

CCS社会実装会議シンポジウム

CO₂輸送船における液化CO₂の取り扱い

2026年 1月29日

上野トランステック株式会社

内 容

- CCSにおける海上輸送の有用性について
- 有効なCO₂海上輸送の検討
- 液化CO₂輸送船舶の検討と課題
- ドライアイス化防止実証試験について
 - ・ タンク内CO₂挙動シミュレーション及びタンク安全弁作動試験
- タンク鋼材の腐食検証について

CCSにおける海上輸送の有用性について

CCSにおける貯留地への液化CO₂の輸送方式の一つとして、「船舶輸送」が候補となる。

海域に存在している貯留候補地への輸送では、臨海部から貯留地へ海上輸送を行うことは合理的で柔軟な選択肢となり得る。

選択肢として:

- * 輸送量
- * 輸送距離
- * 経済性
- * 複数貯留候補地への対応

排出源と貯留候補地が離れている我が国においては、その航路(経路)の自由度を持つことは重要と考えられる。沿岸部から離れた洋上の貯留地まで船舶で液化CO₂を輸送し、洋上から海底下へ圧入する仕組みが必要と考える。

有効なCO2海上輸送の検討

二酸化炭素を輸送するにあたり下記の検討を行った。

➤ 有効な状態(個体・液体・気体の比較)

気体と液体での容量比は温度に依るが、1 m³を液化した場合は1 / 500~700 m³になる。個体の場合は輸送荷役が難しい。

➤ 温度・圧力の違いから比較した液体状態について(下表)

Condition	低温・低圧	中温・中圧
温度 °C	-55~-40	-30~-20
圧力 MPa	0.6~0.8	1.3~2
密度 (kg/m ³)	1,170~1,120	1,080~1,030
m ³ 当たりトン	1.2~1.1	1.1~1.0
利点	密度が高い状態で運べる タンク容量を大きく出来る	陸上で採用されている状態であり 相関性が高い
不利な点	三重点に近くドライアイス化の懸念 冷却設備費用が高い 防熱施工が難しい	タンク板厚が厚い タンク容量が低温・低圧より小さい

液化CO2輸送船舶の検討と課題

2021年3月、本環境省事業にて、液化CO2を海上輸送し、海底へ圧入・貯留させる船舶のAiPを取得した。

本船型は液化CO2の輸送作業に加え、圧入作業にも転用可能な船型として開発し、世界初の液化CO2輸送船(圧入船Ready)である。



CO2輸送船 (圧入船Ready)



AiP授与式の様子 出典：上野トランステック株式会社HPより

概要：最大積載量：1,600トン

全長：106m 幅：14.5m

中温・中圧タンク仕様・再液化装置装備

2軸アジマス推進方式・DPSシステム(定点保持)

液化CO2輸送船舶における検討と課題

液化CO2輸送船(圧入Ready)においてAiP (Approval in Principle)取得の際に、認証機関であるClass NK(日本海事検定協会)より以下の検討課題を受けた。

- ① 液化CO2ドライアイス化防止
- ② タンク鋼材の腐食検証

① 液化CO2ドライアイス化防止

圧縮された液化CO2は、圧力や温度の変化によって容易にドライアイス化する。

ドライアイスは閉塞・固着を引き起こし、各設備の性能に大きな影響を与えるだけでなく、船舶安全性のリスクとなる。

液化CO2の輸送時のドライアイス化を防止する為に、温度や圧力の変化に伴う二酸化炭素の挙動の検証し、ドライアイス化を防止できる安全弁性能の確認を行った。

② タンク鋼材の腐食検証

排出源から分離回収されたCO2に含まれる不純物の影響で腐食を及ぼすことが知られている。タンク材質には輸送で要求される温度・圧力に適正な鋼材を選定し、腐食によるリスクを回避することが必要である事から腐食試験を行った。

ドライアイス化防止実証試験について

- 試験目的

- 中温・中圧タンクでは急激な温度、圧力、流速の変化等によりドライアイス化は起こり得る。低温・低圧では三重点に近く尚更である。ドライアイス化は重大事故に発展する可能性があり、作業員保護の観点から安全上必須の検討事項として挙げられる。船舶向けCO2冷却装置、再液化装置の実績は世界的にないので、温度、圧力を変えながら機器の性能を確認し、ドライアイス化を防止することができる温度・圧力のデータ取得を行う。

- 安全弁については、タンク側にパイロット式、配管側にスプリング式を設置した。

タンク側で中温中圧、低温低圧、高低液面の条件において、安全弁の性能とドライアイス化防止が出来ているかを確認する。

配管側に設置したスプリング式では液封状況から大気開放条件を変えて、検証を行う。

ドライアイス化防止実証試験について

タンク内CO2挙動シミュレーション試験設備の外観とシステム概要

LCO₂試験設備



LCO₂タンクの上部（安全弁）



サイトスコープ



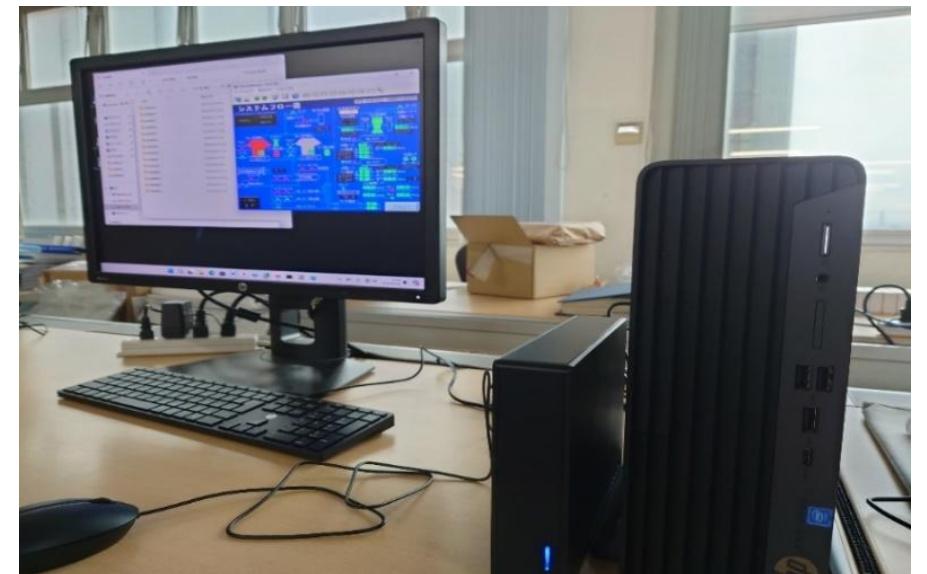
循環システムの確認モニター



圧力・温度の警報画面

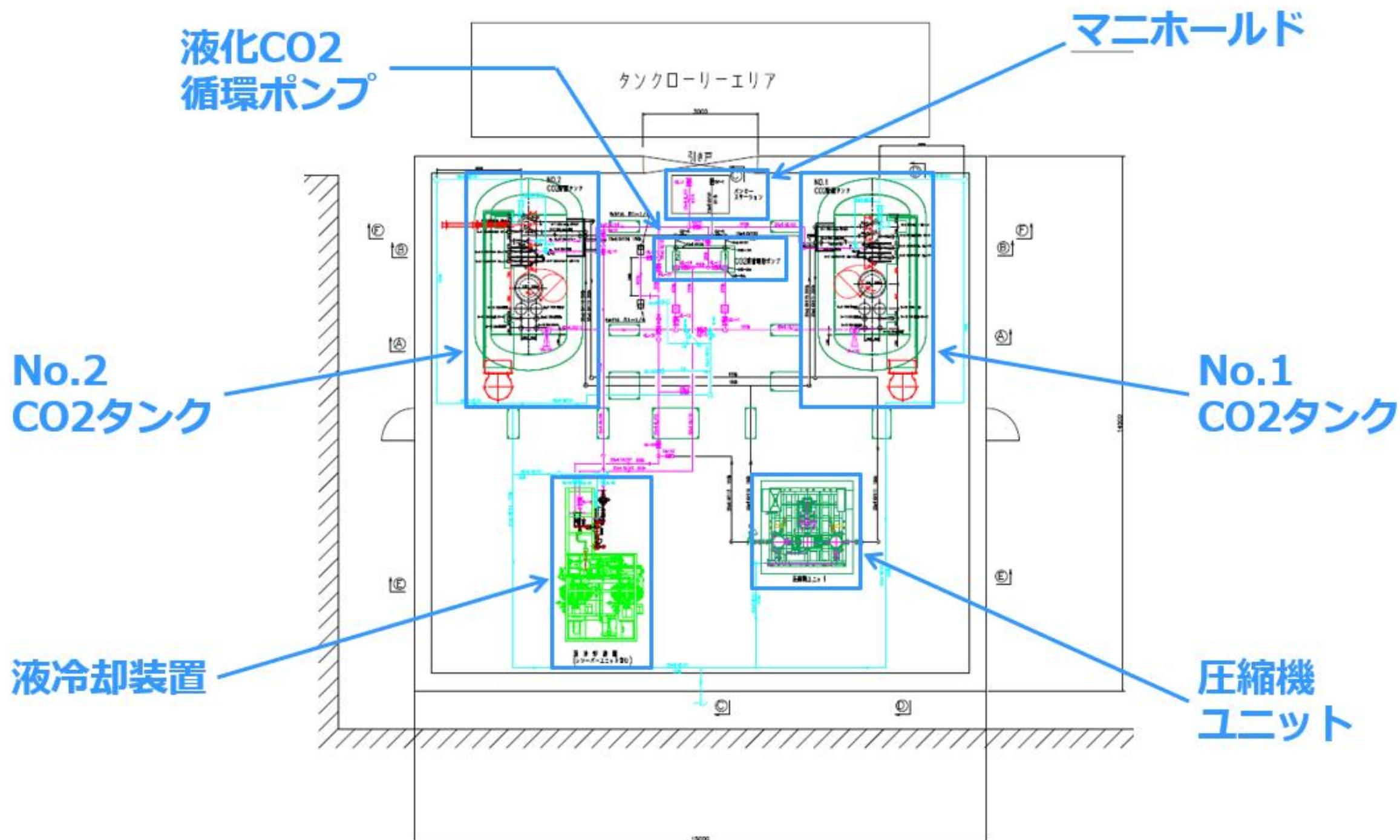


遠隔装置システムとデータロガー



ドライアイス化防止実証試験について

タンク内CO2挙動シミュレーションシステムの概略図

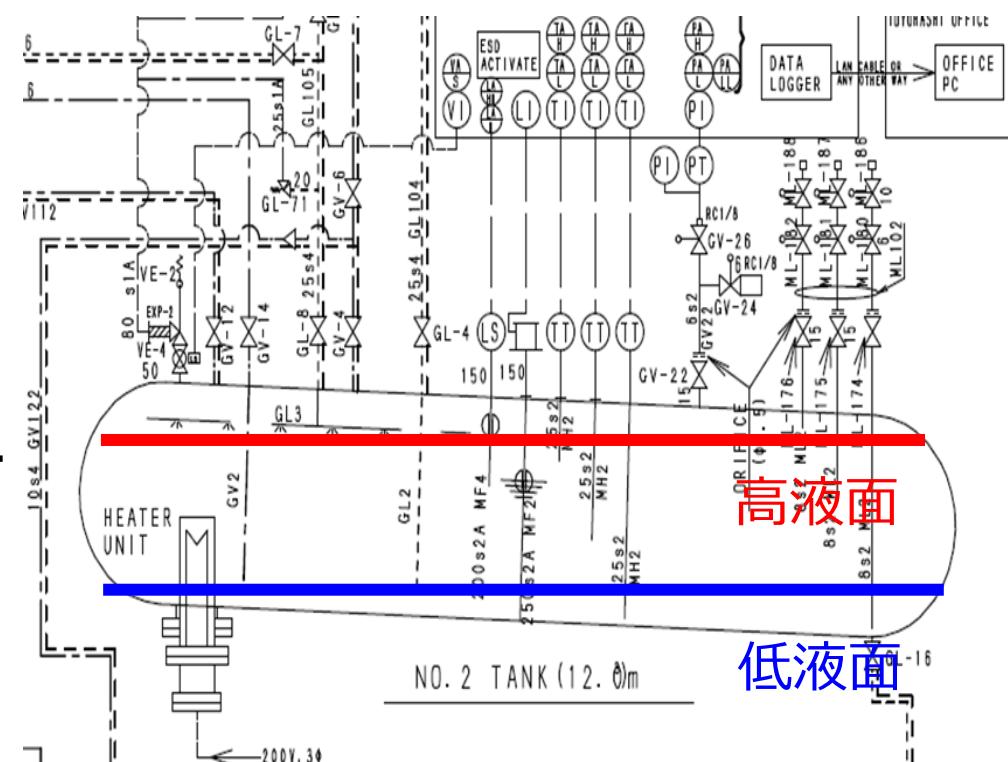


タンク内CO2挙動シミュレーション及びタンク安全弁作動試験

- 試験
 - 中温・中圧及び低温低圧におけるに液冷却、再液化性能を試験する
 - 中温・中圧及び低温・低圧におけるタンク安全弁作動試験
- 試験条件
 - 中温・中圧
 - 温度・圧力： -20°C ・ 2MPa を起点として数値を調整
 - 低温・低圧
 - 温度・圧力： -46°C ・ 0.7MPa を起点として数値を調整

タンク付き安全弁の圧力設定

- 中温・中圧： 2.2MPa 、 2.42MPa
液温約 -15°C 近辺
- 低温・低圧： 0.9MPa
液温 $-46^{\circ}\text{C}/-50^{\circ}\text{C}/-52^{\circ}\text{C}$ 以下
- 液面： 高液面（赤線、少気相状態）
低液面（青線、多気相状態）



タンク内CO2挙動シミュレーション及びタンク安全弁作動試験 試験結果

- 中温・中圧及び低温・低圧におけるに液冷却、再液化性能試験

液冷却:

ドライアイス化は発生せず、安定した低温維持し、液体状況が維持された。タンク内上部下部での温度差(±1°C)が計測されたが、ポンプ・シャワーを用いた循環の影響と考える。液面をフローティングとレーザーを用いて観測し、両機器との計測誤差は殆どない状況が確認できた。

再液化試験:

タンク上部から圧縮機でガスを吸引し、再液化後、シャワーでタンクに戻したがドライアイスは発生しなかった。再液化装置の冷却能力が高く、低温温度制御においては非常に有効であった。

タンク内CO2挙動シミュレーション及びタンク安全弁作動試験 試験結果

- 中温・中圧及び低温・低圧におけるタンク安全弁作動試験

中温・中圧:

低液面における通常作動においては昇圧に合わせた小刻みな開閉を繰り返し、緩やかな減圧を繰り返し、ドライアイス化は発生せず、閉塞は起こらなかった。

高液面の通常作動においては気液混合排出の影響でパウダー状のドライアイスが確認されたが瞬時に気化し、閉塞は起こらなかった。

低温・低圧:

低液面、高液面ともに昇圧に合わせた小刻みな開閉を繰り返し、緩やかな減圧が行われ、パウダー状のドライアイスが発生したが、瞬時に気化し、閉塞は起こらなかった。

タンク内CO2挙動シミュレーション及びタンク安全弁作動試験 試験結果による社会実装への反映

項目	内容
■ タンク内CO2挙動シミュレーション	<p>液化CO2海上輸送タンクの条件は、中温中圧(-30~-20℃, 1.5~2.0MPa)、低温低圧(-50~-40℃, 0.6~0.8MPa)が採用される見込み。両条件における船舶向け冷却装置、再液化装置は機能の安定化が運用上必須である。温度、圧力影響を受けやすい液化CO2の運用試験はこれまで行われてなかったが、本試験で装置の冗長性を得られることが確認できた。</p>
■ タンク安全弁	<p>安全弁作動時のドライアイス化が懸念されたが、本試験においてパイロット式安全弁でドライアイス化を防止できる結果を得た。</p> <p>今回の試験データは将来のCO2輸送船舶の詳細設計、オペレーションガイドを作成するにおいて有意義なデータが得られた。</p>

タンク鋼材の腐食検証について

- 腐食検証の目的

二酸化炭素はH₂O存在下においては、CO₂腐食として激しい腐食を生じることが知られている。

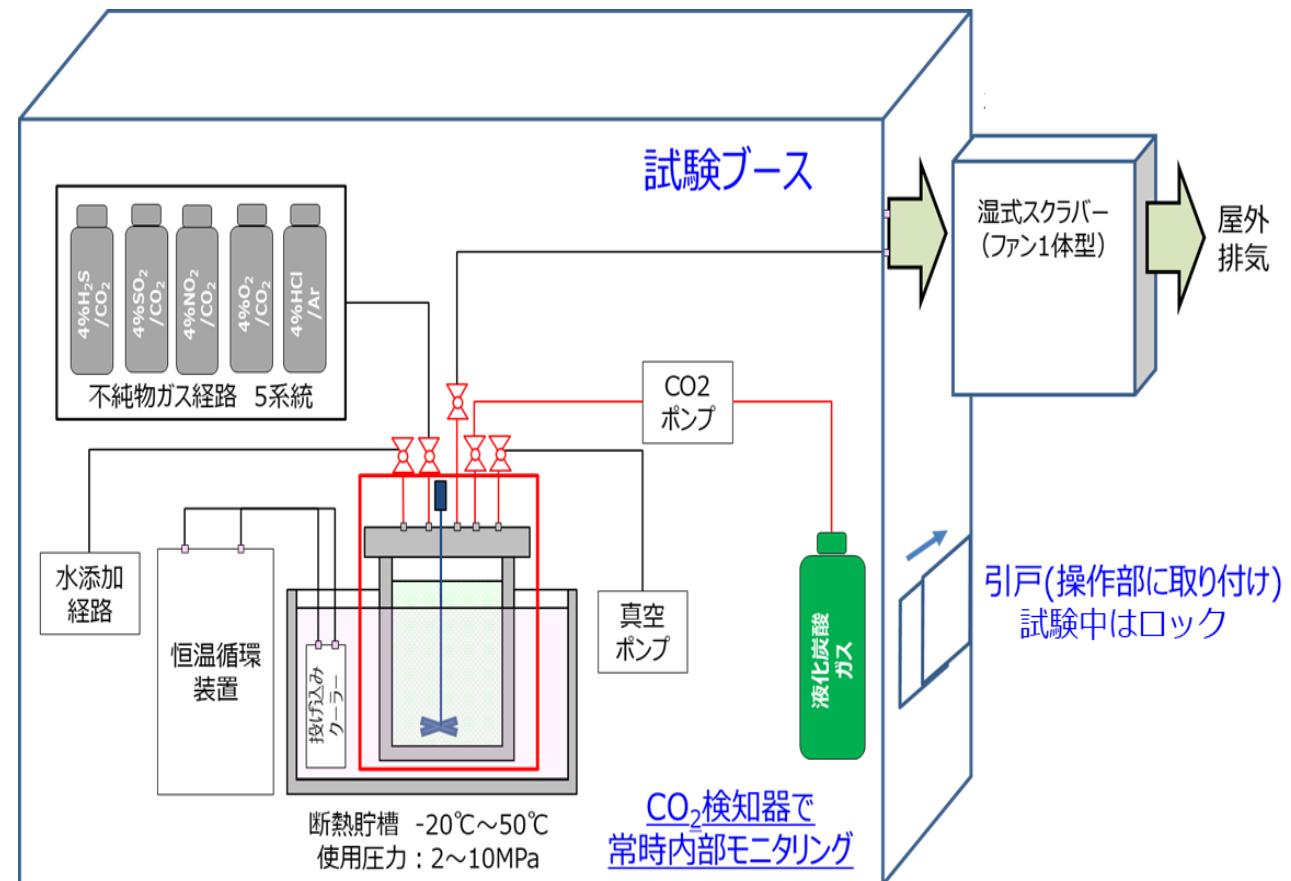
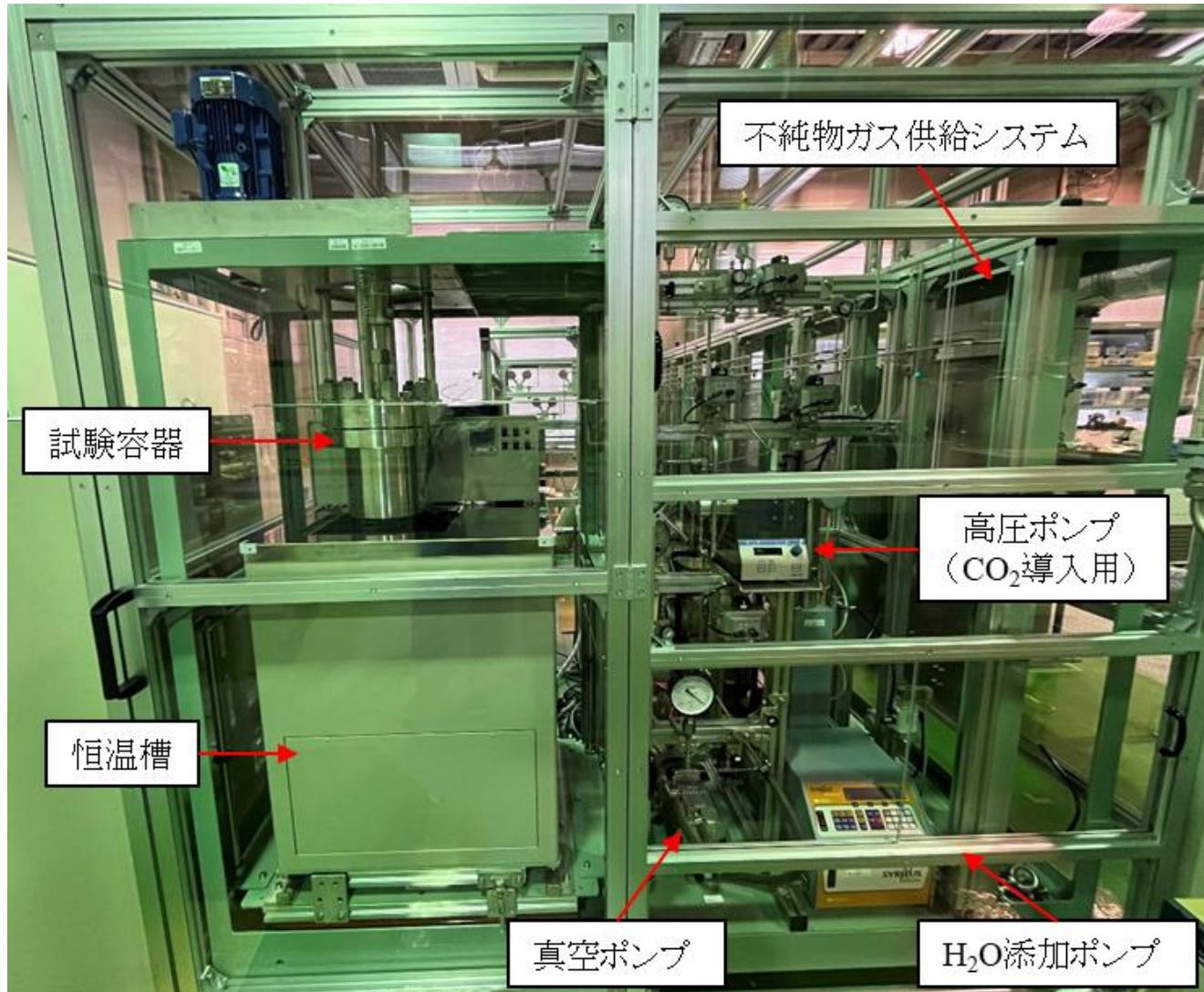
船舶においてIMO（国際海事機関）規則を遵守し検討した場合、タンクに採用される鋼材は9%Ni鋼が推奨される。

規則においては不純物を含む液化二酸化炭素による腐食を検討することが推奨される。

低温液化二酸化炭素の環境下（-20°C・2MPa）における9%Ni鋼腐食試験は過去行われておらず、腐食によるクラック、破孔、減肉によるリスクをアセスメントするために本試験を行った。

タンク鋼材の腐食検証について

- 試験設備概要 (液化CO₂腐食試験)



タンク鋼材の腐食検証について

- 試験条件

条件	温度	圧力	不純物種	不純物種 (ガス)	不純物種 (塩)	攪拌
仕様	-20 ~ 50 °C	2 ~ 10 MPa	H ₂ O	O ₂ , SO ₂ H ₂ S, HCl NO ₂	KCl ZnCl ₂ CaCl ₂	あり
			最大 2,000 ppm 精度 10 ppm	最大 2,000 ppm 精度 10ppm	—	最大1,000 rpm 精度 100 rpm

- 試験目的

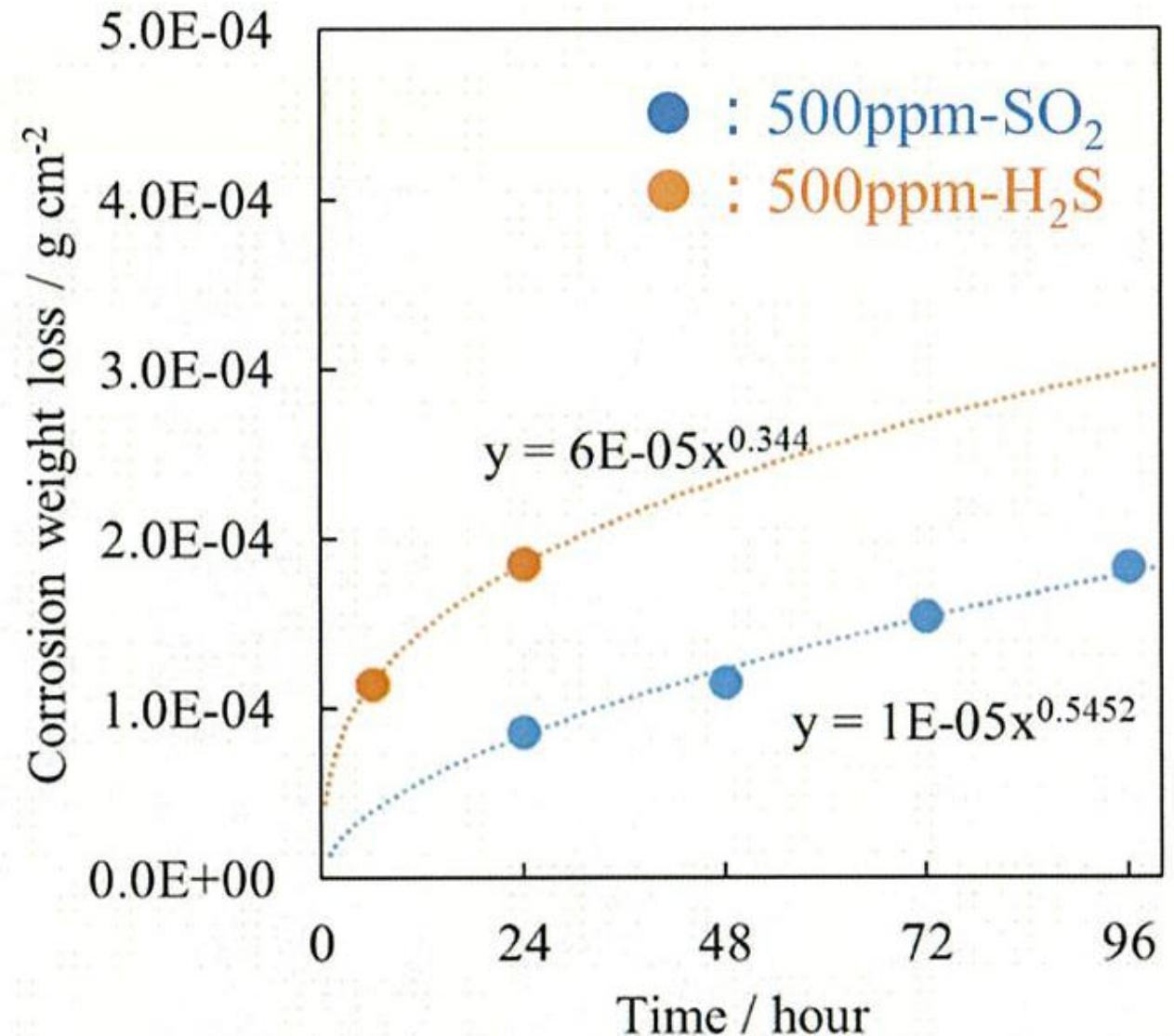
- 時間の影響調査、H₂Oの影響調査、H₂SとSO₂の影響比較、HCl、SO₂、NO₂の影響、因子単体の影響、金属塩の影響調査、低濃度影響調査
- 9%Ni鋼と比較するために5%Ni鋼、低温鋼による腐食試験

タンク鋼材の腐食検討について

試験結果：腐食減量、時間の影響

- 時間経過により腐食減量は減少傾向となった。
 - 大気腐食と同様に錆が保護性を発現すると考えれる。
 - H₂SはSO₂と比較して腐食性が高い
 - S²⁻の腐食性の高さ + 皮膜保護性の低さが原因と推定

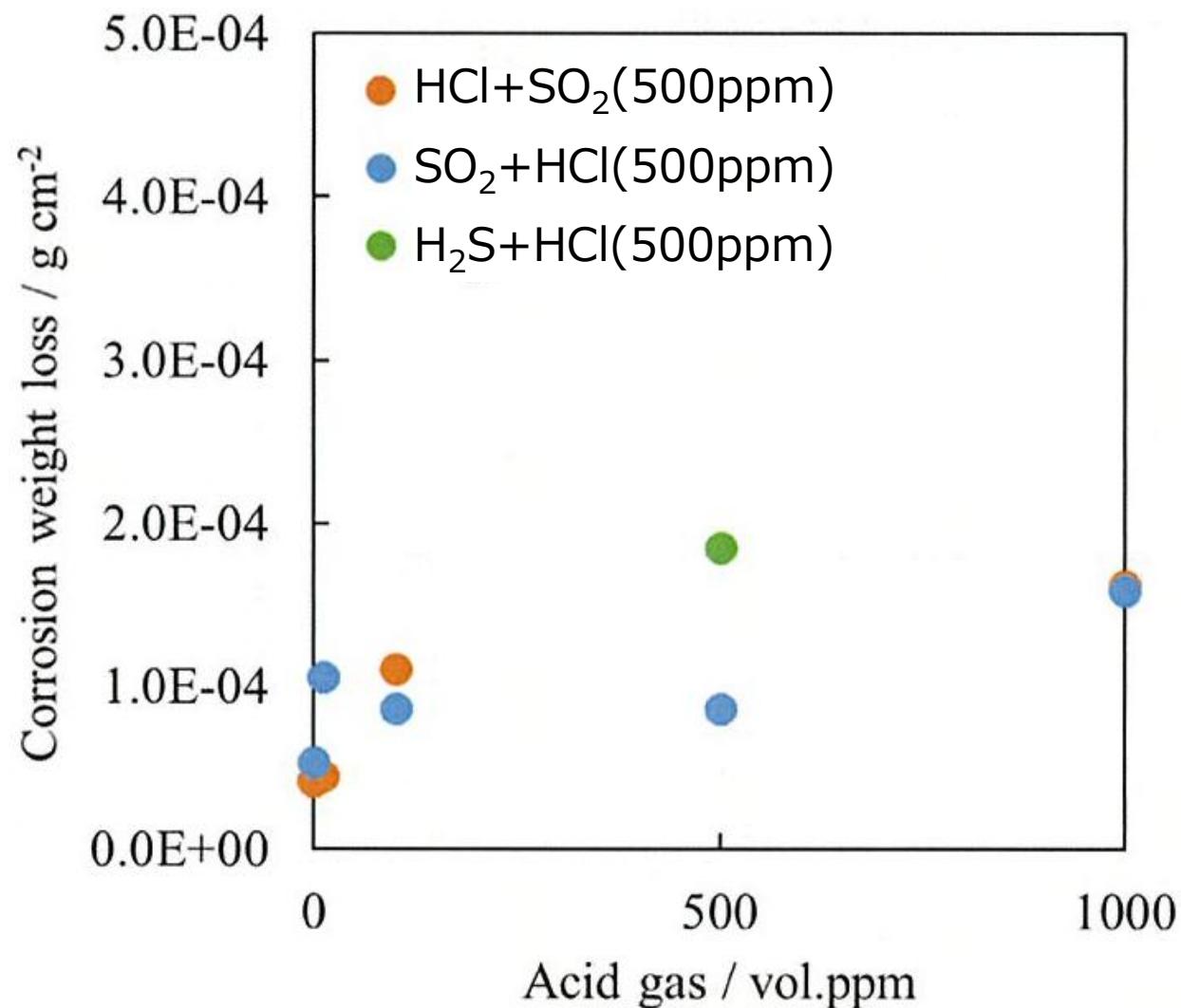
腐食減量と時間経過の関係



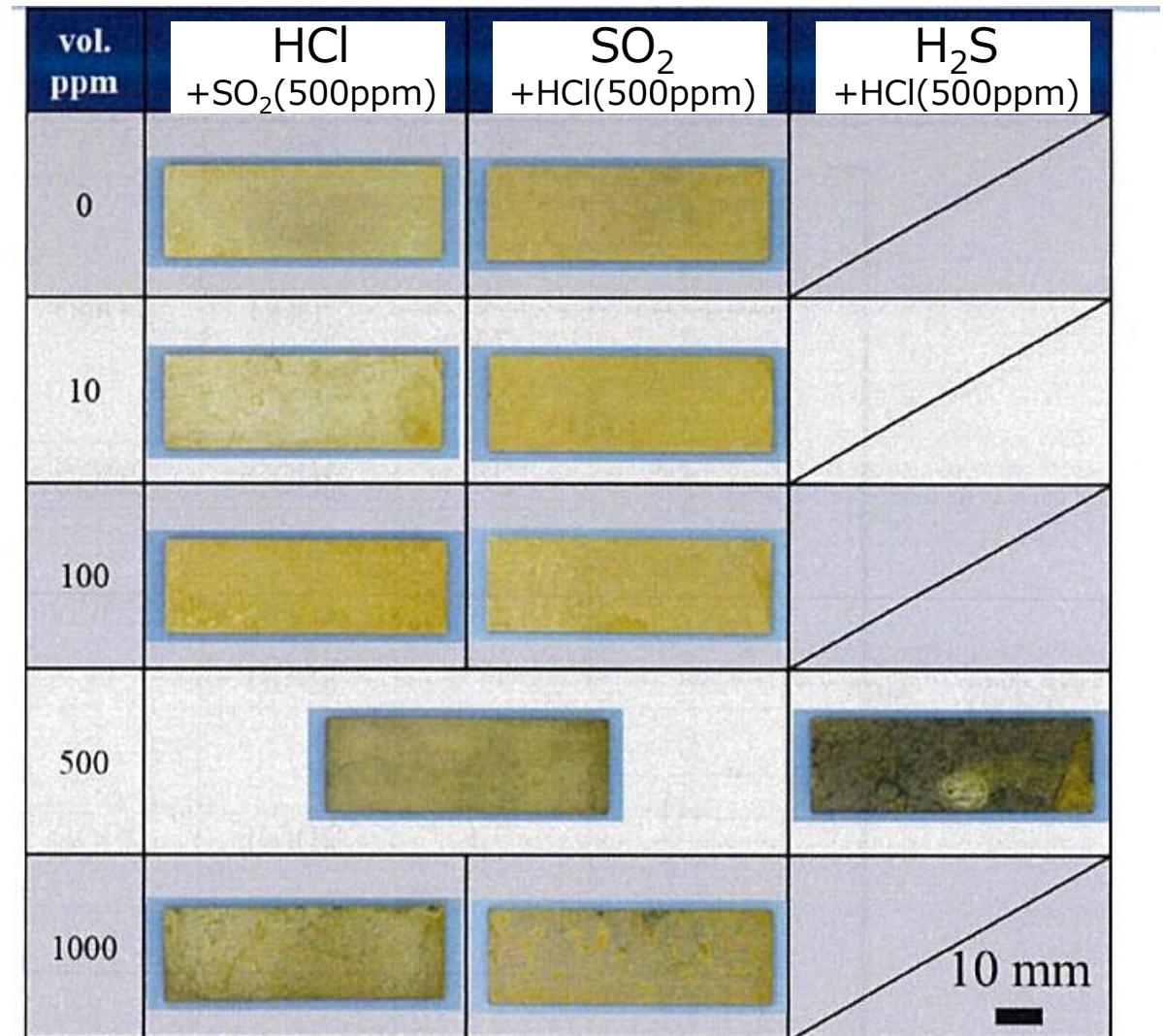
タンク鋼材の腐食検討について

試験結果：腐食減量、腐食性ガスの添加量

- 腐食減量はHCl、SO₂、H₂S添加量とともに増加した（左グラフ）。
- H₂S添加とSO₂添加では試験後試料片の外観が異なっていた（右写真）。



腐食減量と腐食性ガス添加量の関係

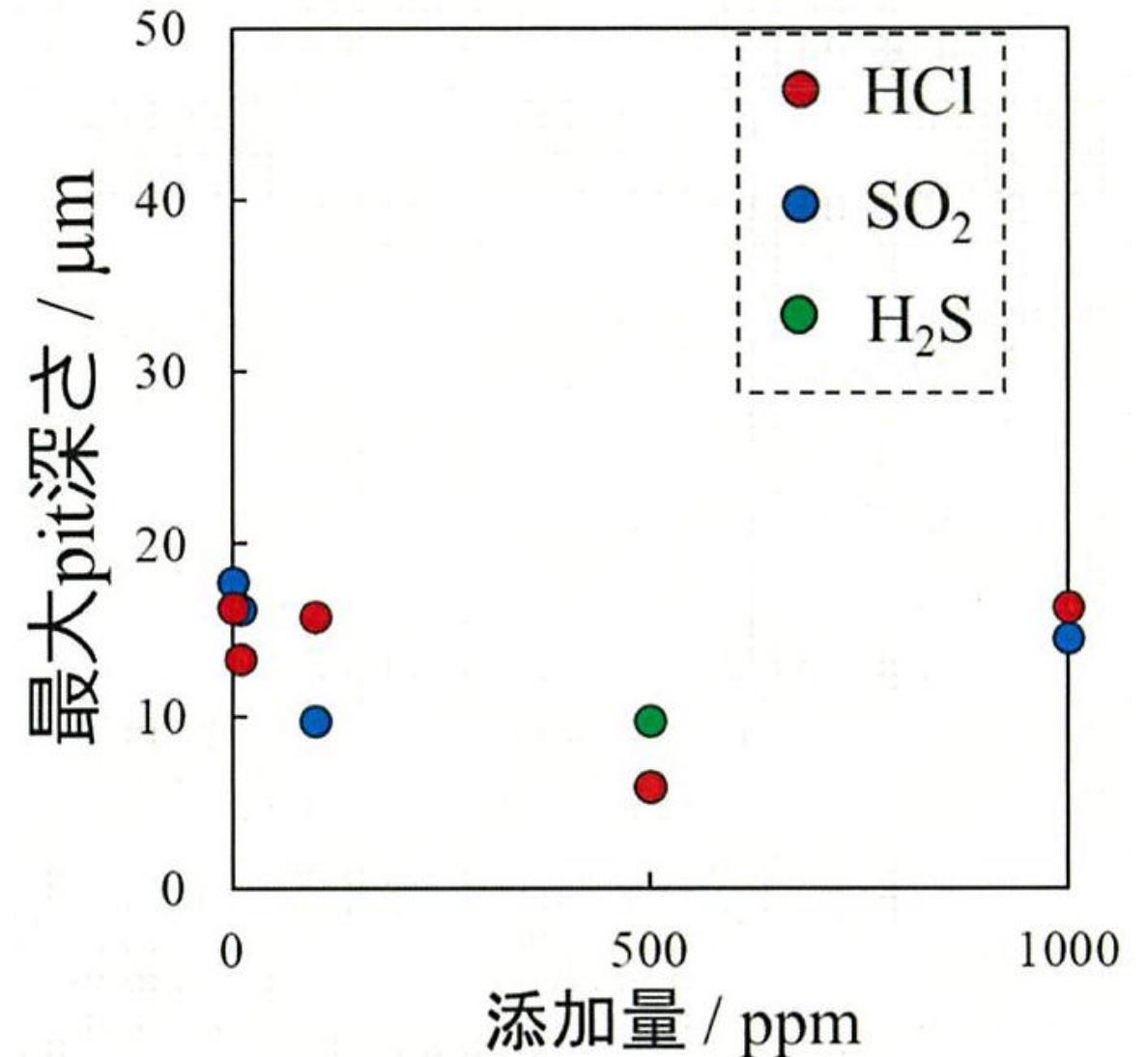
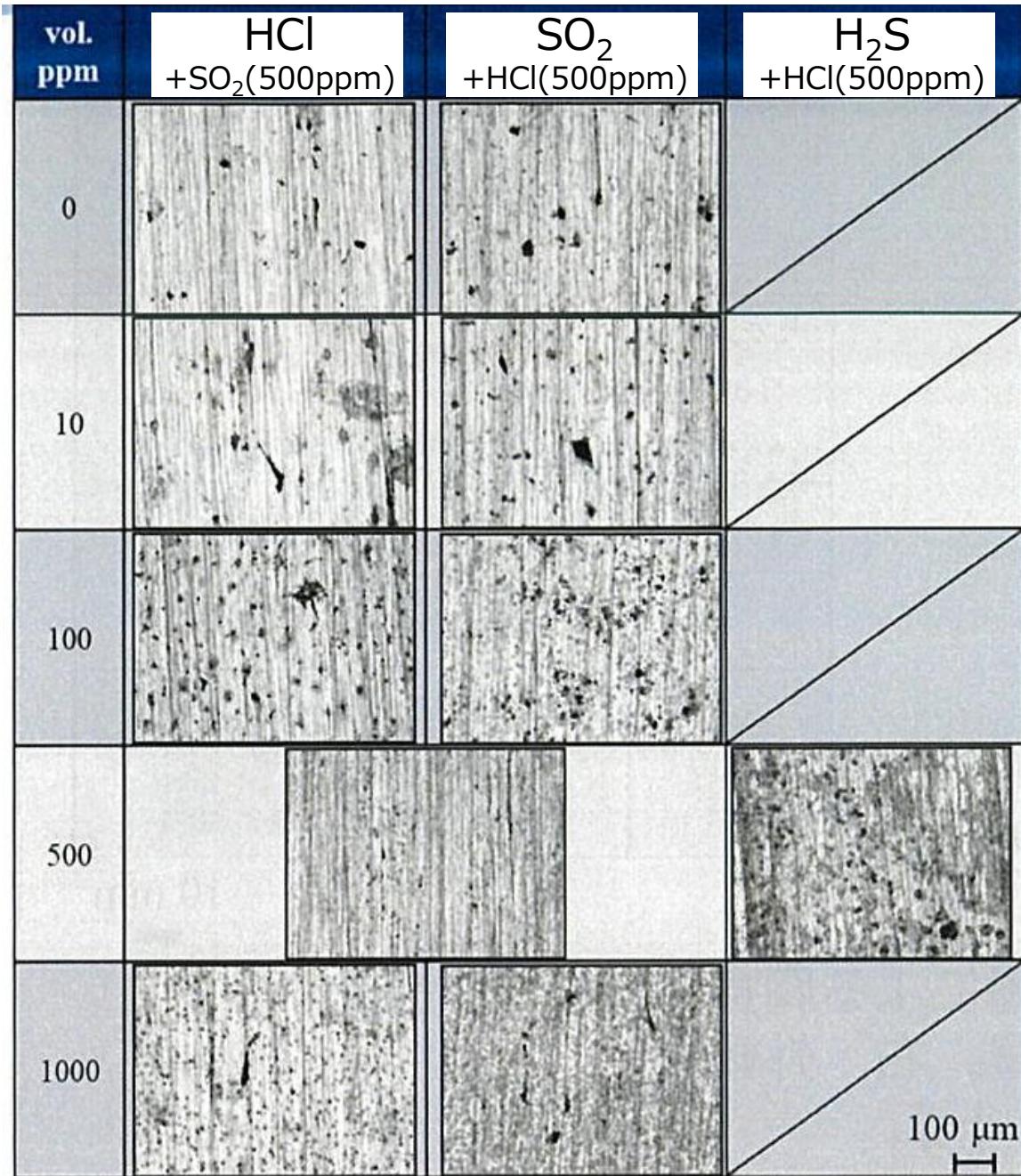


腐食性ガスによる試験後試料片外観への影響

タンク鋼材の腐食検討について

試験結果：孔食深さと腐食性ガス

- HCl、SO₂、H₂S添加量が増えると孔食のサイズが小さくなり、数は多くなる傾向が得られた。

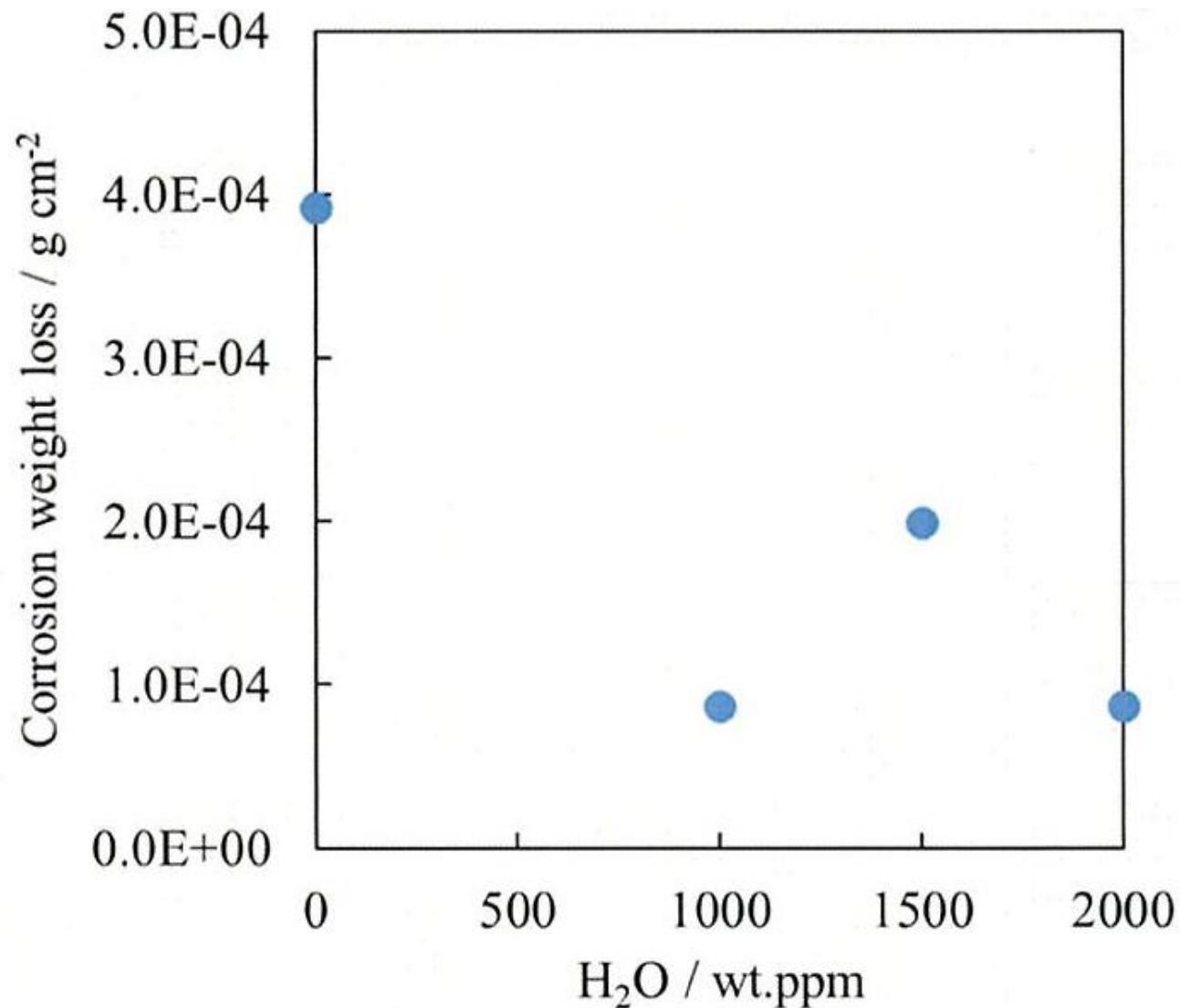


孔食深さと腐食性ガス添加量の関係

タンク鋼材の腐食検討について

試験結果：腐食減量とH₂Oの影響

- H₂O未添加時に腐食速度が大幅に上昇
 - 腐食メカニズムは解析中
 - H₂Oが存在しない液化二酸化炭素は実タンクでは想定できないため、慎重な検討が必要



vol.ppm	H ₂ O
0	
1000	
1500	
2000	

腐食減量とH₂O添加量の関係

タンク鋼材の腐食検討について 試験結果のまとめ(中間報告として)

1) 腐食期間による影響:

腐食期間の増加とともに、鋼材の腐食減量速度は低下する。

これは液体CO₂環境における腐食現象でも大気環境における腐食現象と同様に、腐食生成物による環境遮断効果が働き、腐食が抑制されることを意味する。

2) H₂SとSO₂の腐食性の違い:

H₂Sの方がSO₂に対し腐食減量は大きい。

これはH₂S存在下ではS²⁻は鋼材に吸着性をもち金属の溶解反応を促進することに加えて、形成される硫化物の環境遮断性が異なる可能性も考慮する必要がある。

タンク鋼材の腐食検討について 試験結果のまとめ(中間報告として)

3) H₂O添加量による影響:

H₂O未添加状態では腐食減量は著しく増加する。

この原因は液体のHClやSO₂が鋼材表面に凝集した可能性が考えられる。H₂O添加量が増加するに従い腐食減量も増加するが、H₂O量が一定以上となると腐食速度は逆に減少傾向を示す。これは凝集水中の腐食性因子の濃度低下と水膜厚さ増加による溶存酸素の腐食への影響低下により、溶液の腐食性が低下したことが原因と考えられる。

4) H₂S、SO₂、HCl添加量による影響:

H₂Sは鋼材表面に微細なpitを多数生成し、腐食性も同一添加量の場合SO₂、HClよりも高い。SO₂、HClはいずれも添加量の増加とともに腐食減量は単調に増加する。またSO₂、HClの添加量が増加するに従い全体的にpit数が増加するが、一定量以上になるとpit同士が連結することで、全面腐食的な溶解挙動を示す可能性がある。

タンク鋼材の腐食検討について 試験結果による社会実装への反映

項目

■ 液化CO2タンク 鋼材の腐食検討

内容

■ 液化CO2タンク腐食耐久性試験

中温中圧（-20℃、2MPa）の船舶搭載液化CO2タンクでは、船舶規則の要求を満たす鋼材は9%Ni鋼である。

不純物を含有した液化CO2による腐食は周知されていたが、9%Ni鋼の腐食耐久性はこれまで検証データが無かった。本実証試験を実施し、9%Ni鋼で腐食による減肉、局所的な孔食、各不純物の腐食影響を試験で確認したことで、液化CO2運搬船のタンク板厚の設定、運用ガイド、腐食影響によるリスク回避を策定することが出来る。

KL37および5%Ni鋼も併せて試験を行い、データは防食シミュレーション、船舶規則外での運用に有効なものとなる。

The UYENO logo is displayed in blue, featuring a stylized wave-like graphic between the 'Y' and 'E'.

次の50年を目指して