

「未来社会を支える温暖化対策技術
シンポジウム in 関西 2020」

CO₂地中貯留技術実用化に向けての
安全管理技術開発の取り組み

— 海域CO₂貯留における海洋環境影響評価 —

二酸化炭素地中貯留技術研究組合・技術部長

(公財)地球環境産業技術研究機構 (RITE)
CO₂貯留研究グループリーダー

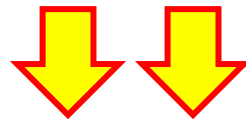
せつ じきゅう

薛 自求

Ziqiu Xue (xue@rite.or.jp)



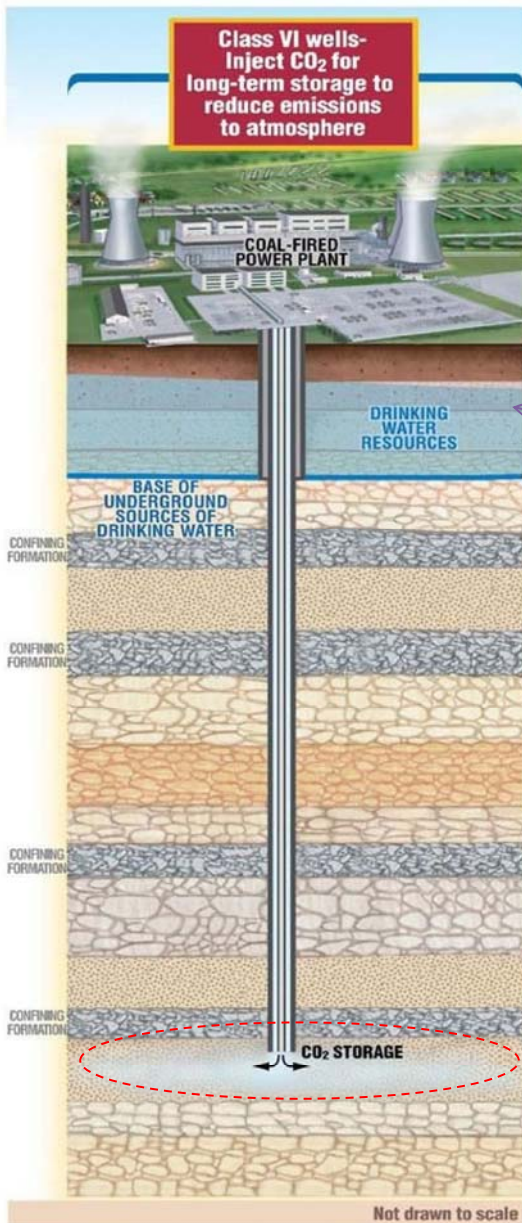
- 大規模CO₂地中貯留の**実用化**に向けて
 - ✓ 油ガス田開発技術・経験・ノウハウを活用しても、**取り組む**べき技術課題がある
 - ✓ **安全性** (リスクマネジメント)、**経済性** (コスト削減)、**社会的受容性**の向上



*Losses of Injectivity, Capacity and Containment,
Induced Seismicity, Environmental Impacts*

環境影響評価(陸上・**海域**)

米国の陸上CO₂地中貯留における環境影響評価(飲料水保護法)



Class VI - Wells used for Geologic Sequestration of CO₂

On this page:

- [Definition of Class VI wells](#)
- [Protecting drinking water resources](#)
- [Requirements for Class VI wells](#)
- [Background information about geologic sequestration](#)
- [Class VI guidance documents](#)
- [Geological Sequestration Data Tool](#)
- [Additional information](#)

- [Comprehensive monitoring requirements that address all aspects of well integrity, CO₂ injection and storage, and ground water quality during the injection operation and the post-injection site care period](#)

海域CO₂地中貯留に関しては、関連法規が議論中

(Webb and Gerrard, 2019)

海域CO₂地中貯留に関する国際合意

International Agreements Respecting Offshore CCS

- ✓ the 1972 Convention on the Prevention of Marine Pollution by **Dumping of Wastes** (**London Convention**): ロンドン条約
- ✓ the 1996 **Protocol** to that Convention (**London Protocol**): ロンドンプロトコール



to prevent pollution of the marine environment as a result of “dumping”

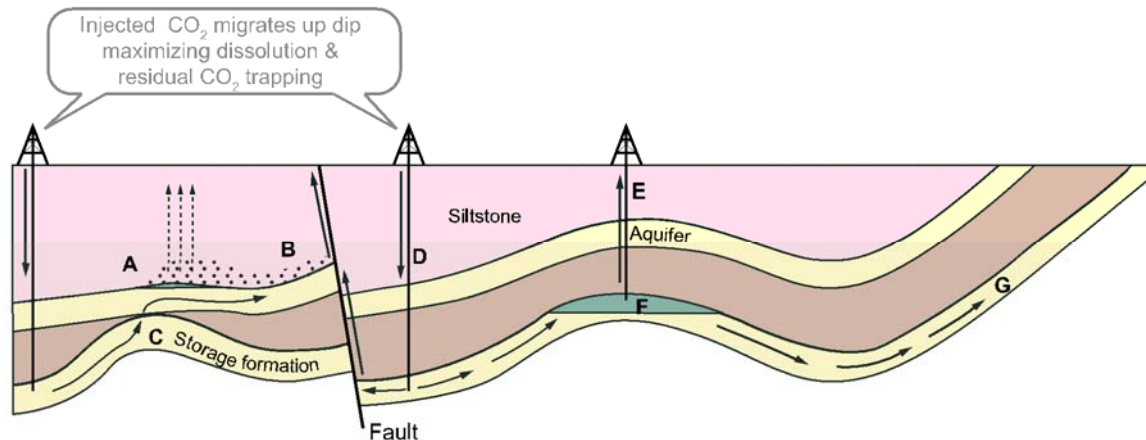
In 2006, when Annex 1 to the London Protocol was amended to list “**carbon dioxide streams** from carbon dioxide capture processes for sequestration.”

Thus, the London Protocol now expressly **allows** the sub-seabed injection of carbon dioxide for the purposes of sequestration, provided the injection operation is **permitted by the relevant national authority**.

平成16年に「海洋汚染等及び海上災害の防止に関する法律」を改正、**環境大臣の許可**がなければ廃棄物等の海水への投棄ができない。平成19年にCO₂の海底下廃棄を追加改正。**「特定二酸化炭素ガスの海底下廃棄の許可等に関する省令」**

Main possible pathways for potential leakage

- ✓ Abandoned Wells (廃棄された坑井)
- ✓ Operational Wells (操業中の坑井)
- ✓ Caprocks (遮蔽層・泥質岩)
- ✓ Faults and fractures (断層 & き裂)



Potential Escape Mechanisms

A. CO ₂ gas pressure exceeds capillary pressure & passes through siltstone	B. Free CO ₂ leaks from A into upper aquifer up fault	C. CO ₂ escapes through 'gap' in cap rock into higher aquifer	D. Injected CO ₂ migrates up dip, increases reservoir pressure & permeability of fault	E. CO ₂ escapes via poorly plugged old abandoned well	F. Natural flow dissolves CO ₂ at CO ₂ / water interface & transports it out of closure	G. Dissolved CO ₂ escapes to atmosphere or ocean
--	---	---	--	---	--	--

潜在的漏洩経路とその漏洩規模

LEAKAGE RATE			Potential Leak Rates		Comparisons
SCALE					
Equivalent Annual Rate					
CO2 Tonnes/Year	CO2 Tonnes/Day	Kg/Year			
>10,000,000	>27,300				
>1,000,000	>2,730				
>100,000	>273.3				
>10,000	>27.3				
>1000	>2.73				
100-1000	0.27-2.7				
10-100	0.027-0.27				
1-10.	0.0027-0.027				
0.1-1.0		100-1000			
0.001-0.1		<100.			

GHGT-12

Numerical simulation of CO₂ leakage along fault system for the assessment of environmental impacts at CCS site

Takahiro Nakajima^{a*}, Ziqiu Xue^a, Shun Chiyonobu^b, and Hiroyuki Azuma^a

^aResearch Institute of Innovative Technology for the Earth (RITE), 9-2 Kizugawadai, Kizugawashi Kyoto 619-0292, Japan

^bAkita University, 1-1 Tegata gakucho, Akita 010-8502, Japan

既存断層
(大曲断層・北海道)

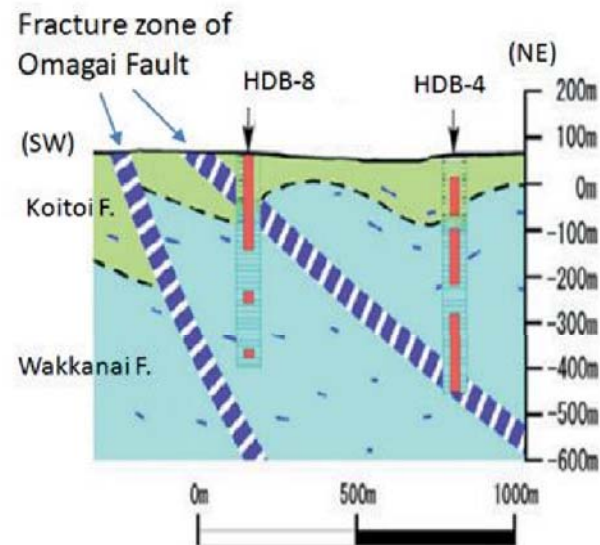


Fig. 1. Boreholes which penetrates Omagari fault, northern part of Japan (modified [6]).

断層モデル概要

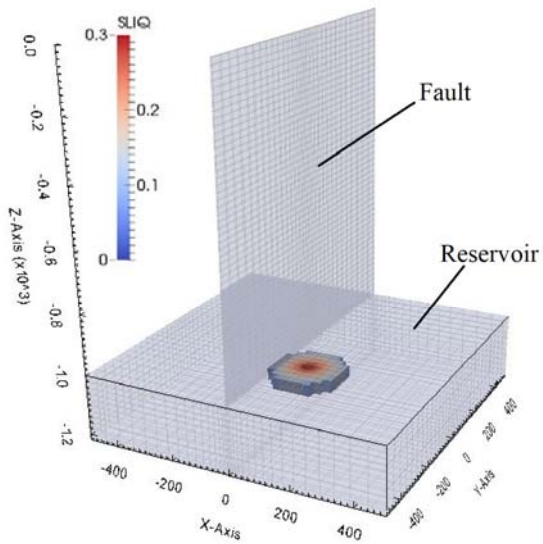


Fig. 4. Mesh for the migration simulation and the initial CO₂ saturation.

Table 1. Model parameters of base leakage case

Parameter	Value
Modeled area	1000m(X) x 1000m(Y) x 1200m(Z)
Number of cells	30 (X) x 33 (Y) x 122 (Z)
Number of active cells	13410
Perm. of the fracture	200 mD
Perm. of the reservoir	10 mD
Side boundary	Wall
Top & bottom boundary	Constant temperature & pressure

CO₂漏洩の様子(断層内)

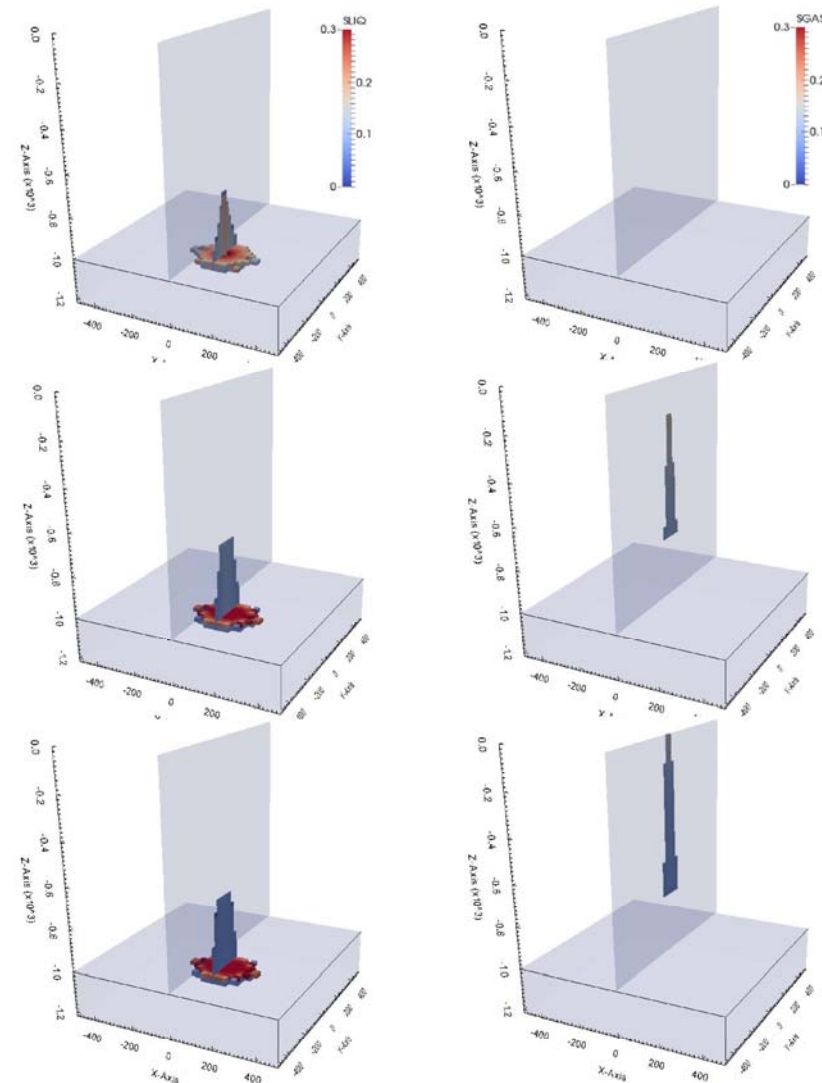


Fig. 5. Snapshots of CO₂ migration by the base model. Left panels show the liquid (including supercritical) phase, and right panels are the gaseous phases. From the top 1, 4, and 8 years later from the start of the migration.

CO₂漏洩の経時変化 & 漏出量

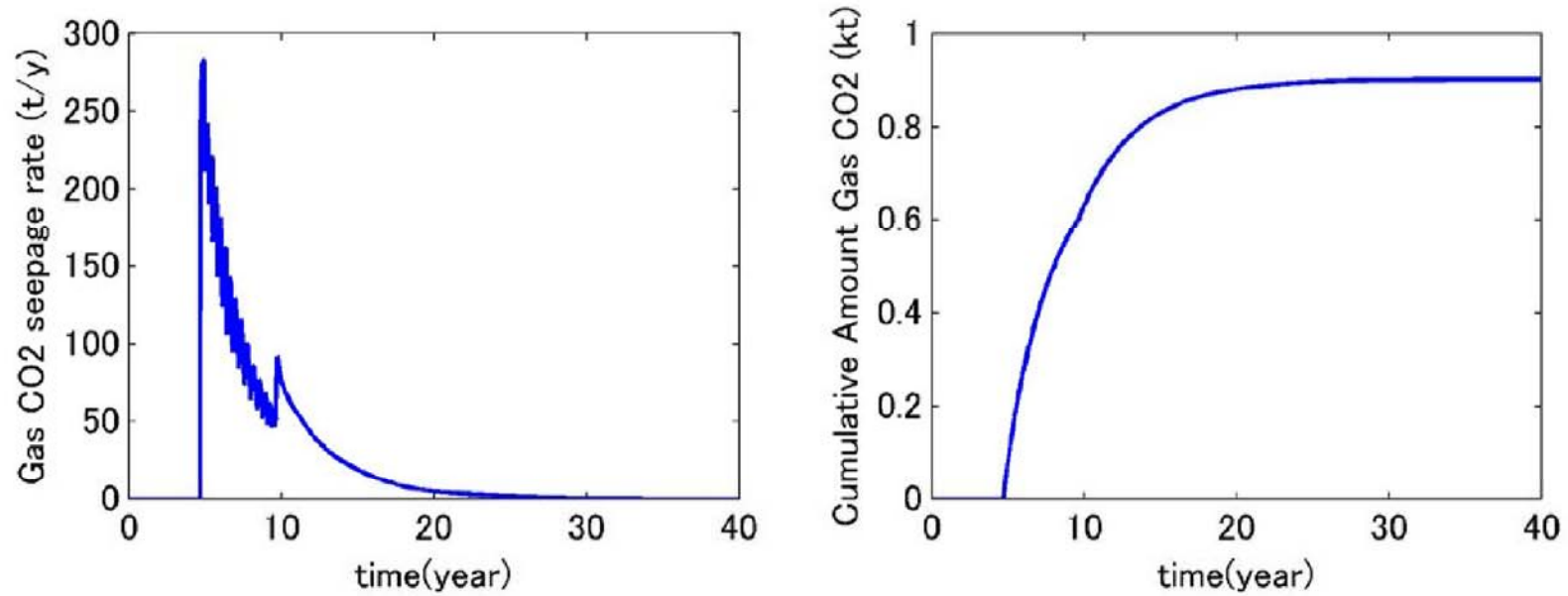


Fig. 6. Temporal variation of CO₂ seepage rate (left) and cumulative amount of escaped CO₂ (right) by the base model.

貯留層から海底面までに、5年もかかっています。貯留層の圧力低下により、漏れたCO₂の駆動力 (driving force) が大きく減少する (超臨界から液体、ガスへの相変換も考慮)。

断層の浸透性 vs CO₂漏洩期間 & 漏出量

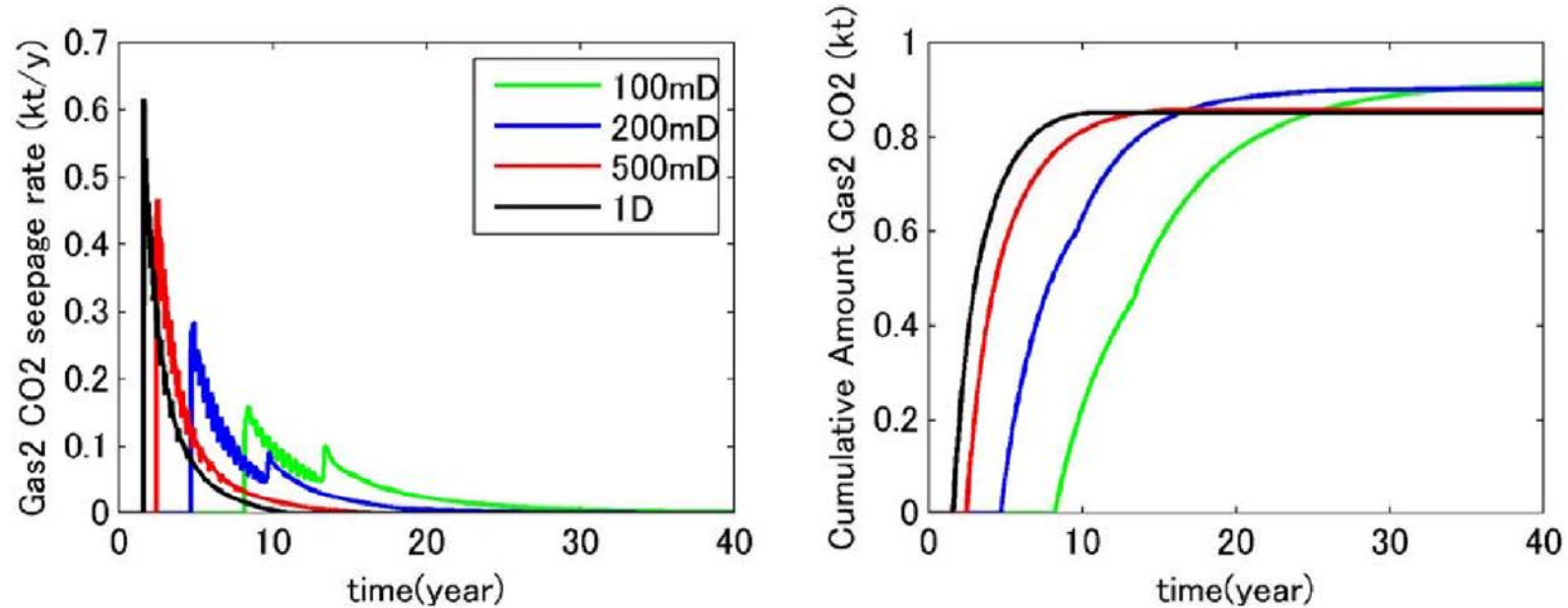
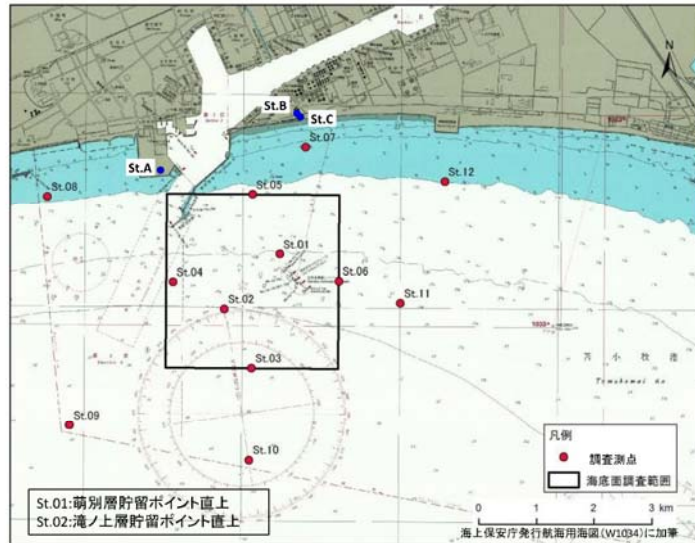


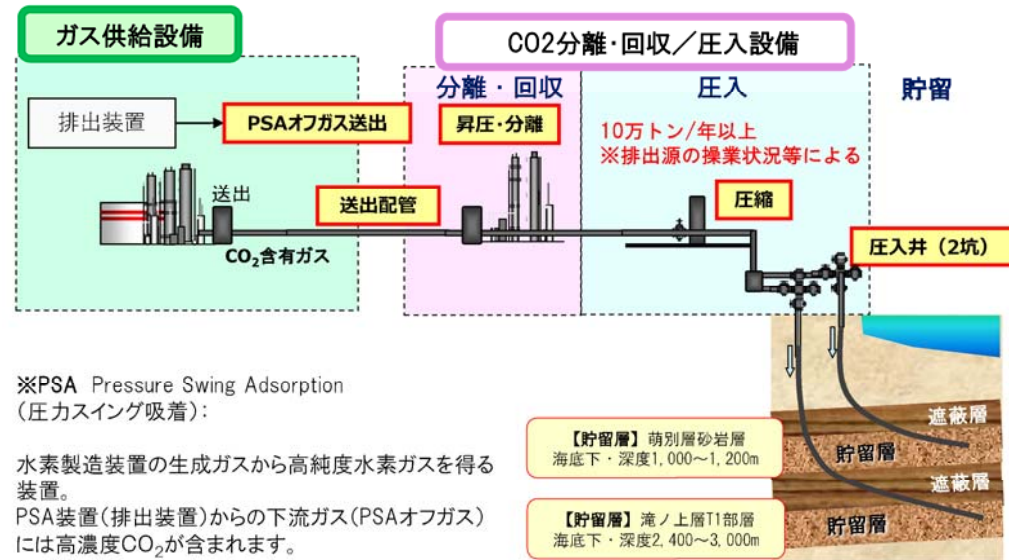
Fig. 7 .Temporal variations of CO₂ seepage rate and cumulative amount of escaped CO₂ from the models with different fault permeability.

断層破碎帯の浸透性を変えたCase Studyも実施し、浸透率が大きいと漏出は早く収束する。

苫小牧CCS大規模実証試験(海底下地層へのCO₂貯留)



地上の3地点(St.A~C)と海上の12地点(St.01~12)で二酸化炭素濃度の季節観測を実施しています。



※PSA Pressure Swing Adsorption (圧カスイング吸着):

水素製造装置の生成ガスから高純度水素ガスを得る装置。
PSA装置(排出装置)からの下流ガス(PSAオフガス)には高濃度CO₂が含まれます。

二酸化炭素(CO₂) 圧入量実績

2016年の春季の海洋調査では、事前調査よりも高いpCO₂を観測した。確認調査を実施し、その間は圧入停止となった。

CO₂圧入量、累積圧入量(速報)

圧入停止中

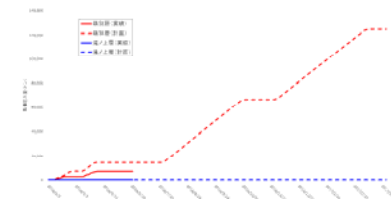
累積CO₂圧入量
(2016年4月6日~2016年5月24日)

7,162.9 トン

2016年6月の圧入実績と2016年7月の圧入計画

	月間圧入実績 (2016年6月)	月間圧入計画 (2016年7月)	累積圧入実績 (2016年6月末)
萌別層	0トン	0トン	7,162.9トン
滝ノ上層	0トン	0トン	0トン

年間圧入計画(2016年度)と2016年6月末までの



現在、圧入再開に向け調整中です。再開時期につきましては、確定次第お知らせ致します。

その後の対応と圧入再開

苫小牧地区におけるCCS大規模実証プロジェクト
二酸化炭素圧入作業再開のお知らせ

平成28年6月から7月にかけて、二酸化炭素貯留海域において実施した海洋汚染防止法の許可申請書に基づく春季海洋環境調査において、一部の観測点で、海水中の二酸化炭素濃度に「基準線」を上回る値が確認されたため、経済産業省は、追加の採水調査及び分析等を行い、その結果を環境省に報告しました。環境省で報告内容を検討した結果、同年10月13日に環境省より、漏出は発生していなかったと考えられる旨、及び今後の監視計画のあり方が経済産業省に示されました。特に、監視計画については、今後、採水調査によって基準線を上回る値が得られた場合には、採水調査に加えて、より直接的に二酸化炭素の漏出の有無やそのおそれを確認するための調査を迅速に実施したうえで二酸化炭素漏出の有無を総合的に判断できるような監視計画のあり方について取りまとめられ、「海底下 CCS 事業に係る監視計画のあり方について」として経済産業省へ示されました。

これらを踏まえ、経済産業省では監視計画の見直し作業を行い、平成28年12月28日に「海洋汚染防止法に基づく監視計画の変更許可申請書」を環境省に提出しました。

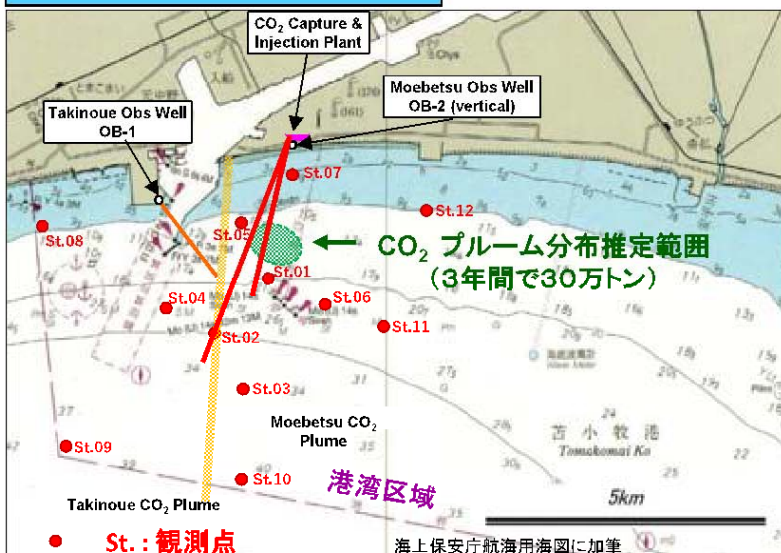
変更許可申請書について、一ヶ月間の公告縦覧が行われた後、平成29年2月1日、環境省から経済産業省に変更許可証が交付されましたので、下記のとおり圧入作業を再開する予定です。

- ・海底下の地層中への二酸化炭素圧入開始予定：平成29年2月4日（土）

海洋環境調査@苫小牧実証試験サイト

国際条約であるロンドン条約1996年議定書を反映した「**海洋汚染等及び海上災害の防止に関する法律(海洋汚染防止法)**」に則り、海洋環境調査の実施が求められている。

海洋環境調査地点

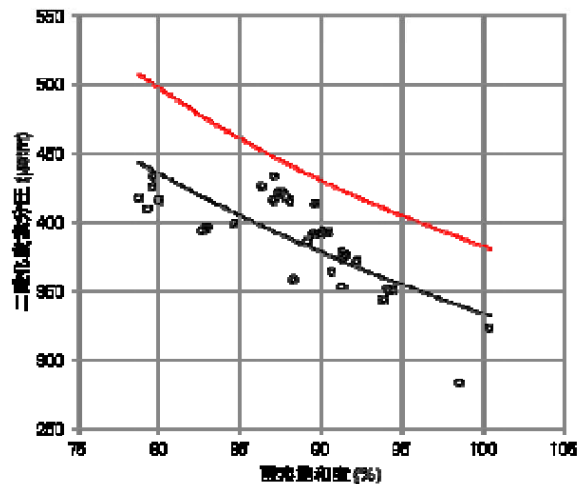


◆ 海水の化学分析に基づく移行基準(環境省指導)

- ・ 観測点: 8測点(12測点中、沿岸4測点を除く)が対象
- ・ 自然変動の基準の算出: ベースライン調査(H25年8月~H26年5月)で得られた底層(海底面上2m)の酸素飽和度(%)と二酸化炭素分圧(μatm)との累乗近似曲線
- ・ 上側95%予測区間を超えた観測値が得られた場合は監視段階に移行

通常時監視 ⇒ 確認調査 ⇒ 懸念時監視 ⇒ 異常時監視

(澤田, 2018)



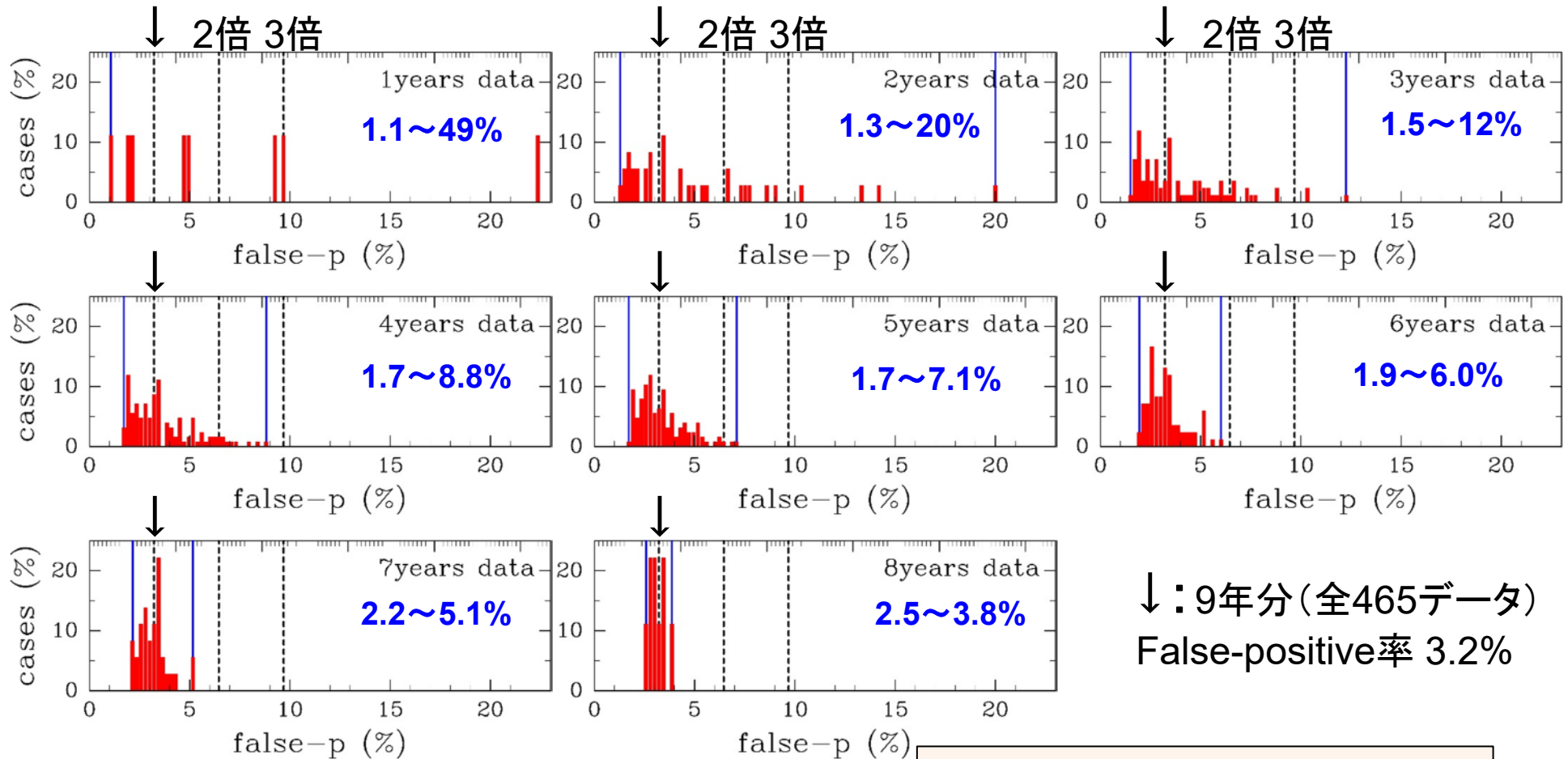
- ベースライン調査観測値(黒)
- 累乗近似曲線(ベースライン調査)
- 上側95%予測区間(ベースライン調査、移行基準の上限)

St.01 - St.12: 観測点(採水ポイント)、年4回(四季)の採水より海中の**CO2漏出を監視**
 海水中のCO2分圧と溶存酸素の関係を基に、圧入前の調査より**ベースライン**を作る。

ベースライン = 自然変動範囲 ←←← 何年分あれば、ベースラインになりうるか

大阪湾海洋観測公開データを用いた pCO₂異常値検出基準作りの検討

Uchimoto et al., 2018



縦軸: $100 \times (\text{該当する組み合わせ数} \div {}_9C_N)$

ベースライン: 5年程度以上

漏出検出：pCO₂異常値検出

連続観測（大阪湾）

結果速報（暫定値）

観測日数

	7月	8月	9月
神戸	8日	23日	19日
関空	6日	21日	10日

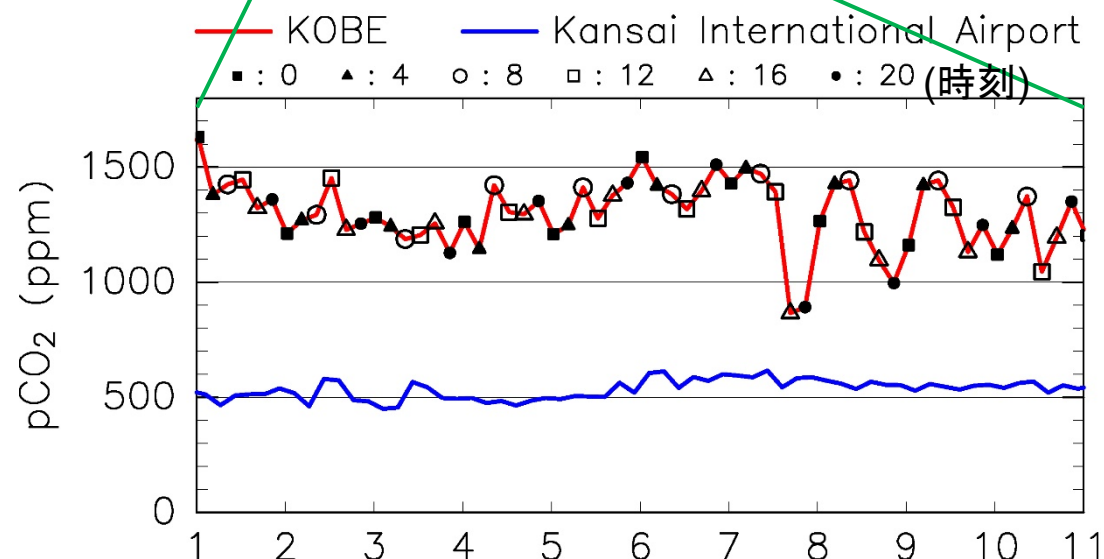
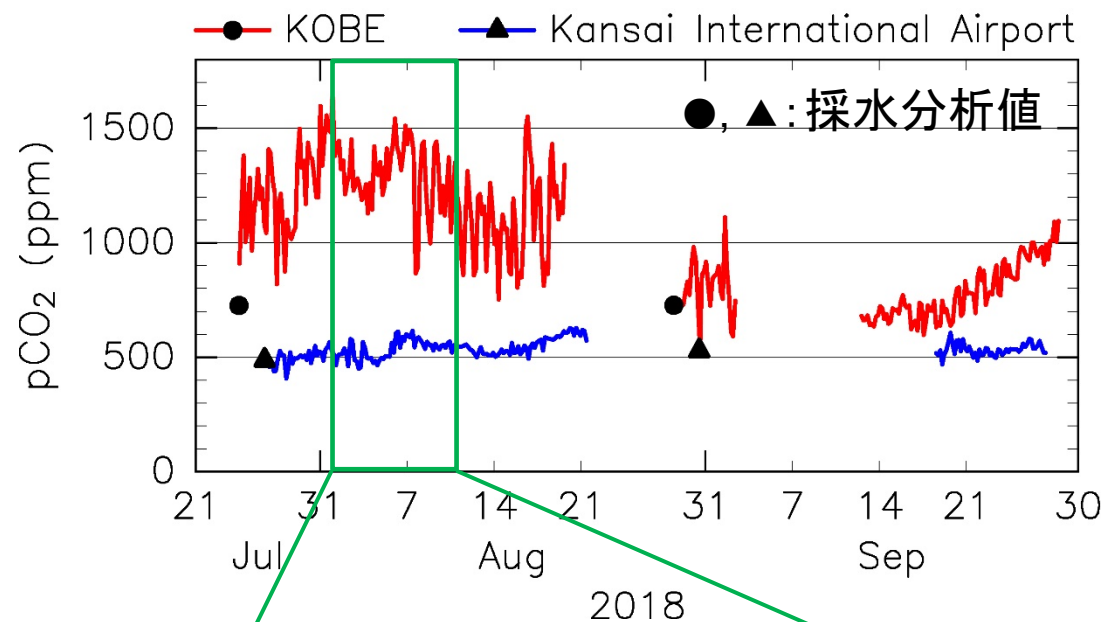
8月（21日まで）のpCO₂値

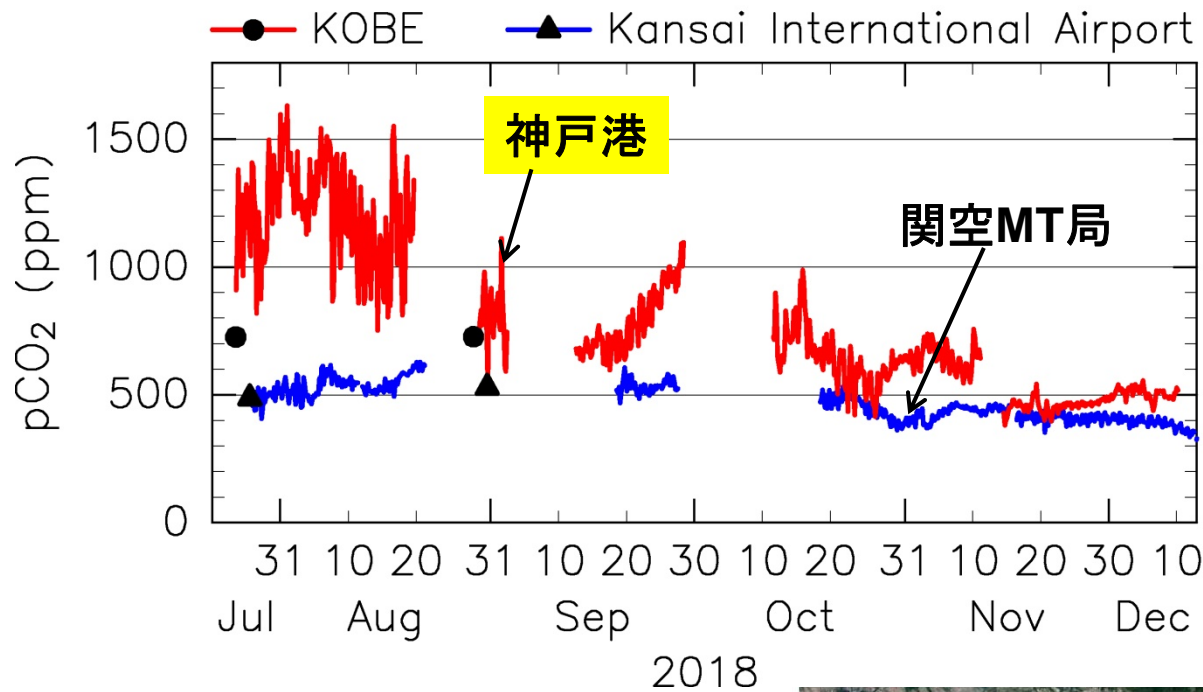
神戸：751～1632 ppm

関空：407～628 ppm



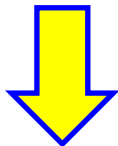
四季調査（1季節に1回の調査）
では、必ずしもその海域・その季節の変動を捉えられない。





7月下旬~12月上旬
観測結果速報

連続観測結果から
四季観測の**妥当性**

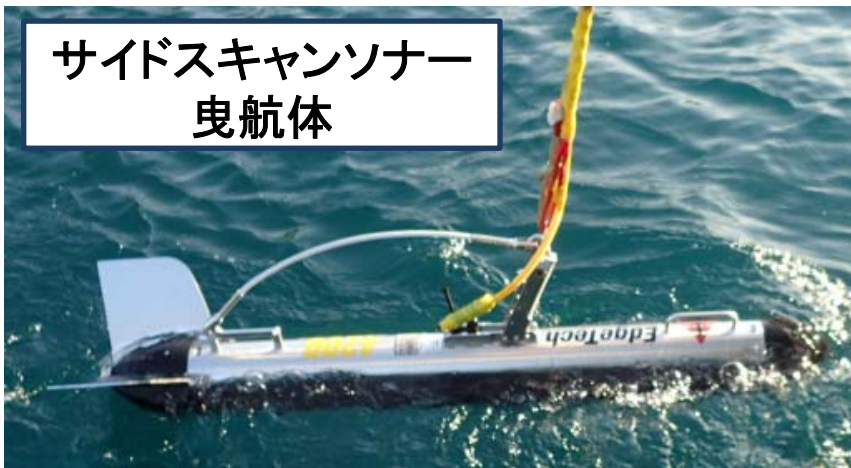


(どこまで、**年間変動を表現**できているか)



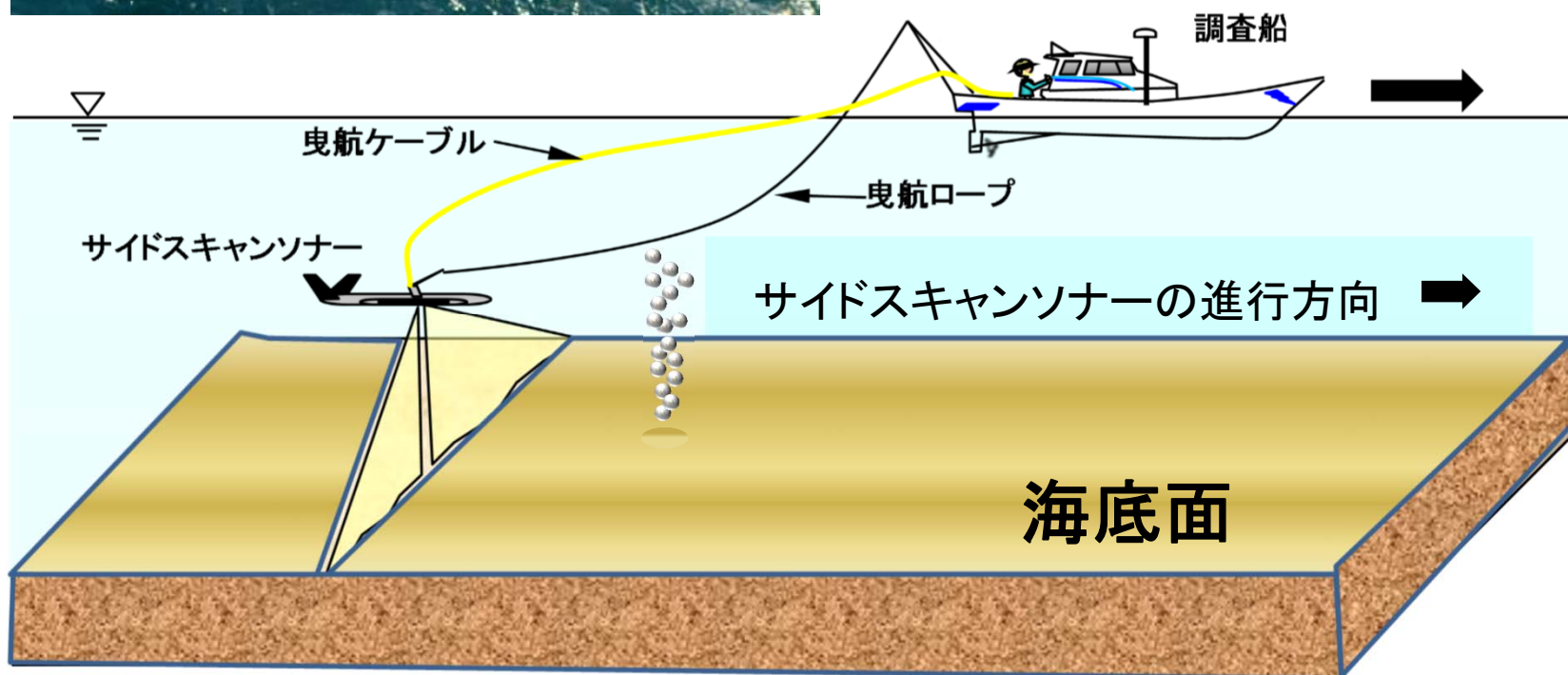
サイドスキャンソナーによる漏出気泡検知

サイドスキャンソナー
曳航体



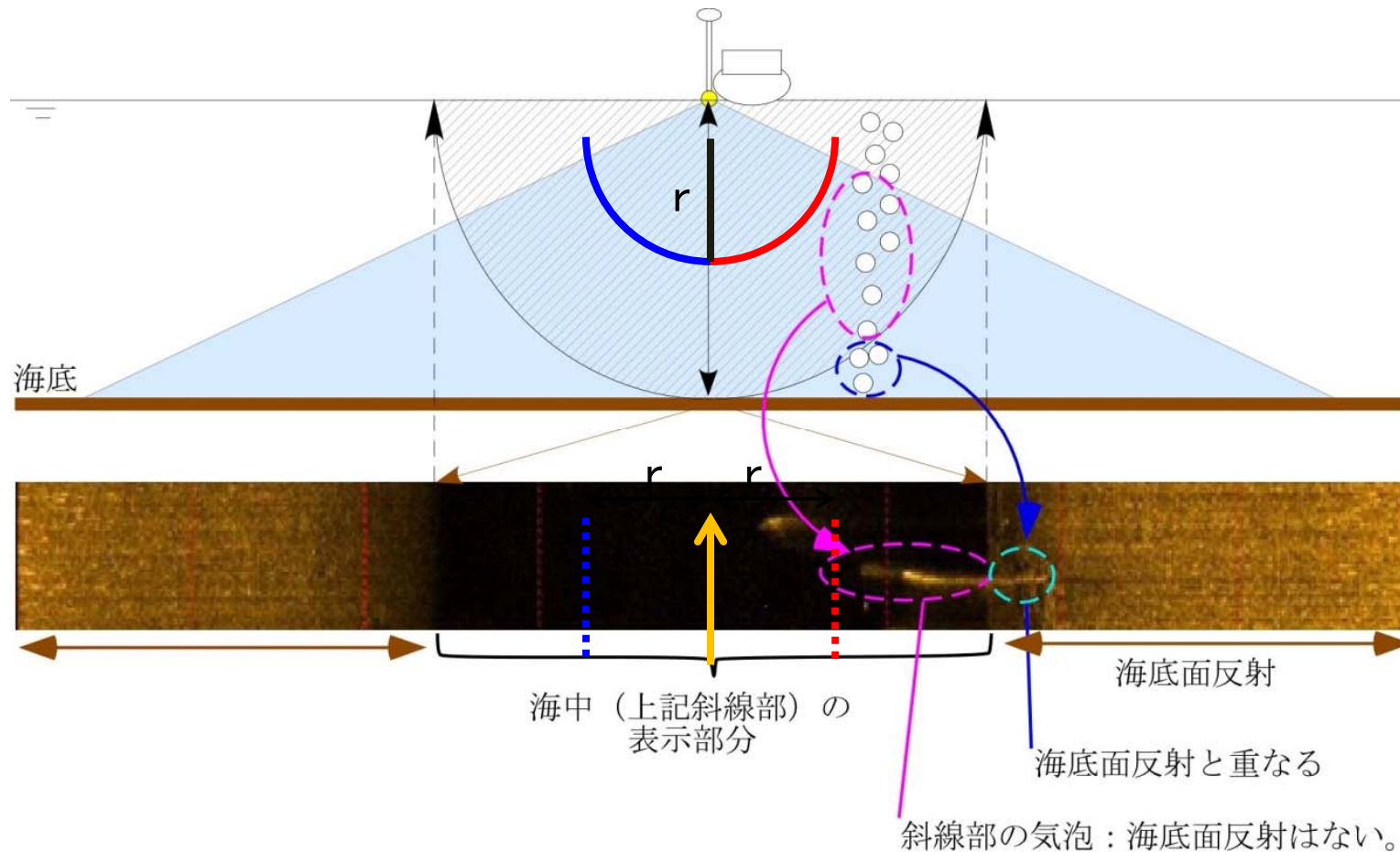
＜サイドスキャンソナーとは＞

船舶で曳航した装置から超音波のビームを発振し、戻ってきた音波の強弱から、海底面の構造等の情報を得る装置



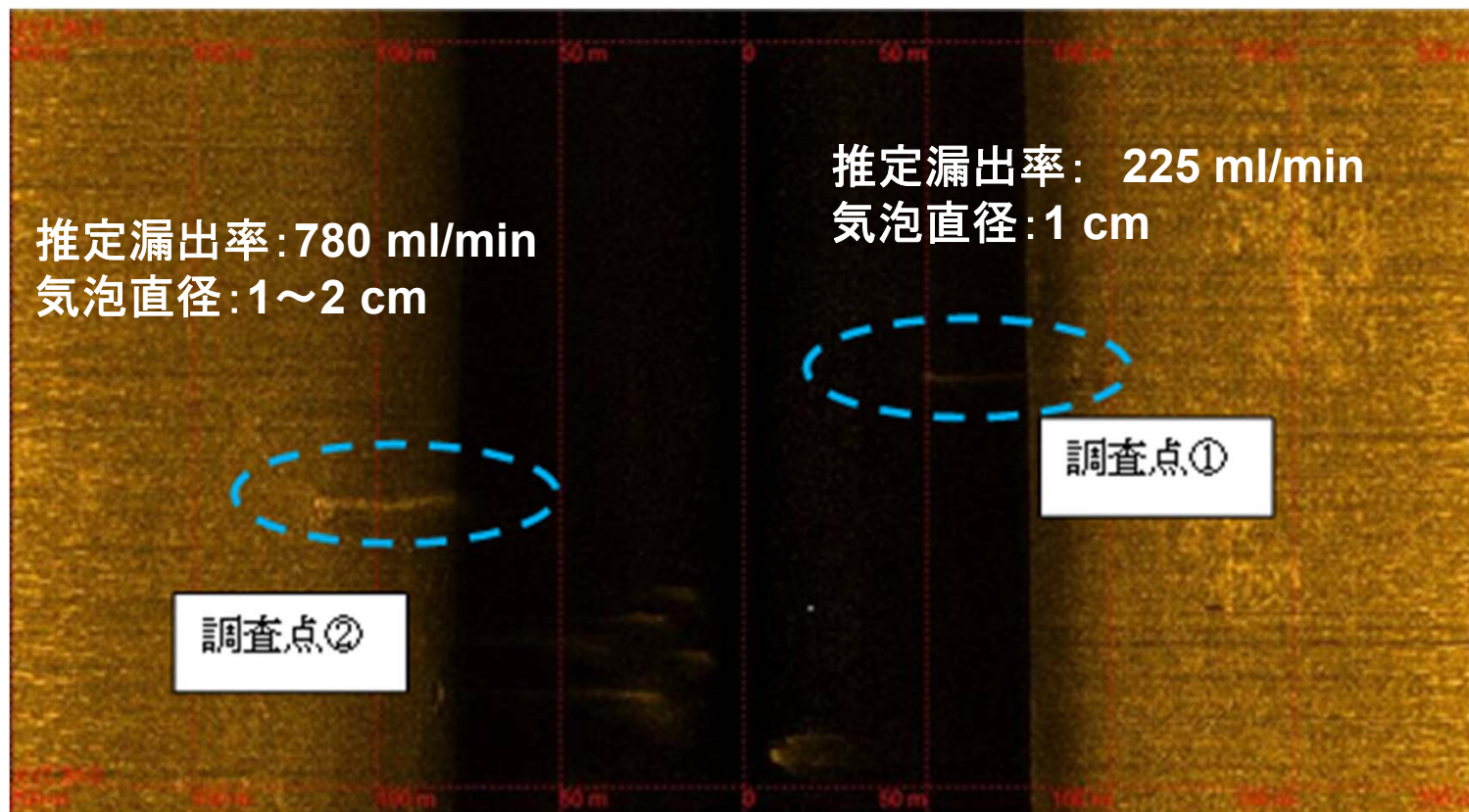
漏出検出：気泡の音波探査

サイドスキャンソナー（SSS）を使った気泡の検出



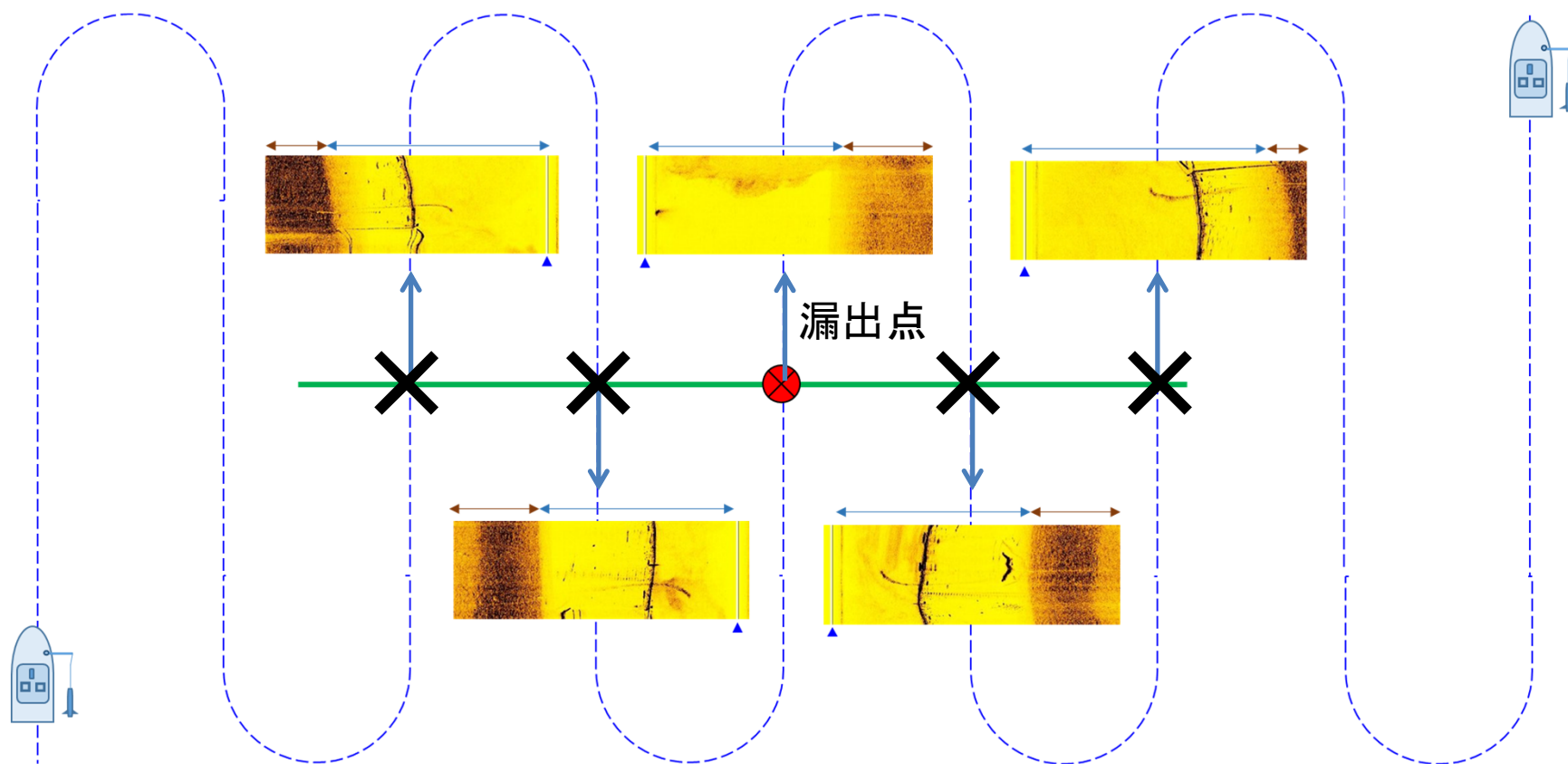
サイドスキャンソナーによる気泡検出例

鹿児島湾火山性ガス湧出域(たぎり) (RITE, 2009)



CO₂気泡検出

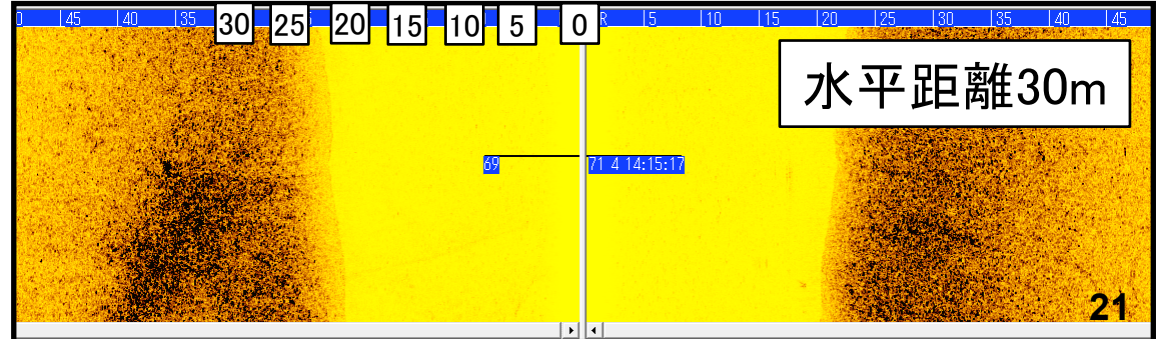
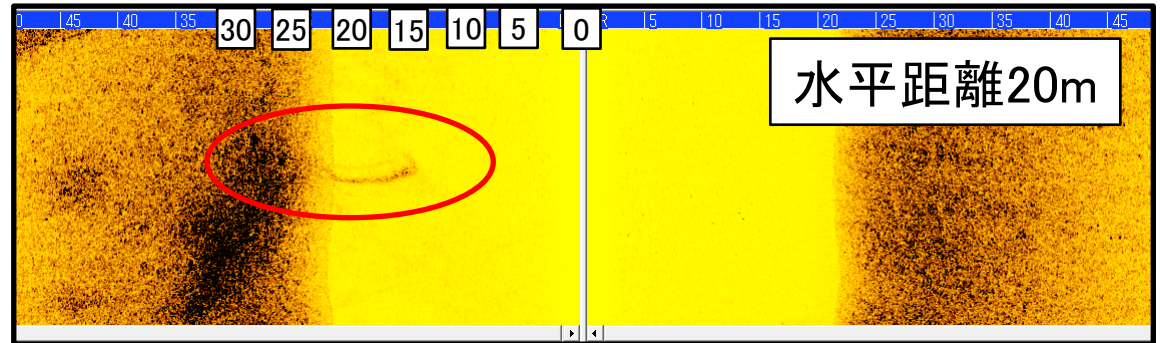
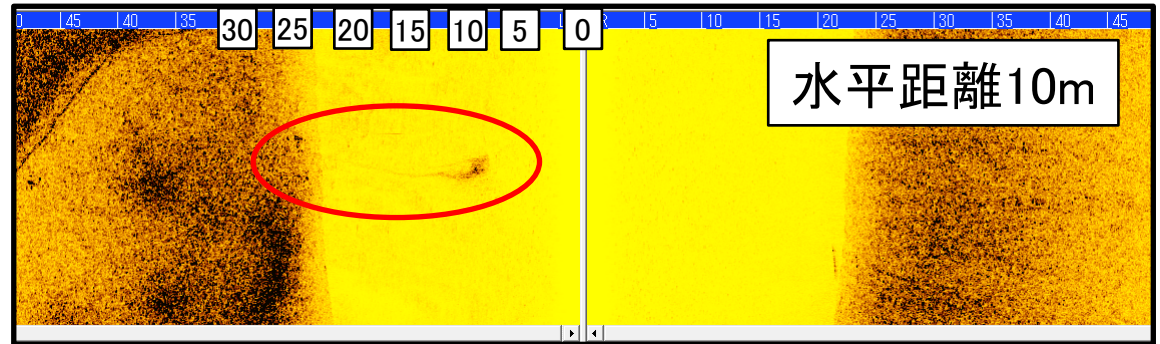
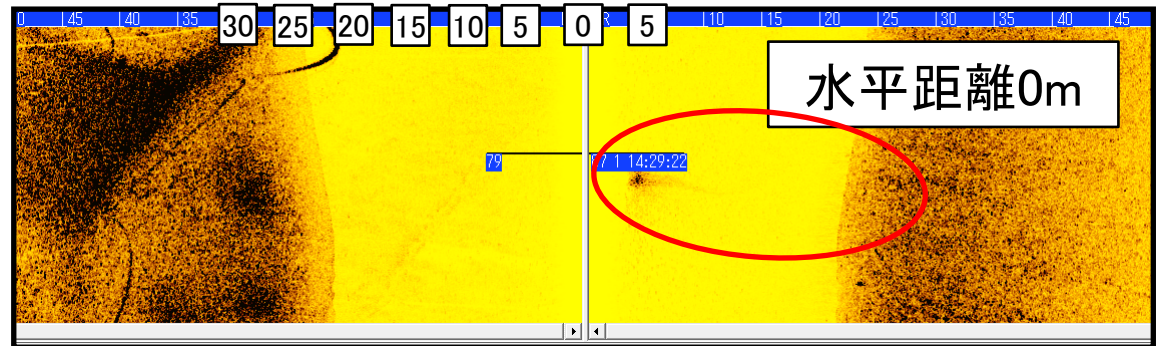
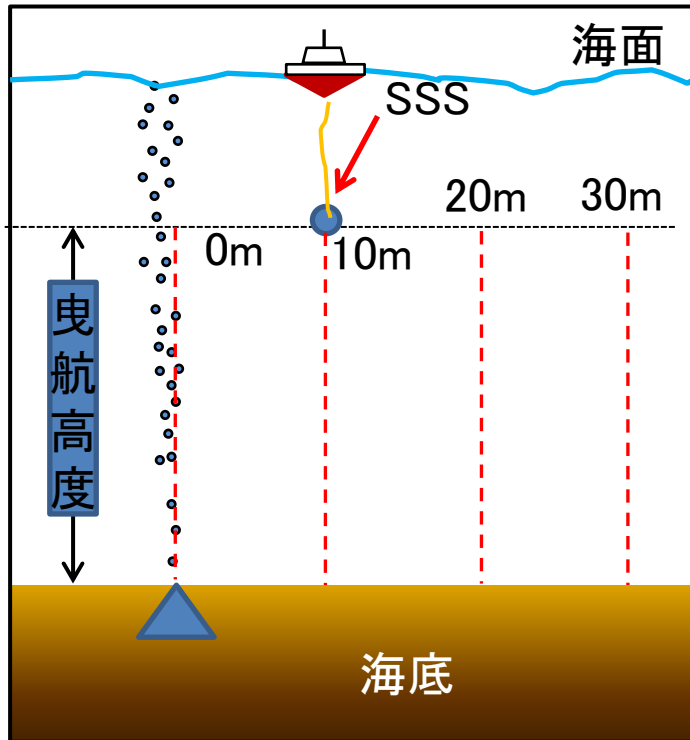
- 測線間隔
 - 船速
 - 検出可能フラックス
- 実用的な漏出監視のためにはどう設定すればよいか？



水平距離による見え方

【観測条件】

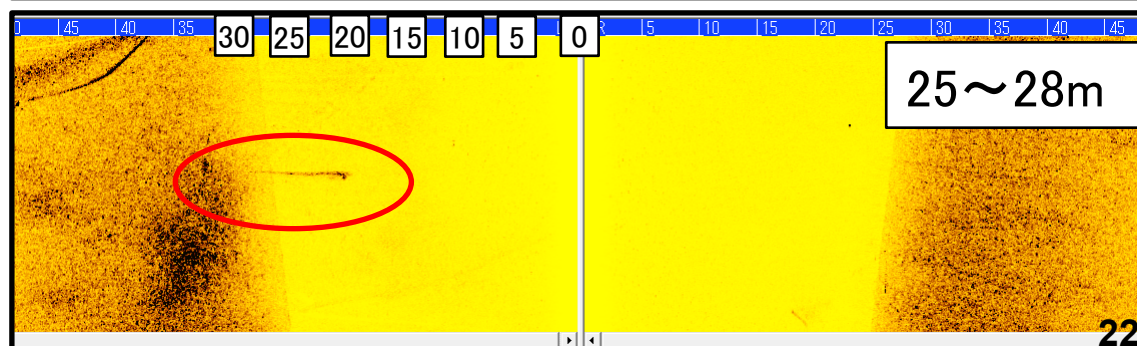
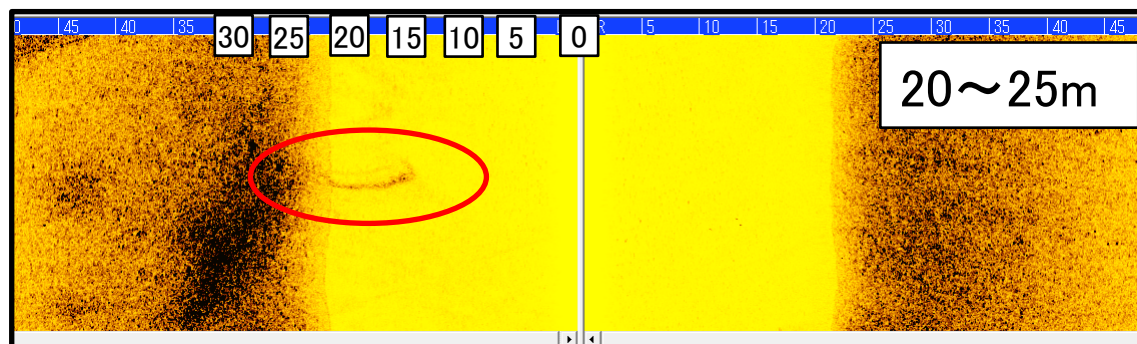
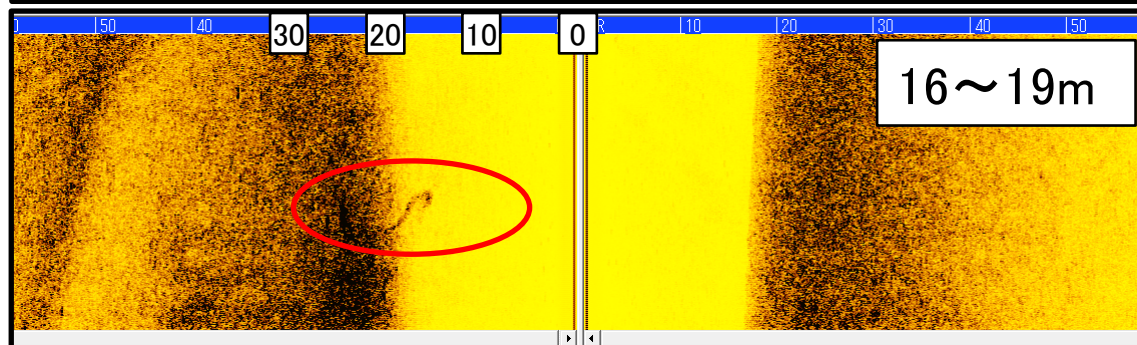
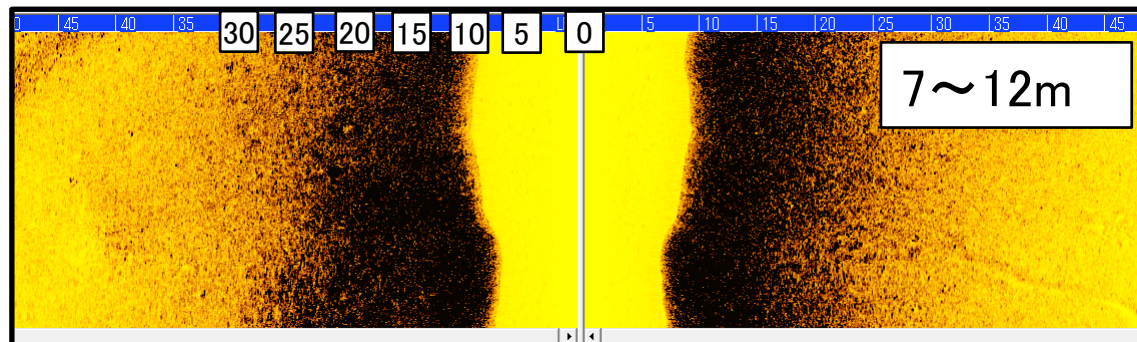
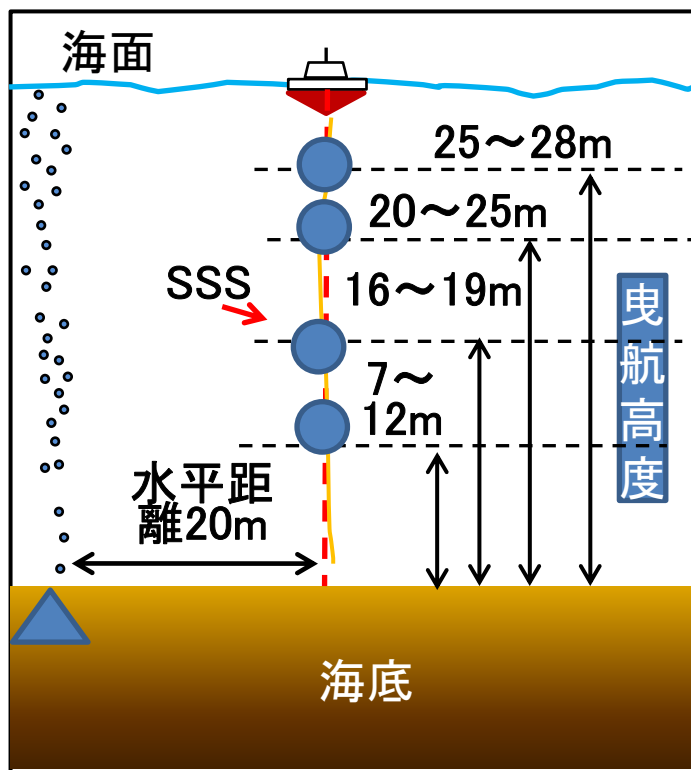
- ・CO₂気泡径; 7.1mm
- ・放出率; 5,000ml/min
- ・観測線(水平距離)
; 0, 10, 20, 30m
- ・曳航高度; 20~25m
- ・船速; 3~4knot



曳航高度の検討

【観測条件】

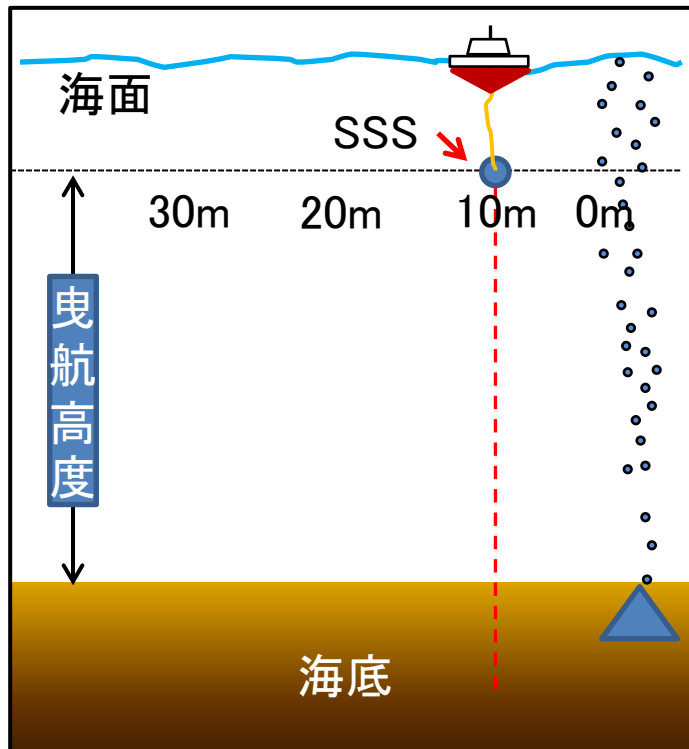
- ・CO₂気泡径; 7.1mm
- ・放出率; 5,000ml/min
- ・観測線(水平距離); 20m
- ・曳航高度; 7~12, 16~19, 20~25, 25~28m
- ・船速; 3~4knot



船速の検討

【観測条件】

- ・CO₂気泡径; 7.1mm
- ・放出率; 1,000ml/min
- ・観測線(水平距離); 10m
- ・曳航高度; 25~28m
- ・船速; 3, 4, 5, 6knot



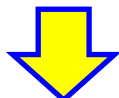
海域環境調査のあり方

CO₂漏洩(地中)・漏出(海中)検出

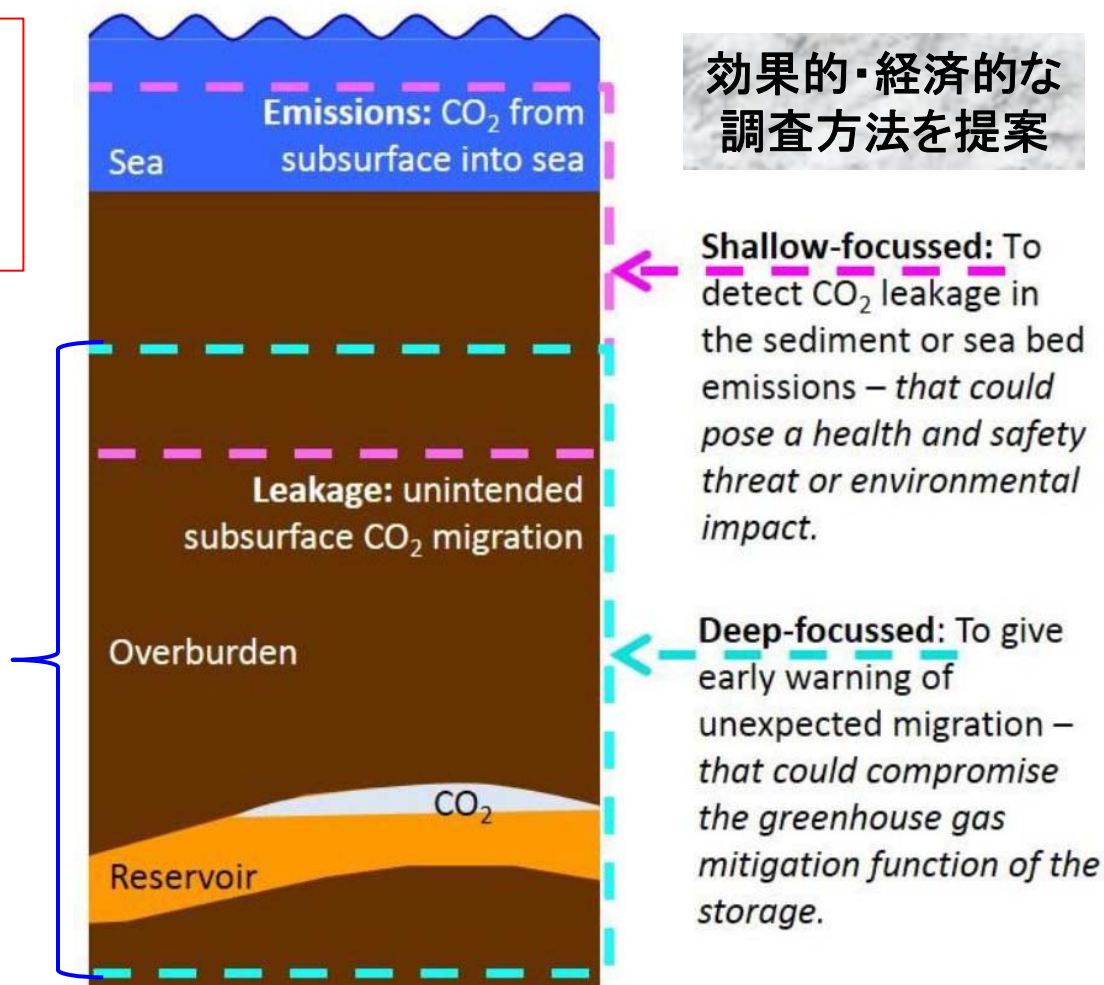
漏出点の特定: 音響ソナー
による漏出気泡検知
+
採水調査

貯留層から上位層
へのCO₂漏洩検出方法

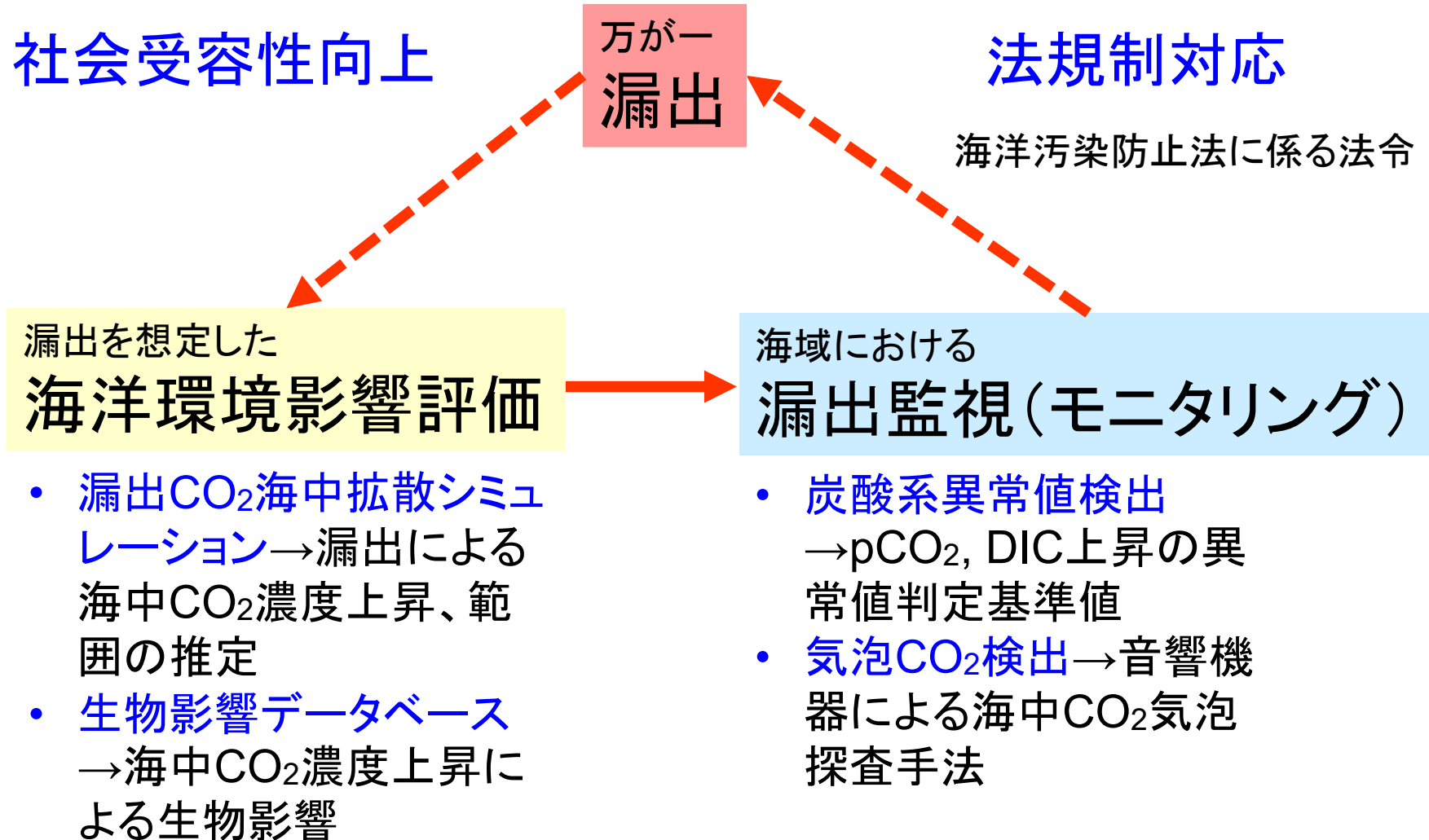
検出能力
Vs
Early Warning



Remediation Plan



CO₂漏出検出・環境影響評価総合システムの構築



生物影響データベース

pCO₂(Δ pCO₂)は一般にわかりにくい

- 漏出監視でpCO₂の異常値が得られた場合
- 拡散シミュレーションの結果(Δ pCO₂の分布)

どのような生物影響(成長阻害など)を及ぼし得る値?

↓
例)実海域サイトの事前評価 生物影響指標: Δ pCO₂=200 μ atm
貝類・ウニへの影響

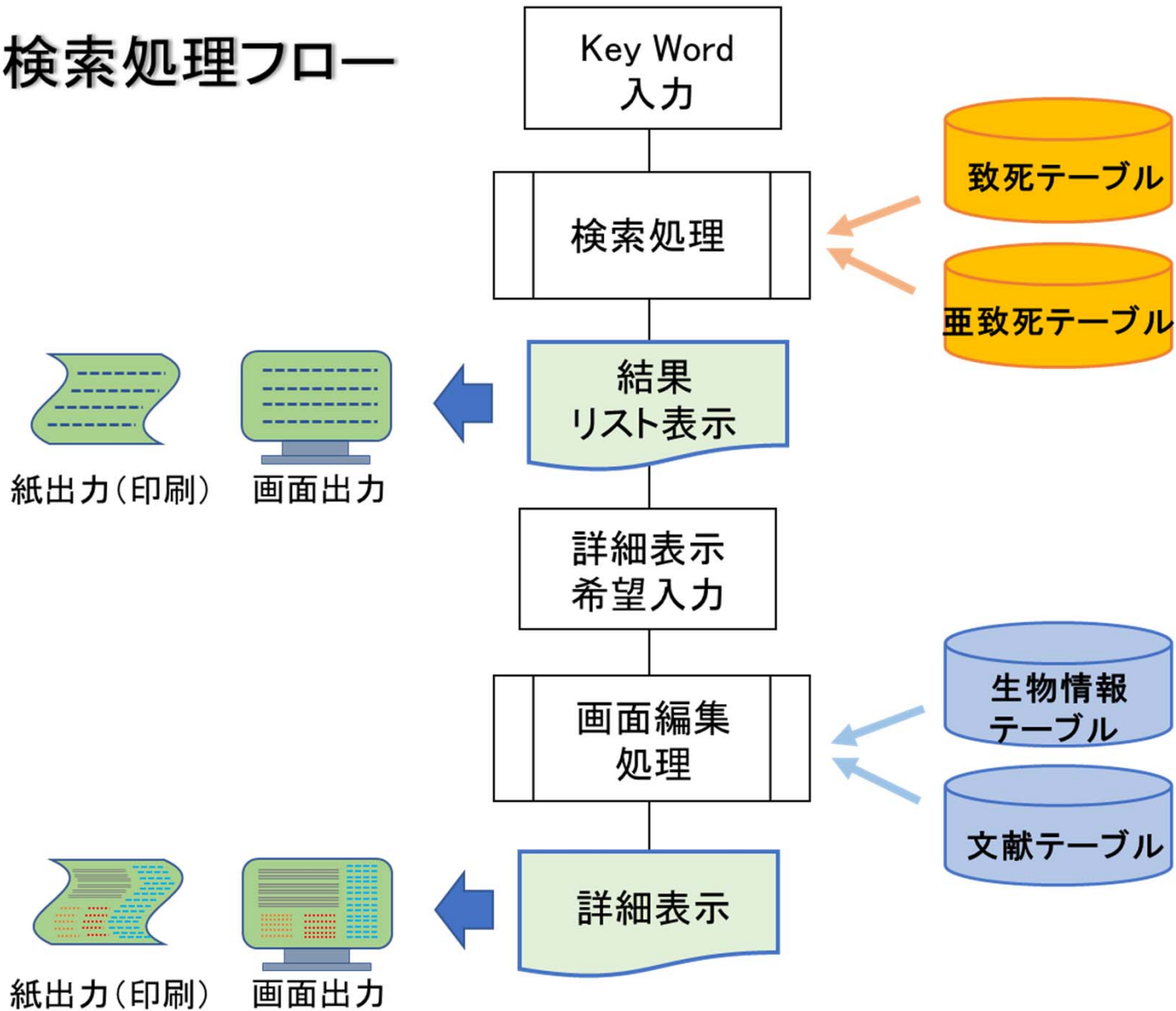
↓
貯留海域はさまざま

- ✓ 地理的: 亜寒帯、温帯、亜熱帯、外洋・内湾、...
- ✓ 生物学・水産業的: 生息生物、水産重要種、...

↓
生物影響データベース構築

生物影響データベース

検索処理フロー



CCS技術事例集の作成



長岡実証試験 + 海外事例に基づき、Vol.1を完成 →→→ 逐次公開、英訳も



苫小牧大規模実証試験や海外の新規事例を加え、2020年度末までにVol.1を完成

謝 辞

この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)
の委託業務の結果得られたものです。