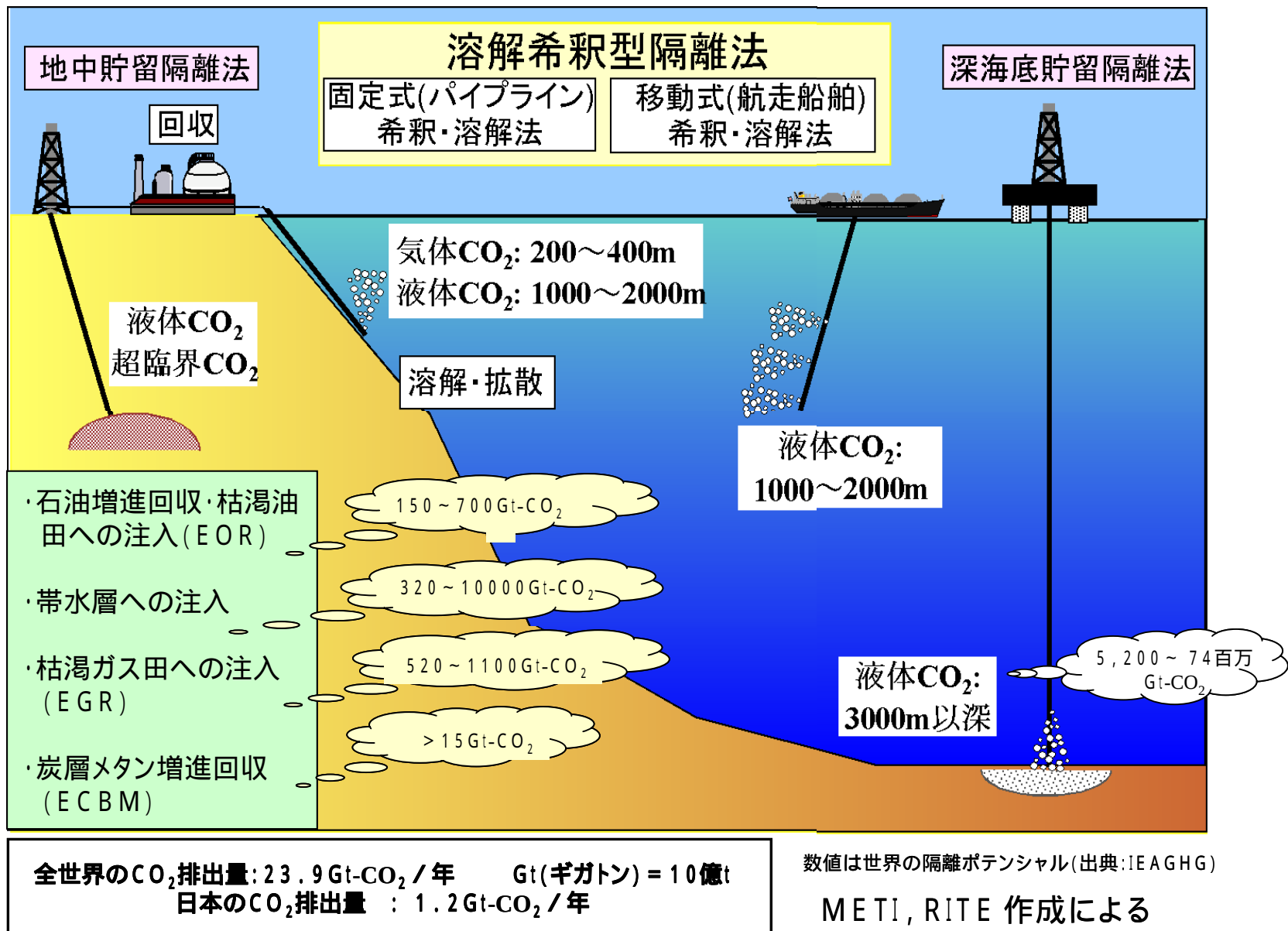
IGCC: Integrated Coal Gasification Combined Cycle

IGFC: Integrated Coal Gasification Fuel Cell Combined Cycle

EAGLE: Coal Energy Application for Gas, Liquid & Electricity

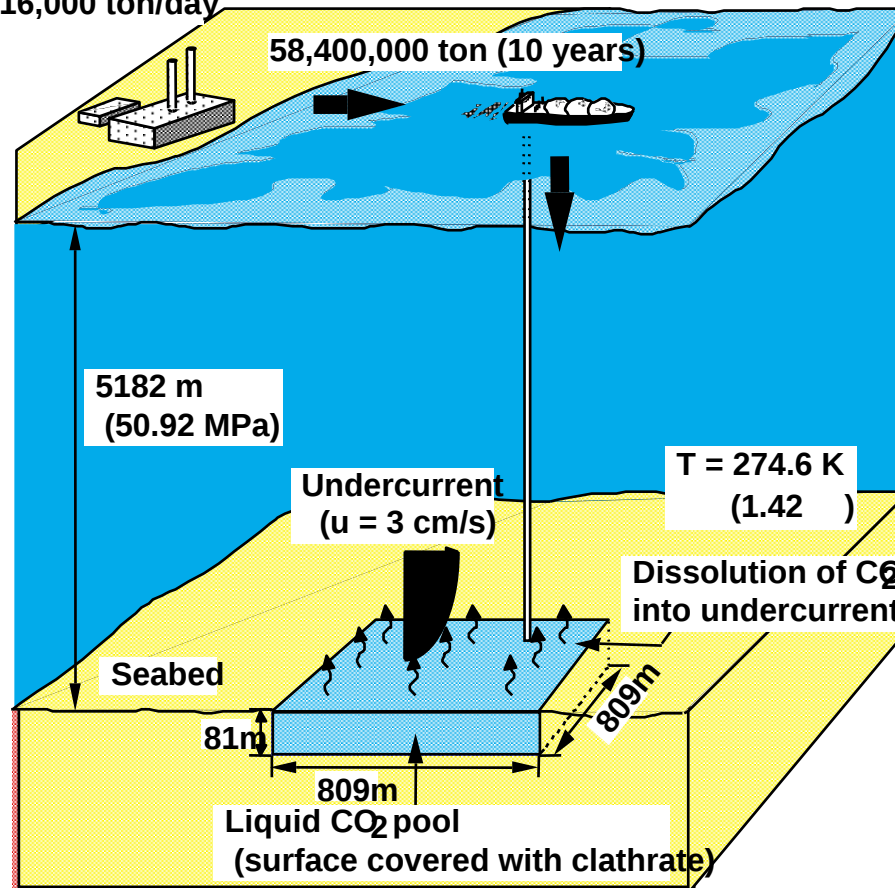
ICFG: Internally Circulated Fluidized Bed Gasification

二酸化炭素隔離技術の概要



1 GW Fossil fuel fired power plant

CO₂
16,000 ton/day



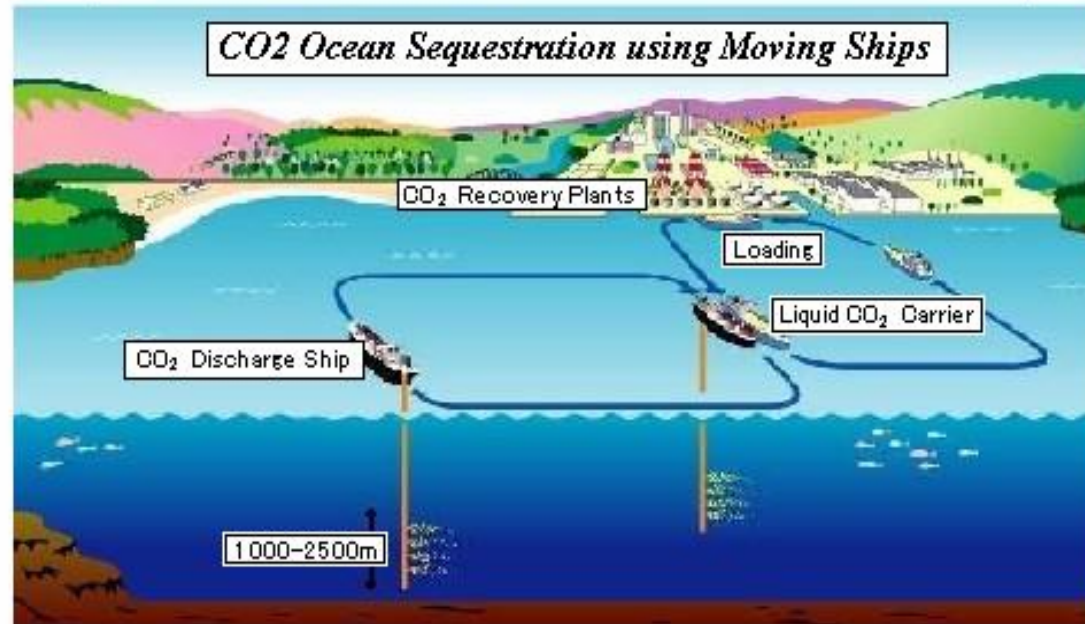
CO₂ Sequestration on the Seabed of Deep Ocean (Lake Type)

Ocean Sequestration of CO₂

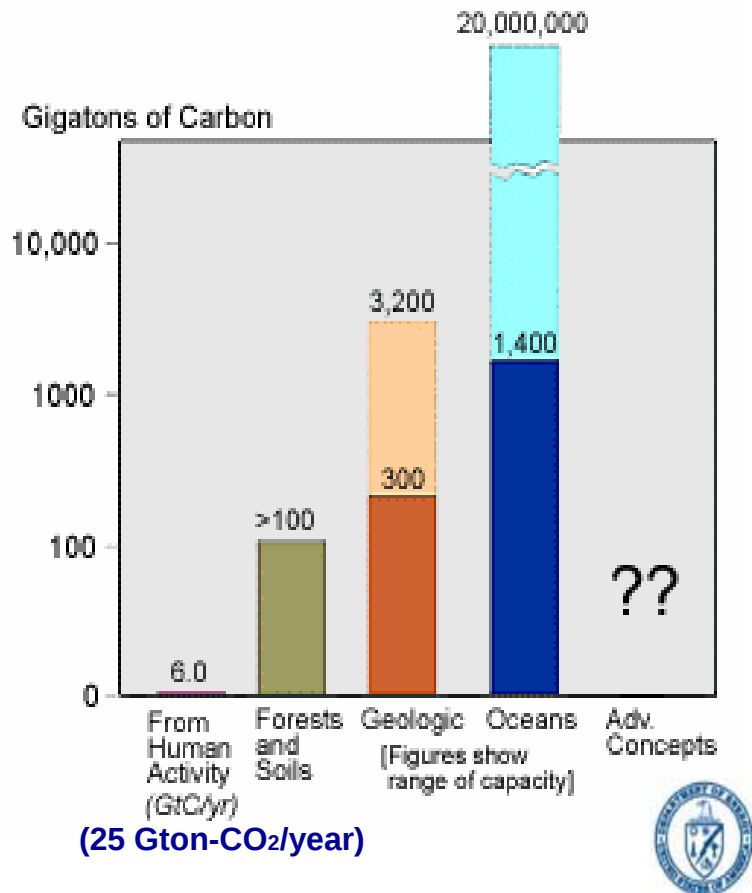
Moving Ship方式要素技術の開発

1. 希釈ノズルの開発
2. 放出パイプの開発
3. 放出海域の航走技術開発
4. 放出海域の希釈モデル開発
5. モニタリング技術の開発

CO₂ Ocean Sequestration using Moving Ships

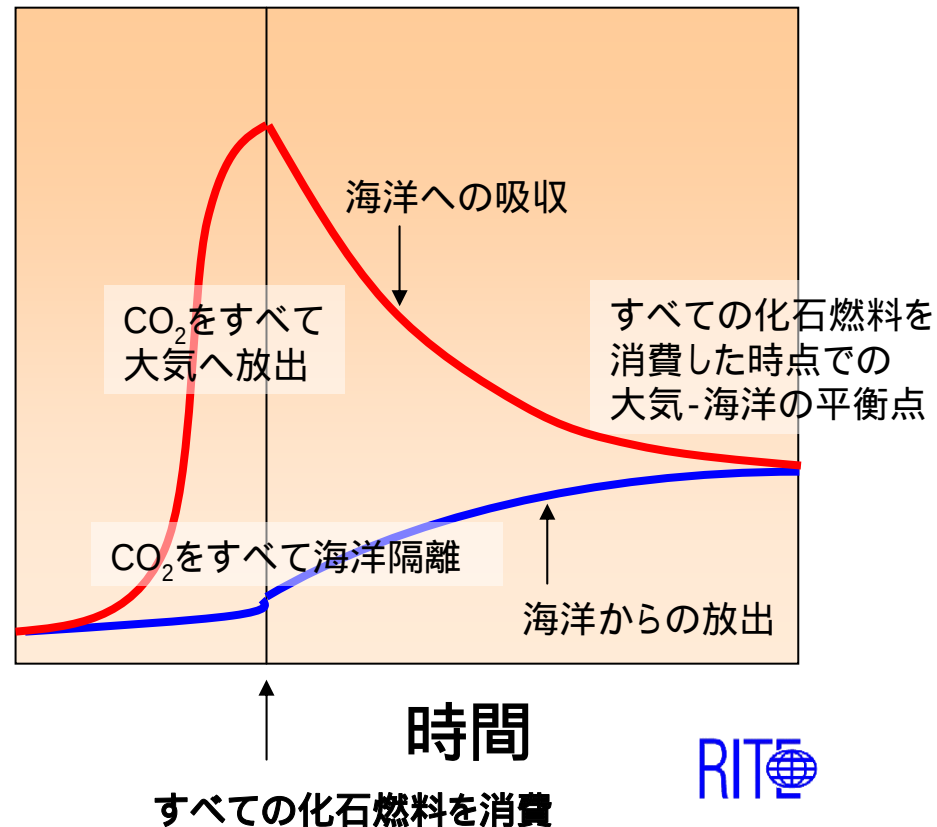


SEA-COSMIC : Study of Environmental Assessment for CO₂ Ocean Sequestration for Mitigation of Climate Change



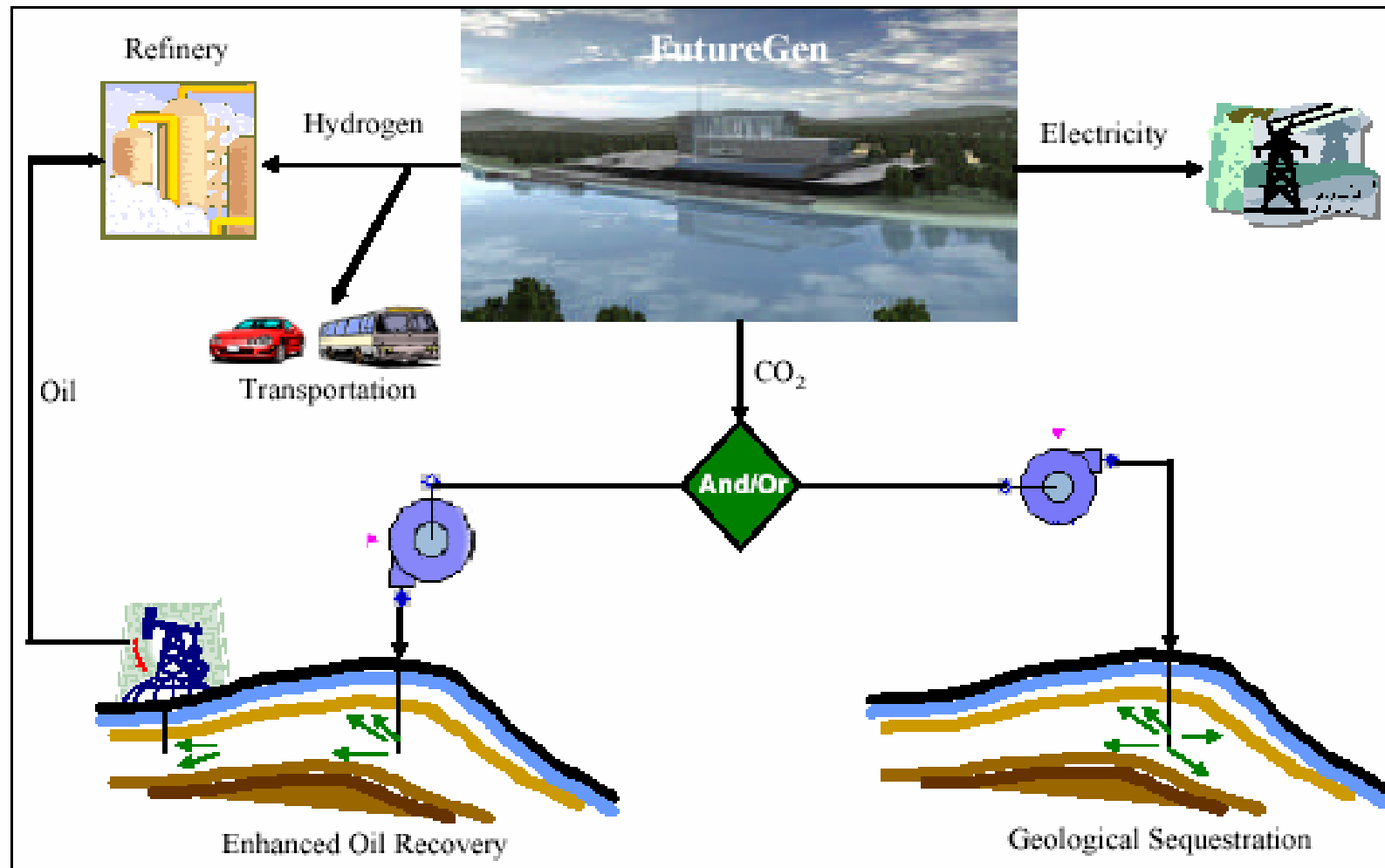
Huge Capacity of Ocean for CO₂ Sequestration

大気中のCO₂濃度



The Essential Meaning of Ocean Sequestration of CO₂

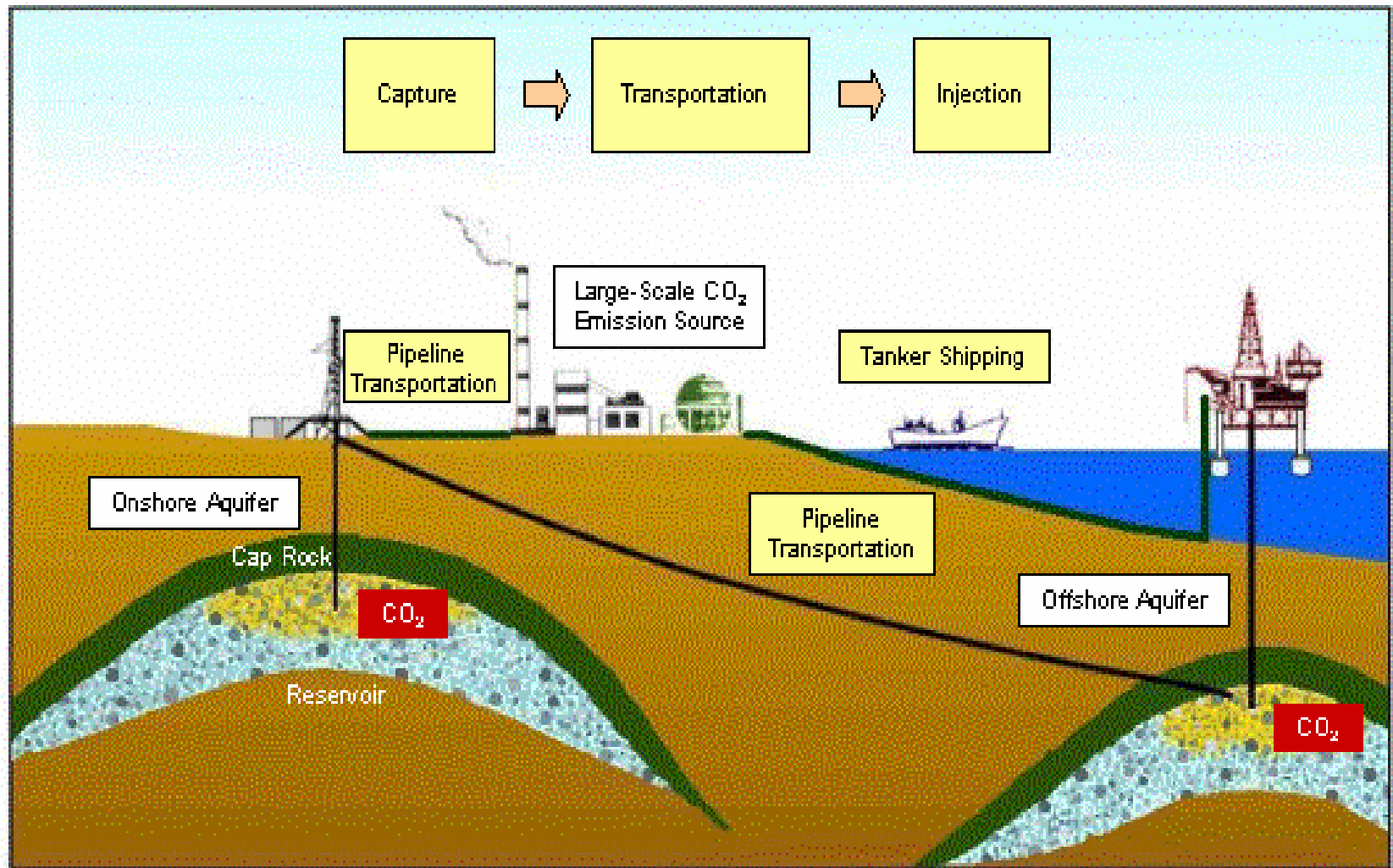
FutureGenのコンセプト

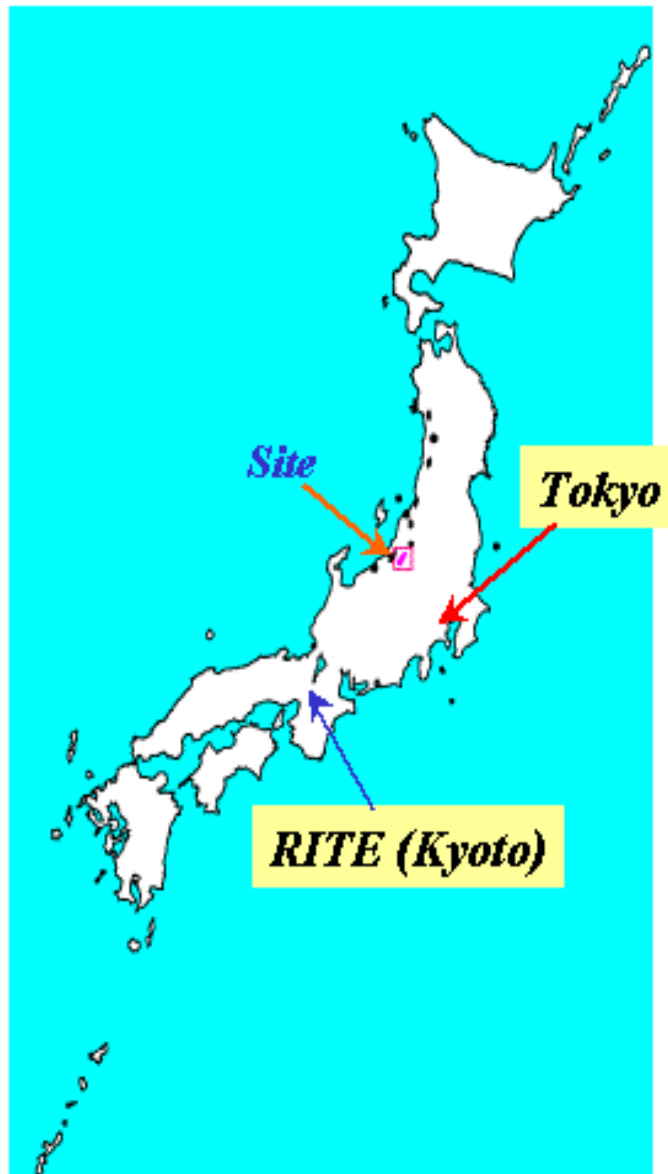


(出典: C.L.Millerら、第12回ピッツバーグ石炭会議(2003)論文より)

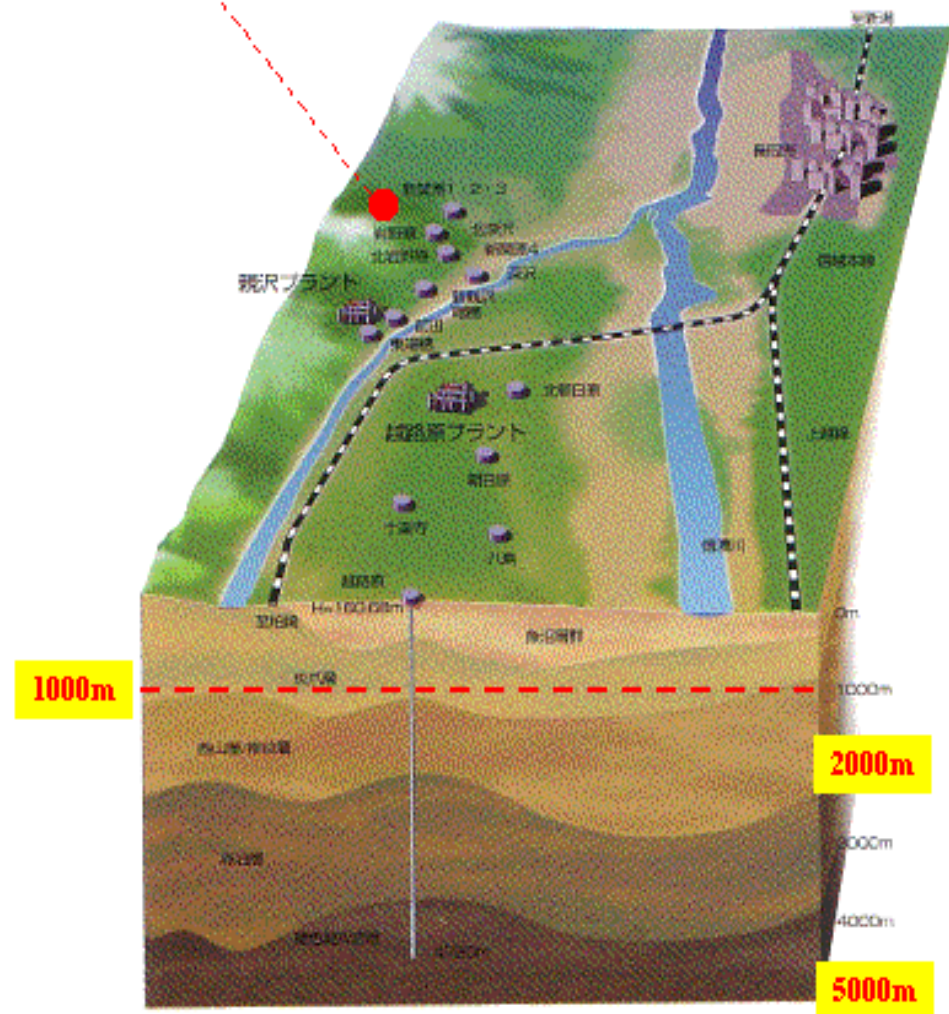
[CCUJ 原田による]

Geological Sequestration of CO₂





Teikoku Oil, Niigata Prefecture



CO₂ Injection Experiment in Niigata Prefecture RITE

Project Integration and World Collaboration

Council for Science & Technology Policy,
Cabinet Office

Coal Utilization with CO₂ Recovery CCUJ

O₂/CO₂ Coal Combustion
CO₂ Capture from IGCC
HyPr-RING for Hydrogen Production

CO₂ Sequestration

Ocean Sequestration
Geological Sequestration

Hydrogen Energy System

FC-Vehicles and H₂ Stations
Distributed Co-generation System

(1.2 B\$/5years, 約290億円/year)

US (Hydrogen Initiative, FutureGen), Europe, etc.
and developing countries

RITE

ENAA, IAE
JARI-JHFC

(307億円, 250 M\$ for FY2003)

METI
w/o
NEDO

consistent strategy

INTEGRATION

COLLABORATION

to improve our global environment for future generations