

Energy and Green House Gas Mitigation Technologies

Japan Society for the Promotion of Science-Imperial College London-University of Tokyo Symposium
on Climate Change

Thursday 28th and Friday 29th September 2006



Imperial College London, South Kensington Campus, London SW7 2AZ





Current State of Technology and Public Acceptance of Ocean CO₂ Storage

Toru Sato

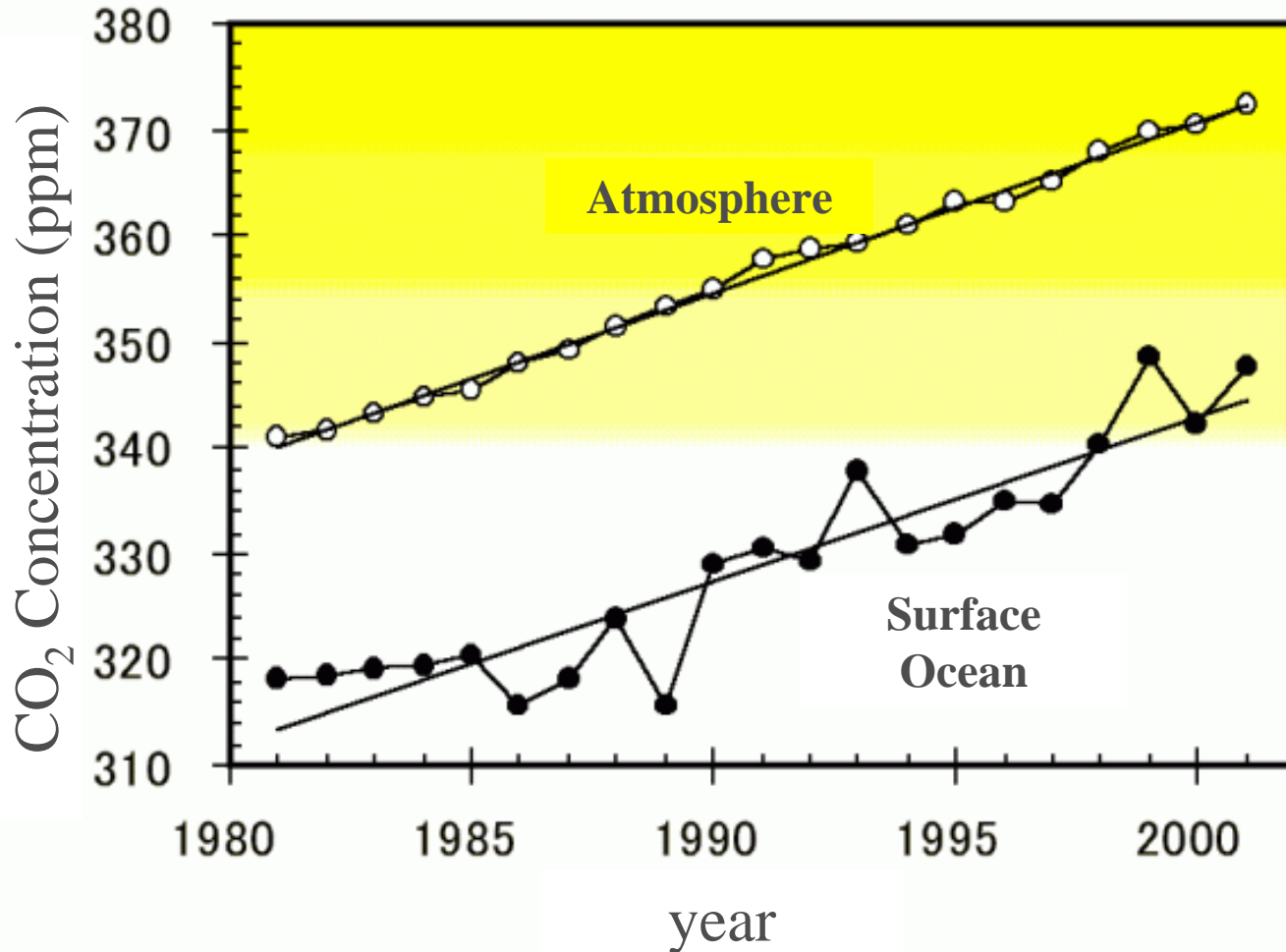
Department of Environment Systems

University of Tokyo



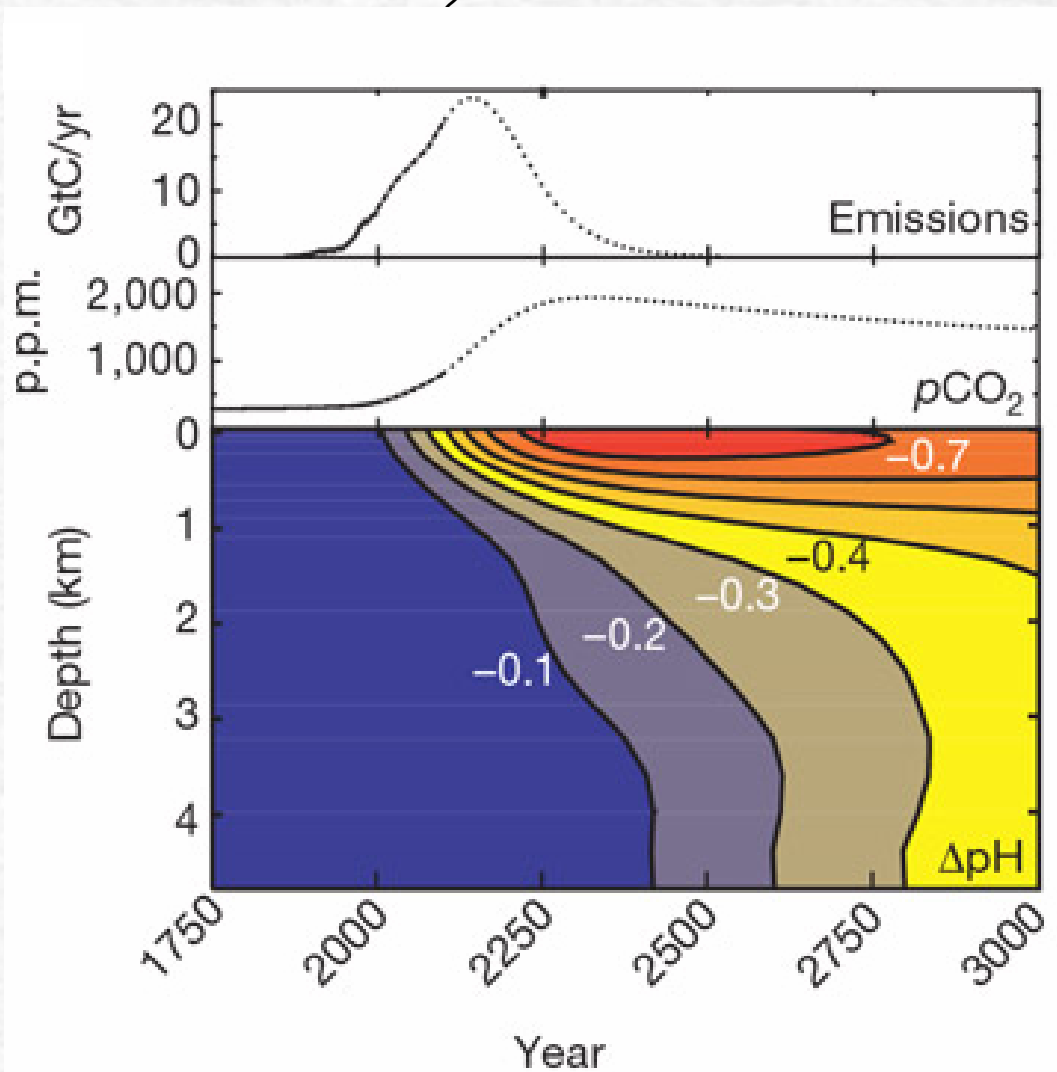
Surface Ocean Acidification

CO₂ Concentration in Surface Ocean



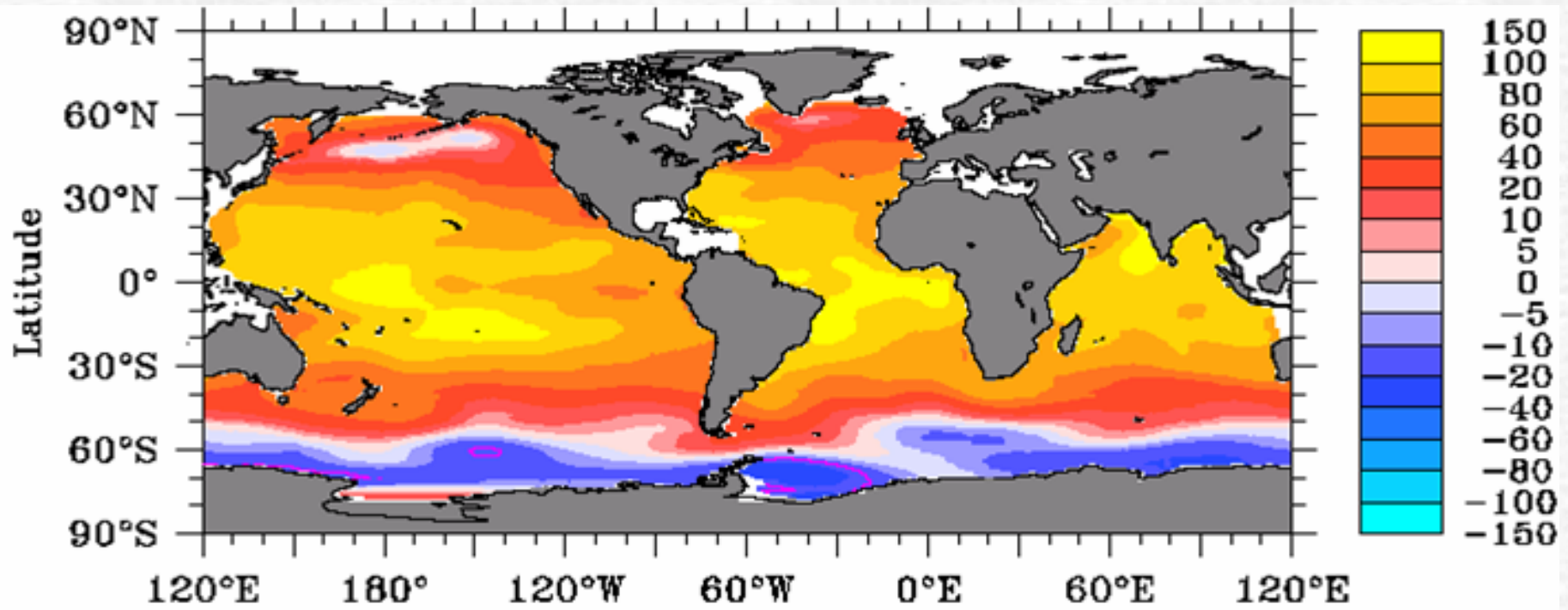
CO₂ Concentration at 137°E, average of 3-30°N in January to February
(Japan Metrology Agency)

Prediction of CO₂ Concentration in the Ocean



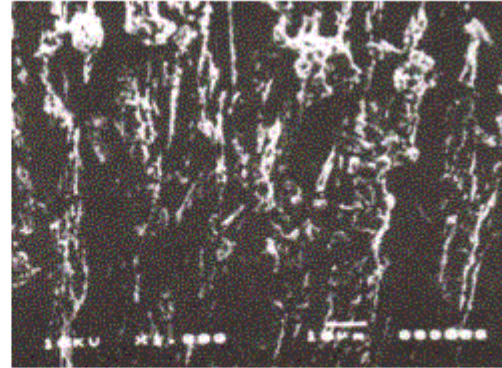
(Caldeira and Wickett, 2003)

Prediction of Aragonite Dissolution in 2100

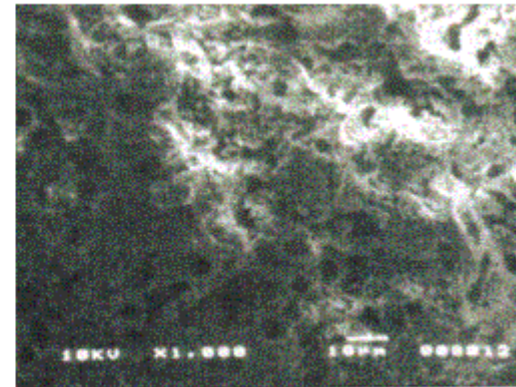
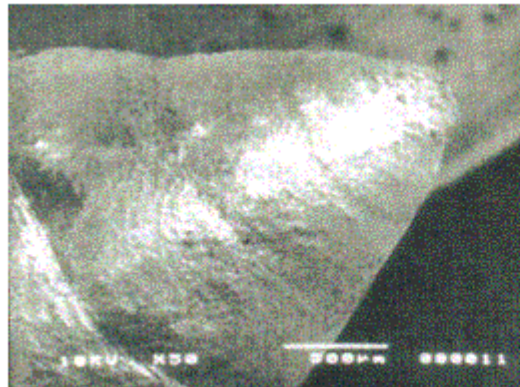


Difference between the predicted concentration of carbonate ion and that equilibrium to the solubility of Aragonite in $\mu\text{mol/l}$, based on the scenario of IPCC IS92a, which is 740ppm in 2100 (Orr et al., Nature, 2005)

Dissolution of Shell in pCO₂ of 2000 ppm



control

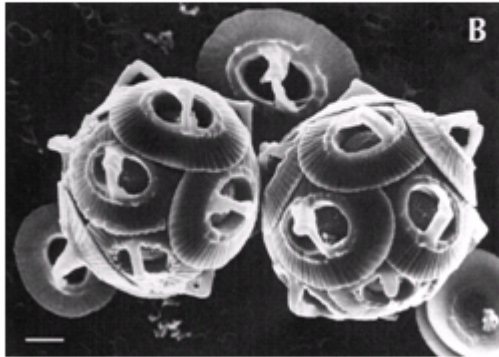


2000 ppm

CO₂-Calcification Feedback

Today's world

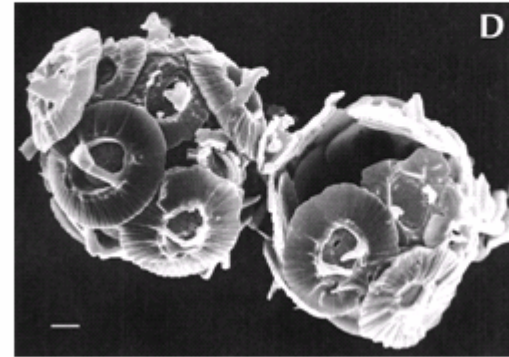
pCO₂: 280-380 ppm



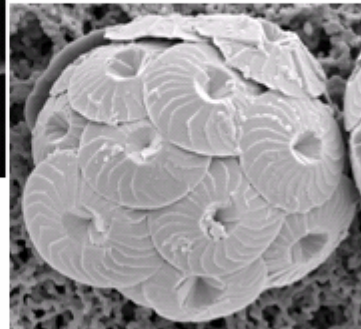
Gephyrocapsa oceanica

High-CO₂ world

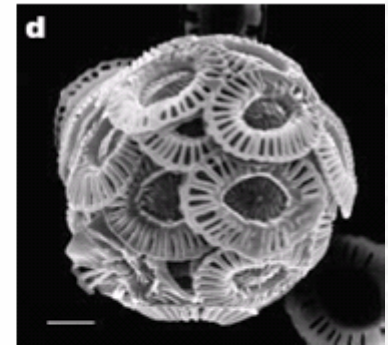
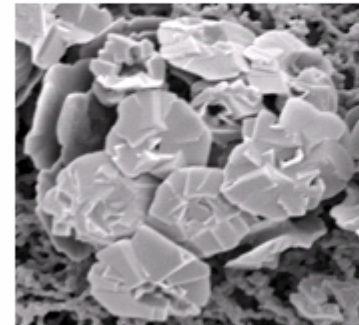
pCO₂: 580-720 ppm



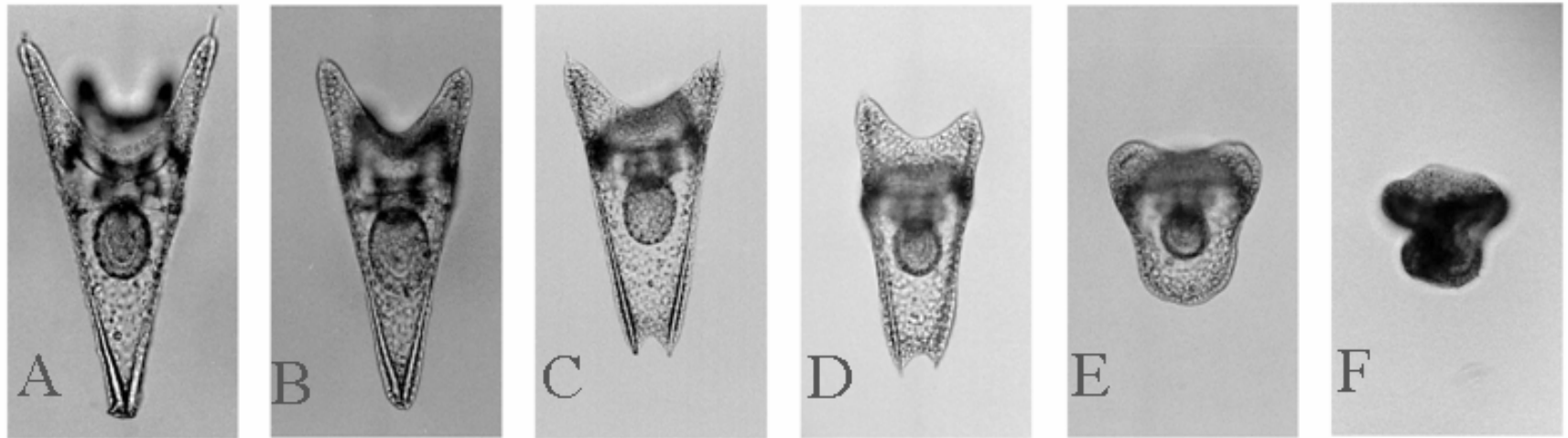
Emiliana huxleyi



Calcidiscus leptoporus



Morphology of Sea Urchin Larva



control

+500ppm

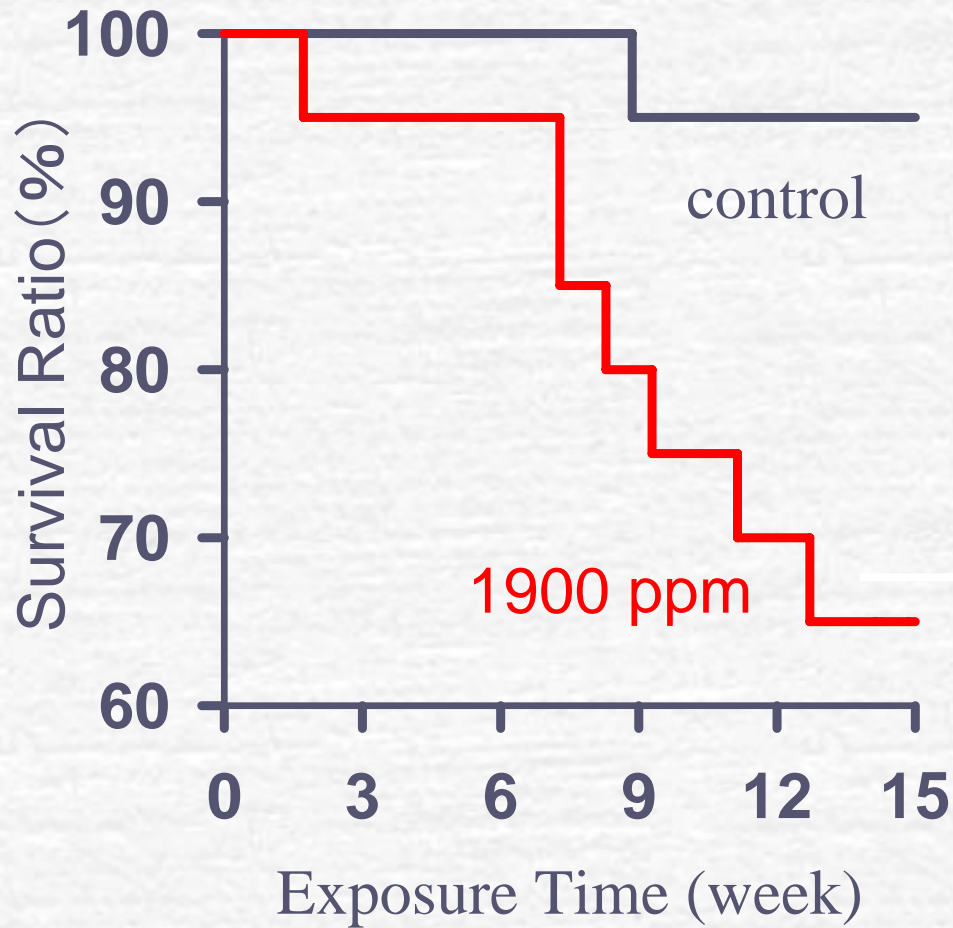
+1000ppm

+2000ppm

+5000ppm

+10000ppm

Mortality of Shrimps



Remarks

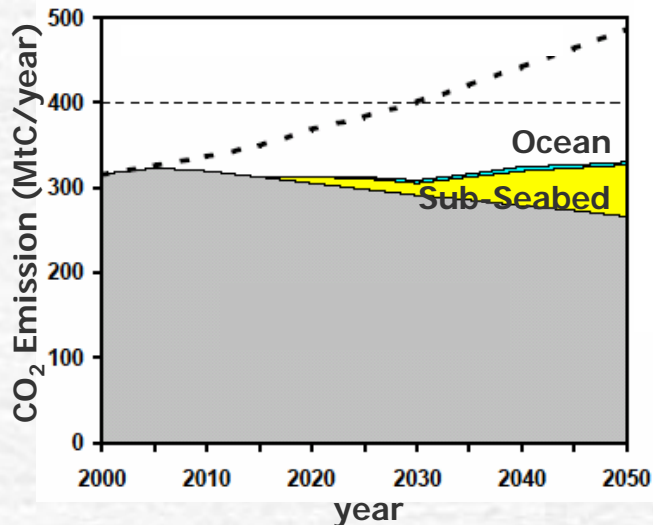
- Surface Ocean Acidification is argent matter to cope with.
- Kyoto Protocol is not enough.
- Current possible solution is CCS.

Why Japan Seeks Ocean Storage

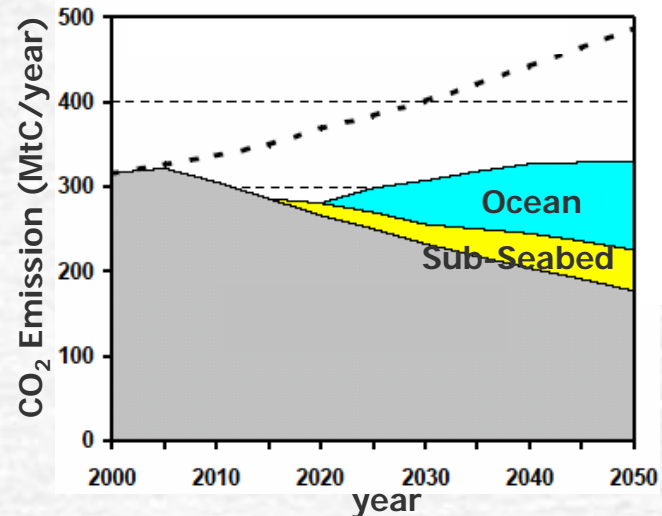
Potential Storage Amount in Japan

Categories of Geological Storage		Potential
Oil/Gas Reservoir		3.5Gt CO ₂
Sub-Seabed Structured Aquifer	less than 10 km from coastline	2.6Gt CO ₂
	more than 10 km from coastline	2.6Gt CO ₂
Sub-Seabed Unstructured Aquifer (water depth of less than 200 m)		27.5Gt CO ₂

Expected CCS Amount : 1.5 - 4.0GtCO₂/year for 2025-2100



CO₂ Emission per GDP in 2050 is 1/2 of that in 2000

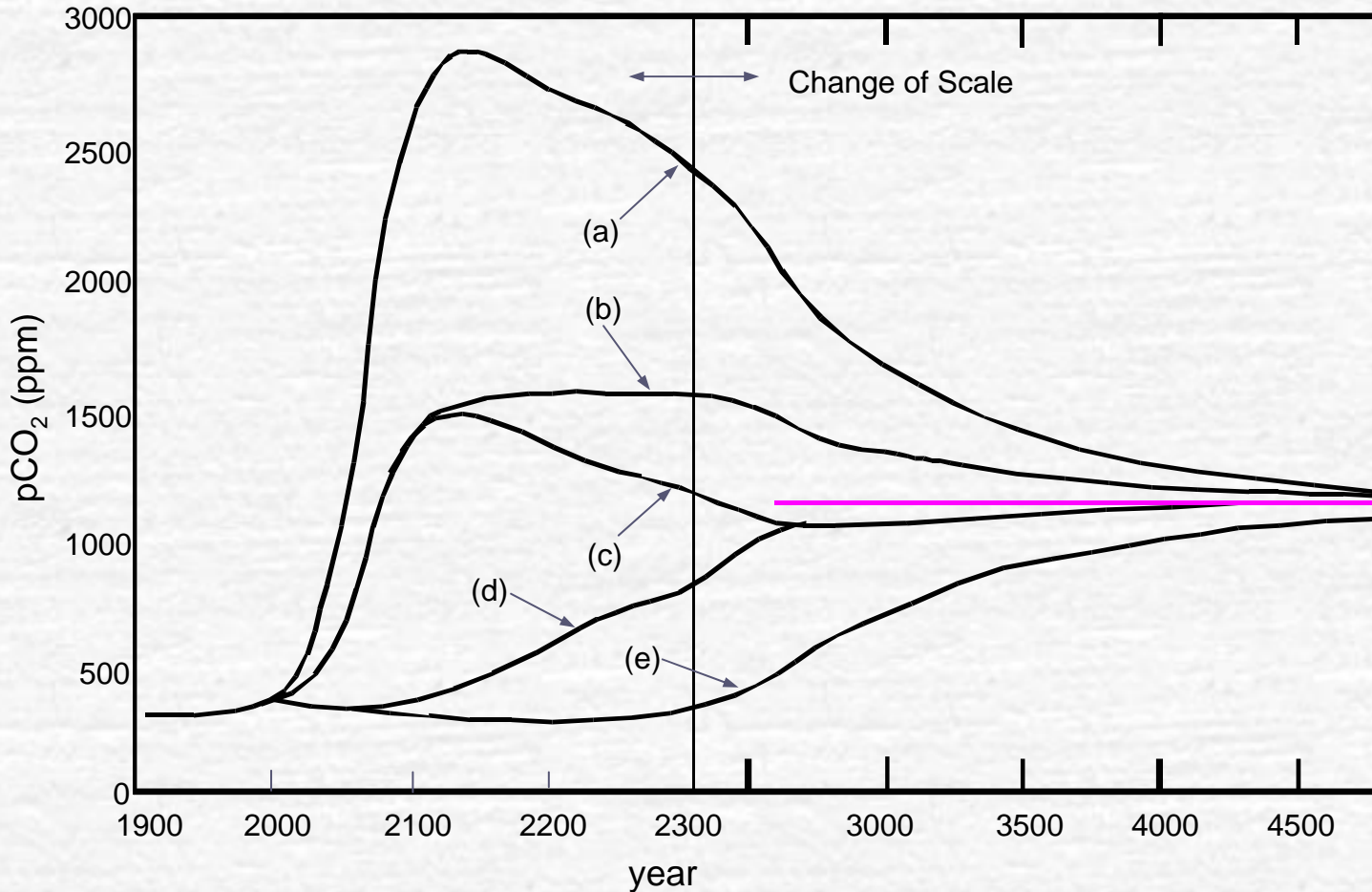


CO₂ Emission per GDP in 2050 is 1/3 of that in 2000

(RITE)

CO₂ Storage in Deep Ocean

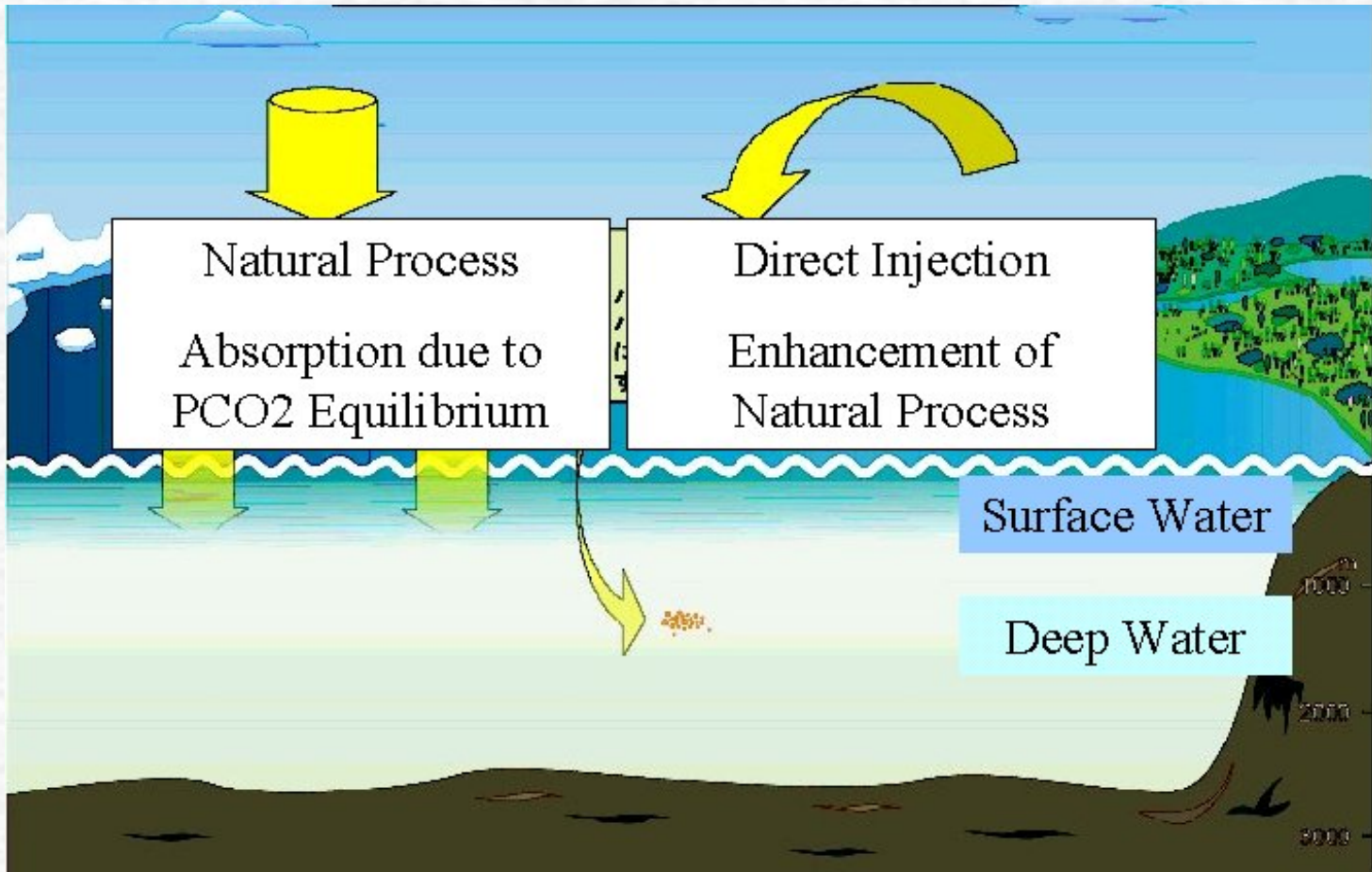
Prediction of Atmospheric pCO₂ Change



Injection (a) 100% into atmosphere, (b) 50% into ocean (1500m),
(c) 50% into ocean (4000m), (d) 100% into ocean (1500m),
(e) 100% into ocean (4000m).

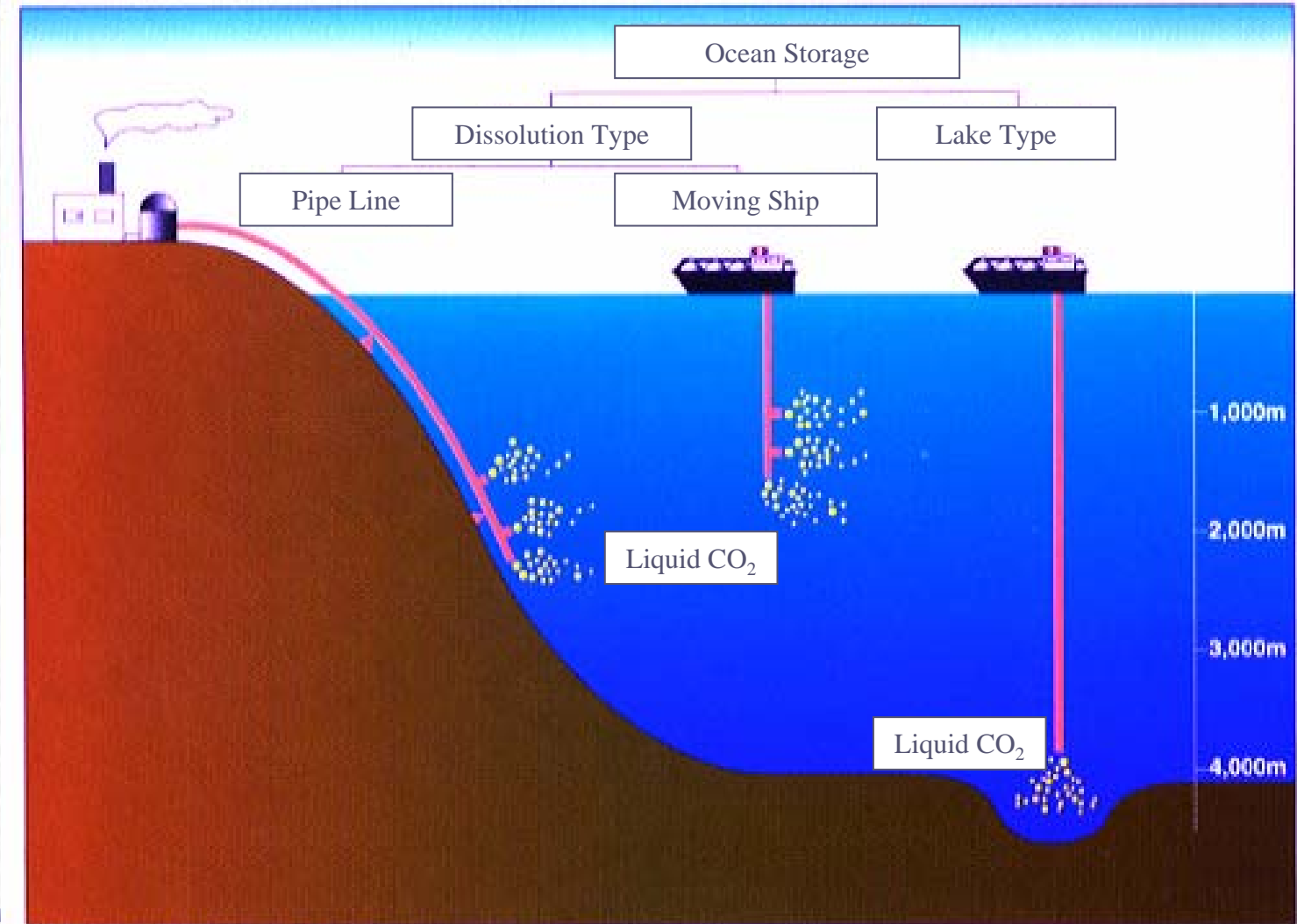
(Hoffert et al, 1977)

Concept of CO₂ Ocean Storage



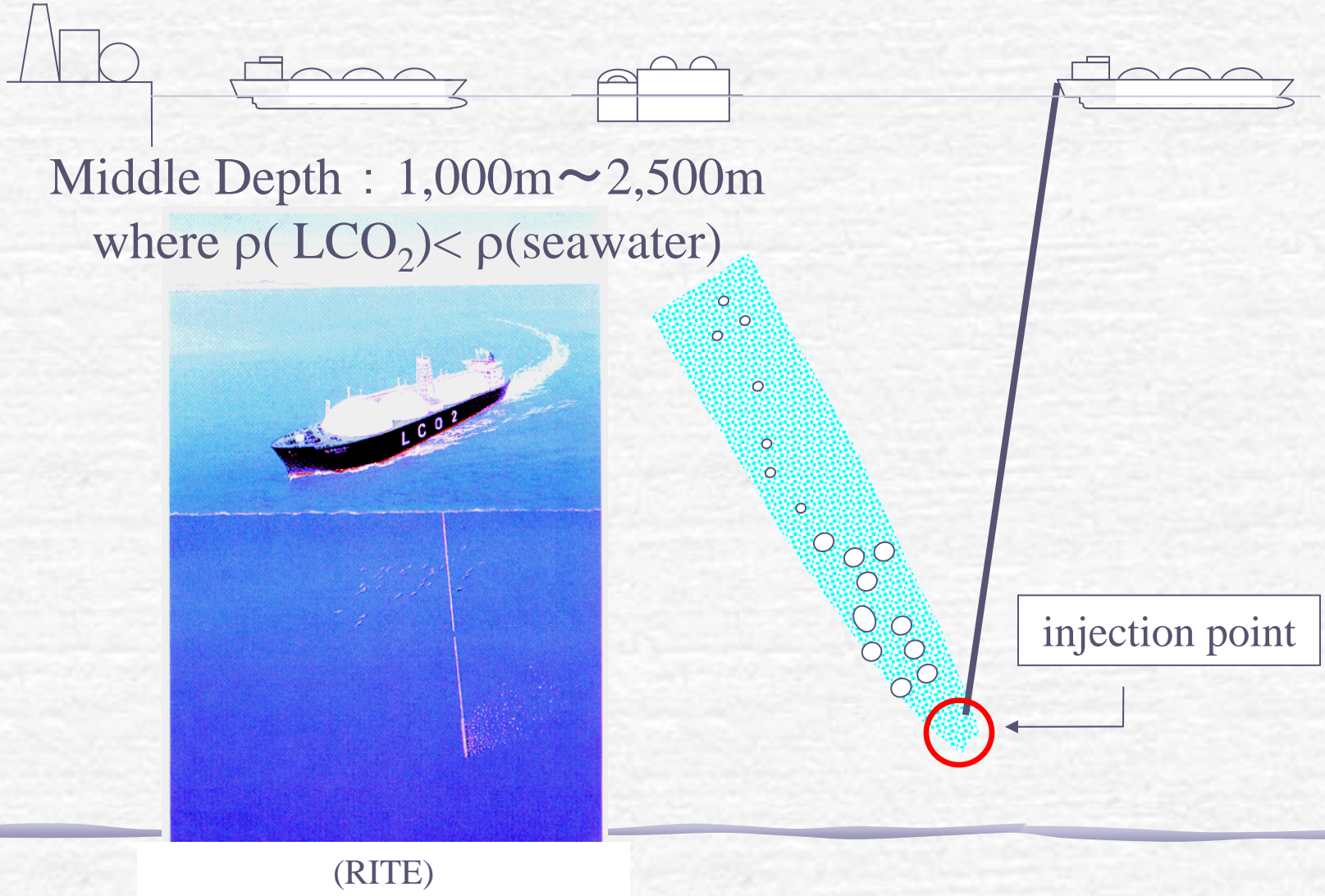
(RITE)

Method of CO₂ Ocean Storage



(RITE)

Middle Depth Dissolution



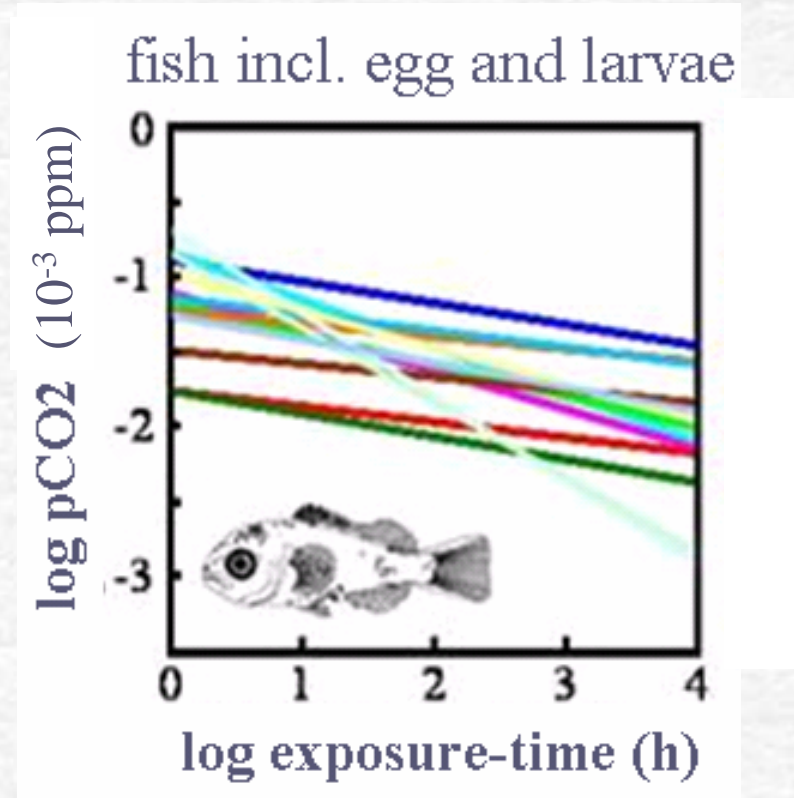
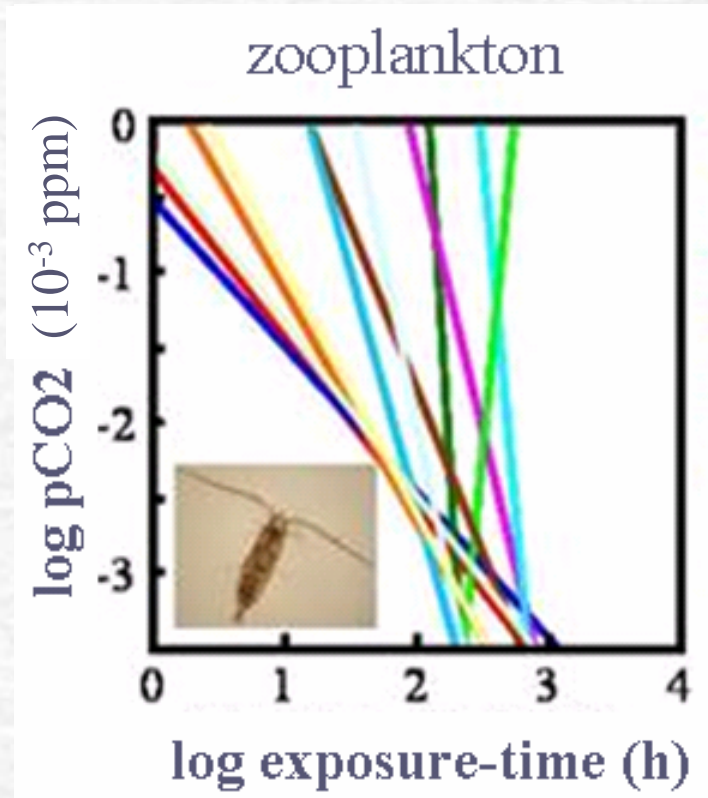
Biological Impact in CO₂ Ocean Storage

Possible Risks of Deep-Sea Organisms

- Acute impact near injection point
 - Mortality within a week
- Chronicle impact in storage site
 - Decrease of population by inhibition of growth
- Ecological impact in oceanic scale
 - Ecological-system alteration through food web

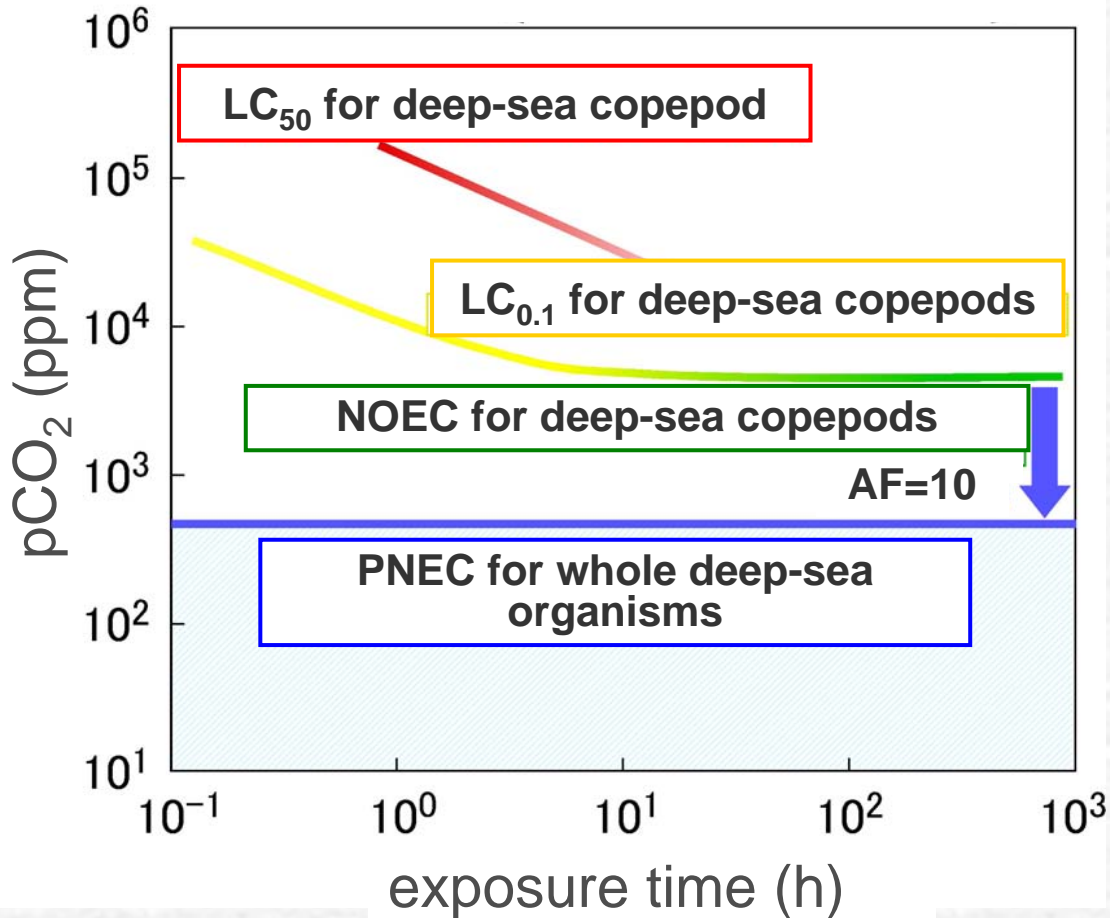
LC₅₀ for Exposure Time and pCO₂

LC₅₀: lethal concentration for 50% mortality



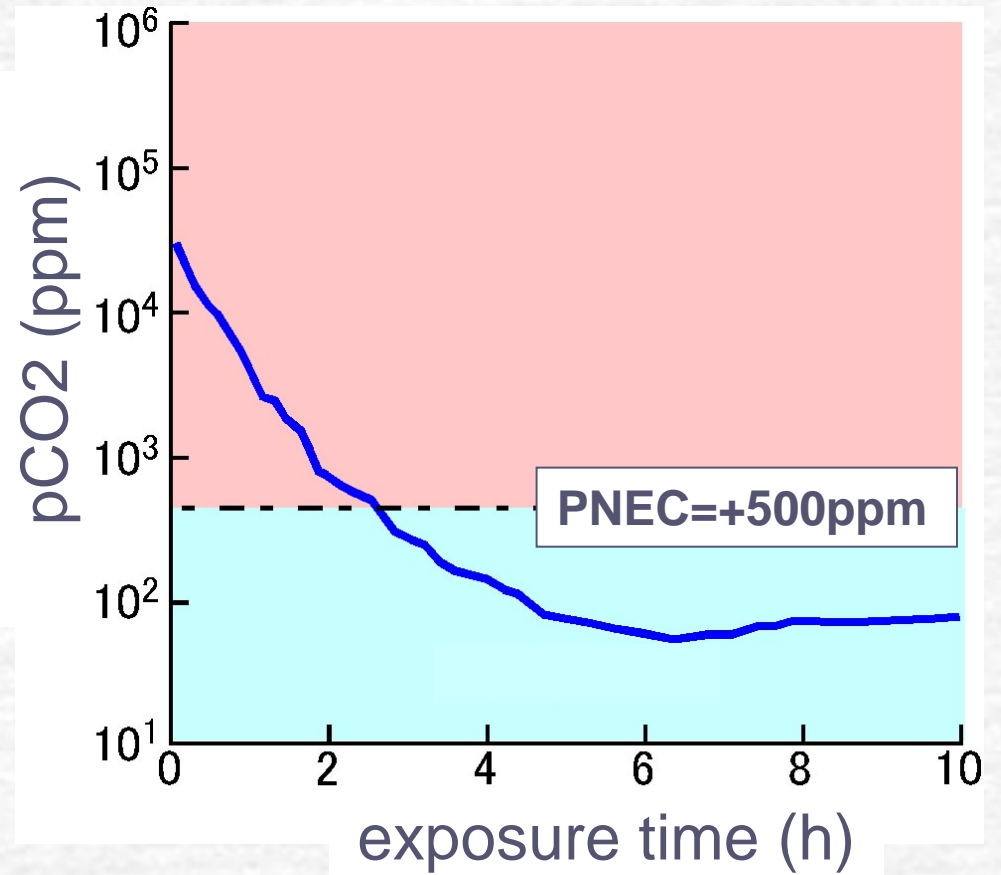
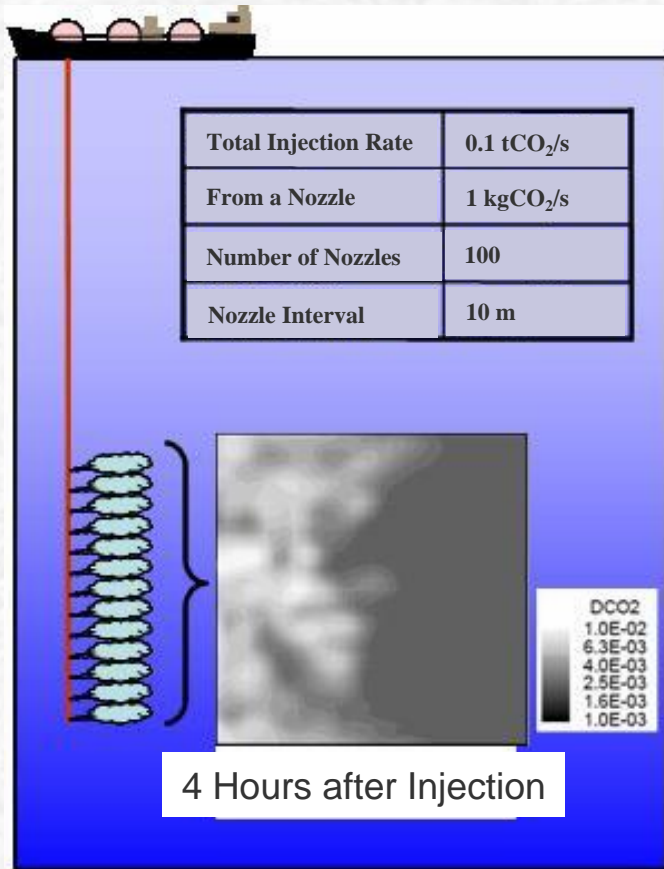
(RITE)

PNEC (Predicted No Effect Concentration) for Deep-Sea Ecosystems



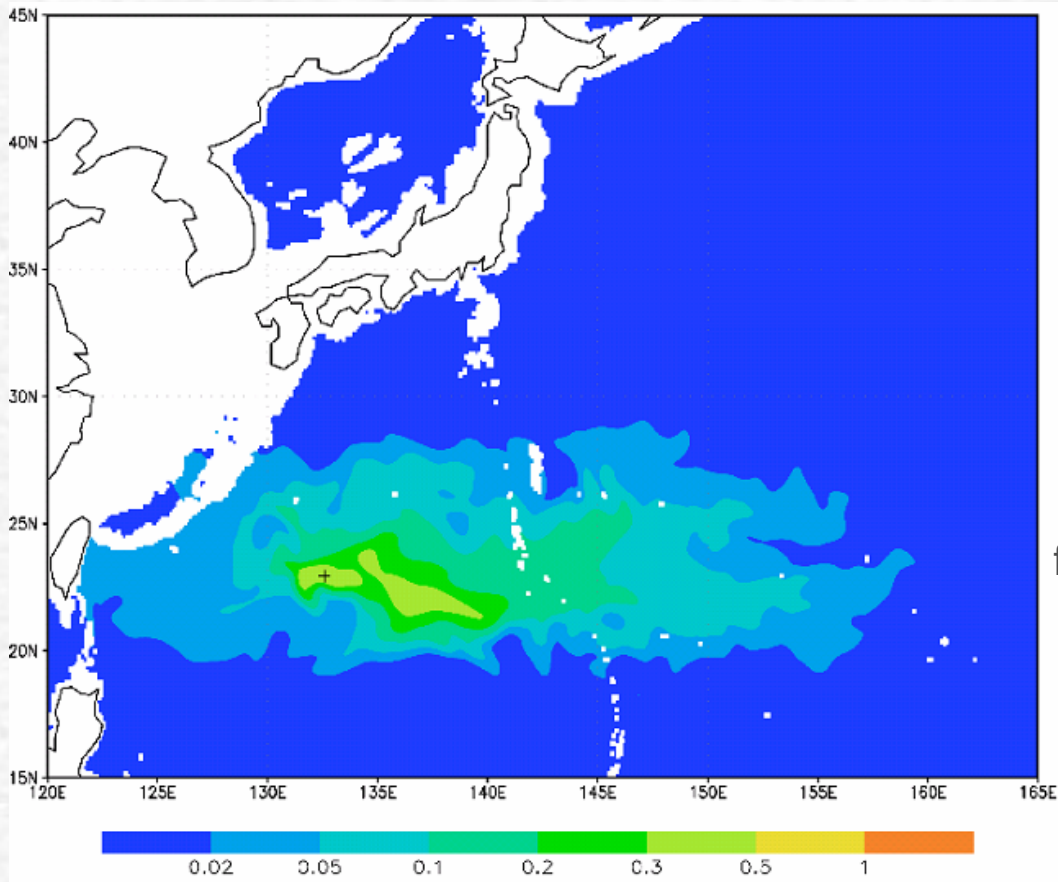
- Obtain LC_{0.1} by acute mortality tests
- Plot LT_{0.1} data against 1/T, where the intercept of linear regression and pCO₂ axis gives **NOEC = +5000 ppm** (No observed effect concentration)
- Estimate **PNEC = +500 ppm** (Predicted no effect concentration) by NOEC/AF (Assessment factor), where AF = 10 based on OECD standard

Near Field LES Model Result



(RITE)

Large-Scale Ocean Model Result



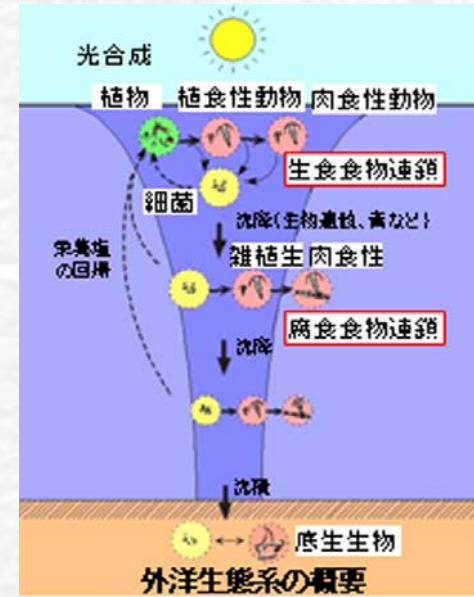
far less than PNEC

(RITE)

Further Research on Biological Impacts



Physiological Study for Deep-Sea Fish



Deep-Sea Ecosystem Model

Public Acceptance of CO₂ Ocean Storage

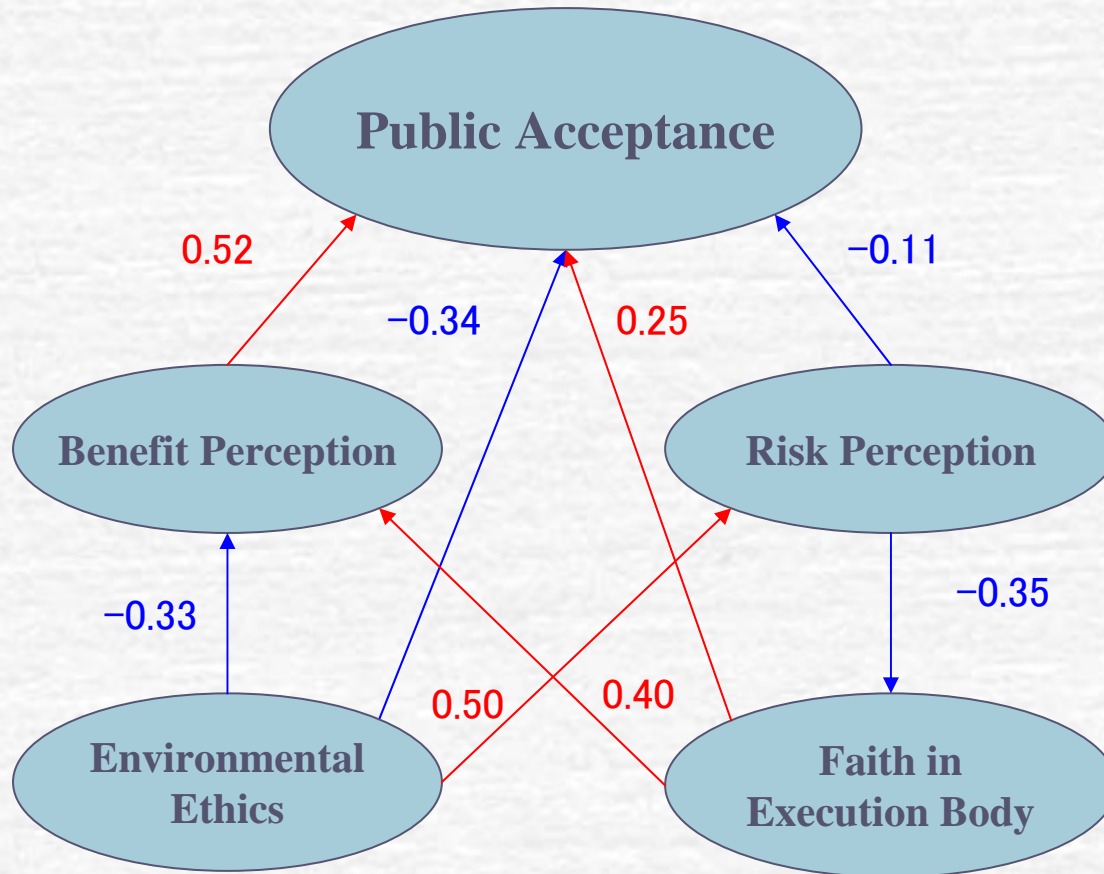
Why Public Acceptance?

- Although most bacteria are more tolerable to CO₂ than plankton, microbial loop in deep-sea ecosystem is not completely understood.
- There are risks, but manageable by Adaptive Management (decision making by the cycle of monitoring and risk communication).
- Public acceptance is the key for decision making, together with continuing to investigate the deep-sea ecosystem.



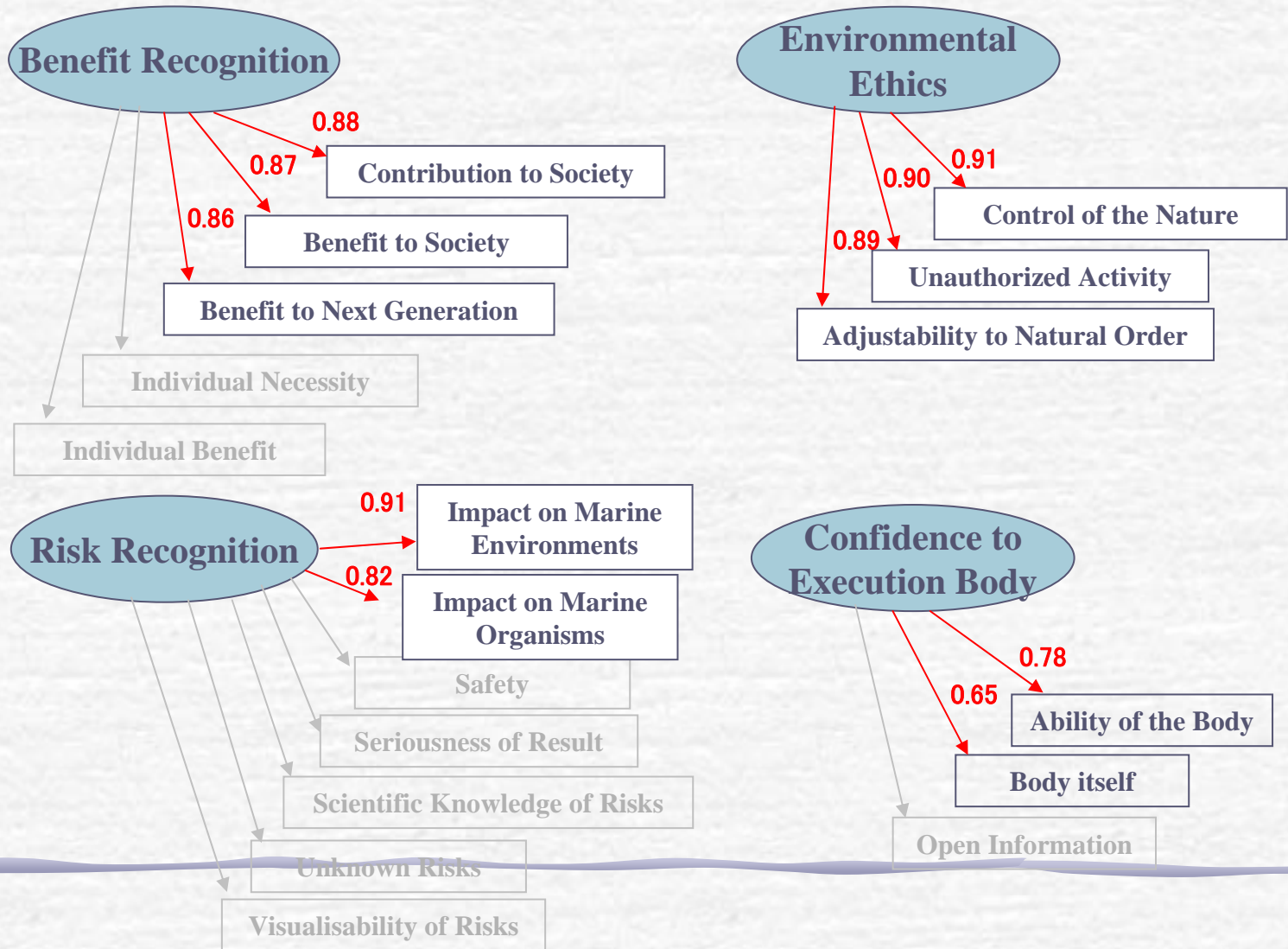
1. Quantify the images of Ocean Storage by Covariance Structure Analysis of questionnaire results.
2. Extract consent standard and future research targets for Ocean Storage by trial of risk communication on web site.

Covariance Structure Analysis to Questionnaire Result - Scores of 4 Major Factors to Public Acceptance-



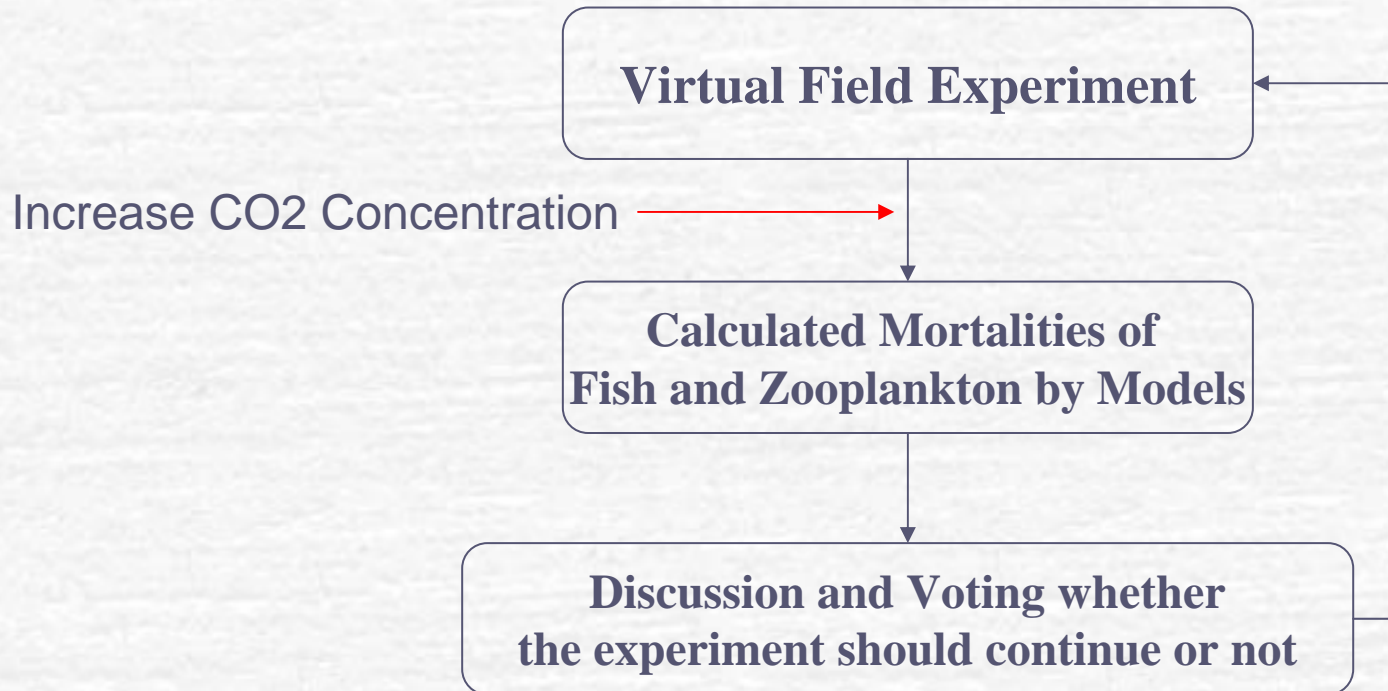
Benefit Perception and Environmental Ethics have larger factor scores to Public Acceptance

Covariance Structure Analysis to Questionnaire Result - Loadings of Each Question to 4 Factors -



Risk Communication

- Virtual Experiment on web Site -



Risk Communication - Virtual Field Experiment on web Site -

CO2海洋隔離実験に関するサイエンスカフェ - Microsoft Internet Explorer

アドレス http://lemons.ku-tokyo.ac.jp/questionnaire/private/index.htm

【更新情報】

1/12
実験条件及び生物影響を変更しました。

1/10
実験条件及び生物影響を変更しました。

1/7
訂正

生物影響について訂正があります。
(前)魚類の死亡率:1.16%
→(後)魚類の死亡率:0.00011%
申し訳ございませんでした。

1/6
モニタリングについての情報を追加しました。

【はじめに】

サイエンスカフェとは

議論が活発になるように、
また研究者と市民の
交流が深まるように、比較的小規模
かつ対面的なコミュニケーションの場
演出するものです。

Questionnaire about CO₂ Ocean Sequestration

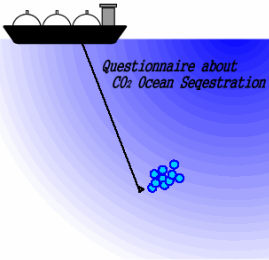
menu

はじめに

海洋隔離について

実験NEWS

BBS / Form



CO2海洋隔離実験に関するサイエンスカフェ - Microsoft Internet Explorer

アドレス http://lemons.ku-tokyo.ac.jp/questionnaire/private/index.htm

【実験ニュース】

モニタリング

モニタリングはORNetを使用しています。(下図参照)

Questionnaire about CO₂ Ocean Sequestration

menu

はじめに

海洋隔離について

実験NEWS

BBS / Form



海洋にネットを投入し、魚を回収し、死亡した魚がいるかどうか確認します。



CO2海洋隔離実験に関するサイエンスカフェ - Microsoft Internet Explorer

アドレス http://lemons.ku-tokyo.ac.jp/questionnaire/private/index.htm

海洋隔離について

「CO₂海洋隔離」とは、「大気と海洋間で行われている自然プロセス」を促進させ、大気中の二酸化炭素濃度の上昇抑制を行うアイデアです。

自然のプロセスでは、海洋表層を通して大気から海洋へCO₂が吸収されていますが、吸収速度が緩やかのために、人類が排出するCO₂の全てを吸収することができません。

そこで、吸収速度を抑えている海洋表層を bypass して、直接海洋にCO₂を注入しようとする考えが生まれました。「CO₂海洋隔離技術」とは、自然のCO₂吸収プロセスを促進するために、大気と海洋を直接結び直す技術を示します。

Questionnaire about CO₂ Ocean Sequestration

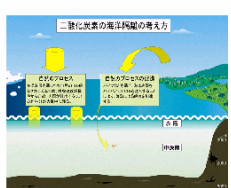
menu

はじめに

海洋隔離について

実験NEWS

BBS / Form



クリックすると拡大します

CO₂海洋隔離の隔離プロセスについてはこちらの動画をご覧下さい。(少々ダウンロードに時間がかかりますが、ご了承下さい:15M程度)

Risk Communication

- Free Discussions on web BBS site -

CO2海洋隔離実験に関するサイエンスカフェ - Microsoft Internet Explorer

ファイル(F) 編集(E) 表示(V) お気に入り(A) ツール(T) ヘルプ(H)

戻る 検索 検索 お気に入り

アドレス(A) http://lemons.ku-tokyo.ac.jp/questionnaire/private/index.htm

Google 検索 チェック オプション

Y! カスタマイズ 検索 ログイン エールを送ろう! プレミアム My Yahoo! ファイナンス Yahoo!メール ニュース 翻訳 スポーツ

Questionnaire about CO₂ Ocean Sequestration

menu

はじめに

海洋隔離について

実験NEWS

BBS / Form

※こちらで投票を行ってください。次回の締め切りは1月16日です。

実験条件が変更されました。

あなたはこれ以上海洋隔離実験を続行してほしいと思いますか？
それとも中止するべきですか？

以下の空欄を埋めた上、選択肢をひとつ選んで送信ボタンを押してください。

所属
[京都大学]

男性
 女性

このままこの海洋隔離実験を続けるべきだと
 思う
 思わない
 分からない

送信

Re: はじめまして nobu - 2006/01/23(Mon) 10:25 No.54

言葉足らずですみません。地球上の総量というのは「隔離した量」と「空気中の量」です。地球温暖化問題の「根本的な解決」とは、大気中への排出量を削減することと温室効果ガスが排出されない技術にシフトしていくことだと思います。温室効果ガスが排出されない技術へ完全に移行してしまえば、隔離する必要もなくなると考えています。

Re: はじめまして StudentA - 2006/01/23(Mon) 14:04 No.55

nobuさんが述べている「温室効果ガスが排出されない技術」というのは、
① 温室効果ガスを回収できる技術
② 温室効果ガスを排出しないグリーンエネルギー技術
のどちらでしょうか？

①ならば、CO₂を隔離するためにはまず回収しなければならぬので、nobuさんの通りです。ただし、年間12億t-CO₂もの二酸化炭素は、地上に貯蔵場所を十分に確保することは困難であるので、やはり海洋隔離や地中隔離などの技術を使うべきでしょう。

②ならば、地球温暖化によって被害が顕著になる前に、グリーンエネルギーが主流になる可能性は低いと思われます。

Re: はじめまして nobu - 2006/01/23(Mon) 18:07 No.56

◎です。でもいずれにしろ化石燃料も

Re: はじめまして nobu - 2006/01/23(Mon) 18:12 No.57

(上のつづき)枯渇してしまうわけです。それに隔離の限界量に達してしまえば、それ以上は隔離できなくなるので、この技術にすべて頼ろうとするのは無理ですよね。

Re: はじめまして マット - 2006/01/24(Tue) 02:58 No.59

この技術は、地球環境問題を解決・改善すると同時に新たな問題(深海の生態系への影響)を生み出すという点が、他の温暖化対策技術にはない特徴だと思えます。だからこの技術をなるべく使わなくても済むようにしたいですが、Aさんが言うように現実にはきびしいんでしょうね。

Re: はじめまして うち - 2006/01/27(Fri) 10:36 No.64

石油はあと2、30年で枯渇してしまうと言われていますが、石炭はまだ大量にあります。石炭はさらにCO₂排出が大きく、海洋隔離技術を使うチャンスはやってくると思います。

Re: はじめまして nobu - 2006/01/30(Mon) 23:01 No.65

石炭火力発電って減少傾向にあると思うのですが、それでもやはり隔離するの必要性があるということですか。

Re: はじめまして うち - 2006/01/31(Tue) 10:15 No.66

Risk Communication

- Tree Structure of Discussions on web BBS-

	PGR	AR	行
海洋隔離についての懸念	0.61	1.00	1
○ 生態系への影響が不安	0.36	0.28	
○ 不安は取り除けないのか?	1.00	0.02	
○ 実験を行えばいい	0.58	0.22	
○ 実験を行ってもわからない問題はある	1.00	0.02	
○ 深刻な影響を出す可能性もある	1.00	0.02	
○ 慎重に実験を行えばいい	0.67	0.17	
○ 繰り返し実験を行えばいい	0.67	0.12	
○ どんなに努力しても影響はでる	0.20	0.10	
○ 人間のために生物を犠牲にしているのか	0.75	0.09	10
○ 地球温暖化を放置しても生物に影響はある	0.00	0.07	
○ いつでも実行できるように準備はすべき	1.00	0.02	
○ 実験により少しでも多くのことを解明すべき	1.00	0.03	
○ 実験してももしなくても同じなのでは	1.00	0.02	
○ 結果を検討し一般の人々の理解を得るべき	0.00	0.03	
○ 環境団体の反対がある	1.00	0.02	
○ 多少の損害は目をつむるべき	1.00	0.02	
○ 実験は中止すべきでない	1.00	0.05	
○ 地球温暖化に対して他に有効な打開策がない	1.00	0.03	
○ 削減ポテンシャルが魅力的	1.00	0.02	20
○ 濃度を上げて実験を行うべき	0.62	0.22	
○ 生物量が少ない海域なら比較的高い濃度でも良いと思う	0.64	0.22	
○ 生物調査を長期で行うべき	1.00	0.02	
○ 貴重な生物がいる可能性もある	0.33	0.17	
○ 生物が多いところよりは少ないところを選択すべき	0.50	0.05	
○ 短期の死亡率だけを考えるならそれでよい	1.00	0.02	
○ 生物量の少ない場所でさらに生物を少なくしてしまえば	1.00	0.02	
○ その海域の生態系は回復不能になるのでは			
○ 生物量の多い場所で隔離して回復力に期待する	0.60	0.10	
○ やはり、多い場所で行う方がよいのでは	1.00	0.03	30
○ 結局規制が甘そうなのでどこでもできるのでは	1.00	0.02	
○ 生物量が多くても回復力はわからないのでは	0.50	0.05	
○ 回復力を測る実験を行う必要がある	0.00	0.03	
○ 季節、年度により変化するので	1.00	0.02	
○ 良い実験結果は得られない			
○ 生物量より希釈技術の発展を重視すべき	1.00	0.02	
○ 技術的に優れたものだ	1.00	0.02	
○ 隔離量に限界があるのでは	1.00	0.02	
○ 地球上の総量は変わらない	0.50	0.12	
○ 空気中の濃度を下げれば温暖化が防げる	0.40	0.10	40
○ 大気への排出量を削減するべき	0.50	0.09	
○ 地球温暖化が深刻化する前でのクリーンエネルギーの台頭は困難	0.33	0.07	
○ 海洋隔離に頼りすぎるのは問題	0.50	0.05	
○ なるべく使わないようにしたい	1.00	0.02	
○ 現実では使わざるを得ない	1.00	0.02	

Risk Communication

- Logic Analysis of Discussions on web BBS-

Definitions

Proof (p)	ApB: Argument Unit B is inevitably the truth by Argument Unit A
Support (s)	AsB: Argument Unit B is possibly the truth by Argument Unit A
Challenge (c)	AcB: Argument Unit B is possibly the false by Argument Unit A
Disproof (d)	AdB: Argument Unit B is inevitably the false by Argument Unit A
Others (o)	AoB: Argument Unit B does not have logical result by Argument Unit A

Axioms

$$pp \equiv sp \equiv p$$

$$ps \equiv ss \equiv cc \equiv cd \equiv dc \equiv dd \equiv s$$

$$pc \equiv cp \equiv sc \equiv cs \equiv dp \equiv ds \equiv c$$

$$pd \equiv sd \equiv d$$

$$op \equiv os \equiv oc \equiv od \equiv oo \equiv o$$

Positive Ground Ratio (PGR)

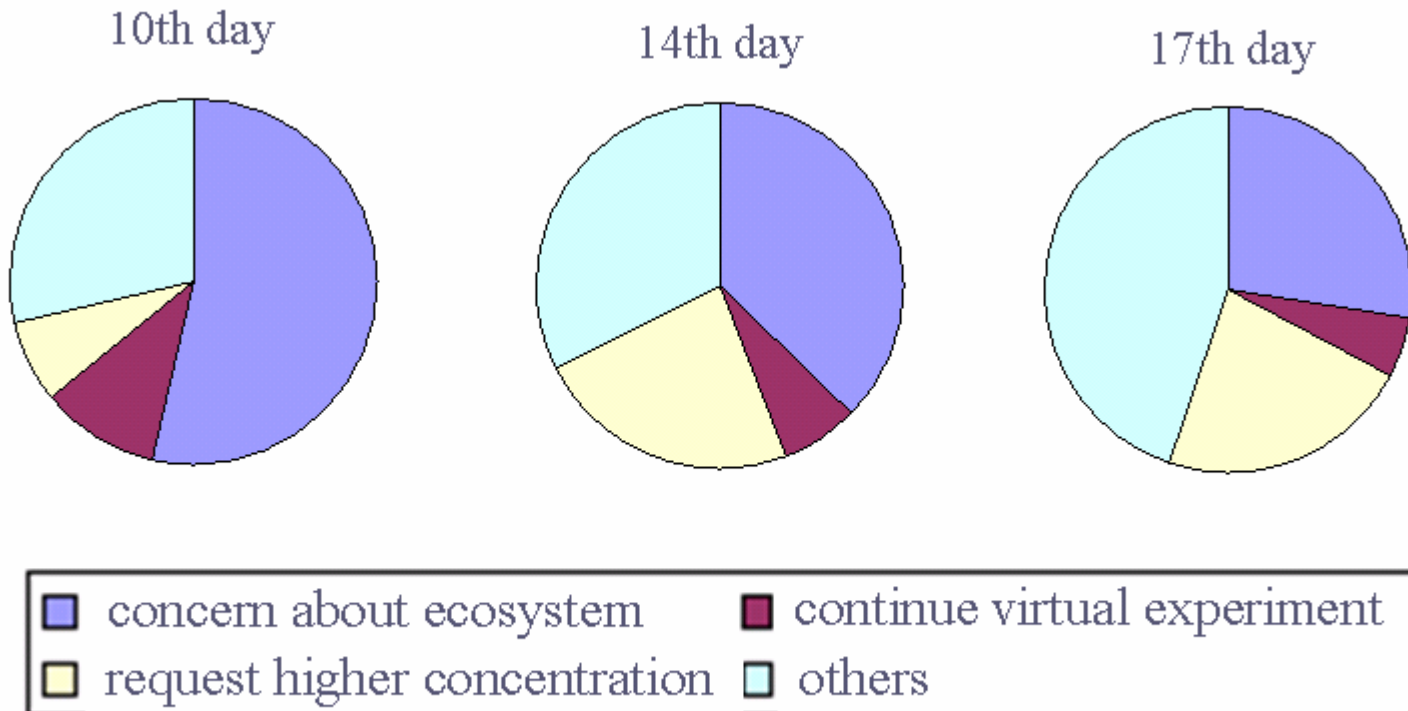
$$PGR_A = \frac{i_p(A) + i_s(A)}{i_p(A) + i_s(A) + i_c(A) + i_d(A)}$$

Attention Ratio (AR)

$$AR_A = \frac{\sum_{j \in \{p,s,c,d,o\}} i_j(A) + 1}{\sum_{a \in \Omega} \sum_{j \in \{p,s,c,d,o\}} i_j(a)}$$

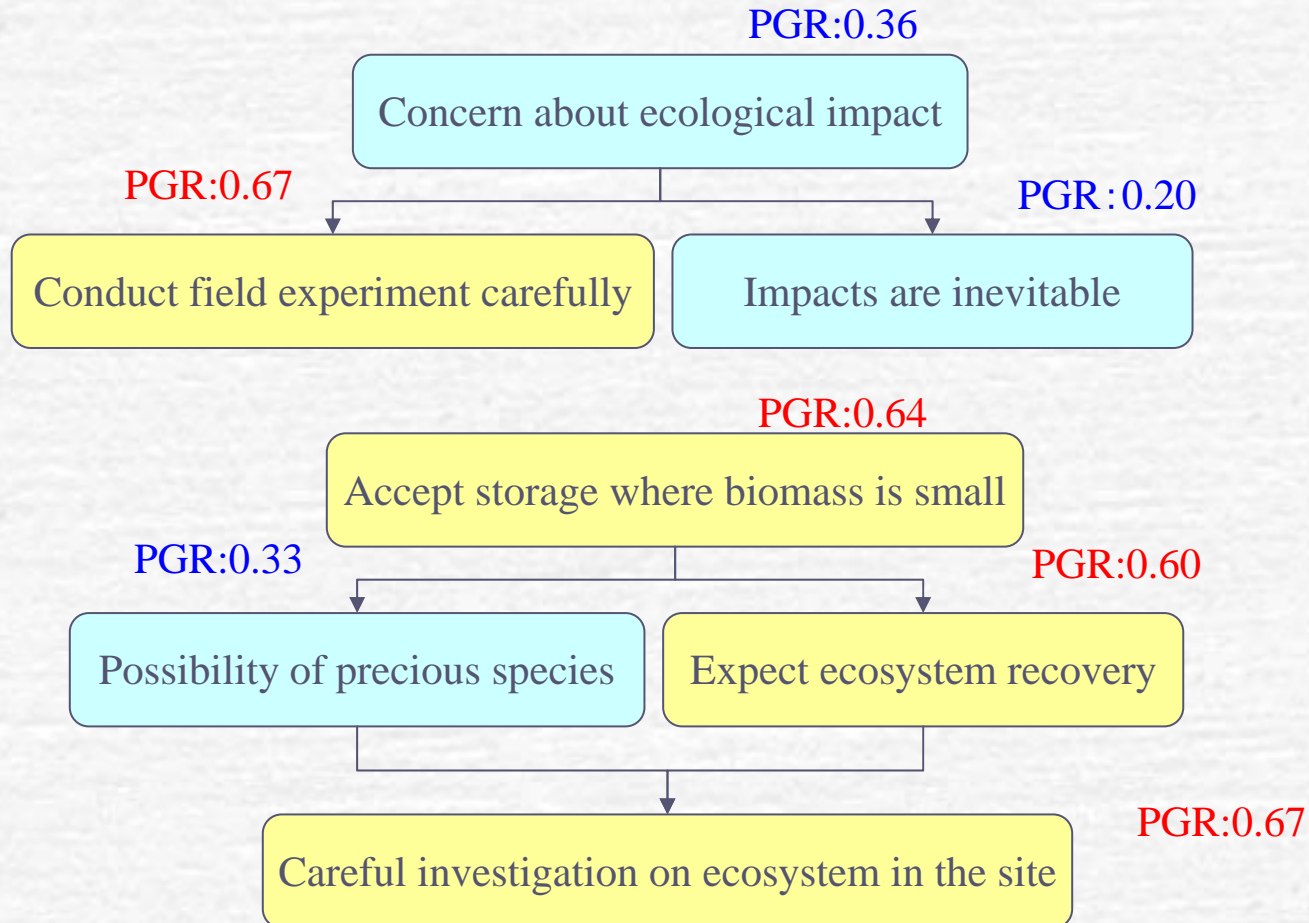
$i(A)$: Number of Argument Unit A

Risk Communication - Time Change of AR Distribution -



Risk Communication

- Resultant Two Major Discussion Structures -



Situation Surrounding CCS

CCS in IPCC

- IPCC Montreal: Special Report on CCS (Sept 2005)
 - CCS can reduce the cost for mitigation of greenhouse gas effect in this century by more than 30%
 - If CO₂ cost is more than \$25-30/tCO₂, CCS will be efficient
 - Geological Storage: potential of 200-2200 GtCO₂
 - Ocean Storage: still on research stage
 - EU (Sub-Seabed, no Ocean), Japan Korea (Ocean), US Australia (Sub-Seabed, no comment to Ocean), Saudi China (sitting on the fence)

Legal Issue - London Dumping Convention

- London Convention (LC) on the Prevention of Marine Pollution by Dumping of Wastes and Other Matter
 - Protocol 1996
 - Annex 1: Reverse List
 - Annex 2: Waste Assess Framework (WAF)
 - Waste Assess Guideline (WAG): not the subject to be ratified
 - Adopted in Nov 2005, Issued in March 2006
 - US, Japan not ratify yet
 - Japan is preparing for ratification in near future (2007 ?)

CCS in London Convention

- LC26 (Nov 2004)
 - ✓ UK proposed WG for CO₂ for Sub-Seabed Geological
- SG28 (May 2005)
 - ✓ Geological storage should be discussed in LC
 - ✓ Surface ocean acidification and economical benefits
 - ✓ Necessity of monitoring for leak risk
- LC27 (Oct 2005)
 - ✓ UK, Australia, France, Norway proposed CO₂ in Reverse Lists
 - ✓ Opinion Book by Feb 2006
 - ✓ Hold WG for CCS
- **Protocol 96 was Issued (March 2006)**
- WG for LC27 (April 2006)
 - ✓ CO₂ should be in Reverse List
 - ✓ Discussion on CO₂WAF/WAG (Sub-Seabed) with Greenpeace
- SG29 (May 2006)
 - ✓ Drafts of revised Reverse List and CO₂WAF/WAG (Sub-Seabed)

Future Movement of CCS in LC

- LC28/LP1 (Oct 2006)
 - Adopt the revision of Reverse List ?
- SG30 (May 2007)
 - Finalise Draft of CO₂WAF/WAG ?
- LC29/LP2 (Oct 2007)
 - Adopt CO₂WAF/WAG ?

Way to Go

CO₂ Ocean Storage Project of RITE, Sponsored by METI, Japan

🌐 till 2006 (Phase 2)

- 🌐 technologies for dilution
- 🌐 acute and chronic biological impact
- 🌐 **public outreach** (stakeholders, academia)

🌐 till 2010 (Phase 3)

- 🌐 long-term biological impact by benthic and pelagic chambers
- 🌐 **small-scale field experiment** (Canada, US, Korea, Norway)
- 🌐 **international collaborations**

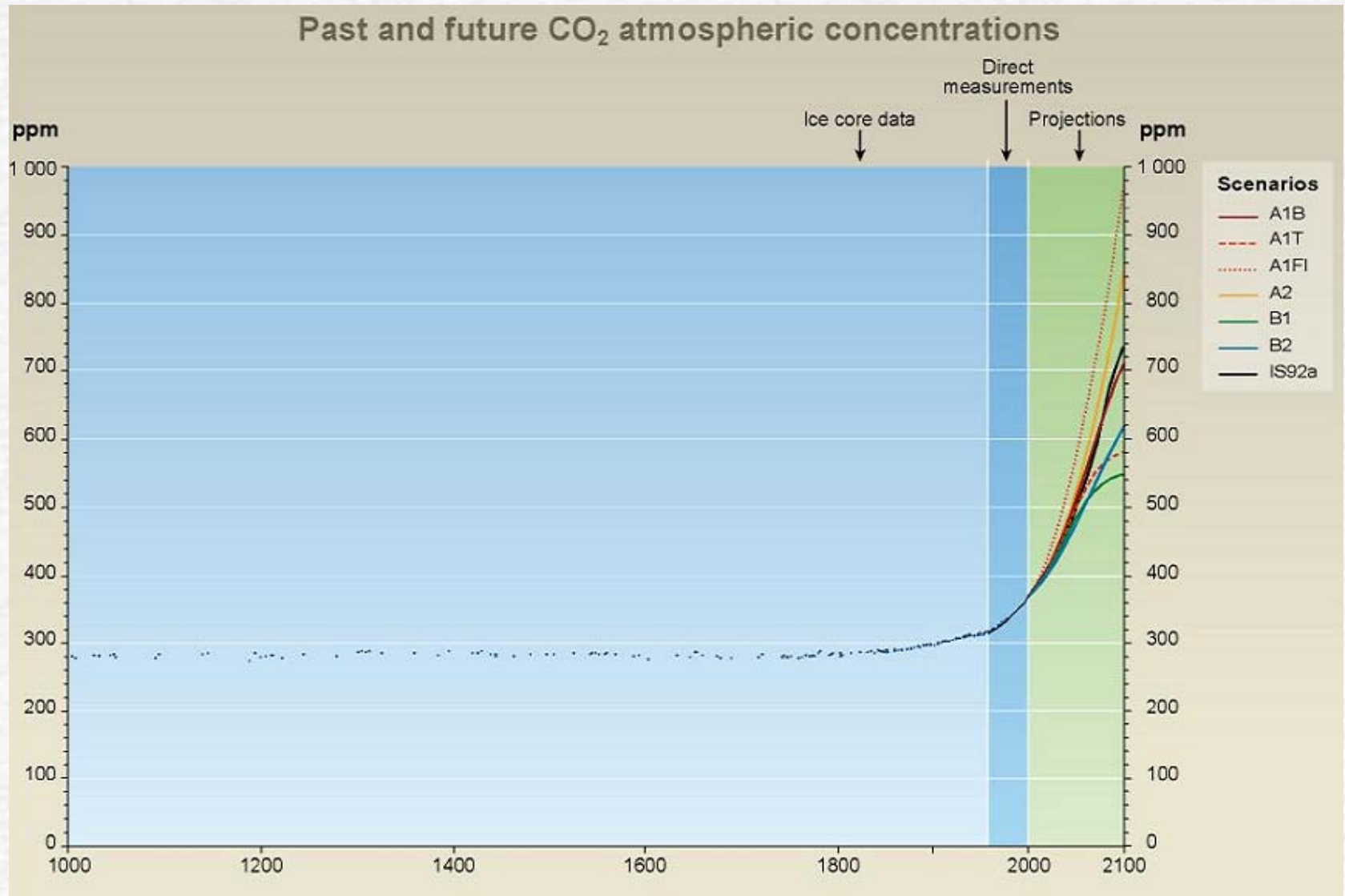
🌐 till 2015 (Phase 4)

- 🌐 **real-scale field experiment**
- 🌐 **international public acceptance**
- 🌐 revision of CO₂WAF/WAG of London Convention

The image features a light blue background with a faint grid pattern. At the top and bottom, there are decorative horizontal bands with wavy, dark blue lines. The word "End" is centered in the middle of the page.

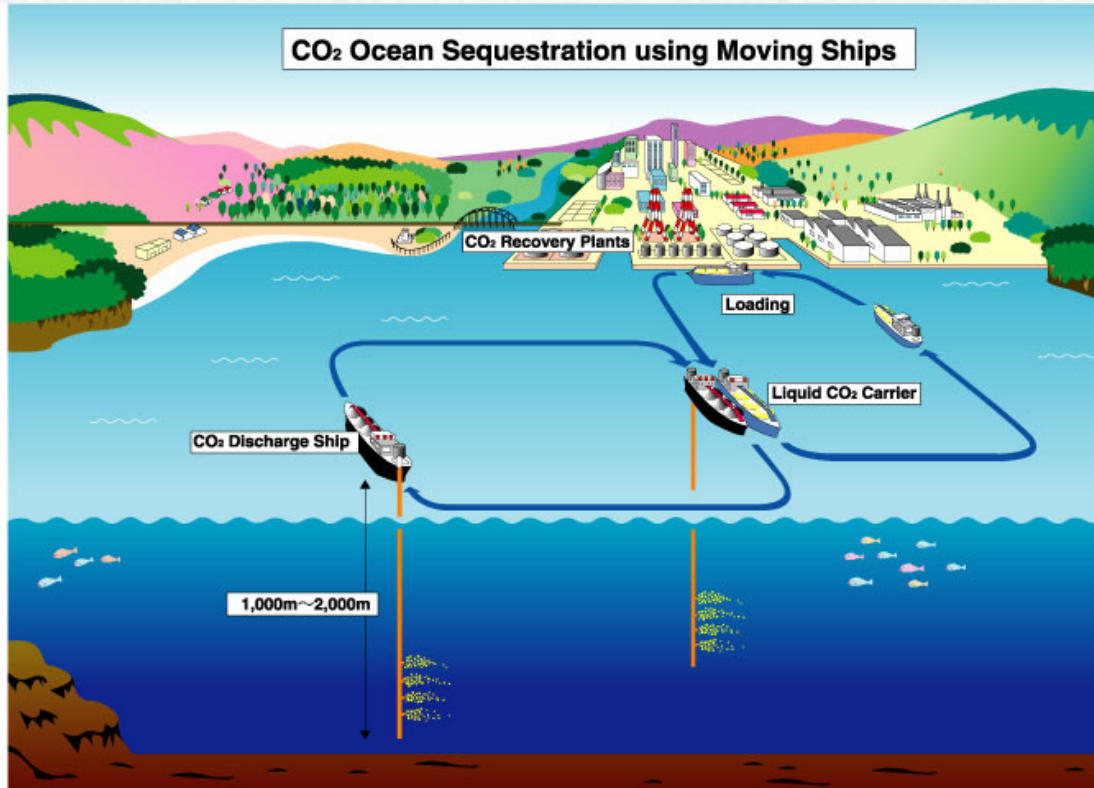
End

Surface Ocean Acidification



(IPCC)

Moving Ship Method



(RITE)

- Potential amount in the whole Ocean: 7300GtCO₂
- Emission from Japan: 1.4GtCO₂/year

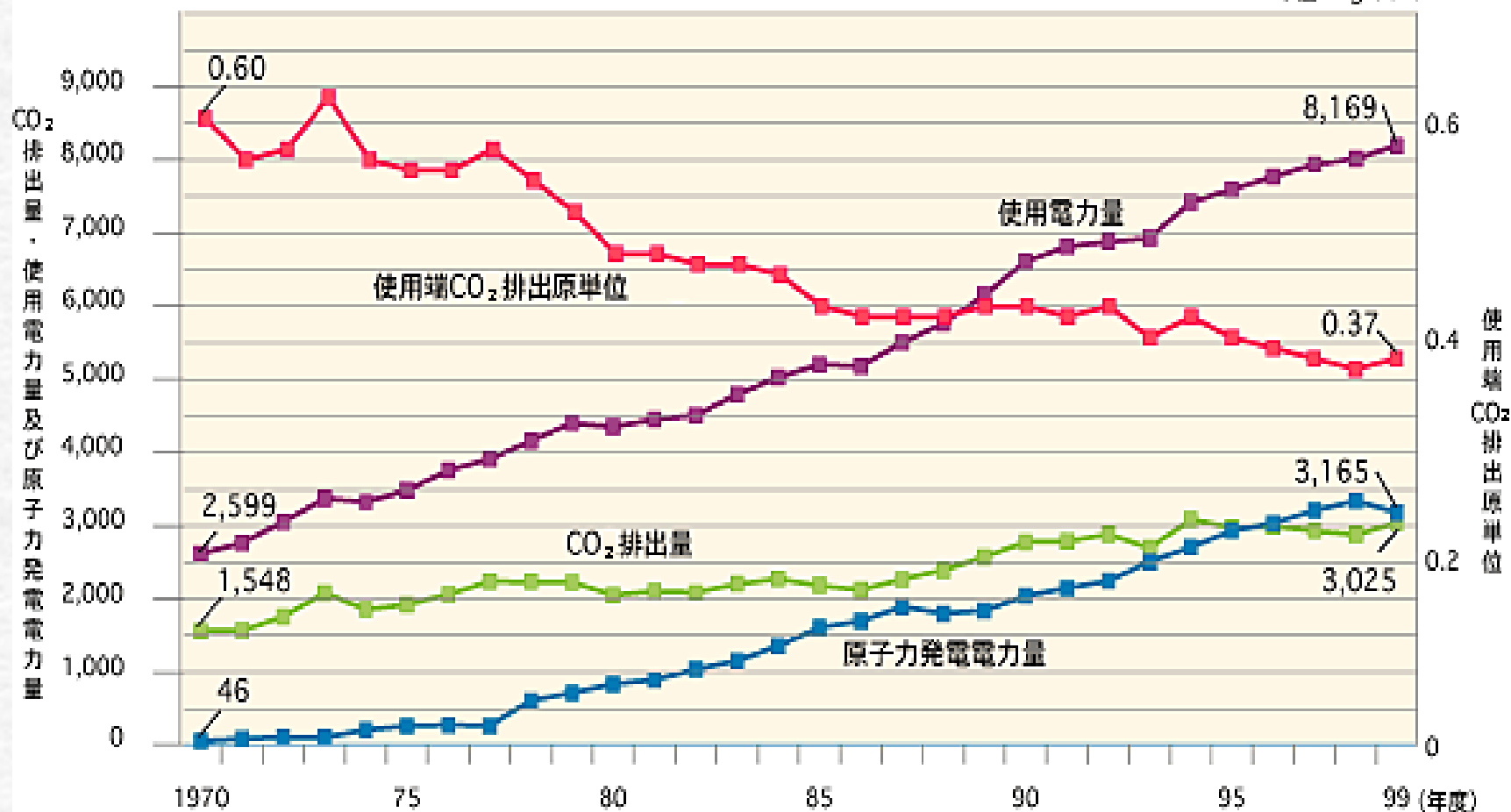
- Planned storage amount: 50MtCO₂/year

- Storage site: 300kmX100kmX1000m
If well diluted, the increase of pCO₂ is 0.67ppm

Time Changes of CO2 Emission & Electricity Supply in Japan

単位：10万t-CO₂ 億 kWh

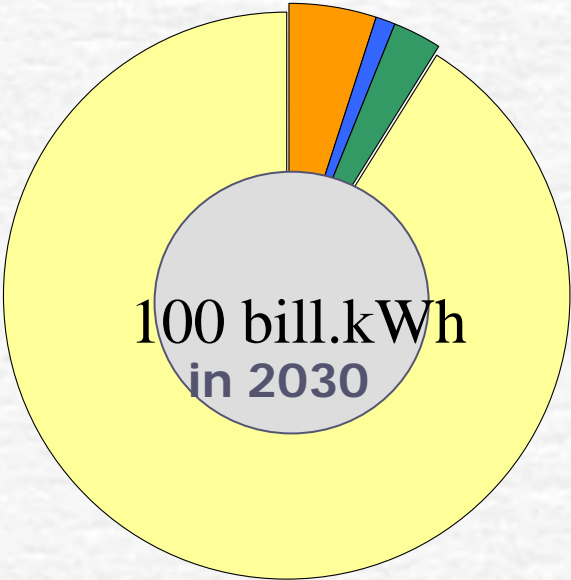
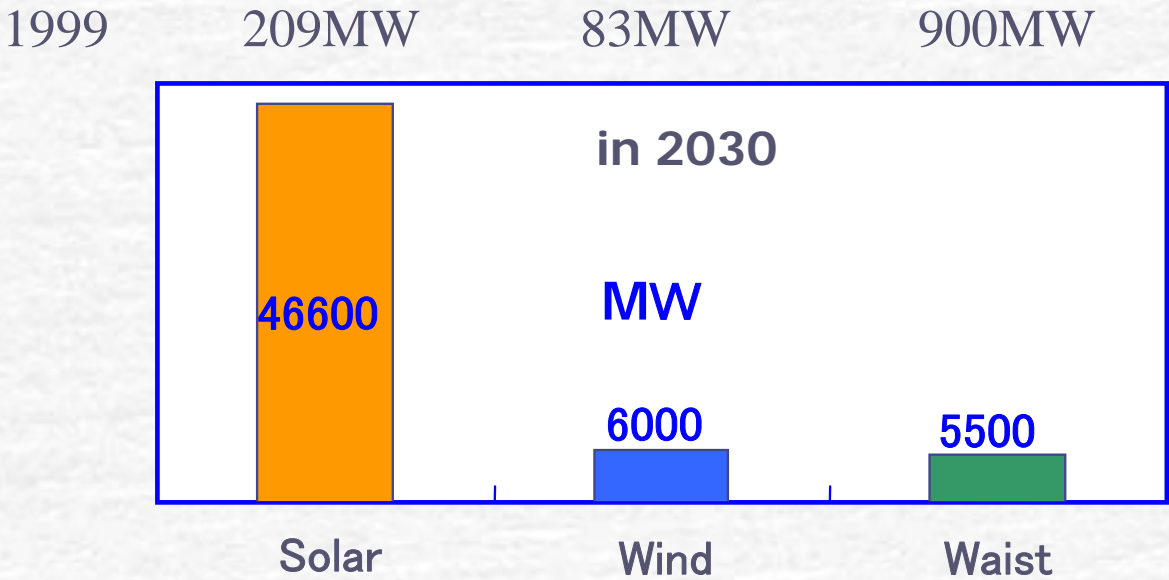
単位：kg-CO₂/kWh



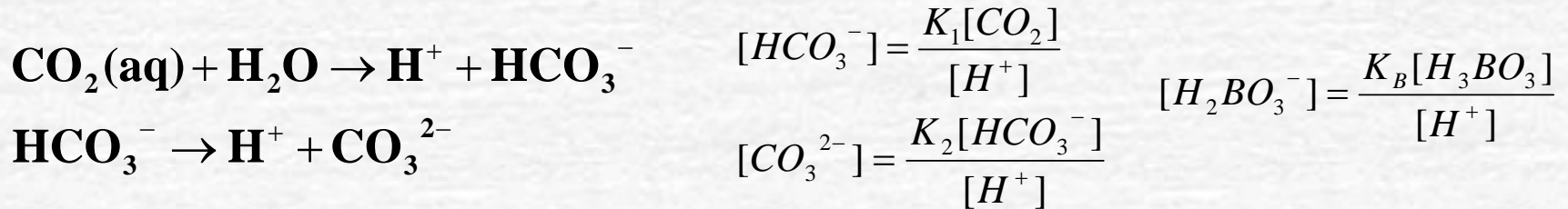
(注) CO₂排出量 (10万t-CO₂)、使用電力量及び原子力発電電力量 (億kWh)
使用端CO₂排出原単位 (kg-CO₂/kWh)

出所：電気事業連合会調べ

Estimation of Renewable Energy Supplies in 2030 in Japan



Calculation of pCO₂



$$\left\{ \begin{aligned} A &= [\text{HCO}_3^-] + 2[\text{CO}_3^{2-}] + [\text{H}_2\text{BO}_3^-] + [\text{OH}^-] - [\text{H}^+] = 2.435 \times 10^{-3} \text{ (M)} \\ B &= [\text{H}_3\text{BO}_3] + [\text{H}_2\text{BO}_3^-] = \left(1 + \frac{[\text{H}^+]}{K_B} \right) [\text{H}_2\text{BO}_3^-] = 0.409 \times 10^{-3} \text{ (M)} \\ C &= [\text{CO}_2] + [\text{HCO}_3^-] + [\text{CO}_3^{2-}] \end{aligned} \right.$$

↓

$$\sum_{n=0}^4 E_n [\text{H}^+]^n = 0$$

$$\left\{ \begin{aligned} K_w &= [\text{H}^+][\text{OH}^-] = 6.463 \times 10^{-15} \text{ (M}^2\text{)} \\ -\log_{10} K_1 &= \frac{3523.46}{T} - 15.5873 + 0.034153T - 0.074709\sqrt{Cl} - 0.0023483Cl \\ -\log_{10} K_2 &= \frac{2902.39}{T} - 6.4980 + 0.023790T - 0.45322\sqrt{Cl} + 0.035226Cl \\ -\log_{10} K_B &= \frac{2291.90}{T} - 3.3850 + 0.01756T - 0.32051\sqrt{Cl} \end{aligned} \right.$$

$$S = 0.03 + 1.805Cl$$

Environmental Risk

Human Risk

- Human Health
- Social Resources

Ecological Risk

- Primary Production
- Extinction of Species