

発表No. B2-16

競争的な水素サプライチェーン構築に向けた技術開発事業／  
需要地水素サプライチェーンの構築に係る技術開発／  
高圧水素パイプラインの国内基準化に向けた導管材料の水素  
適合性と耐震設計に関する研究開発

一般社団法人 水素バリューチェーン推進協議会

国立大学法人 九州大学

JFEスチール 株式会社（再委託：国立大学法人 大阪大学）

発表日：2025年7月16日

連絡先：  
水素バリューチェーン推進協議会  
和田孝一 <koichi\_wada@jh2a.jp>

# 事業概要

## 1. 期間

開始 : 2024年6月  
終了（予定） : 2028年3月

## 2. 最終目標

国内の高圧水素パイプラインの普及に向けて、高圧ガス導管用材料の耐震性を考慮した材料適合性の評価とDB化を行うと共に、水素中破壊機構解明と海外研究機関との連携により、高圧水素パイプライン用材料の国内基準化に資する成果を得ることを目指す。

## 3. 成果・進捗概要

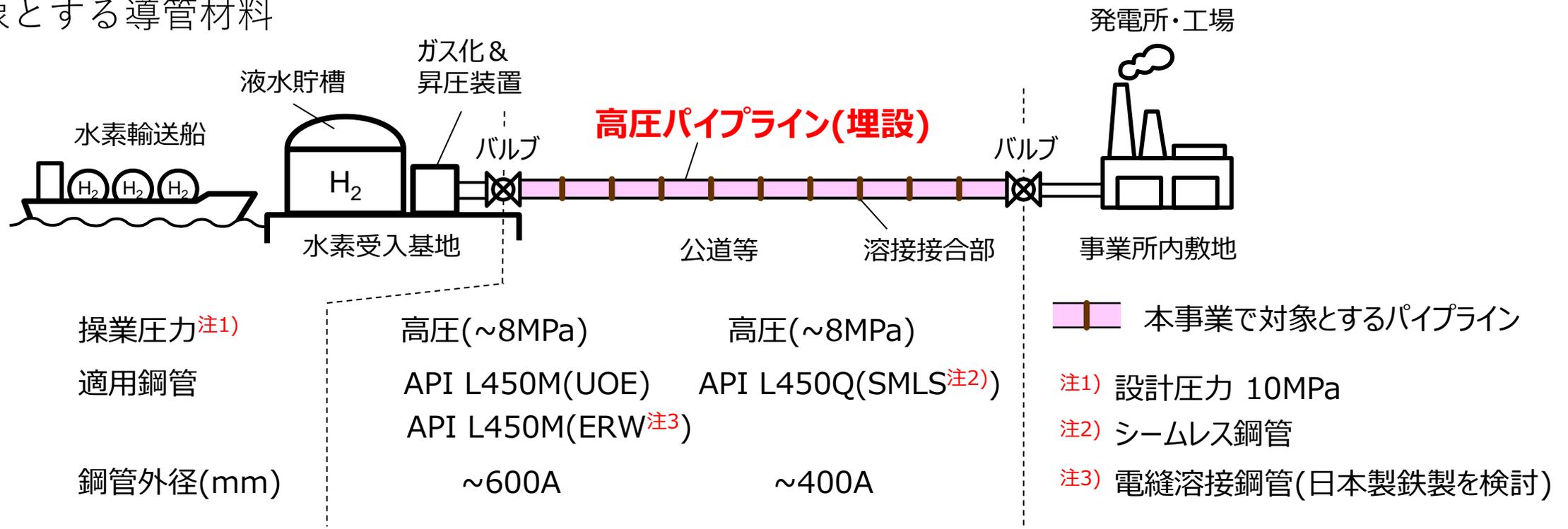
- ① ラインパイプ材料水素適合性検討会で専門家や事業者の意見を取り入れながら事業を推進。
- ② 高圧ガス導管仕様を満足するUOE鋼管及びシームレス鋼管を製造、円周溶接を実施し有害な欠陥ないことを確認。母材及び溶接部から各種試験用のサンプルを採取各機関へ送付した。
- ③ UOE鋼管母材の10MPa高圧水素中引張試験及び破壊靱性試験を開始した。SMLS母材及びUOE鋼管シーム溶接部のサンプル準備も進んでおり疲労き裂進展も含め順次試験を進める。
- ④ 水素下での低サイクル疲労試験方法の確立は目途が立ち、10MPa水素環境と同等の水素が侵入する陰極水素チャージ下での試験を進める。
- ⑤ 水素量、負荷速度依存性評価のための実験環境とサンプル準備を完了し実験開始。
- ⑥ 海外研究機関との国際連携は複数機関と既に実施中。

# 1. 事業の位置付け・必要性

## □ 事業の目的

- 水素の大規模利用時にパイプラインが必要とされるが、1 MPaを超える高圧水素下で埋設パイプラインを安全に使用する技術基準が国内になく、海外の材料仕様には耐震設計が考慮されていない。
- 1 MPaを超える高圧水素パイプライン（埋設）の国内基準化に向け、耐震性を考慮した導管材料の水素適合性を評価する。

## □ 対象とする導管材料



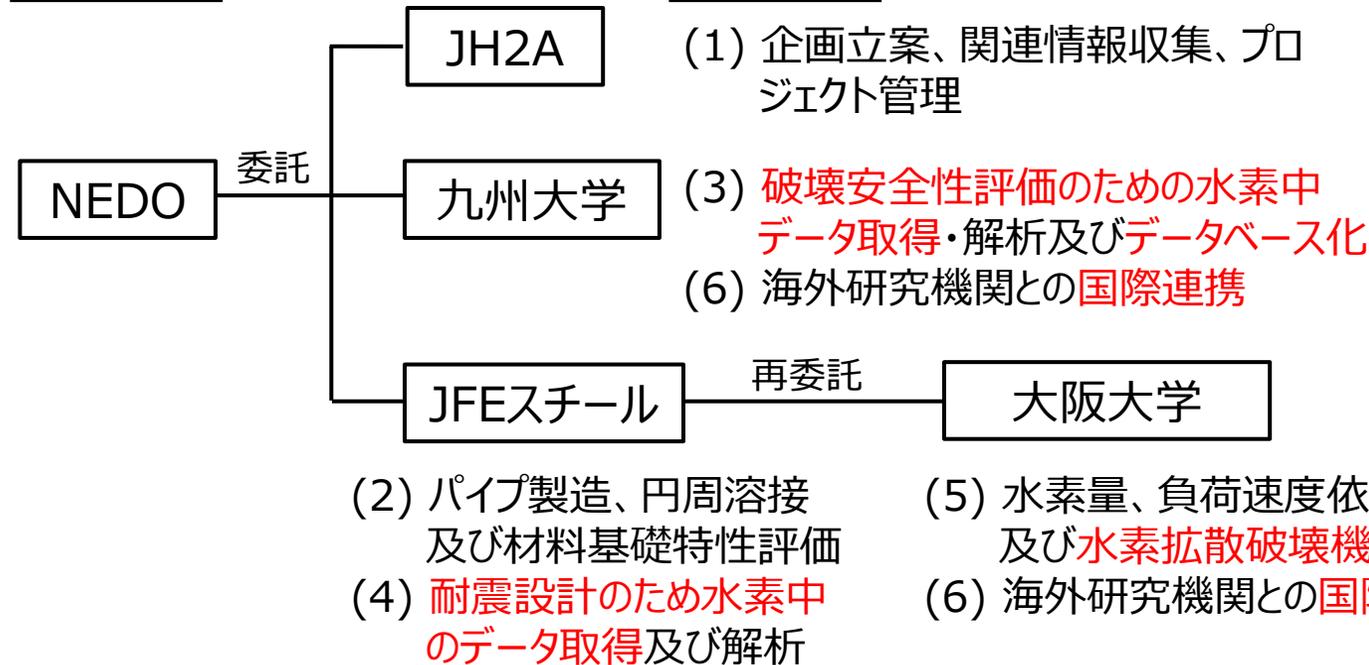
## 2. 研究開発マネジメントについて

### □ 事業の目標

- 耐震設計を考慮したラインパイプ材料及び溶接部の水素環境中特性のデータ取得と水素中破壊機構の解明、及び国際連携

### □ 実施体制及び研究項目

#### 実施体制



#### 協力者

\*水素バリューチェーン推進協議会員

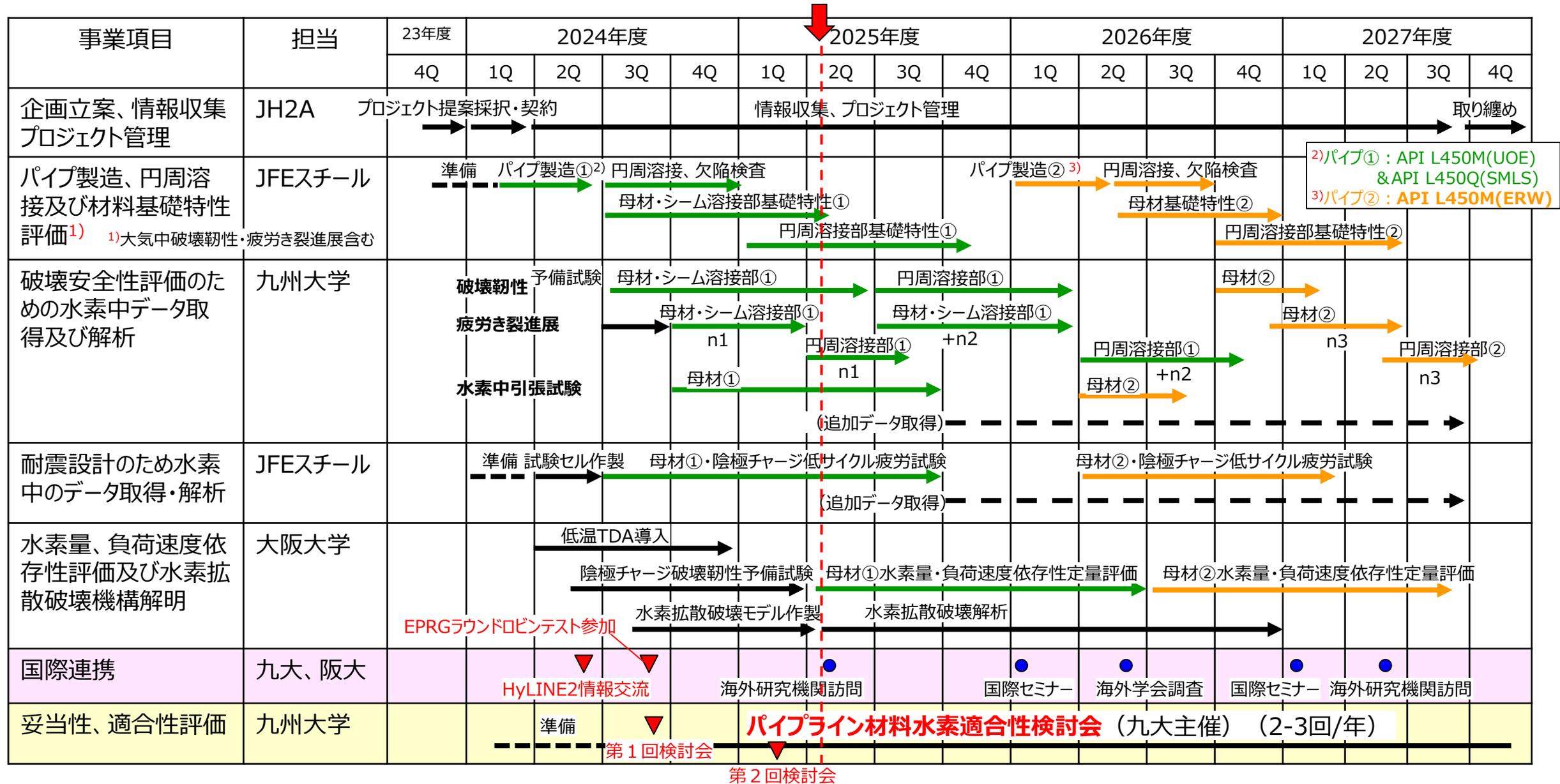
ENEOS\*、JERA\*、東京ガス\*、東京ガスNW\*、INPEX\*、JFEエンジニアリング\*、日本製鉄\*、日鉄P&E\*、日鉄エンジニアリング\*、上智大学、東京大学、他

#### マネジメント

- パイプライン材料水素適合性検討会での議論
- JH2A 規制委員会パイプラインSWGなどでの議論・助言

➡ 研究計画に反映(優先順、適用鋼種、試験条件、等)

### 3. 研究進捗：①プロジェクト管理



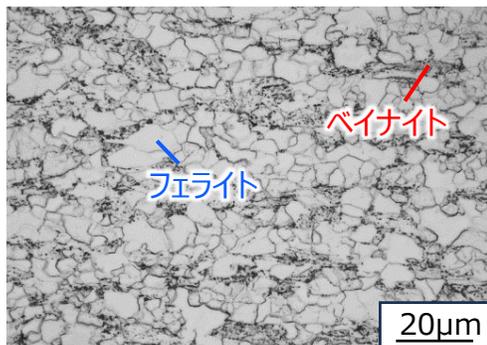
### 3. 研究進捗：②パイプ製造、円周溶接及び材料基礎特性評価

#### ➤ 供試鋼管

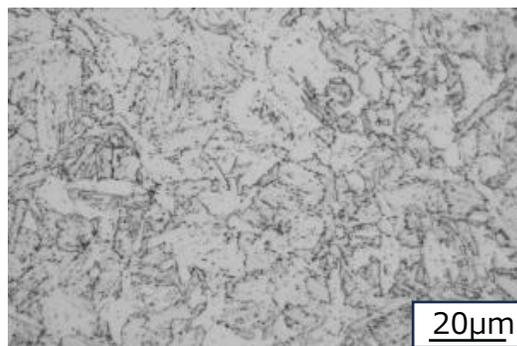
種類	グレード	外径 (mm)	管厚 (mm)	引張特性*1			
				YS (MPa)	TS (MPa)	YR (%)	EL (%)
UOE	API L450M	610	21.7	550	619	89	48
SMLS	API L450Q	406	14.5	559	636	88	38

#### ➤ ミクロ組織

UOE



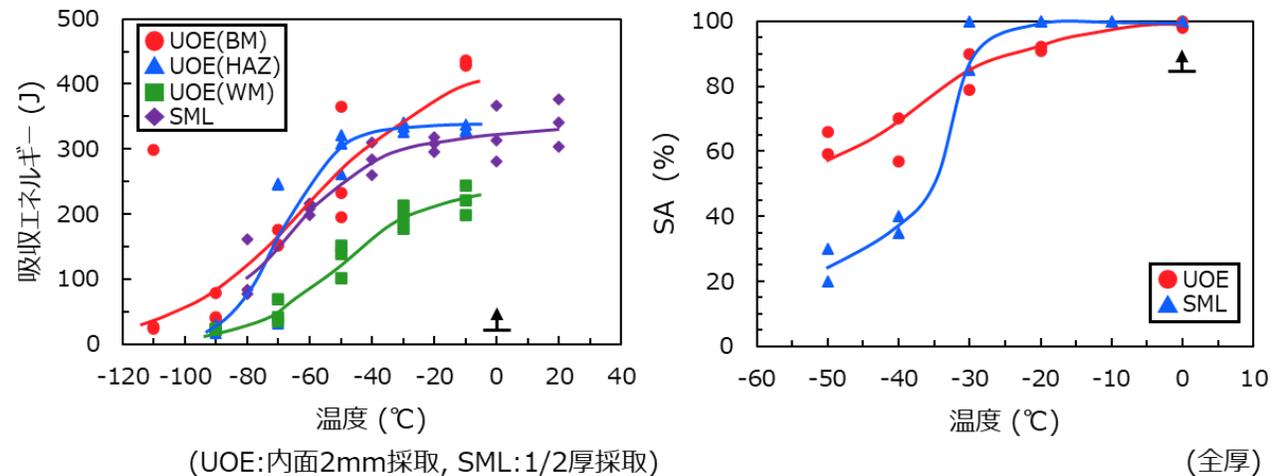
SML



シーム溶接部 (UOE)



#### ➤ シャルピー試験、DWTT試験結果

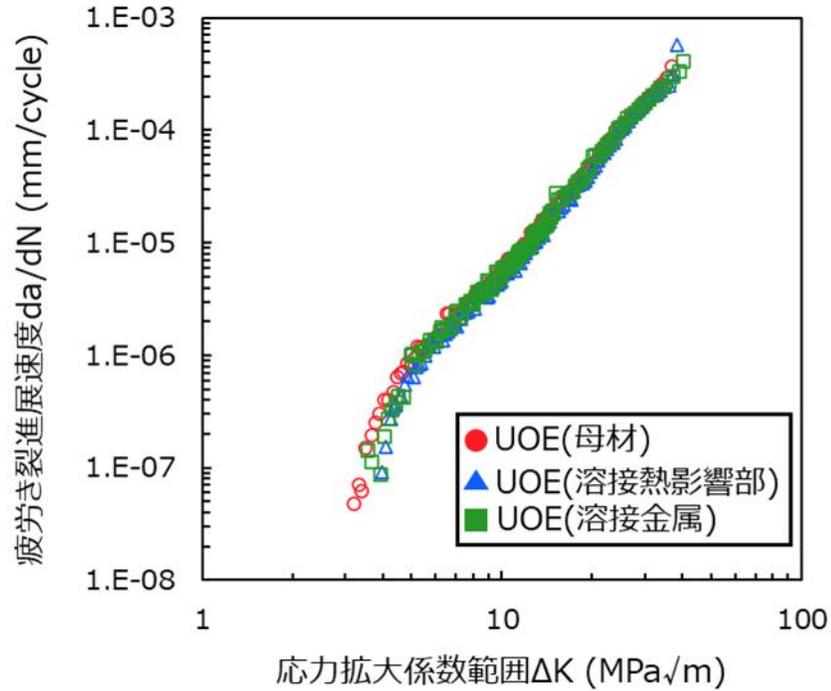


#### □ 母材・シーム溶接部基礎特性 進捗状況

試験項目	UOE	SML
引張	済	済
シャルピー衝撃	済	済
DWTT	済	済
硬さ	済	済
疲労き裂進展(大気中)	N1完了	実施中
破壊靱性(大気中)	済	実施中

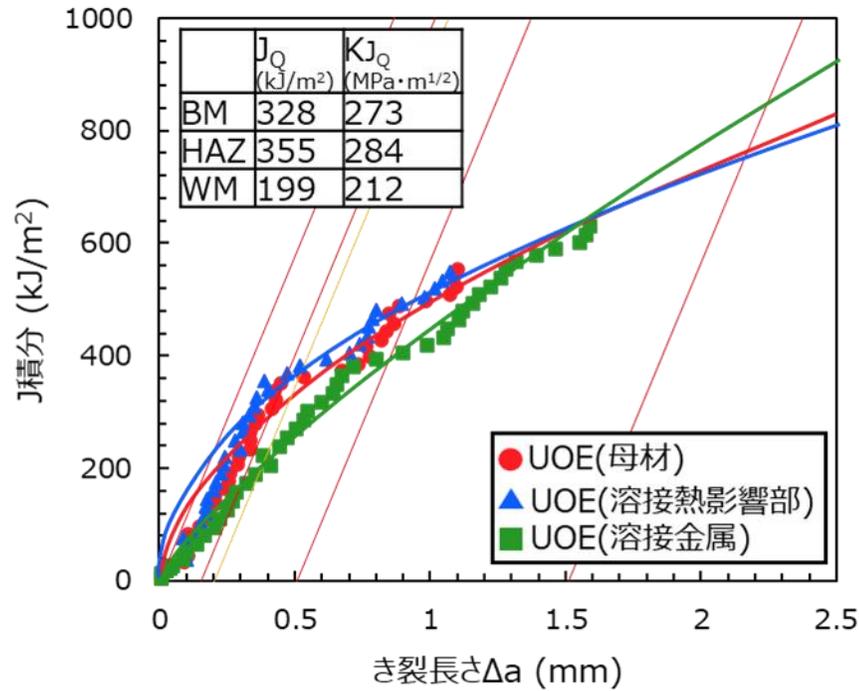
### 3. 研究進捗：②パイプ製造、円周溶接及び材料基礎特性評価

#### ■ 大気中疲労き裂進展

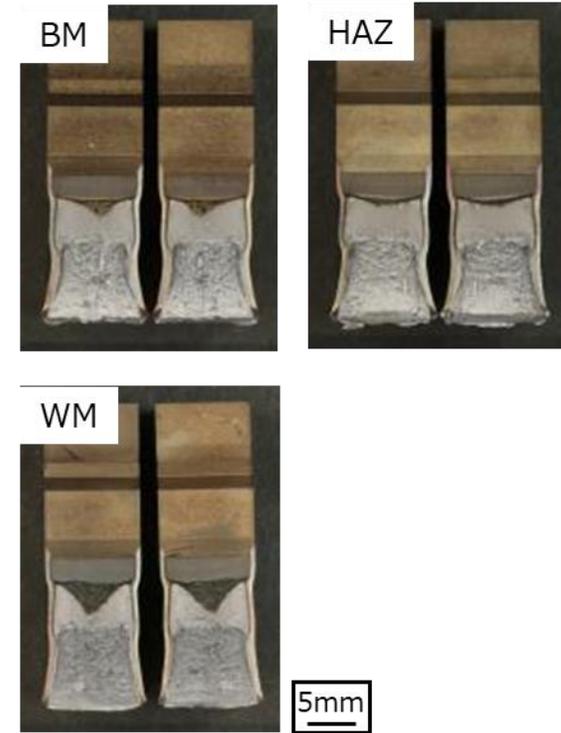


(ASTM-E647準拠、応力比：0.5)

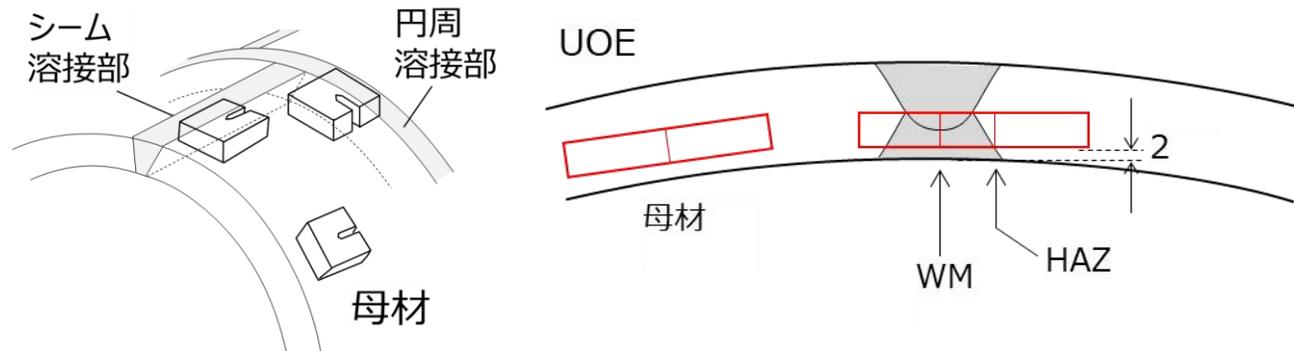
#### ■ 大気中破壊靱性



(ASTM-E1820準拠、除荷弾性コンプライアンス法)



#### ● 疲労き裂進展・破壊靱性試験片採取位置の模式図



水素ガスに接する  
内面側から採取

### 3. 研究進捗：②パイプ製造、円周溶接及び材料基礎特性評価

#### ■ 円周溶接方法と溶接材料

- ・ API L450M(UOE) : (1~8層)MAG自動溶接
- ・ API L450Q(SML) : (1, 2層)TIG溶接+(3~6層)MAG自動溶接

対象鋼管	TIG溶接		MAG自動溶接	
	ワイヤ	シールドガス	ワイヤ	シールドガス
UOE	-	-	MG-S58P( $\phi$ 0.9mm)	Ar-50%+CO <sub>2</sub> -50%
SML	TG-S62( $\phi$ 2.4mm)	Ar-100%	MG-S58P( $\phi$ 0.9mm)	Ar-50%+CO <sub>2</sub> -50%

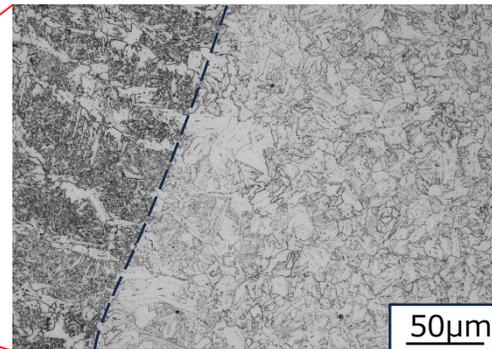
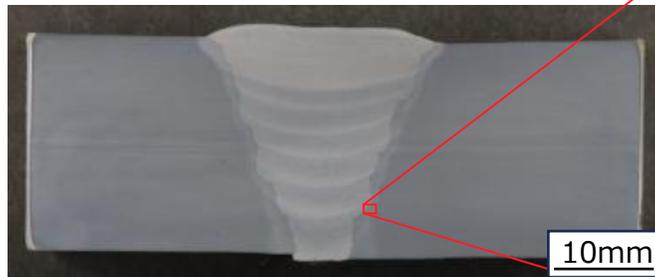
括弧内はワイヤ径を示す

#### ■ 非破壊検査結果

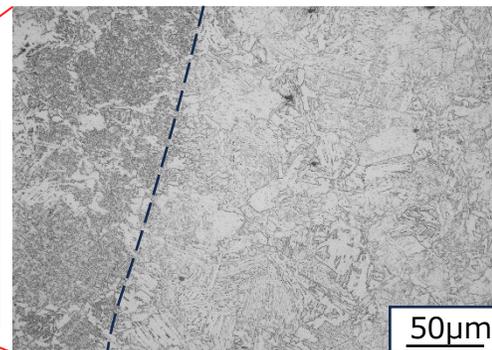
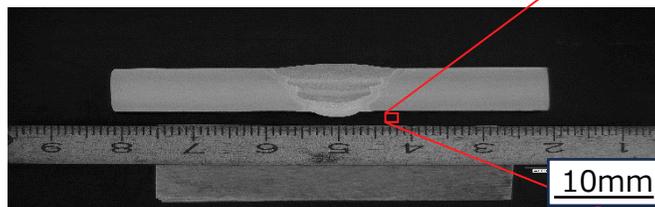
- ・ 放射線透過試験 (JIS Z 3104:1995) にてすべての視野できず分類が1類 ⇒合格
- ・ 超音波探傷試験 (JIS Z 3060:2015) にてきずエコーなし ⇒合格

#### ■ マクロ・ミクロ

UOE



SML



#### □ 円周溶接部基礎特性 進捗状況

試験項目	UOE	SML
組織観察	済	済
硬さ	済	済
継手引張	済	済
シャルピー衝撃	済	済
疲労き裂進展(大気中)	N1完了	実施中
破壊靱性(大気中)	済	実施中

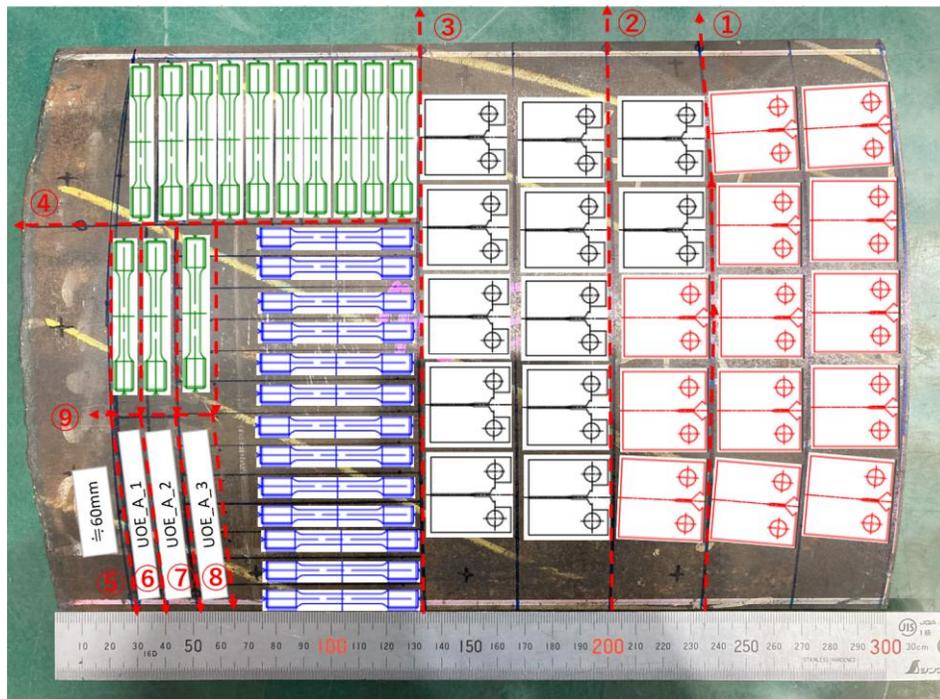
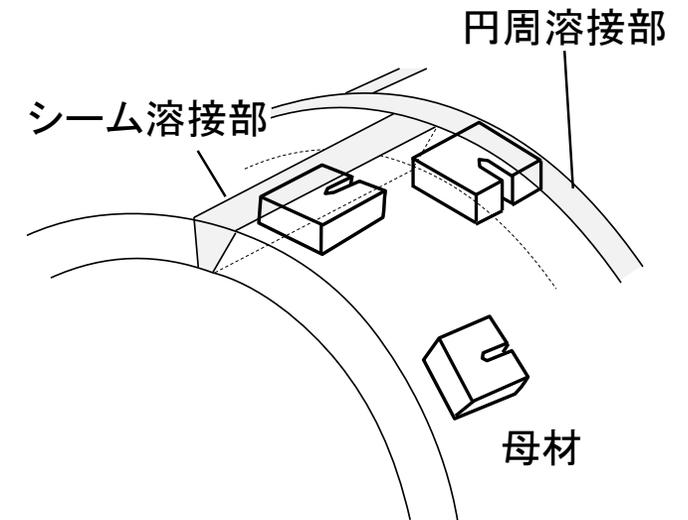
### 3. 研究進捗：③破壊安全性評価のための水素中データ取得

#### □ 本事業で対象とする材料

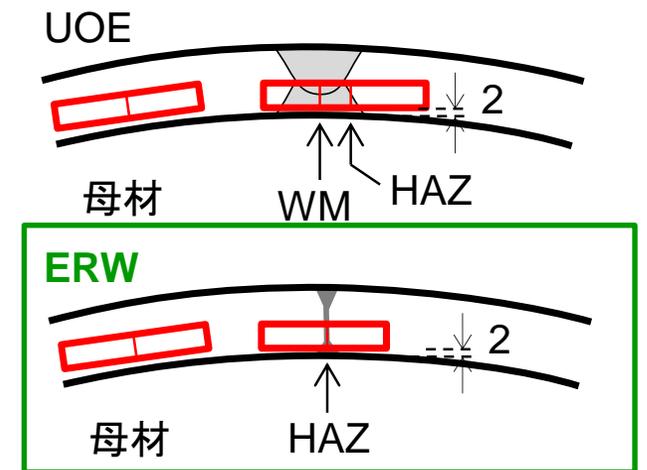
##### 供試鋼管

グレード	種類	外径 (mm)	管厚 (mm)	パイプ 製造
API L450M	UOE	610	21.7	JFE
API L450Q	SMLS	406	12.7	JFE
API L450	ERW	610	18.0	NSC

今回は母材の結果を報告



試験片採取例  
(UOE管)

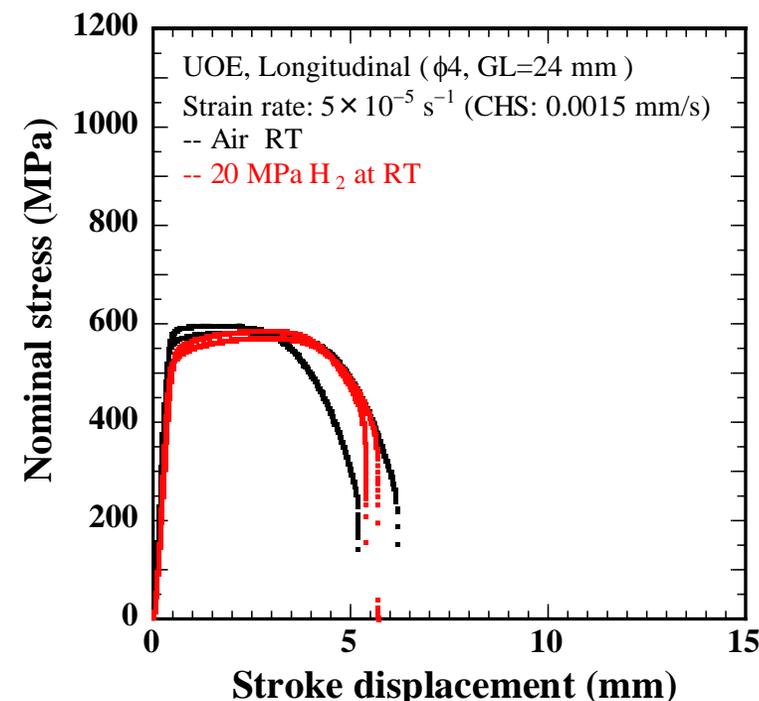
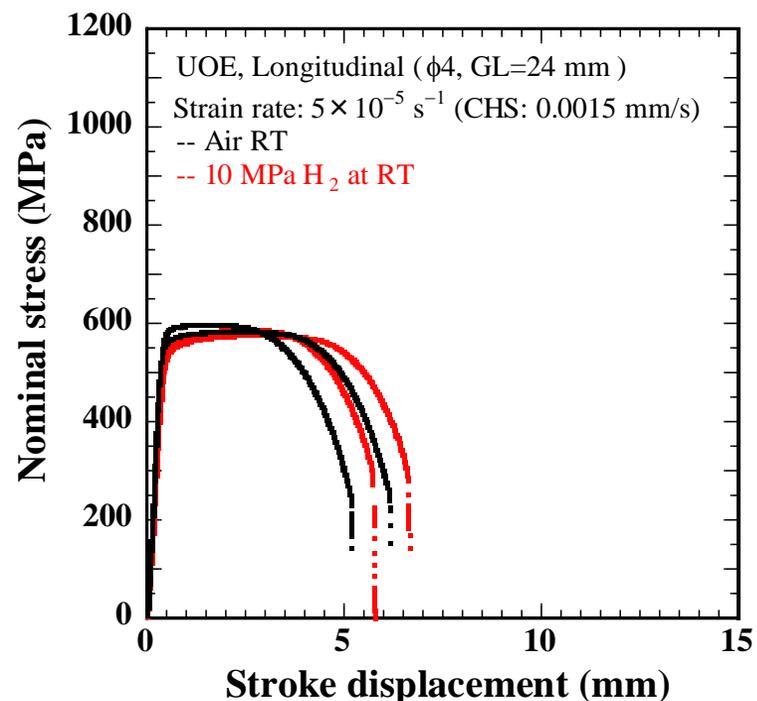
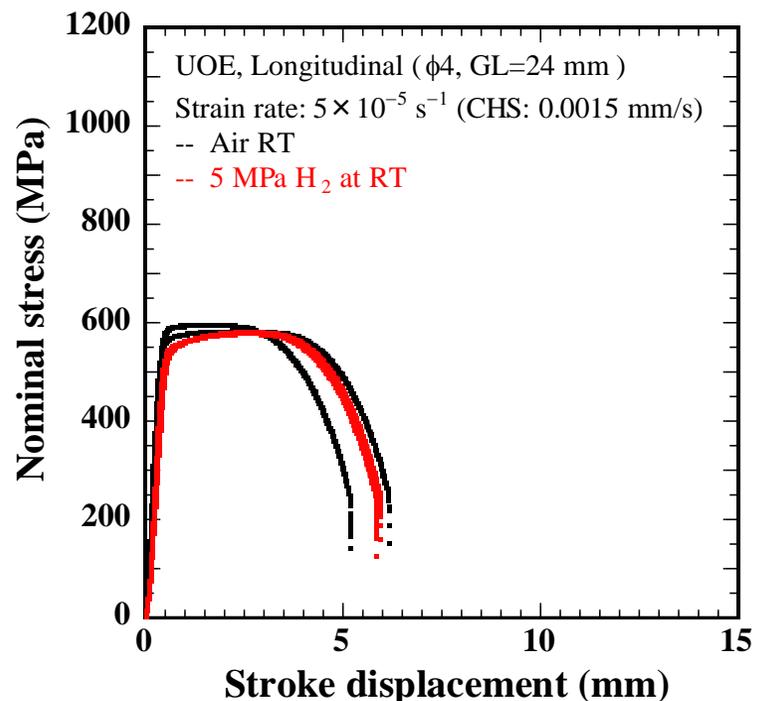


試験片採取位置の模式図

### 3. 研究進捗：③破壊安全性評価のための水素中データ取得

#### □ 水素中SSRT試験結果 (UOE、母材、長手方向)

##### • 応力-変位曲線



	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	$\sigma_B$ (MPa)	$\delta$ (%)	$\Phi$ (%)
Air·RT	534	585	25	85
	559	598	20	85
5 MPa H <sub>2</sub> ·RT	509	581	23	85
	519	583	24	85

	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	$\sigma_B$ (MPa)	$\delta$ (%)	$\Phi$ (%)
Air·RT	534	585	25	85
	559	598	20	85
10 MPa H <sub>2</sub> ·RT	530	587	23	77
	517	577	28	80

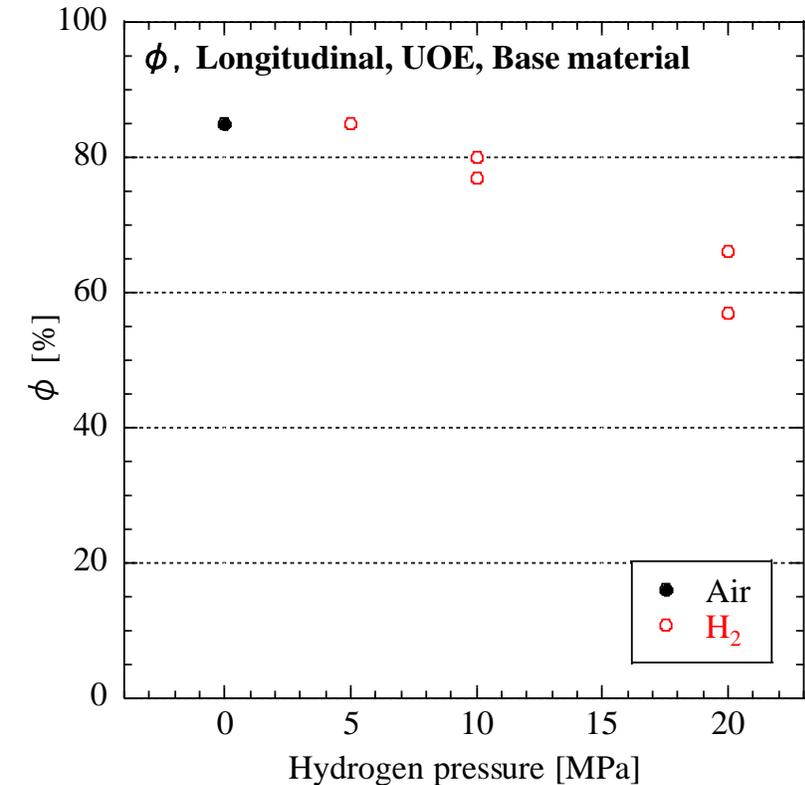
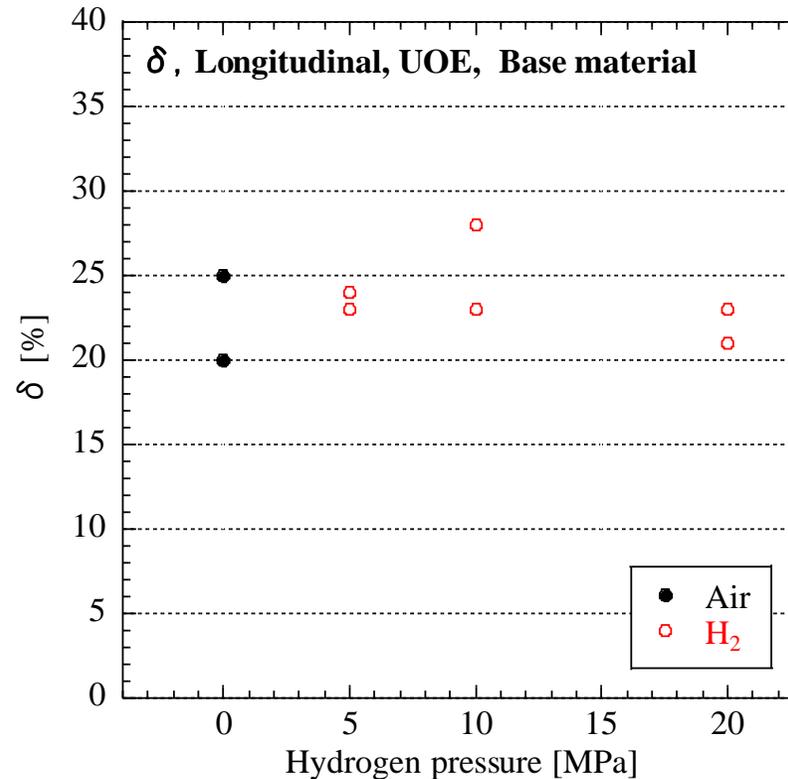
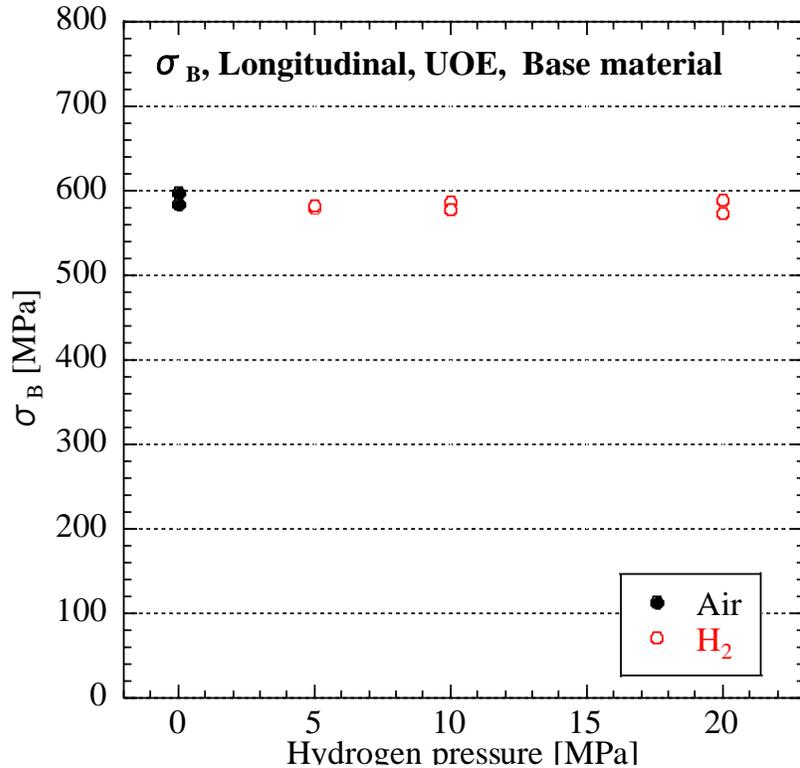
	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	$\sigma_B$ (MPa)	$\delta$ (%)	$\Phi$ (%)
Air·RT	534	585	25	85
	559	598	20	85
20 MPa H <sub>2</sub> ·RT	517	588	21	66
	502	573	23	57

※大気中のデータは全てのグラフで共通

### 3. 研究進捗：③破壊安全性評価のための水素中データ取得

#### □ 水素中SSRT試験結果（UOE、母材、長手方向）

- 引張強さ $\sigma_B$ , 破断伸び $\delta$ , および絞り $\phi$ の圧力依存性

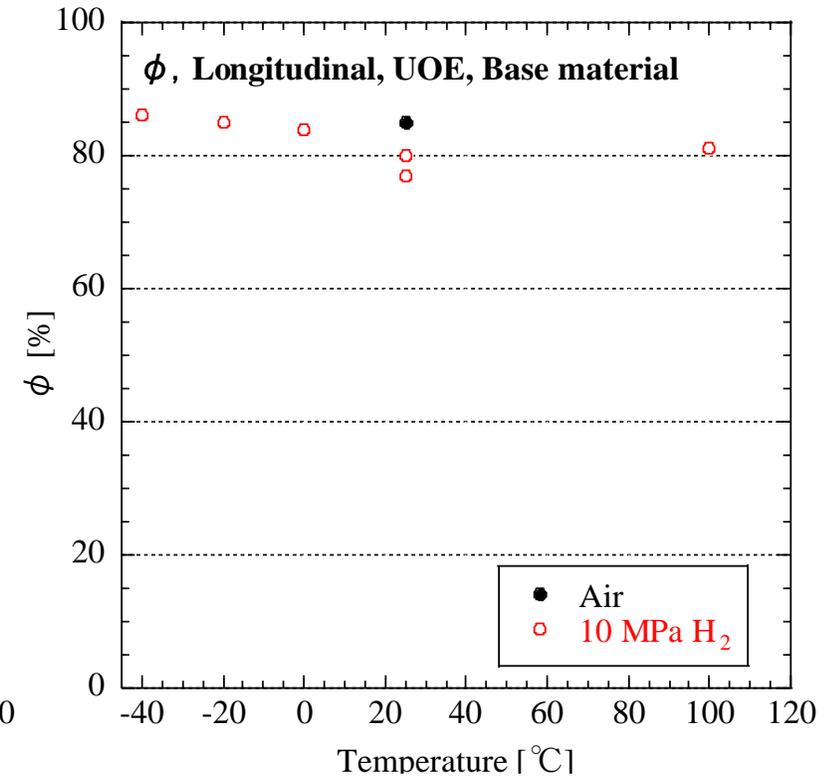
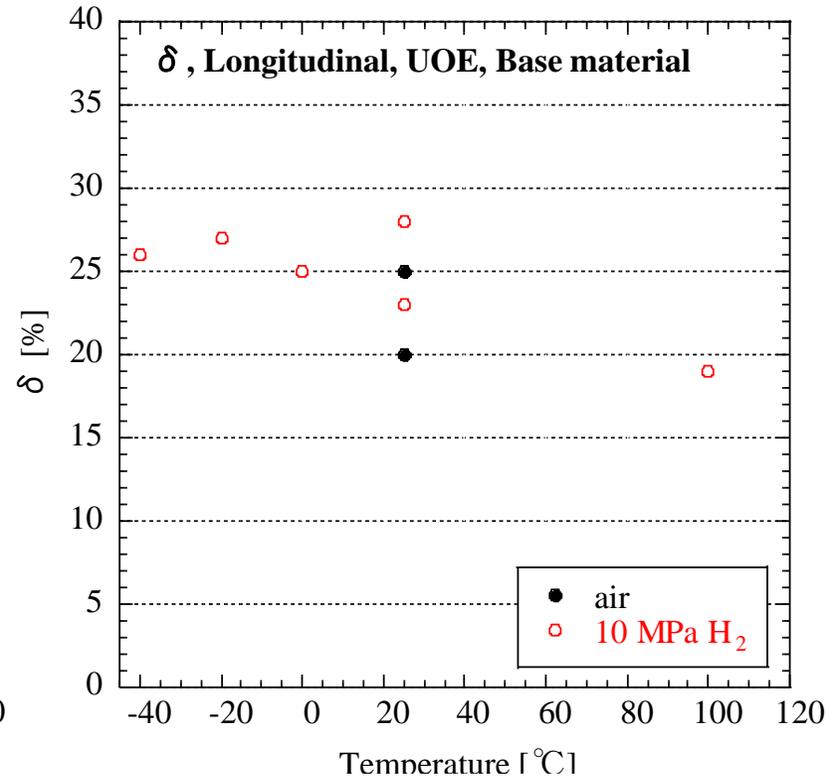
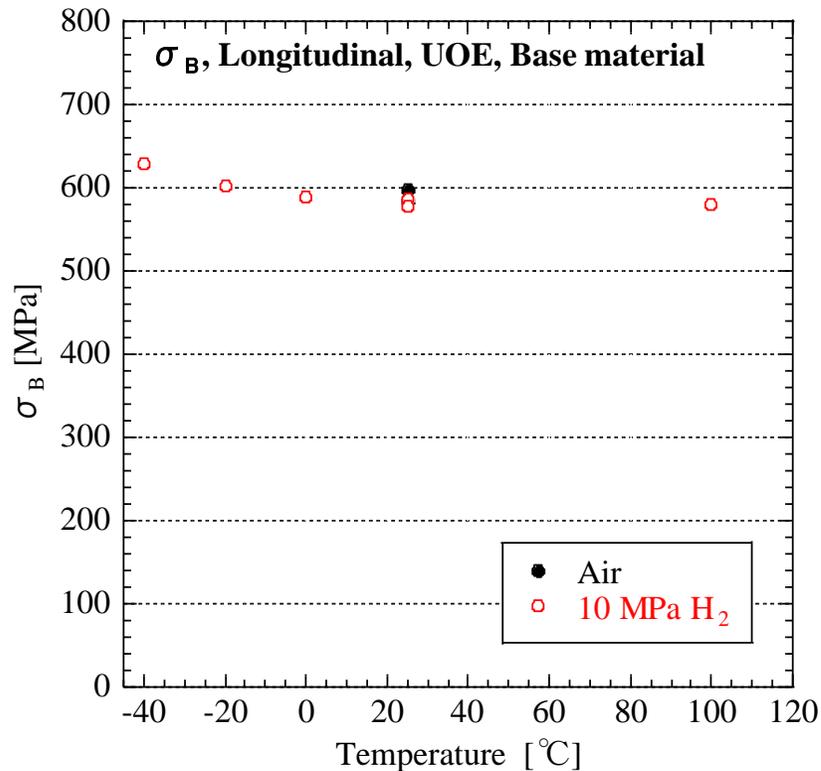


- **引張強さ**：いずれの圧力においても、水素による低下は見られない。
- **伸び**：若干のばらつきが見られるものの、水素による明らかな低下は見られない。また、圧力依存性も見られない。
- **絞り**：圧力の上昇とともに低下する傾向がある。本結果は、不均一塑性変形過程において、き裂の発生・進展が水素圧力により影響を受けた可能性を示唆する。

### 3. 研究進捗：③破壊安全性評価のための水素中データ取得

#### □ 水素中SSRT試験結果（UOE、母材、長手方向）

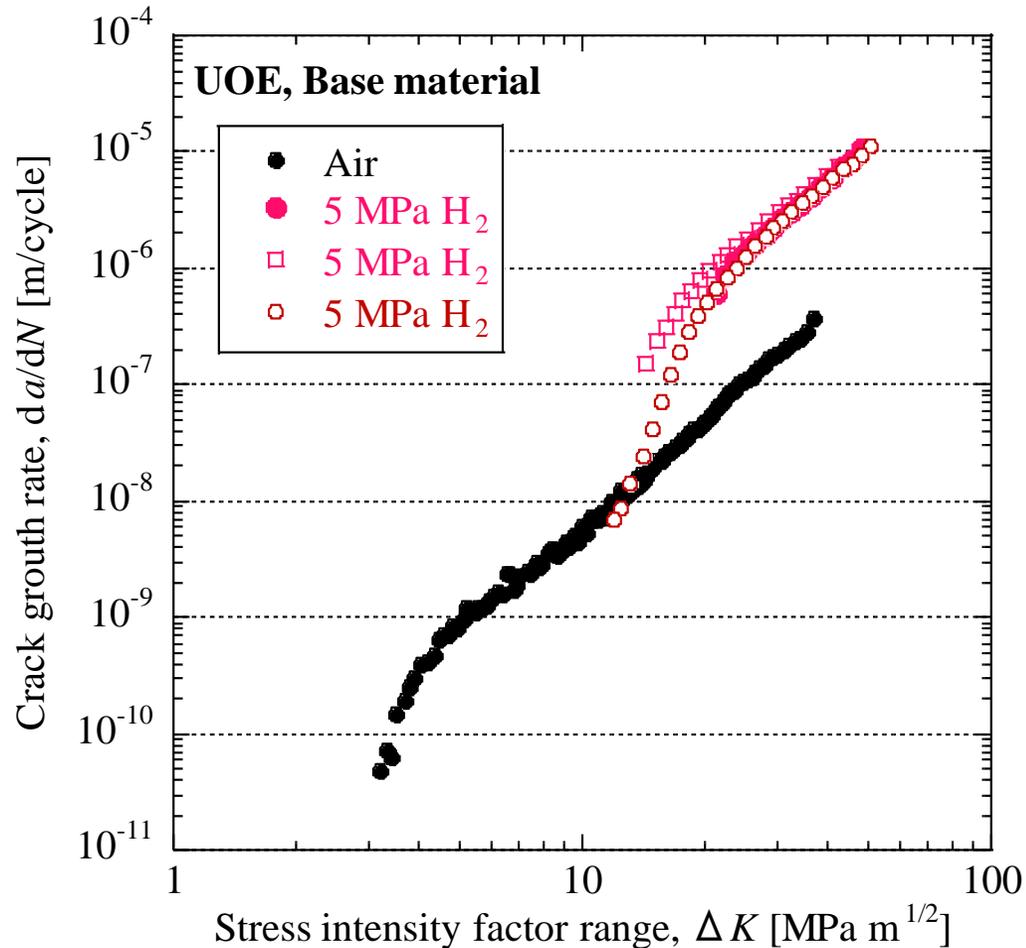
- 引張強さ $\sigma_B$ ，破断伸び $\delta$ ，および絞り $\phi$ の温度依存性



- **引張強さ**：-40°C～100°Cの温度範囲において，水素ガス中で引張強さはほぼ一定となった。
- **伸び**：おおよそ20%～30%の範囲でばらついている．温度依存性の傾向を明らかにするためには， $N$ 数を増やす必要がある。
- **絞り**：-40°C～100°Cの温度範囲において，水素ガス中で絞りはほぼ一定となった。

### 3. 研究進捗：③破壊安全性評価のための水素中データ取得

#### □ 水素中疲労き裂進展試験結果（UOE、母材）

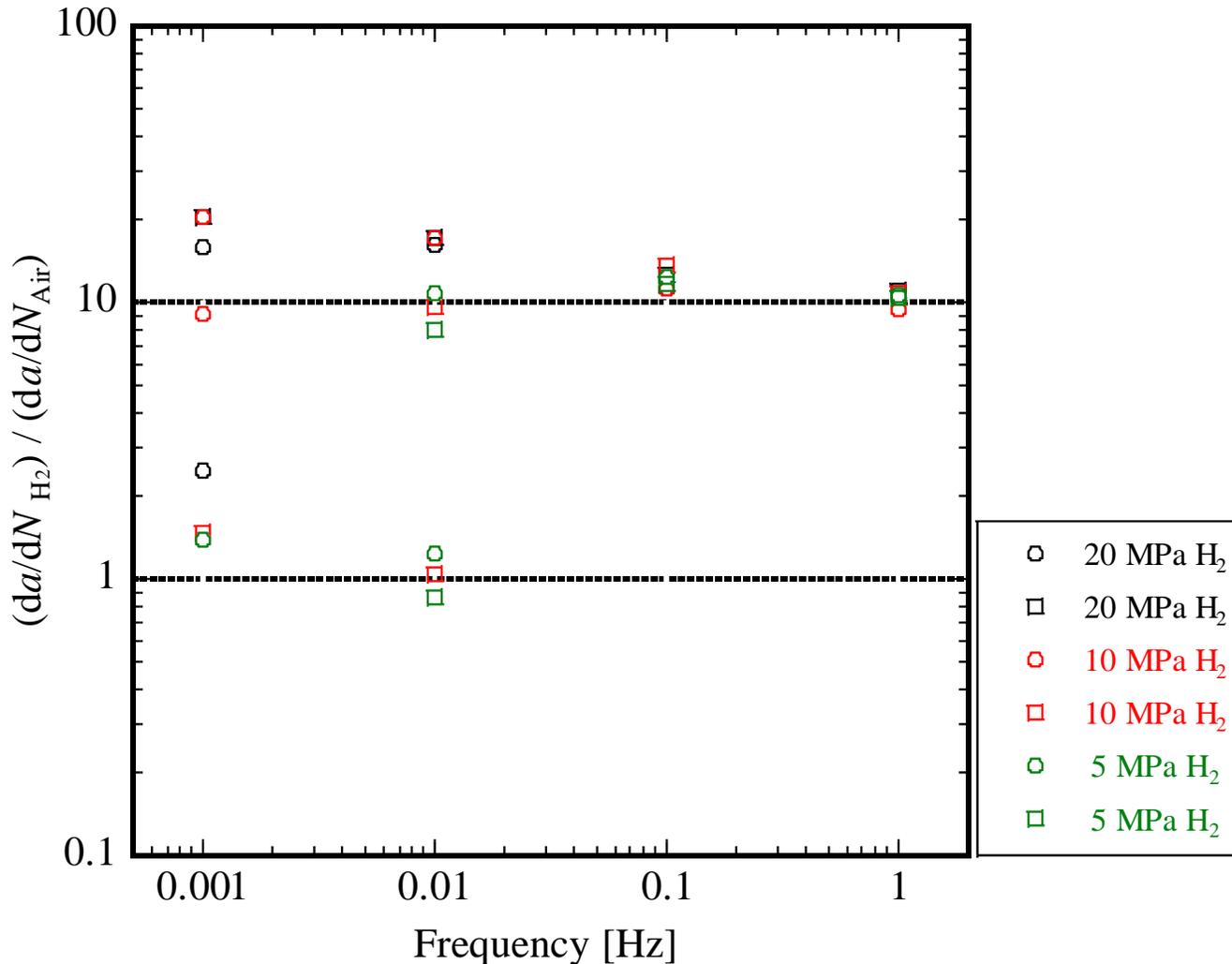


- 低 $\Delta K$ 域では水素ガス中の $da/dN$ は大気中とほぼ同等となった。
- 高 $\Delta K$ 域ではき裂が加速した。  $da/dN$ - $\Delta K$ 曲線は、遷移域を経て両環境中で平行となった。
- 高 $\Delta K$ 域でのき裂加速率は10～20倍であった。
- 類似の結果は、これまでに報告されている低合金鋼や炭素鋼（他のプロジェクトで調査されたパイプライン鋼を含む）についても報告されている。

### 3. 研究進捗：③破壊安全性評価のための水素中データ取得

#### □ 水素中疲労き裂進展試験結果 (UOE、母材)

- 疲労き裂進展加速率の試験周波数依存性



- 全ての圧力において、き裂加速率は試験周波数によらずほぼ一定となるか、もしくは、低試験周波数で減少した。この $\Delta K$ 域 (30MPa $\sqrt{m}$ ) またはそれ未満では、**疲労き裂はサイクル依存型で安定に成長**すると考えられる。

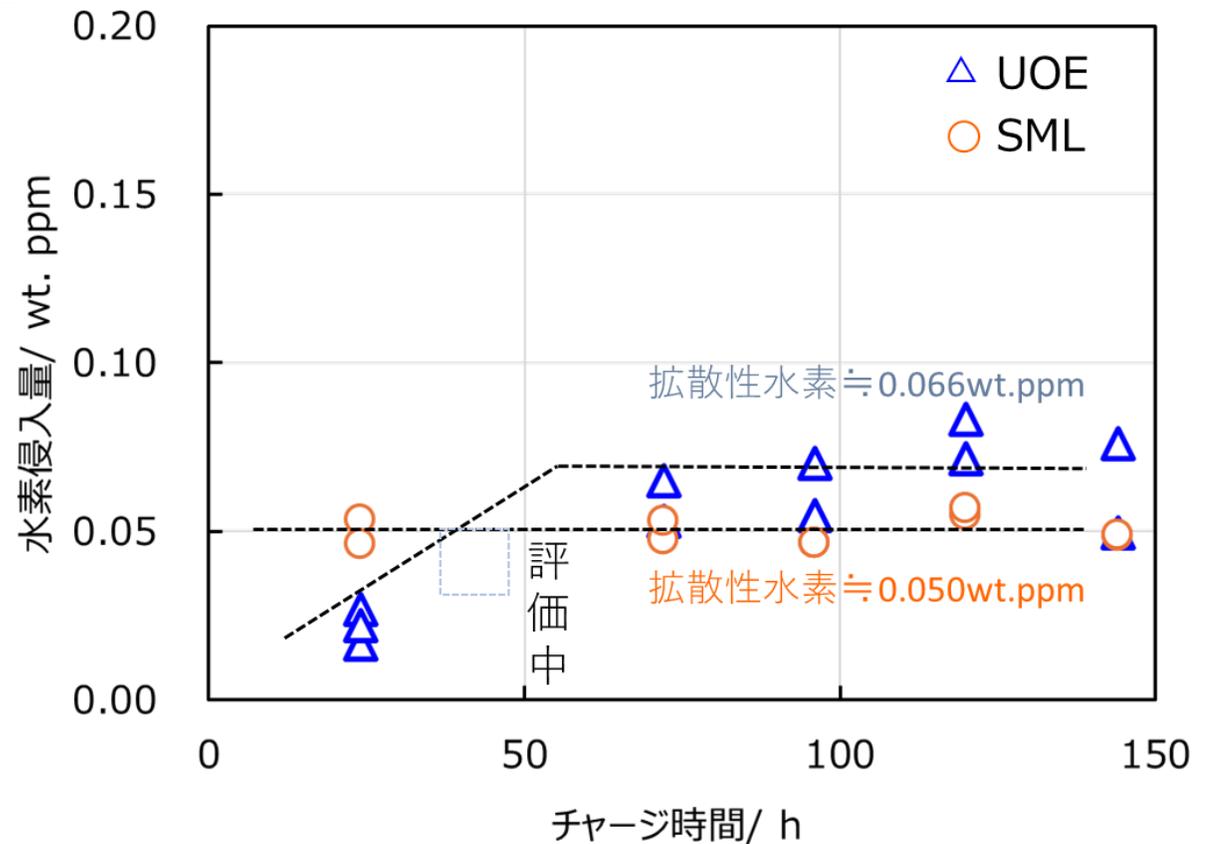
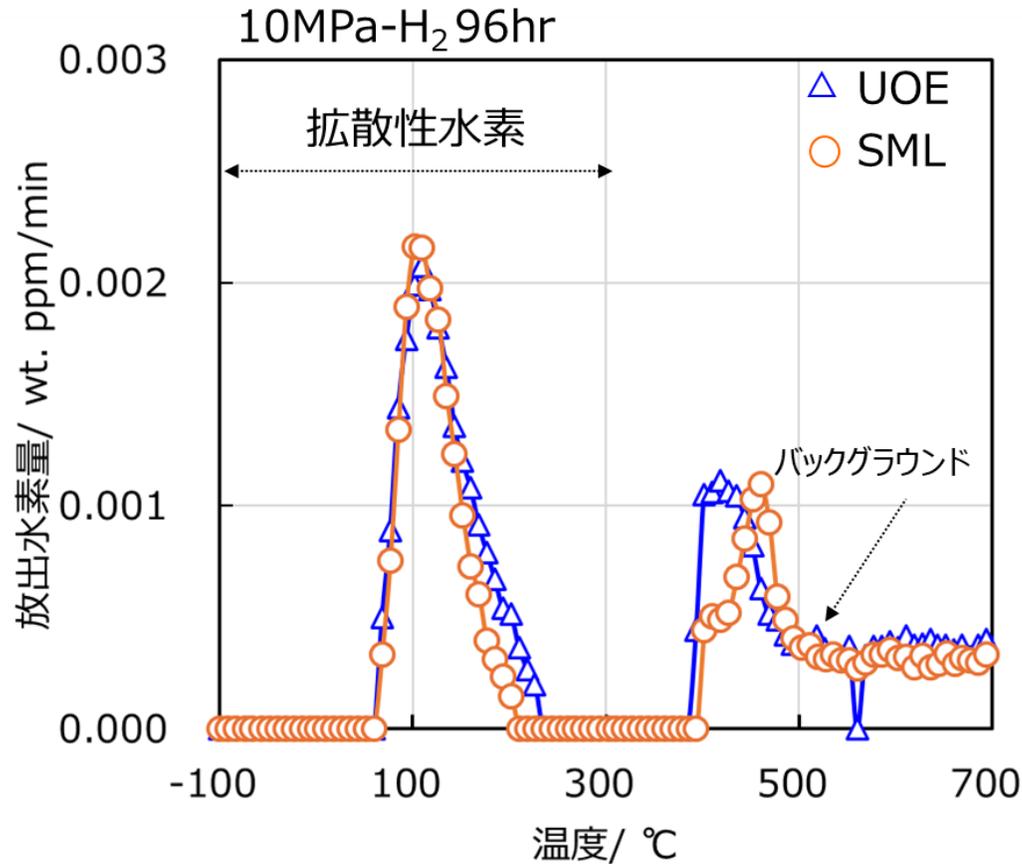
- き裂加速率の**上限値は10~20倍**であった。

- 本結果は、**き裂加速率を考慮することにより疲労き裂進展速度に基づく疲労寿命設計が可能**であることを示唆する。

- 低周波数域での減速の原因として、(i) **圧力容器中の微量酸素によるInhibitor効果**や、(ii) **低試験周波数域でのき裂先端の鈍化量の増大によるき裂先端の応力場の緩和**、などが考えられる。そのメカニズムについては、本NEDO事業外での基礎研究での検討を含め、今後の課題である。

### 3. 研究進捗：④耐震設計のため水素中のデータ取得及び解析

#### □ 高圧水素雰囲気下での水素侵入量評価



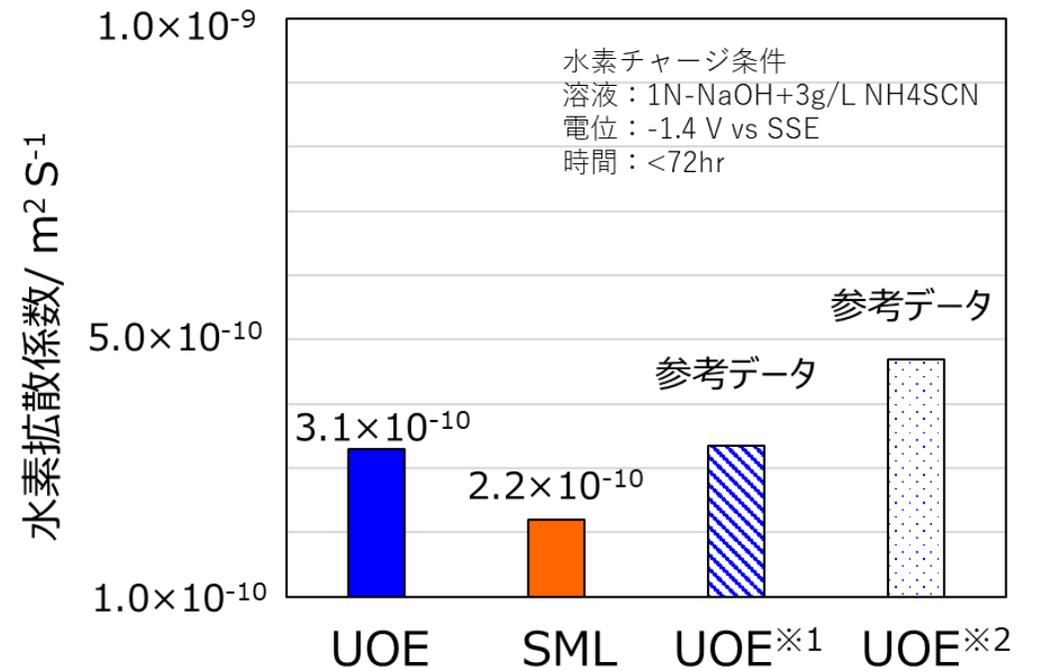
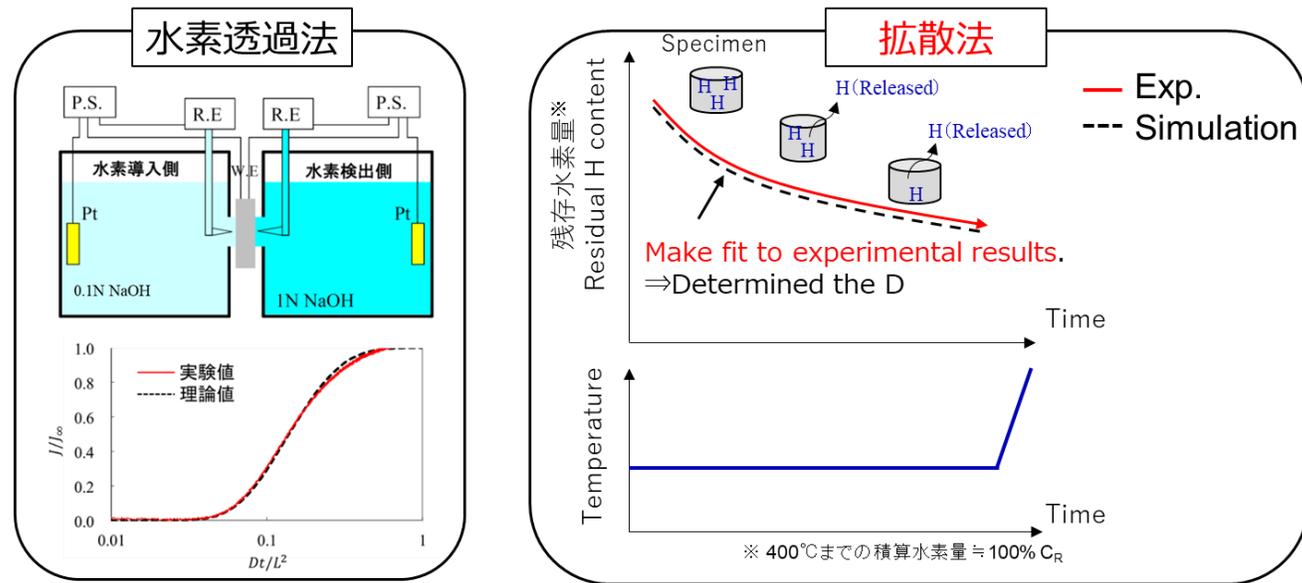
#### 水素侵入の定常時間評価

- ・300℃以下で放出する水素 (1<sup>st</sup> Peak) を、侵入水素量として定義
- ・UOE (BM) : 72hr以上、SML (BM) : 48hr以上

# 3. 研究進捗：④耐震設計のため水素中のデータ取得及び解析

## □ 水素拡散係数評価

拡散法：水素チャージ後の試験片を任意温度で保持。放出する水素を随時測定。放出する時間-水素放出曲線を理論解でフィッティング⇒拡散係数を算出



※1 E. Koren, Int. J.H, 64 (2024) 1157  
 ※2 K. Yasuda, CORROSION 2021, NACE-2021-16383

$$C_R(t) = A \left\{ \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\exp[-(2n+1)^2 \pi^2 Dt / z_0^2]}{(2n+1)^2} \right\} \cdot \left\{ \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\exp[-D \beta_m^2 t / r_0^2]}{\beta_m^2} \right\}$$

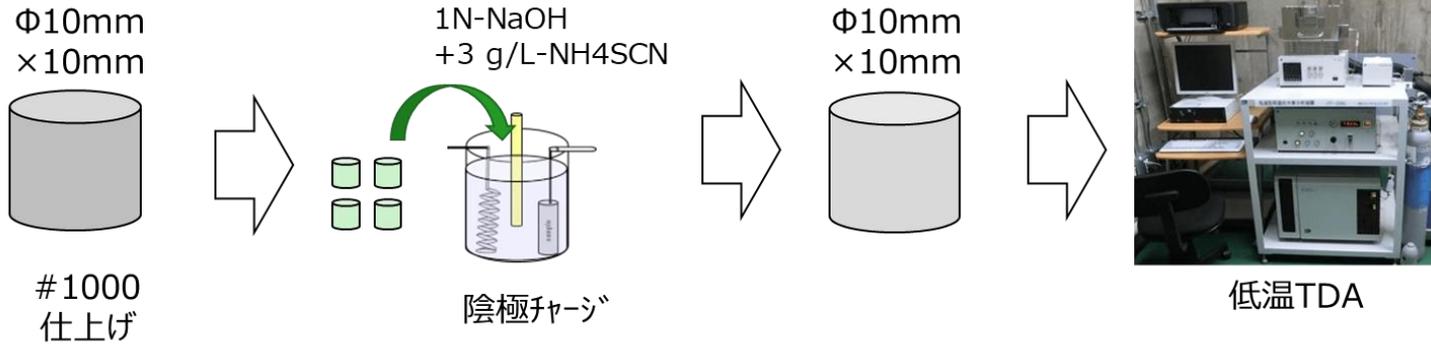
$C_R$ : Residual H Content (残存水素量)  
 $A$ : Constants (定数)  
 $D$ : H Diffusivity (水素拡散係数)  
 $r_0$ : Radius of the specimen (試験片の半径)  
 $z_0$ : Thickness of th specimen (試験片の厚さ)  
 $\beta_m$ : Root of the zero order Bessel function (ベッセル関数の0次の根)

AL. Demarez, Acta Metallurgica, Vol 2, Mar. 1954.  
 J. Yamabe et. al Int. J. Hydrogen energy, 40(2015), 11075.

**水素拡散係数**  
 ① UOE (BM) :  $D=3.1 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$   
 ② SML (BM) :  $D=2.2 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$

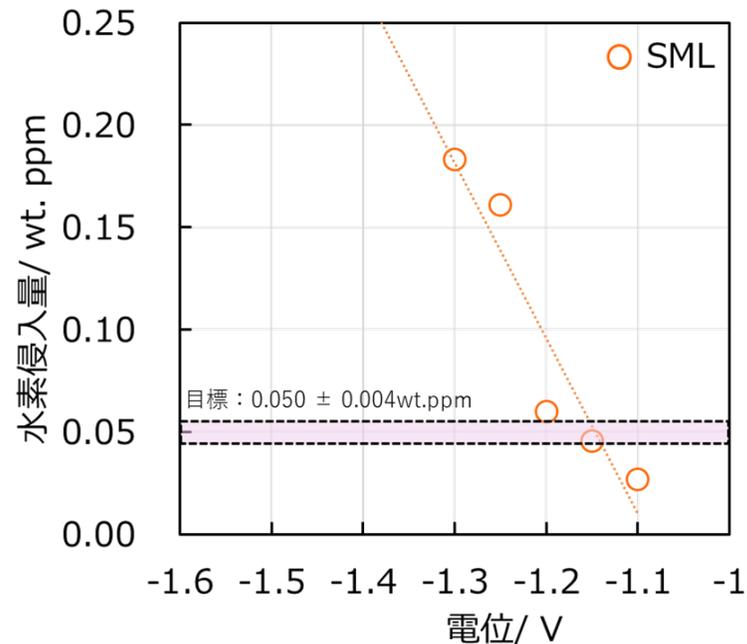
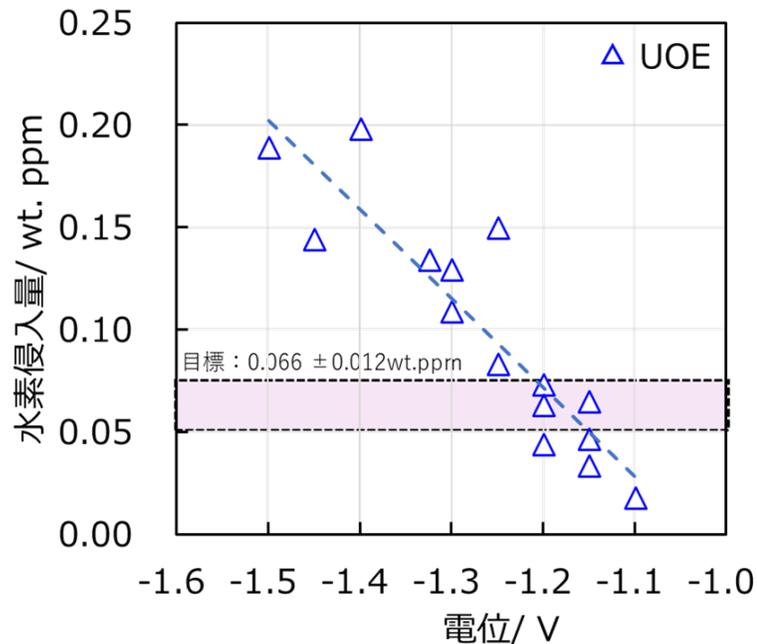
### 3. 研究進捗：④耐震設計のため水素中のデータ取得及び解析

#### □ 水素侵入量に及ぼす陰極チャージ条件調査



- 陰極チャージ条件  
溶液: 1N-NaOH+3g/L NH<sub>4</sub>SCN  
電位: -1.50~-1.15V vs. SSE  
水素時間: 72hr以上  
温度: 室温
- 目標水素量  
UOE: 0.066 wt.ppm  
SML: 0.050 wt.ppm

#### □ 水素侵入量と陰極チャージ電位の関係

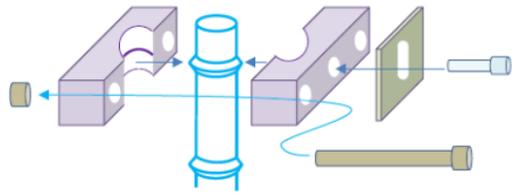


10MPa相当となる陰極チャージ電位  
①UOE(BM) : -1.20V vs SSE  
②SML(BM) : -1.15~-1.20V vs SSE (データ拡充中)

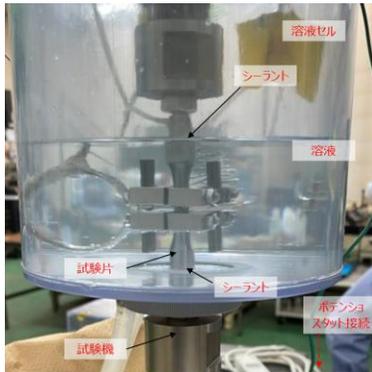
### 3. 研究進捗：④耐震設計のため水素中のデータ取得及び解析

#### □ 陰極チャージ下低サイクル疲労試験

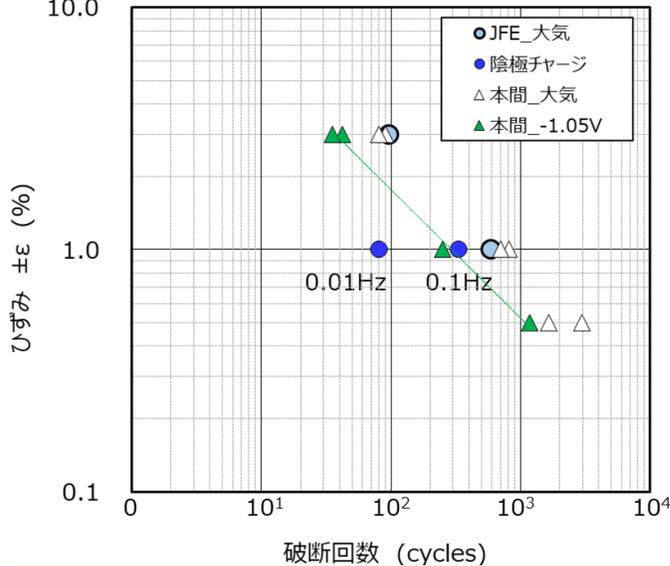
- つば付き試験片によるトライアル



ゲージ取り付け部詳細



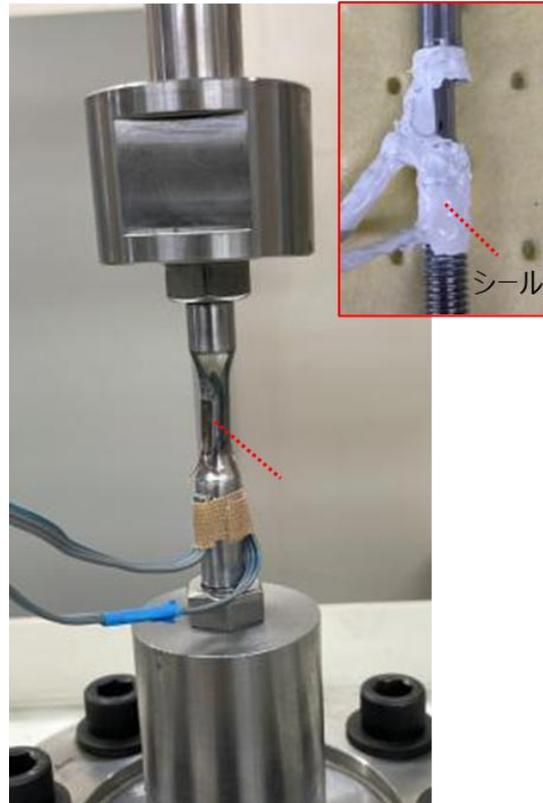
※50%荷重低下 or き裂発生で破断判定



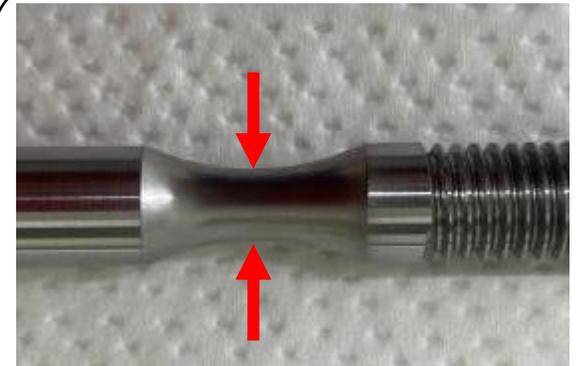
ツバ隅に円周状に  
き裂が発生

#### • 改良試験方法

ひずみゲージ方式



径変位計方式



<https://www.intesco.co.jp/products/1045/>



径変位計のイメージ

水素による寿命低下は確認できたものの、**所定のひずみ量に制御できていない** (ツバ底にき裂が早期に発生し開口量が増大)

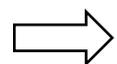


改良試験方法で評価実施中

### 3. 研究進捗：⑤水素量、負荷速度依存性評価及び水素拡散破壊機構解明

#### □ 試験項目

- ・陰極チャージ延性破壊評価（延性破壊限界の応力多軸度依存特性）
- ・陰極チャージ破壊靱性試験（延性き裂進展抵抗：J-R曲線）

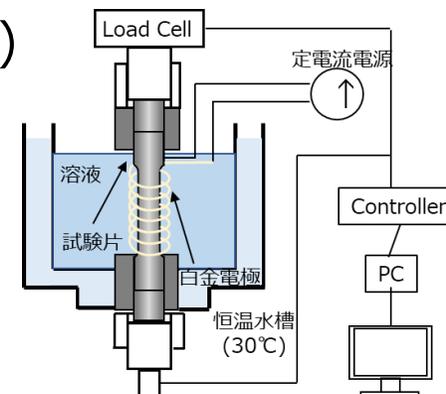


き裂発生・伝播に及ぼす水素量と負荷速度の影響明確化

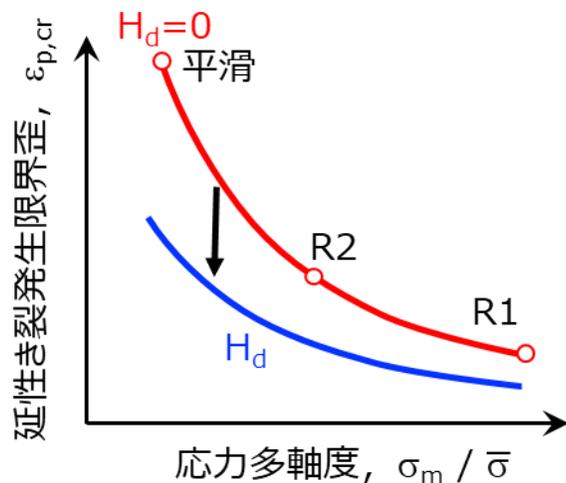
※鋼中水素量定量測定のために低温TDS装置導入

#### □ 水素損傷数理モデル提案に基づく水素拡散破壊挙動のメカニズム解明

陰極チャージ引張試験の模式図、設備外観



- ・延性破壊限界の応力多軸度依存性



#### 延性損傷数理モデル（既提案）\*1

$$\Phi = \left(\frac{\bar{\Sigma}}{\bar{\sigma}}\right)^2 + a_1 L(|\mu|) D^* \exp\left(a_2 \frac{\Sigma_m}{\bar{\sigma}}\right) - 1 = 0$$

$$L(|\mu|) = 1 - a_3 (1 - |\mu|)^{a_4}$$

#### 水素損傷数理モデル

靱性予測解析

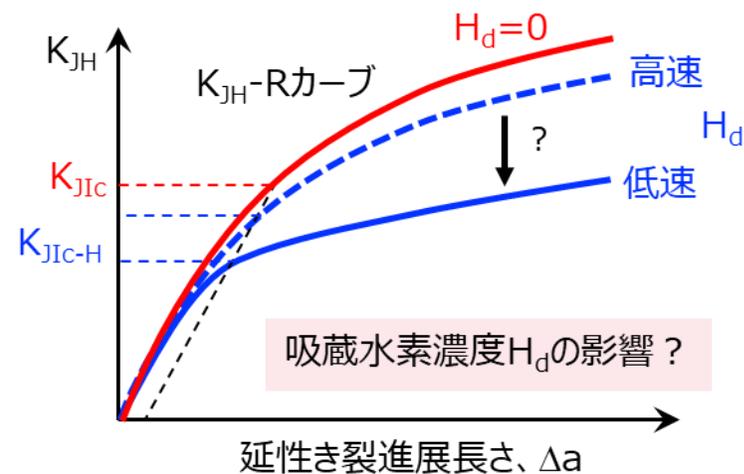
#### 水素拡散モデル（既提案）

化学ポテンシャルの勾配駆動の拡散モデル

$$\text{拡散流速} : J = -D_0 \frac{1}{\eta(\epsilon_p)} \left[ \nabla a + \frac{V_H}{RT} a \nabla \sigma_H \right]$$

「静水圧応力」と「塑性ひずみ」に依存

- ・破壊靱性試験の予測



### 3. 研究進捗：⑥国際連携

連携先	プロジェクト名	内容
SINTEF/NTNU (ノルウェー)	HyLINE II	<ul style="list-style-type: none"><li>HyLINEはノルウェーの国家プロジェクト。九州大学も参画しパイプライン材料の水素脆化特性を基礎的実験と解析から解明することを目的としている。</li><li>昨年9月に来日したHyLINEメンバーと面会し、本NEDO事業の内容を紹介、両プロジェクト間の連携に関して賛同を得た。</li><li>2026年5-6月にトロンハイムで開催される国際H2Science会議の期間での共同ワークショップが提案されている。</li><li>今後、両プロジェクト間で共有可能な内容を示す覚書(MoU)の締結に関して検討を進める。</li></ul>
Sandia国立研究所 (米国)	HyBlend	<ul style="list-style-type: none"><li>HyBlendは米国エネルギー省のプロジェクトであり、Sandia国立研究所を中心に、パイプライン材料の水素中特性を幅広く調査している。</li><li>昨年8月のASME PVP2024でSandia国立研究所のDr. San Marchiに相談。In-kind Requestを提出しHyBlendに参画することを検討中。現在HyBlendからの返答待ちで、今年7月のPVP2025で状況を確認。</li></ul>
European Pipeline Research Group (EPRG)	国際ラウンドロビン試験	<ul style="list-style-type: none"><li>EPRGが提案した水素ガス中破壊靱性試験のガイドラインをラウンドロビン試験を通じて検証することが目的で、世界中の29機関が参加</li><li>試験片および練習用材料が、7月を目途に各機関に順次発送される予定で、結果報告の期限は材料受領から3か月後</li></ul>

## 4. 今後の見通しについて

### □ 事業スケジュールと見通し

研究項目	2024年度	2025年度	2026年度	2027年度
パイプ製造、円周溶接及び材料基礎特性評価	UOE, SMLS鋼管製造・円周溶接・評価		ERW鋼管製造・円周溶接・評価	
破壊安全性評価のための水素中データ取得及び解析	UOE, SMLSの水素中破壊特性データ取得		ERWの水素中破壊特性データ取得	
耐震設計のため水素中のデータ取得・解析	UOE, SMLSの水素中耐震性データ取得		ERWの水素中耐震性データ取得	
水素量、負荷速度依存性評価及び水素拡散破壊機構解明		水素量、負荷速度依存性解明		
国際連携				
パイプライン材料水素適合性検討会	▼ 第1回	▼ 第2回	▼ 第3回	▼ ▼

国内水素パイプライン実現のために活用

- 2026年度初めにAPI L450 (UOE, SMLS)の水素中データを取得
- 2027年度までにAPI L450(ERW)の水素中データ取得



検討会を経てDB化し、必要とする水素パイプライン事業者が利用可能に

### □ 今後の課題

- 高圧ガス導管液状化耐震設計指針に対応した耐震安全性の確保と評価内容の議論
- 直流電位差法による水素中破壊靱性試験（国際的ガイドラインへの対応）
- 本事業成果（取得データ）の技術基準・ガイドラインへの反映方法