

解説

地球環境とエネルギー

山田興一

(受取日：2005年7月1日，受理日：2005年8月7日)

Global Environment and Energy

Koichi Yamada

(Received July 1, 2005; Accepted August 7, 2005)

Extensive usage of fossil fuels is causing CO₂ emission increase and rapidly increasing the atmospheric CO₂ concentration which causes the global warming. The atmospheric CO₂ concentration should be stabilized at a low level to mitigate the global warming.

Herein, projections of the world population, economic growth, energy consumption and energy sources in 100 years, which affect the CO₂ emissions, are explained. CO₂ mitigation measures, especially, carbon capture and storage technologies which are considered to be necessarily implemented for a world based on fossil fuels are described.

1. はじめに

エネルギー消費量は人口の増加，社会・経済の発展とともに急速に増加しており，商業燃料として消費された量は年間90億toe（石油換算トン）にもなっている。このエネルギーの90%近くは化石燃料によって賄われている。太陽光発電，風力，地熱，バイオマスなどによる新エネルギーの占める割合は水力を加えても5%以下である。この年間消費エネルギー量90億toeの他に，約10億toeのバイオマスエネルギーが非商業燃料として消費されているが，そのエネルギー利用効率は10%以下の低い値である。

このように化石燃料を大量に消費しているため，資源枯渇，環境問題が引き起こされている。これら問題を解決するためには再生可能エネルギー利用やエネルギー有効利用を推進する必要がある。現在世界各国で数多くの新エネルギー技術，システムの開発が行われ，その実用化も進められている。しかし，経済的，社会的な障壁があるためにその使用量や実用化速度は低く，また人間活動の活発化が進んでいるため持続性社会構築の方向ではなく逆の方向に進

んでいるのが現状である。

それら障壁は今後の技術的開発によりある程度乗り越えることが可能である。しかし，どうやって障壁を乗り越え，再生可能エネルギーやクリーンエネルギーの開発，適用を促進するかの戦略は総合的なものの必要がある。

環境問題の中でも地球温暖化につながるCO₂問題はその解決が困難であるだけでなく，その解決法はエネルギー問題とも密接に関連する。そのためここでは今後のエネルギー消費量の推移，それに伴うCO₂排出量の変化，大気中CO₂濃度安定化のための対策，CO₂分離回収・隔離技術の現状などについて述べる。

2. 21世紀の温室効果ガス排出シナリオ

21世紀のエネルギー技術を展望するためには，エネルギー消費量が今後どう変化するか知る必要がある。そのためには，世界の人口，経済成長，社会状態，技術水準などがどうなるか明らかにせねばならない。しかし，それらの因子は互いに関係し合い，仮定の置き方で，結果はどうにでも変わってしまう。Intergovernmental Panel on Climate

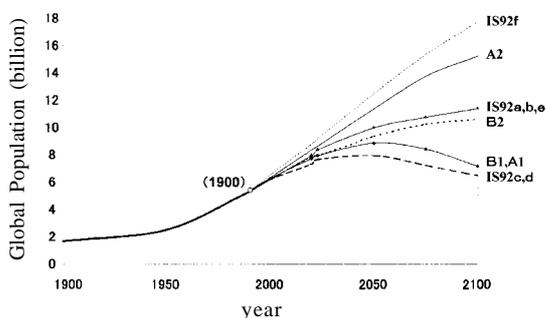


Fig.1 World population 1)

Change (IPCC) が各国からの専門家を集めてまとめた Special Report on Emissions Scenarios (SRES)¹⁾が、エネルギー技術を考える上で大変参考になる。その概要を以下2.1～2.7に紹介する。

2.1 SRES シナリオ分類

数多くのシナリオが検討されているが大きくはA1, A2, B1, B2の四つに分類される。その概要は次の通りである。

- A1：経済は成長し、世界人口は急激に増加するが、それらは2050年にピークとなり、その後低下する。新技術は急速に世の中に取り入れられる。そのため1人当たり収入の地域格差も小さくなる。
- A2：地域各々に不均質な世界を想定している。各地域の特長が保たれたままの世界が続くため、世界人口は増加し続け、経済成長も地域によって異なる。新技術の世界各地への応用も進展が遅い。
- B1：経済成長、人口変化のパターンはA1に似ている。しかし経済構造は急激にサービス、情報分野の方向へ変化して行く。そのため、脱物質化が進み、クリーンな省資源技術の導入が進む。経済、社会、環境持続性などの問題解決には地球規模で対処する。
- B2：経済、社会、環境持続性問題の解決は地域別に図られる。人口は成長し続けるがA1よりは低い値である。経済成長は中位で、技術変化速度はA1, B1より遅いが、技術の拡散は進む。

Table 1 Economic Growth Rates (% per annum).

Region	1950-1990		1990-2050				1990-2100			
	Scenario		A1	A2	B1	B2	A1	A2	B1	B2
OECD90	3.9	2.0	1.6	1.8	1.4	1.8	1.6	1.5	1.1	
REF	4.8	4.1	2.3	3.1	3.0	3.1	2.5	2.7	2.3	
IND	3.9	2.2	1.6	1.9	1.6	2.0	1.7	1.6	1.3	
ASIA	6.4	6.2	3.9	5.5	5.5	4.5	3.3	3.9	3.8	
ALM	4.0	5.5	3.8	5.0	4.1	4.1	3.2	3.7	3.2	
DEV	4.8	5.9	3.8	5.2	4.9	4.3	3.3	3.8	3.5	
WORLD	4.0	3.6	2.3	3.1	2.8	2.9	2.3	2.5	2.2	

REF: Central and Eastern Europe and Newly Independent States of the former Soviet Union
 IND: Industrial(ized) countries
 ASIA: Asia excluding the Middle East
 ALM: Africa, Latin America and Middle East
 DEV: Development countries

Table 2 Primary Energy (EJ) by World and Regions (10¹⁸ J = EJ).

Region	Scenario	1990				2050				2100			
		A1	A2	B1	B2	A1	A2	B1	B2	A1	A2	B1	B2
OECD90	151-182	267	266	166	236	397	418	126	274				
REF	69-95	105	93	64	97	139	155	39	125				
IND	227-252	370	359	230	334	536	573	164	399				
ASIA	49-79	440	335	272	319	838	581	154	521				
ALM	35-49	538	278	312	217	852	563	196	437				
DEV	84-123	977	612	583	536	1639	1144	350	959				
WORLD	326-368	1347	971	813	869	2226	1717	514	1357				

2.2 21世紀の人口

60億人を超えて21世紀に突入した人口は21世紀末にどの程度になるのであるかは仮定の置き方が大きく変わる。国連統計でも2100年時の人口推定値は60～160億人の巾がある。しかし、各々の推定値の値の中間値は2100年時に100億人でほぼ一致している。四つのSRESシナリオで人口がどう変化しているかをFig.1¹⁾に示す。2100年時の人口はA1, B1の72億人からA2の150億人と2倍以上の開きがある。

2.3 21世紀の経済成長率

各シナリオに対応する1990～2100年までの各地域、世界の経済成長率変化をTable 1¹⁾に示す。1950～1990年の世界平均年率4.0%の経済成長率に比べると低い値であるが、21世紀も世界平均で年率2.2～2.9%の成長が見込まれている。

2.4 21世紀の一次エネルギー消費量

各シナリオに対する2050年、2100年の各地域、世界の

【用語解説】

IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change (気候変動に関する政府間パネル)の略語であり、1988年に世界気象機関(WMO)と国連環境計画(UNEP)が共同で設立した国連の組織で、人為的な気候変化に関する最新の自然科学的及び社会科学の知見をまとめ、地球温暖化防止施策に科学的な基礎を提供することを目的とした政府間機構である。

石油換算トン(toe): エネルギー源として化石燃料(石油、石炭、天然ガス等)、原子力、水力・バイオマスなど多くある。これらの量を換算するため燃焼熱、出力エネルギーを石油1トンの燃焼熱に換算したトン数である。尚、石油の燃焼熱としては1トン当たり107 kcal (4.186 × 10⁷ KJ)を基準にしている。

年間一次エネルギー消費量を Table 2¹⁾ に示す。2100年の世界の年間消費量は514 ~ 2,226EJ (EJ = 10¹⁸ ジュール) と1990年の1.5 ~ 6.4倍にも増加することになる。

2.5 21世紀のエネルギー供給形態

増大するエネルギー消費量を賄うエネルギー源がどのように変化するかを見るため、各シナリオについてのエネルギー供給形態の2100年までの推移を Fig.2¹⁾ に示す。2100年には石炭、バイオマスなど固体エネルギー源の直接使用割合が10%以下に減少していることは各シナリオに共通している。敷設網による電力、ガス、熱などの供給が50~85%と多く、残りが石油、アルコールなど液体で供給される。

2.6 21世紀のCO₂排出量

人口変化、経済成長、エネルギー消費量などから推定したCO₂排出量は同一シナリオの中でも Fig.3¹⁾ に示すようにど

うしても巾がでる。2100年時点でのCO₂排出量は1990年のCO₂総排出量80億t-C (炭素換算トン)より減少するケースから5倍くらいに増加するケースまでが考えられている。今後100年間のCO₂排出量はどうなるかの予想は困難であり、この程度の中は小さいとも考えられる。

2.7 化石燃料使用量

各シナリオに従った時の1990~2100年間の石油、天然ガス、石炭の累積使用量は Table 3¹⁾ のようになると報告されている。1994年までの累積使用量に対して、1990年~2100年間で石油が約4倍、天然ガスが7~20倍、石炭が3~8倍も使用される計算となっている。このために必要な石油資源量は技術革新を考慮した究極資源量²⁾と同程度となっている。天然ガス資源量は非在来型の天然ガス資源が開発されれば³⁾枯渇はしない可能性もある。しかし、昨今の急速な原油価格上昇を考えると石油資源使用量が Table 3の推定通りは増加しない可能性が高い。

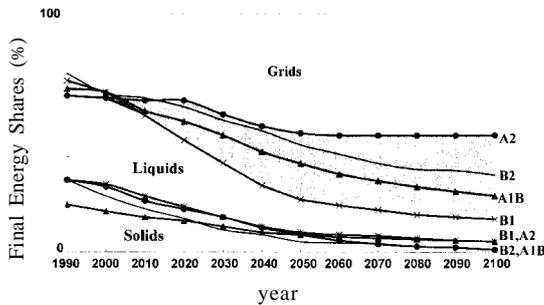


Fig.2 World final energy by from of deloivery.¹⁾

Table 3 World Cumulative Hydrocarbon Use, in ZJ (1,000 EJ).

Fuel	1800-1994	1990-2100			
	Scenario	A1B	A2	B1	B2
Oil	4.6	20.8	17.2	19.6	19.5
N.G.	2.0	42.2	24.6	14.7	26.9
Coal	5.6	15.9	46.8	13.2	12.6

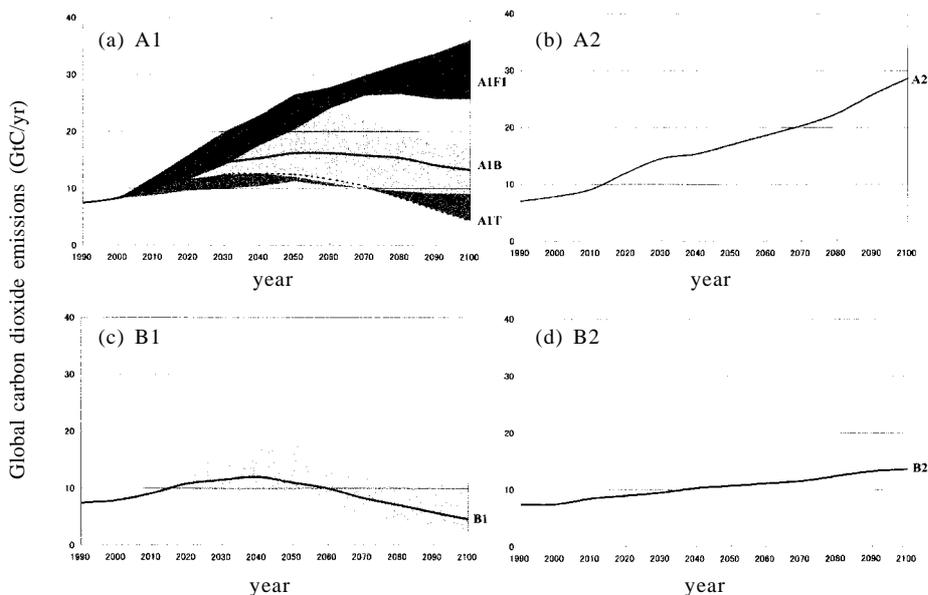


Fig.3 Total global annual CO₂ emissions from all sources.¹⁾

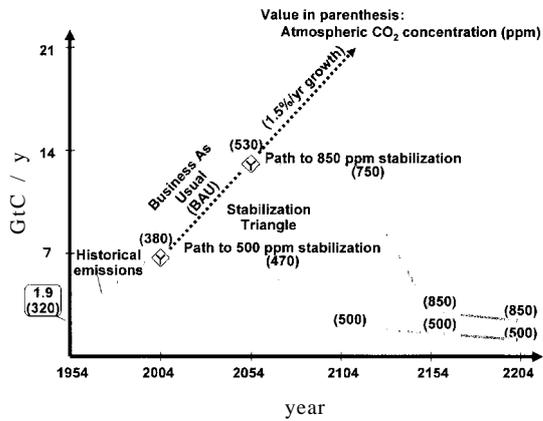


Fig.4 The carbon challenge (S. Pacala).⁴⁾

3. 今後のCO₂削減対策技術導入シナリオ

増加し続けている大気中CO₂濃度（現在370 ppm）をどの水準で、いつ迄に安定化されるかによって、CO₂削減対策シナリオは変わる。大略は2100年時点で大気中CO₂濃度を500 ppmから産業革命前の2倍濃度である550 ppmに安定化させる意見が多い。

ここでは500, 550 ppm安定化のシナリオを紹介する。

3.1 CO₂ 500ppm 安定化

CO₂安定化濃度を500 ppmとした場合、直ちに削減量の大きな対策を導入しないと安定化は困難になる。Fig.4 (S. Pacalaら⁴⁾)のStabilization triangle面積で示されているように今後50年間で通常の対策(BAU)しか取らない場合に比べて25 GtCを削減する必要がある。今、直ちに削減対策技術を導入し、その削減量を50年間直線的に増加させるとすると50年後に1 GtC/yを削減すればよいことになる。

現在の技術水準で適用可能でしかも1 GtC/yの削減ポテンシャルのある技術としてTable 4に示す項目が挙げられている。

これらの技術の中でエネルギー有効利用や再生可能エネルギー利用などのように技術が進歩すればCO₂削減のコストは負になる可能性のあるものがある。しかし、それらの技術の発展速度、削減ポテンシャルを考慮すると、コストは高くても排ガスからのCO₂分離回収・隔離(CCS: Carbon Capture and Storage)技術も削減シナリオに入ってくる。

3.2 CO₂ 550 ppm 安定化

2100年時点で大気中CO₂濃度を550 ppmで安定化させるためのシナリオが茅らにより報告されている。⁵⁾

対策技術の導入時期、導入の割合はエネルギーコストを最小化するモデルシミュレーションより決定されている。Fig.5に示すように 省エネルギーの促進、クリーンエ

Table 4 Strategies available to reduce CO₂ emission rate in 2054 by 1 Gt-C/y (S. Pascal et al.⁴⁾).

Energy efficiency improvement	Efficient vehicle	2 billion cars, 13~25km/l
	Reduced use of vehicles	2 billion cars, 10,000~5,000miles/y
	Efficient building	Cut CO ₂ emissions by 25%
Fuel shift in fossil fuel	Efficient baseload coal plant	Thermal eff. 60% (2,000GW)
	Gas baseload for coal	1,400GW coal→NG
	Capture CO ₂ at baseload power plant	800GW coal or 1600GW NG P.P.
CCS*	Capture CO ₂ at H ₂ plant	250MtH ₂ /y from coal or 500MtH ₂ /y from N.G
	Capture CO ₂ at coal-to-synfuels	1.7 × 10 ⁶ m ³ /y (200times Sasol)
	Nuclear power for coal	700GW (twice current cap.)
Renewable energy	Wind power for coal	2 million 1MW windmills (60 times)
	PV for coal	2000GW PV (700 times)
	Wind H ₂ in FC	4 million 1MW windmills
	Biomass fuel for fossil fuel	2 million cars, 100times current Brazil ethanol
Forests and agricultural soils	Reduced deforestation plus reforestation, afforestation	0 deforestation. 300Mha of new plantation
	Conservation tillage	apply to all cropland (10 times current usage)

*CCS (Carbon Capture and Storage)

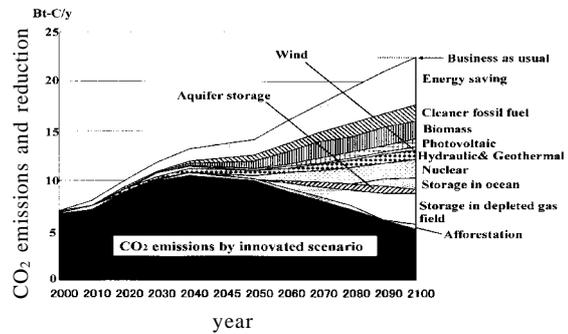


Fig.5 CO₂ reduction by innovation (Y. Kaya).⁵⁾

ネルギーの大幅導入、CO₂分離、貯留技術導入、CO₂吸収源の拡大(植林)などの対策により、2100年時のCO₂排出量が51億t-Cに削減されている。また、以外に宇宙太陽光発電や核融合など革新的なエネルギー関連技術導入のケースも検討されている。Fig.6に2100年時までの一次エネルギー生産量とエネルギー供給形態の推移を示す。2100年の一次エネルギー消費量は213億石油換算トン(890 EJ)でSRESのエネルギー消費量が最も低いB1シナリオ(514 EJ)よりは高い値で、1997年のエネルギー消費量の約2.5倍になっている。

4. CO₂分離回収・隔離技術

前3章で述べたようにCO₂削減のためには多くの対策がある。しかし、現状の対策のCO₂削減コスト、技術水準、削減ポテンシャルを考えるとCO₂分離回収・隔離(CCS)技術が近い将来重要な対策の一つとなる。

この技術は他の対策技術である省エネルギー、再生可能エネルギー技術と異なり、CO₂削減のために必ず経費がかかり、エネルギーを消費する。それでもこの技術が目目さ

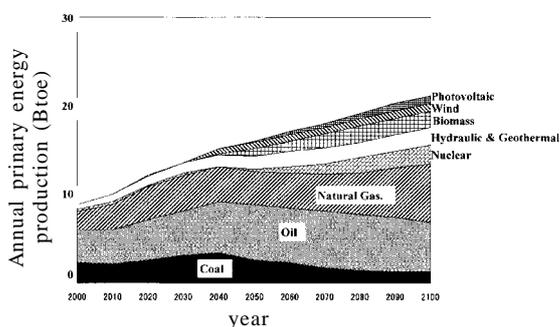


Fig.6 World primary energy production after implementation of CO₂ measures.⁵⁾

れるのはCO₂削減ポテンシャルが大きく、今世紀中は他の方法に比較するとCO₂削減コストが低くなる可能性があるためである。ここではCCS技術の現状、概要を記す。

4.1 CO₂分離回収技術

我国の火力発電所からのCO₂排出量は全排出量の35%の113.5 MtC (2003年)もある。このような大量のCO₂発生源からのCCSは量的には有効な削減方法である。火力発電所からの排煙中CO₂濃度は燃料、操業条件により変わるが9~14%の範囲にある。

石炭火力発電所排煙からのCO₂を分離するための理論エネルギーは約1 kJ mol⁻¹ CO₂である。しかし、現状の主な分離プロセスである化学吸収法ではその10倍以上のエネルギーを消費している。そのために石炭使用量は分離プロセスのない場合に比べて20%以上多く必要となる。またCO₂分離コストも15,000円/t-C程度と高い。

主なCO₂分離回収法としては下記(1)~(3)の方法がある。

4.1.1 化学吸収法

吸収法は、アルカノールアミンなどアミン系水溶液が、CO₂と反応し易い性質を利用して、排ガス中のCO₂を分離する技術である。排ガス中のCO₂は約50%の吸収塔内でアミン系水溶液と接触して、アミン炭酸塩を形成し吸収液中に固定される。このアミン炭酸塩の水溶液は、加熱され(110~130℃)、アミン水溶液とCO₂に分離され、前者は循環使用され、後者は回収される。

本分離技術は、火力発電所のような常圧で比較的低濃度のCO₂を含むガスに適しており、大規模化が比較的容易である。CO₂の分圧が低い場合でも高い除去率が得られるが、CO₂を取り出す際に多量の熱エネルギー(蒸気)が必要である。CO₂の回収率は90%以上、純度は99.9%まで可能である。

前述したようにエネルギー多消費プロセスなので省エネルギー化が必要であり、それによりコストも下がる。省エ

ネルギー化のポイントはCO₂吸収・放出熱が低く、また単位体積当りのCO₂吸収・放出量が大きい吸収液の開発が必要であり、実際にそれが進められている。この方法は天然ガスからのCO₂分離など大規模に実用化されており、火力発電所排ガス、製鉄高炉ガスからのCO₂分離回収技術としても有望である。

4.1.2 吸着法

吸着法とは、CO₂を吸着しやすい多孔性の固体吸着剤(ゼオライトや活性炭等)に、CO₂含有排ガスを接触させて、CO₂ガスを選択的に吸着させて分離する方法である。吸着が終了し、吸着剤の空隙中に吸着されたCO₂は、減圧または加熱することにより、再びCO₂を放出するので、これを集めてCO₂ガスを回収する。一般的には常温、常圧下で吸着させ、減圧(10 kPa以下)してCO₂を回収するPSA法(Pressure Swing Adsorption法)または吸着剤を加熱してCO₂を回収するTSA法(Temperature Swing Adsorption法)及び減圧、加熱の両者を組み合わせる方法がある。

排ガス中のCO₂を、吸着法(PSA法)で回収した例として、30%前後のCO₂を含む製鉄所ガスから、純度99.99%以上のCO₂ガスを、3000 Nm³ h⁻¹程度製造して、外販した実績がある。⁶⁾

回収装置の特徴として、比較的装置が簡単であり、中小規模の回収プラントに適し、乾式操作でメンテナンスが容易であることがあげられる。しかし、水分を含有し、CO₂濃度が低い火力発電所排ガスへの適用は容易でない。

4.1.3 膜分離法

CO₂分離膜の両側のCO₂化学ポテンシャル差があるとCO₂はポテンシャルの高い方から低い方に移動する。それを利用してCO₂分離をする方法である。

CO₂化学ポテンシャルを高めるために加圧したり、低めるために減圧にする必要がある。膜材料としては高分子膜、無機膜があるが、現状ではCO₂移動速度がより高い高分子膜が有利である。それでも膜コストが高いため、通常の火力発電所排ガスへの適用は困難である。石炭ガス化複合発電法(IGCC)のCO₂含有ガスのように4 MPa程度の圧力のある場合やCO₂濃度が20%以上と高い製鉄高炉ガスの場合には適用可能性がある。CO₂移動速度やCO₂分離効率を高めたり、コスト低減を目的とした研究が進められている。⁷⁻¹¹⁾

4.2 CO₂隔離技術

大気中に排出されたCO₂によりその大気中濃度が高くなって地球温暖化が起こっている。そのためCO₂対策として前述した方法で分離回収したCO₂を大量に隔離する場所は海洋か地中しかない。隔離法を実用化するにはコスト低減と共に環境影響の評価とその最小化を進める必要がある。以下簡単に地中、海洋隔離について述べる。

4.2.1 地中隔離

地中貯留は、地下にあった炭素を人類が利用して基に戻すというごく自然な考え方に基づくものであり、貯留方法として、EOR (Enhanced Oil Recovery), EGR (Enhanced Gas Recovery), ECBM (Enhanced Coal Bed Methane), 帯水層貯留などがある。EORは、石油増進回収を目的として油層にCO₂を圧入するもので、米国では1970年代から実用的に行われている。またECBMは、石炭層に吸着しているメタンをCO₂によって置換させ、CO₂貯留とメタンの回収を図ろうとするものであり、(株)環境総合テクノスが経済産業省の補助事業として現在、北海道の夕張で予備実験に取り組んでいる。一方、RITEが取り組んでいるのが帯水層貯留である。地層水を含んだ隙間の多い砂岩層からなる帯水層の上部に気体や液体を透さないキャップロックと呼ばれる固い層が存在することにより、帯水層に圧入したCO₂を長期に安定して閉じ込めるものである。帯水層貯留の技術は、基本的に天然ガスの地下貯留や石油増進回収等で蓄積された地中へのガス圧入・貯留技術を応用できるので、最も即効的かつ実用的技術として期待されている。

4.2.2 海洋隔離

海洋は膨大なCO₂吸収能力を有するが、自然プロセスではCO₂吸収速度が緩やかなために大気中にCO₂が蓄積することになる。海洋隔離技術は、吸収速度の遅い海洋表層を通らずにCO₂を直接深海に注入し、大気中におけるCO₂濃度の増加を抑制するもので、溶解希釈隔離法、深海底貯留隔離法(CO₂を水深3000 m以深の海底にハイドレード状態で隔離)などがある。RITEの海洋隔離プロジェクトでは、環境への影響を最小限に抑えることができる方法として、船舶を航行させながら液体CO₂を水深1500 mから2500 mに放出して海水に溶解希釈する方式について研究開発を行っている。

5. おわりに

年々大気中CO₂濃度が上昇し、温暖化が進行している。今後100年で大気中CO₂濃度を550 ~ 550 ppmで安定化させることも容易ではない。ここではCO₂排出量に大きな影響を与える人口、経済成長、エネルギー消費量、エネルギー源など将来どうなっていくかのシナリオを紹介した。更にそのための対策技術、またその中でも化石燃料を使用する限り対策として取り上げざるを得ないCO₂分離回収・隔離技術について現状を説明した。

文 献

- 1) IPCC, Emissions scenarios, Cambridge Univ. press (2000).
- 2) 野村真介, PETROTECH **22**, 531 (1999).
- 3) 藤田和男, エネルギー・資源 **21**, 248 (2000).
- 4) S. Pacala and R. Socolow, Stabilization Wedges: Solving the Climate Problem for the Next 50 Years with Current Technologies, *Science* **305**, 968 (2004).
- 5) 茅陽一監修, CO₂削減戦略, 日刊工業新聞社, p.48 (2000).
- 6) 竹内雅監修, 最新吸着技術便覧, NTS出版, p.111 (1999).
- 7) H. Mano, S. Kazama, and K. Haraya, Greenhouse Gas Control Technologies, Volume II, J. Gale and Y. Kaya (Eds.), Elsevier Science Ltd, p.1551 (2003).
- 8) 風間伸吾, 膜 **29**[5], 250 (2004).
- 9) <http://www.rite.or.jp/English/E-home-frame.html>
- 10) M. P. Bernal, J. Coronas, M. Menéndez, and J. Santamaría, *AIChE* **50**, 127 (2004).
- 11) Y. Cui, H. Kita, and K. Okamoto, *J. Mater. Chem.* **14**, 924 (2004).

要 旨

化石燃料の多消費に伴いCO₂排出量が増加し、大気中CO₂濃度が急上昇している。そのため地球温暖化が進行している。温暖化を緩和するためには大気中CO₂濃度を低い濃度で安定化させる必要がある。ここではCO₂排出量に大きな影響を与える人口、経済成長、エネルギー消費量、エネルギー源など将来どうなっていくかのシナリオを紹介した。更にそのための対策技術、またその中でも化石燃料を使用する限り対策として取り上げざるを得ないCO₂分離回収・隔離技術について現状を説明した。

山田興一 Koichi Yamada
 財団法人地球環境産業技術研究機構,
 Research Institute of Innovative
 Technology for the Earth, TEL. 0774-
 75-2305, FAX. 0774-75-2318, e-mail:
 yamada@rite.or.jp, 成蹊大学理工学部
 特別研究招聘教授, e-mail: yamada@
 st.seikei.ac.jp
 専門分野: 化学システム工学, 地球環境
 工学, 電気化学
 趣味: パラグライダー, ダイビング