

NEDOエネルギー・地球環境分野成果報告会2026

プログラムNo.602-3-11

契約件名 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

発表：2026年07月23日

国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構

発表者名 JFEスチール（株）岡野拓史

団体名 JH2A（一財）、九州大学（国）、JFEスチール（株）、日本製鉄（株） 再委託）大阪大学（国）、東京大学（国）

問い合わせ先 水素バリューチェーン推進協議会 和田孝一 E-mail: 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（UOE鋼管、SMLS鋼管、ERW鋼管）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

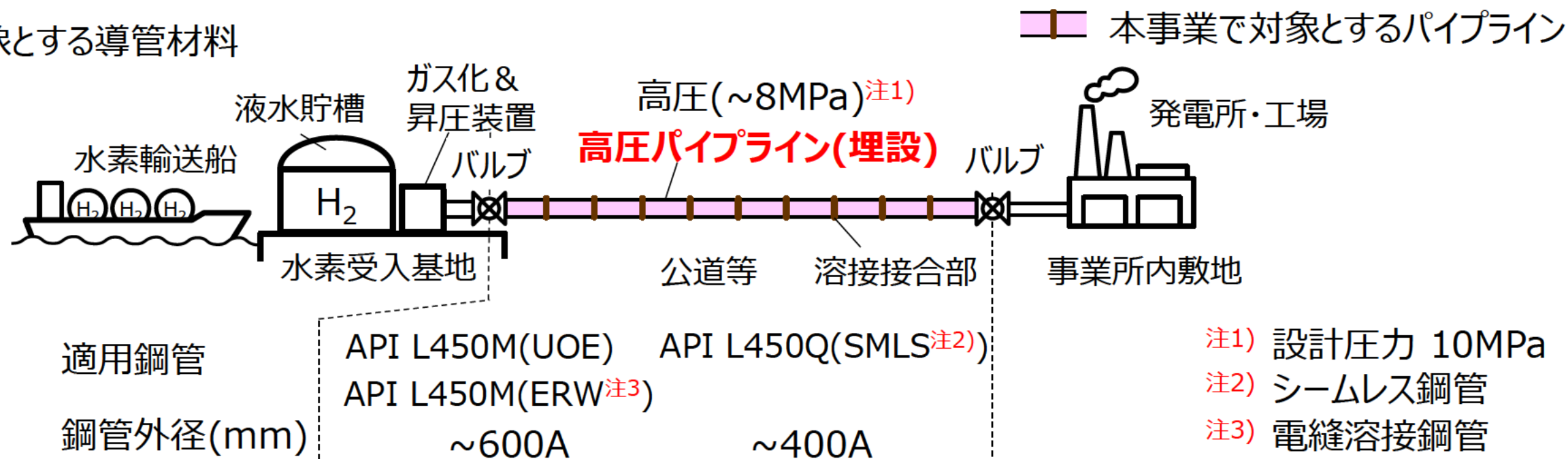
- ・高圧水素引張特性(3鋼種) : 10MPaでは鋼管種類によらず、引張強度・絞りの低下は認められなかった。
- ・高圧水素き裂進展特性(3鋼種) : 水素中で進展は加速するが、既存知見と同程度で鋼種差は小さい。
- ・高圧水素破壊靱性(UOE) : 水素中で低下するものの、海外規格基準を上回り十分な安全余裕を確認。
- ・破壊安全性評価(UOE) : 検査可能な欠陥寸法からパイプが破断に至る可能性は低く、寿命上問題なし。
- ・水素中耐震評価(UOE, SMLS) : 水素環境下でも想定地震回数を上回る破断寿命を確認。
- ・シミュレーション : 評価手法・解析基盤を構築し、設計・基準化への適用基盤を整備。

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。

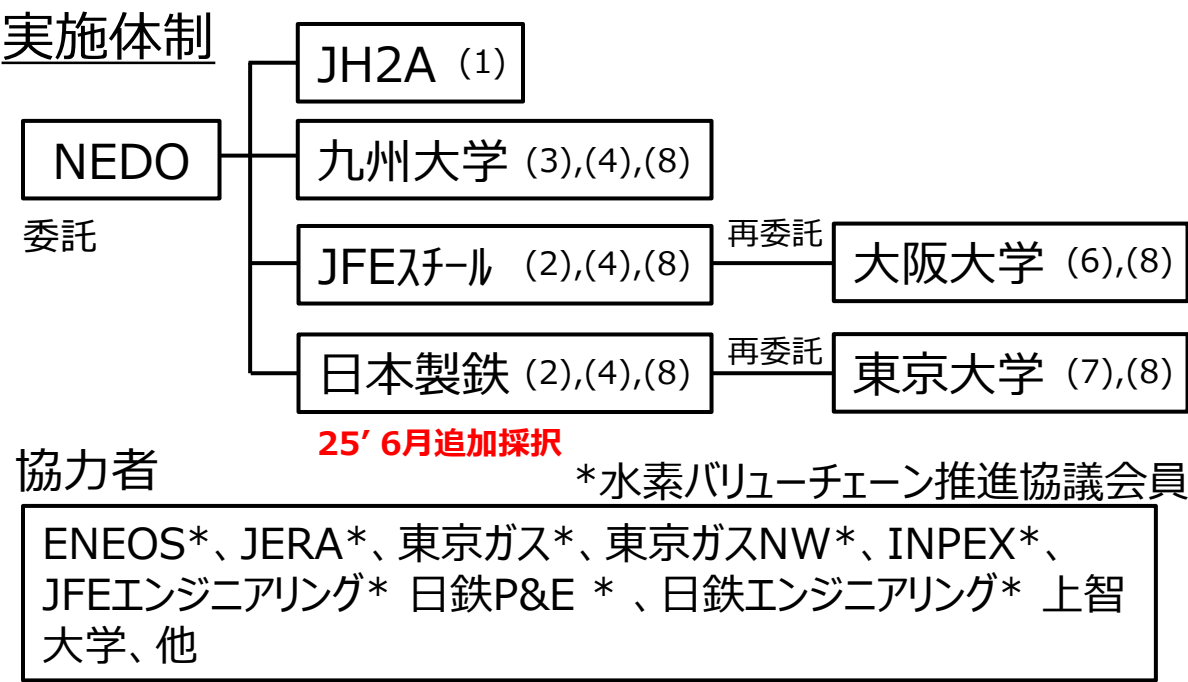
□ 対象とする導管材料



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



研究項目

項目	
(1)	企画立案、関連情報収集、プロジェクト管理
(2)	パイプ製造、円周溶接及び材料基礎特性評価
(3)	破壊安全性評価のための水素中データ取得及びデータベース化
(4)	破壊安全性評価手法による導管材料の水素適合性評価
(5)	耐震設計のため水素中のデータ取得及び解析
(6)	水素量、負荷速度依存性評価及び水素拡散破壊機構解明
(7)	水素PL耐震性評価のための数値シミュレーション手法開発
(8)	海外研究機関との国際連携

3. 研究進捗：（1）高圧水素用ラインパイプの必要性能

➤ 海外規格に準拠した評価項目

ASME B31.12 (Hydrogen Pipeline and Piping)

Option	設計係数*1	材料特性要求
A (仕様規定)	最大0.5	水素中材料特性要求無し
B (性能規定)	最大0.72	①水素中破壊靱性試験 ②水素中疲労き裂進展試験 ⇒ 破壊安全性評価

➤ 耐震設計での必要性能

高圧ガス導管耐震設計指針 (日本ガス協会)

地震動	変形モード	許容歪	要求性能
レベル1	軸変形 繰返し(N=50)	1%, 35t/D*2 (%)の小さい方	修理せずに 運転再開
レベル2	軸変形 繰返し(N=3~5)	3%	変形しても 漏洩なし

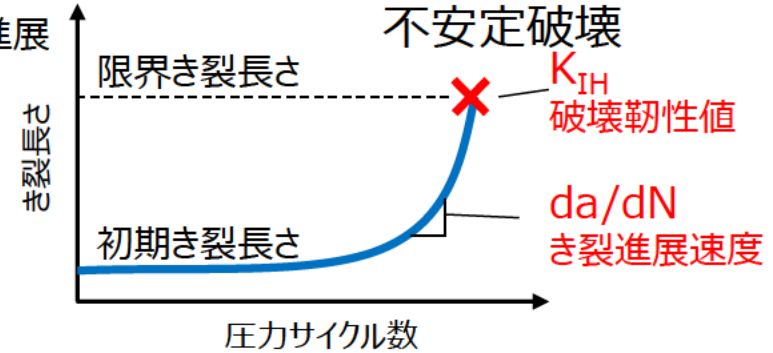
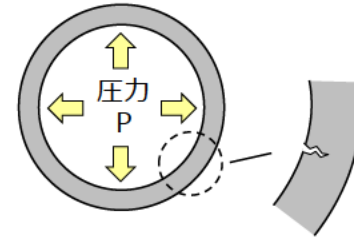
➡ 水素環境中での③低サイクル疲労特性、
④加工硬化特性(応力歪曲線)の評価が必要

*1 規格下限YSに対する(内圧により発生する)管周方向応力の割合

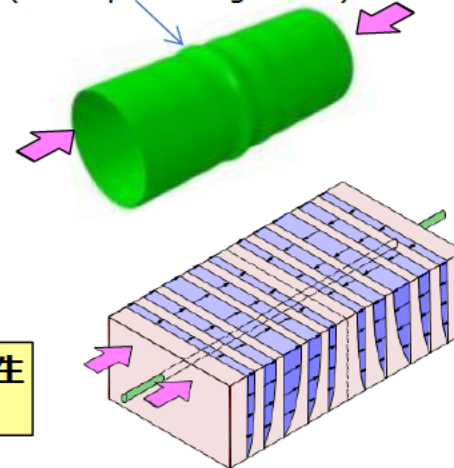
*2 加工硬化係数 $n=0.11$ とした場合の座屈開始歪

【ASME破壊安全性評価の模式図】

圧力変動による疲労き裂進展

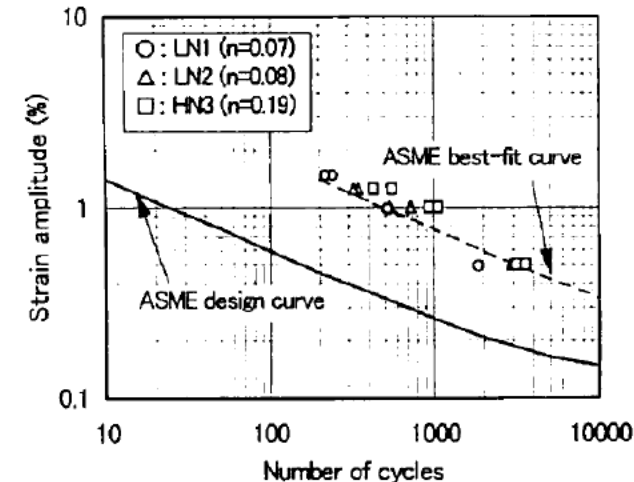


軸圧縮によるパイプの座屈
(Earthquake Eng. 2017)



座屈しない

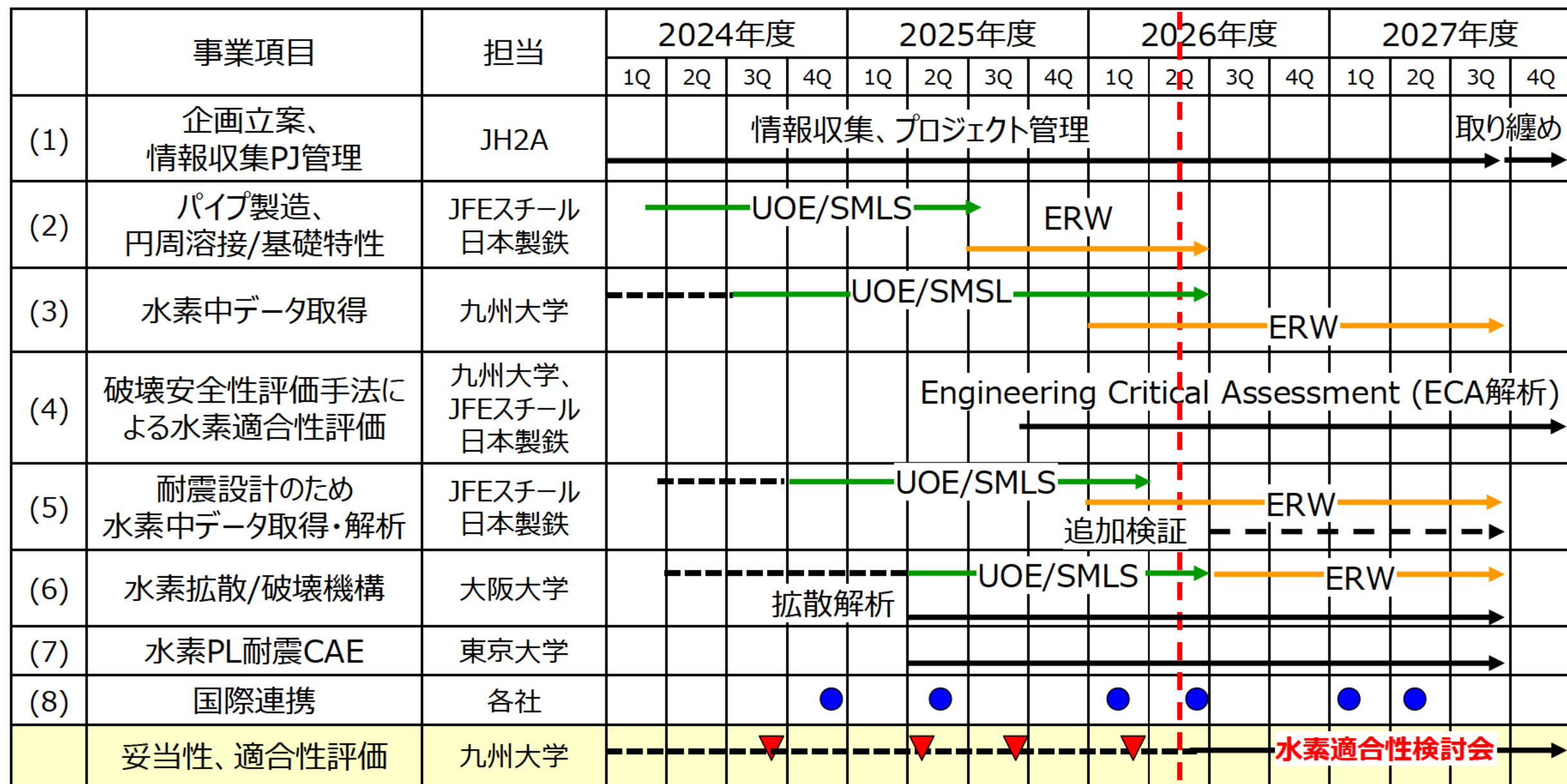
座屈部で割れ発生
しても貫通しない



地盤振動によるパイプラインの変形
(鈴木、溶接学会誌(2011))

低サイクル疲労試験結果の例
(NKK技報 No.167)

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/基礎特性

➤ 供試鋼管

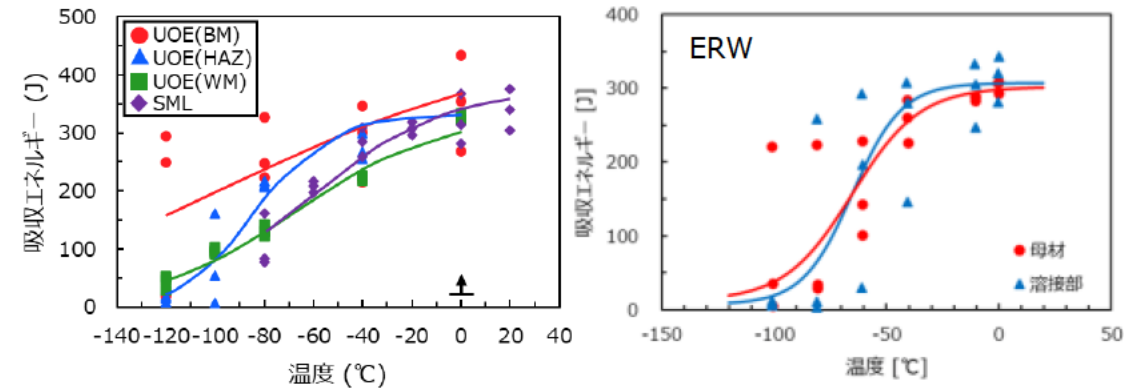
※UOE, ERW：周方向、SMLS：管軸方向

種類	グレード	外径 (mm)	管厚 (mm)	引張特性 API矩形・全厚 (Ave.)			
				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
ERW	API L450M	610	18.2	491	585	84	64

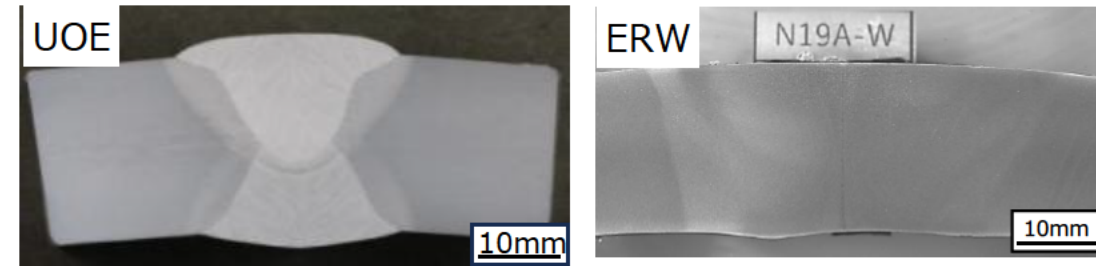
➤ ミクロ組織



➤ シャルピー衝撃特性

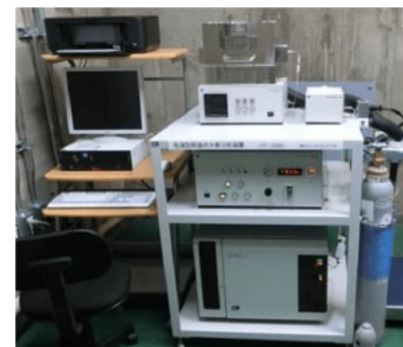
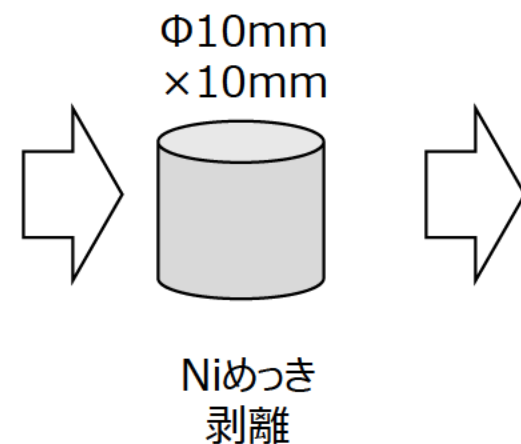
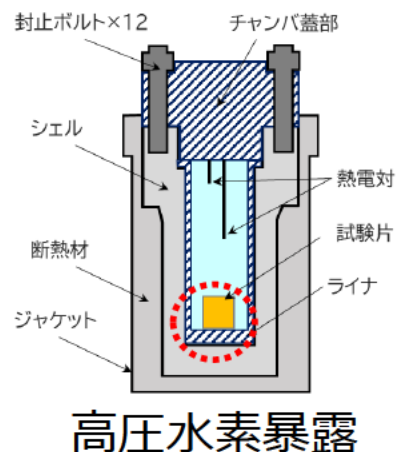
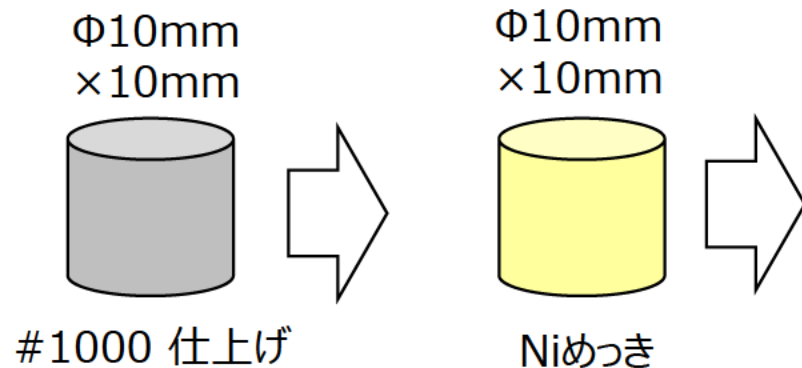


➤ シーム溶接部

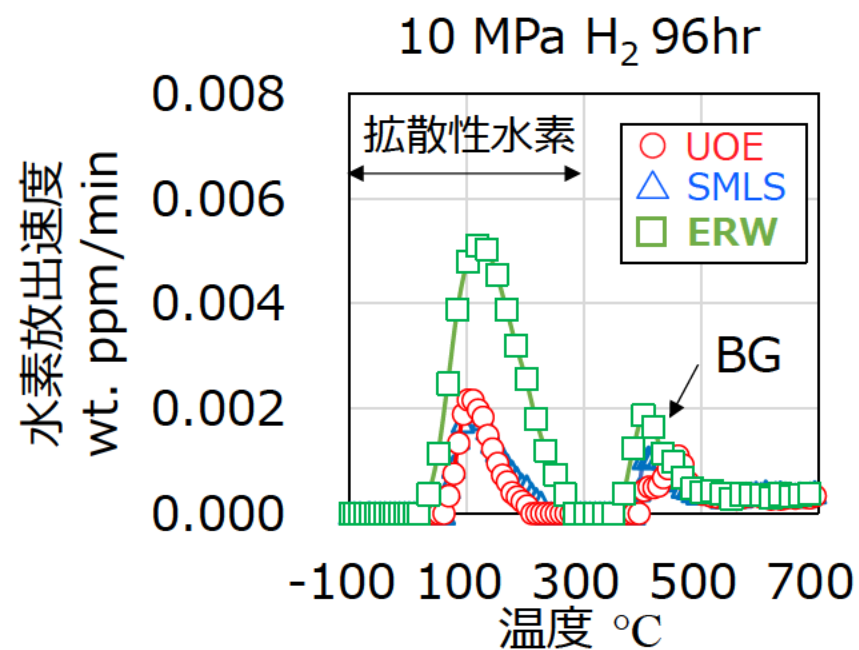


母材、シーム溶接部共に規格を満足する良好な特性

3. 研究進捗：（3）水素中データ取得（水素侵入量）



常温TDA or
低温TDA

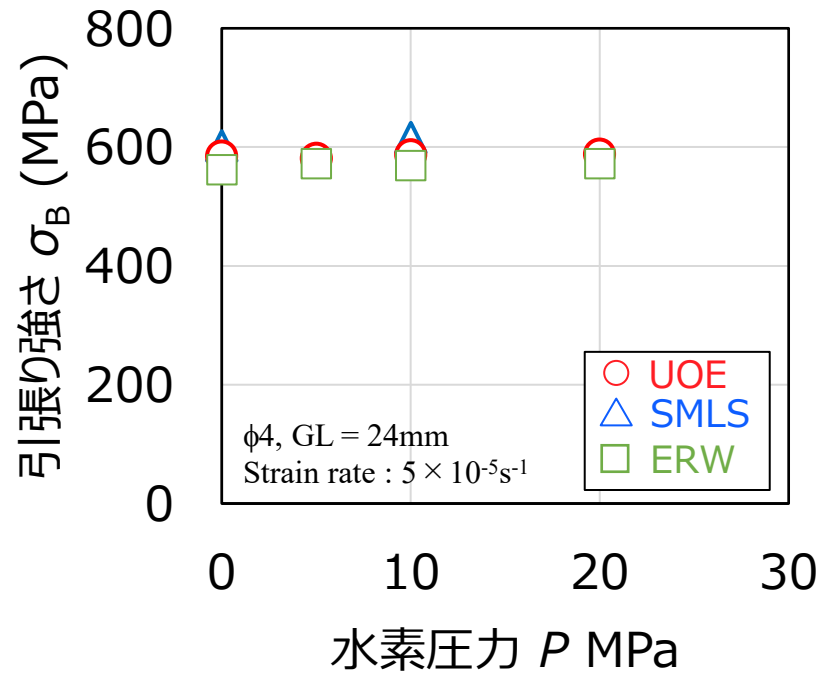


水素侵入量:UOEとSMLSは同等。EWRはやや多い。

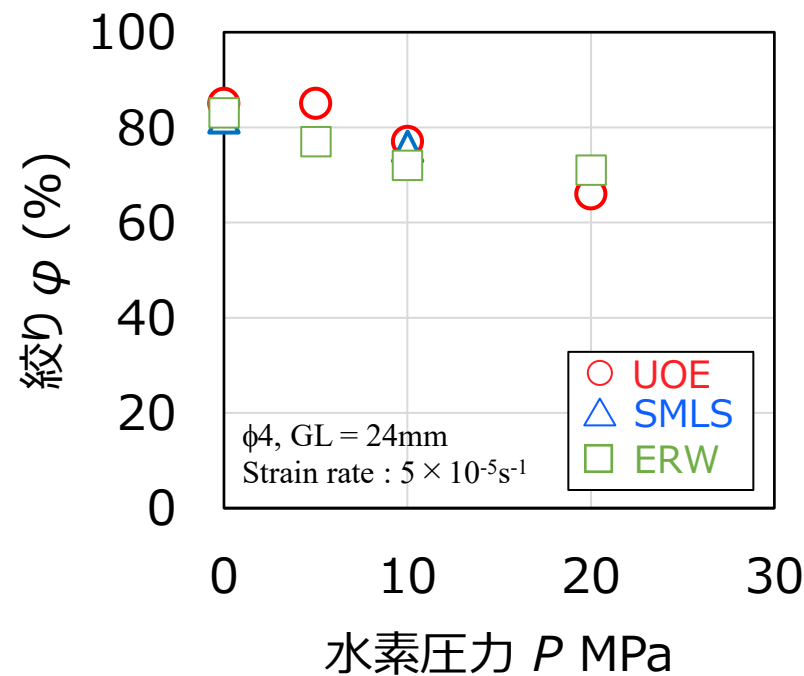
鋼種 (母材)	水素侵入量 の温度範囲	水素侵入量 (10MPa-H ₂)	水素固溶度 ppm/√MPa	水素拡散係数 m ² /s
UOE	300°C以下	≒ 0.066	0.0224	2.2×10 ⁻¹⁰
SMLS	300°C以下	≒ 0.050	0.0147	3.2×10 ⁻¹⁰
ERW	300°C以下	≒ 0.22	評価中	1.5×10 ⁻¹⁰

3. 研究進捗：（3）水素中データ取得（SSRT）

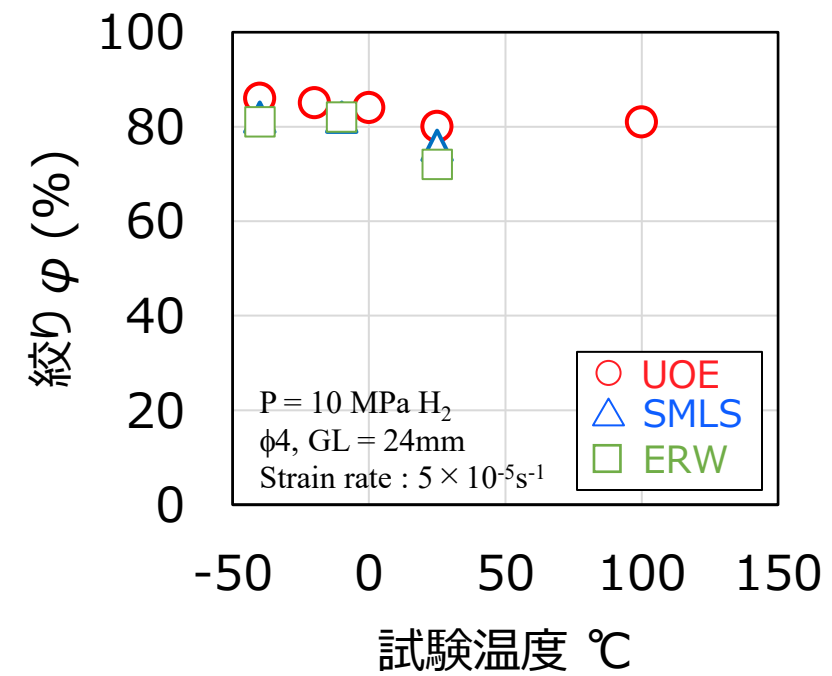
➤ 引張強さと水素圧力の関係



➤ 絞り値と水素圧力の関係



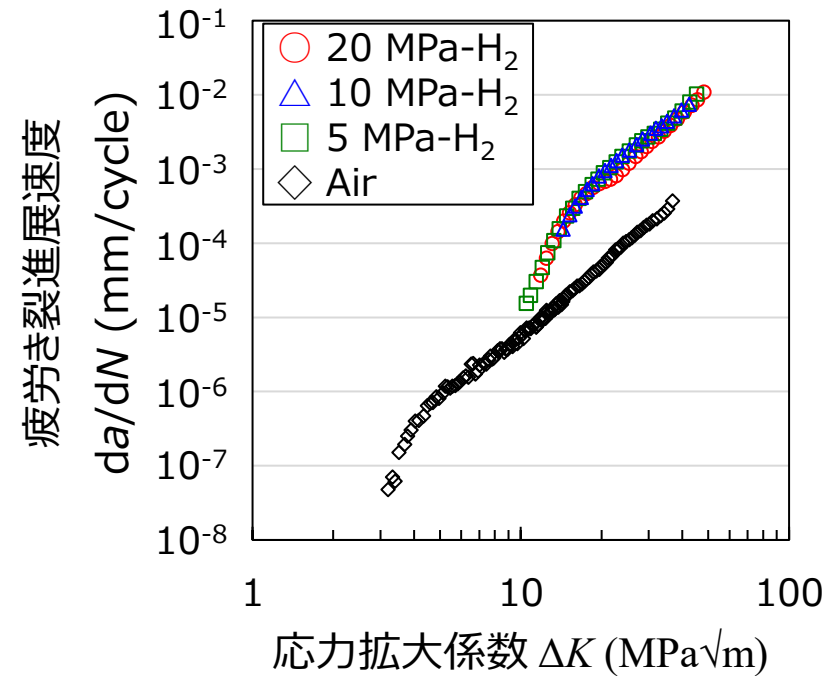
➤ 絞り値と温度の関係



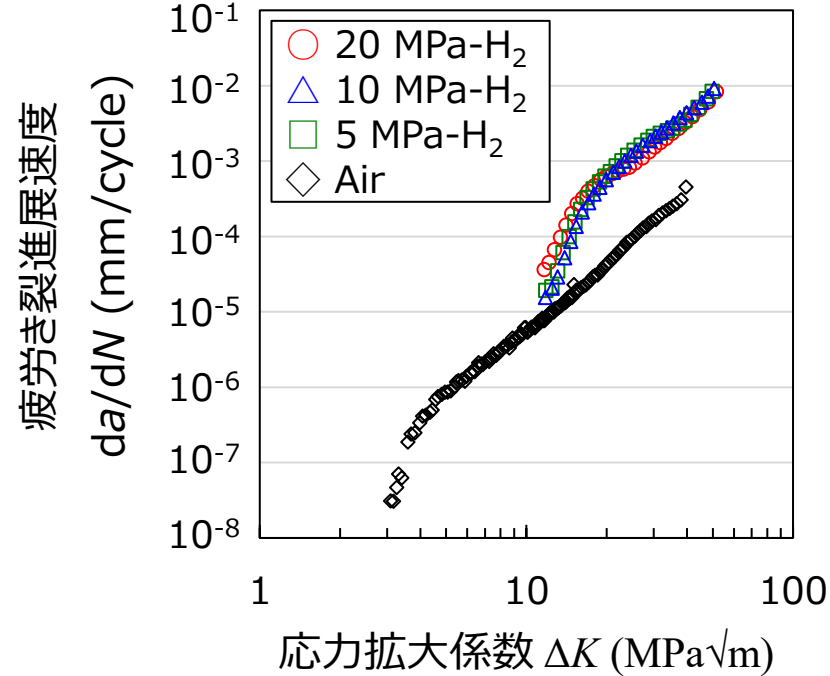
- 引張強さ：いずれの圧力でも水素による低下なし
 - 絞り：圧力依存性がやや生じるが、10 MPaまでは水素影響小さい
 - 温度：本試験範囲においては、温度依存性はほとんどなし
- ⇒ 高圧水素ガス中引張特性は3鋼種でほぼ同等。

3. 研究進捗：（3）水素中データ取得（疲労き裂進展試験）

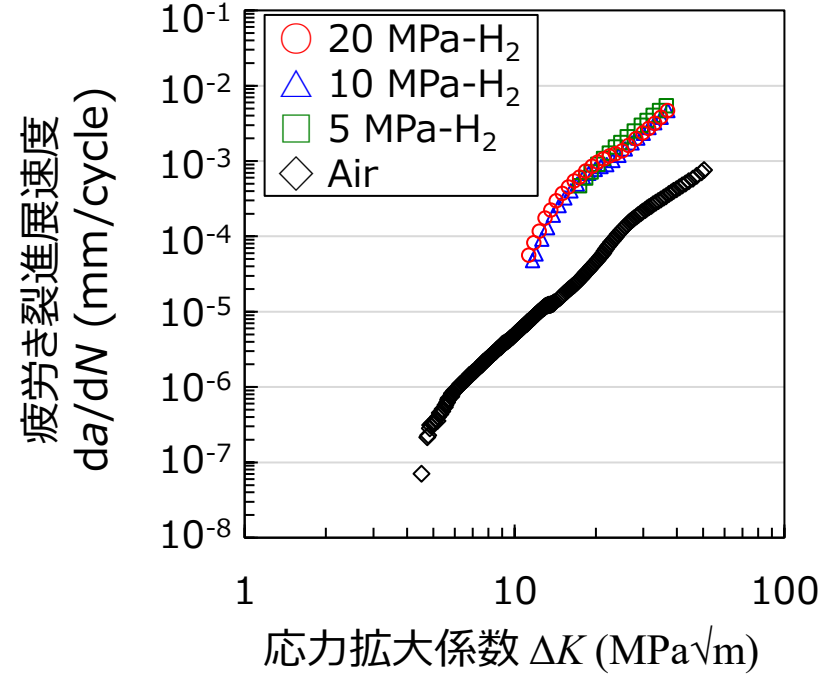
➤ UOE母材



➤ SMLS母材

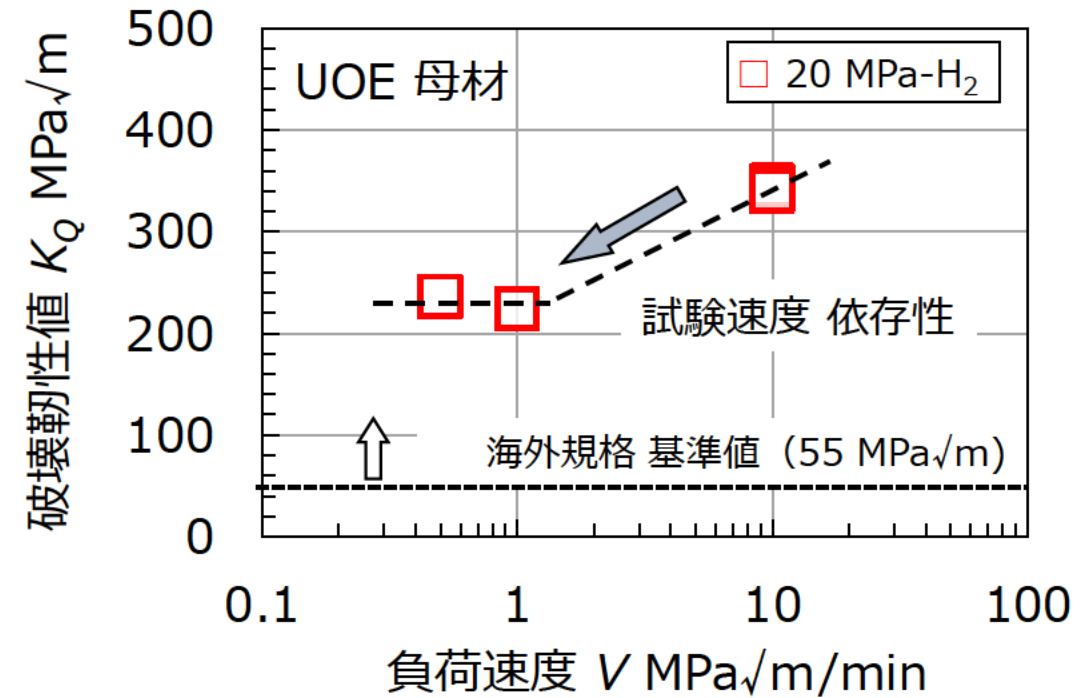
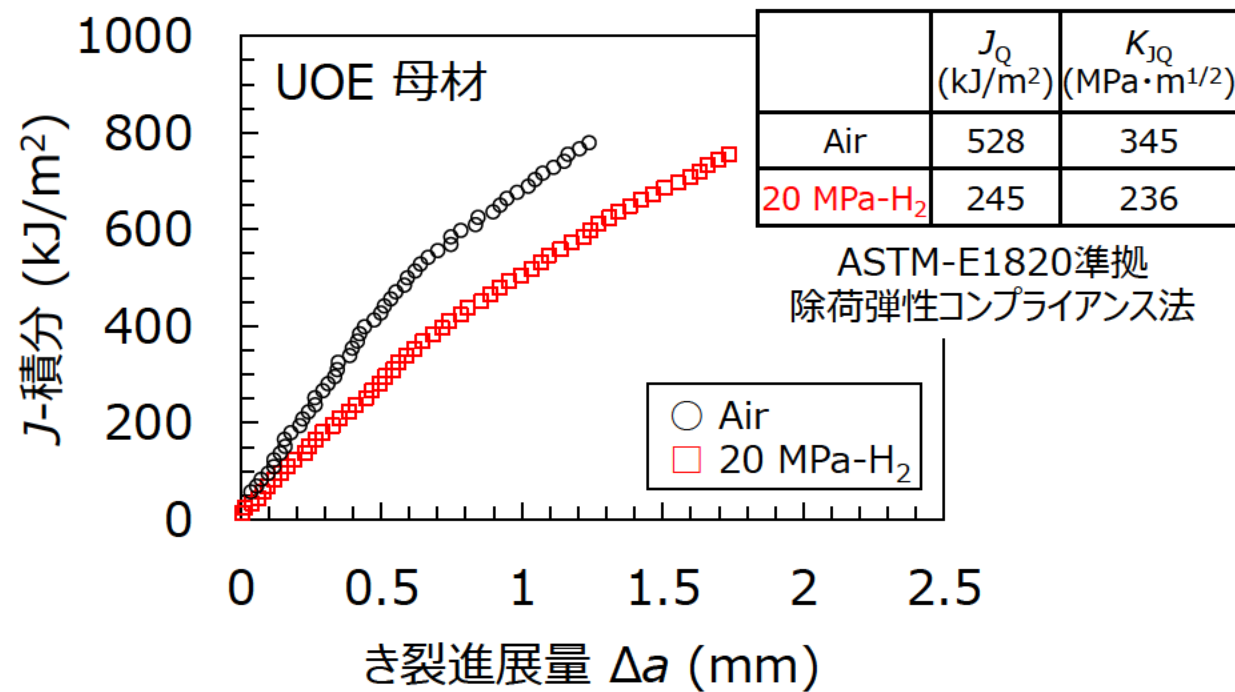


➤ ERW母材



- 水素下では高 ΔK 領域で、き裂が加速。本試験範囲においては、**水素圧依存性はほとんどなし**
- き裂の**加速率は従来知見通り**（大気に対して10～30倍程度）
⇒ 高圧水素ガス中疲労き裂進展特性は**3鋼種でほぼ同等**。

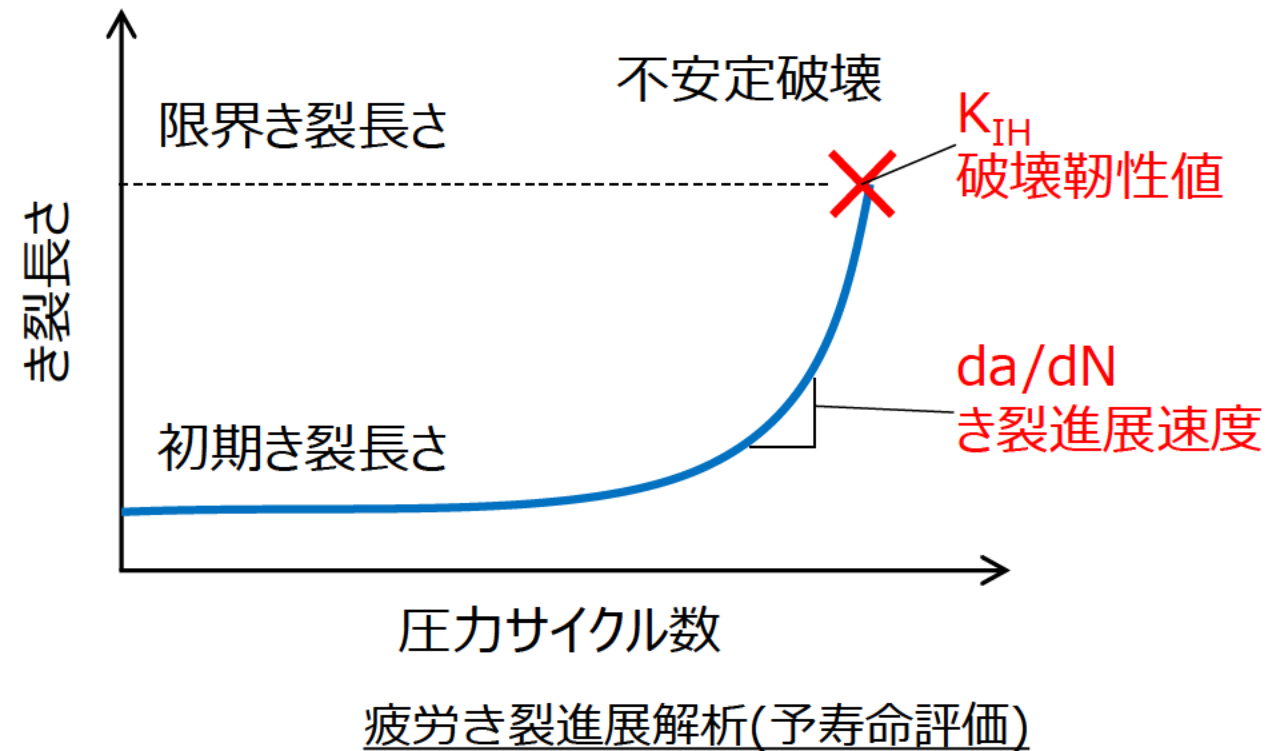
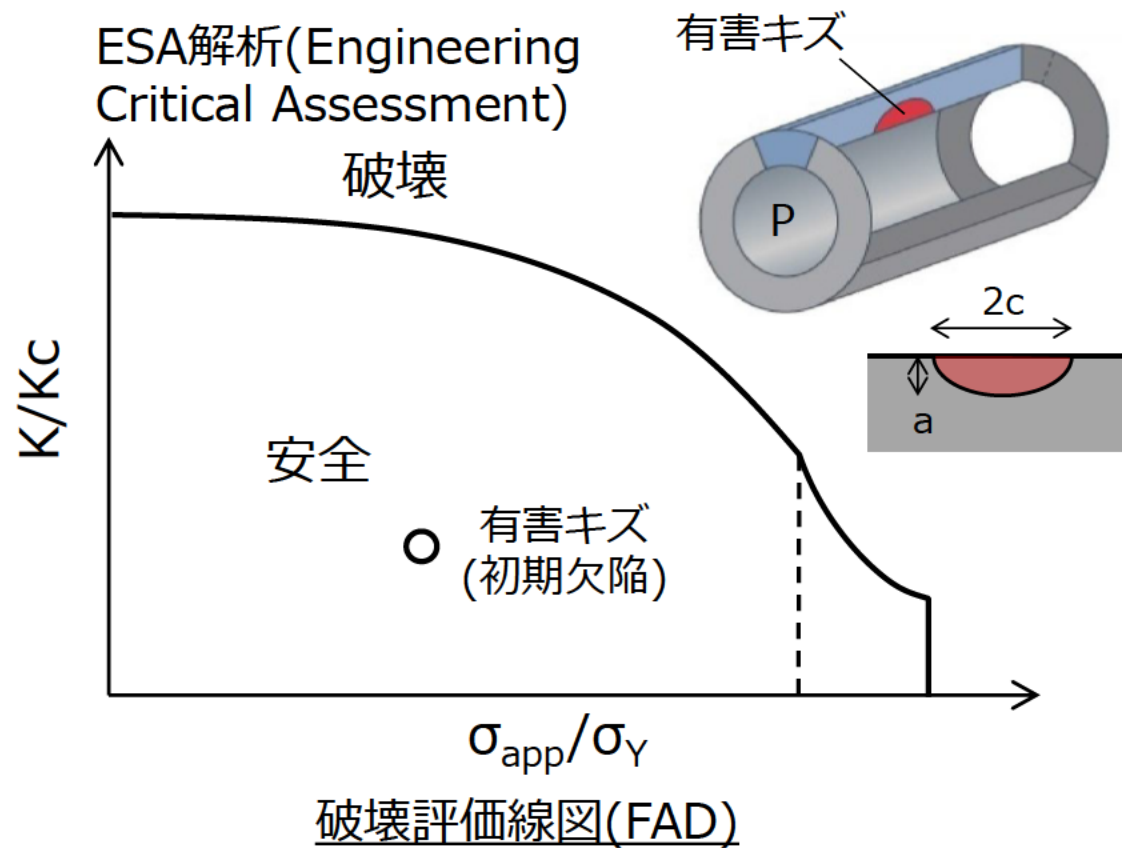
3. 研究進捗：（3）水素中データ取得（破壊靱性試験）



- 大気に対して、水素ガス環境では靱性が低下。
- 負荷速度依存性は存在するが、約1 $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 以下で一定となり、海外規格基準値を上回る。

3. 研究進捗：(4) 破壊安全性評価

- パイプラインの設計・施工段階において破壊に至る有害キズ(欠陥・き裂)寸法を把握する。
- パイプラインの設計あるいは供用中に予寿命(何年もつのか?)を把握する。



3. 研究進捗：（４）破壊安全性評価（計算条件）

➤ 鋼管サイズ・材料特性

Input parameters	X65UOE Pipe		
	Case①	Case②	Case③
OD (mm)	609.6	609.6	609.6
WT(mm)	21.7	21.7	21.7
YS (MPa)	450	555	521
TS (MPa)	530	620	588
YR (-)	0.85	0.90	0.89
P (MPa)	10	10	10
σ_{app} (MPa)	140.5	140.5	140.5
σ_{app}/YS (-)	0.31	0.25	0.27
$K_c(J_{Q0.2})$ (MPa $m^{0.5}$)	235.5	235.5	235.5

Case①: SMYS、SMTS

Case②: 大気中板状引張試験YS, TS

Case③: 10MPa水素中SSRT試験のYS, TS

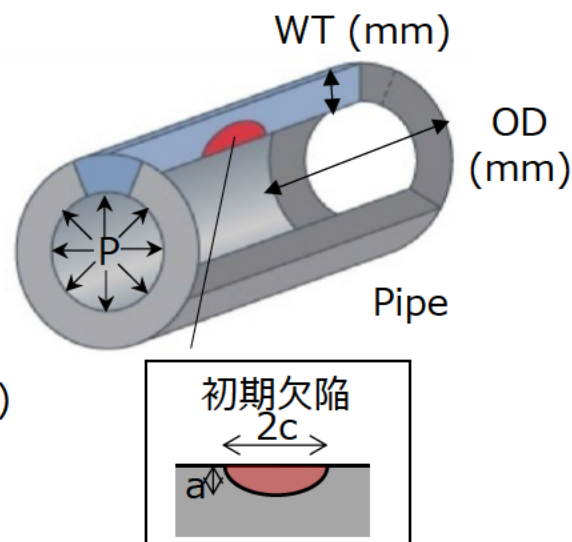
*1 $a=3\text{mm}$: UTで検出可能なサイズに対して安全側設定

*2 板厚の20%の深さを想定、 $a/c=0.33$ と仮定(API 579)

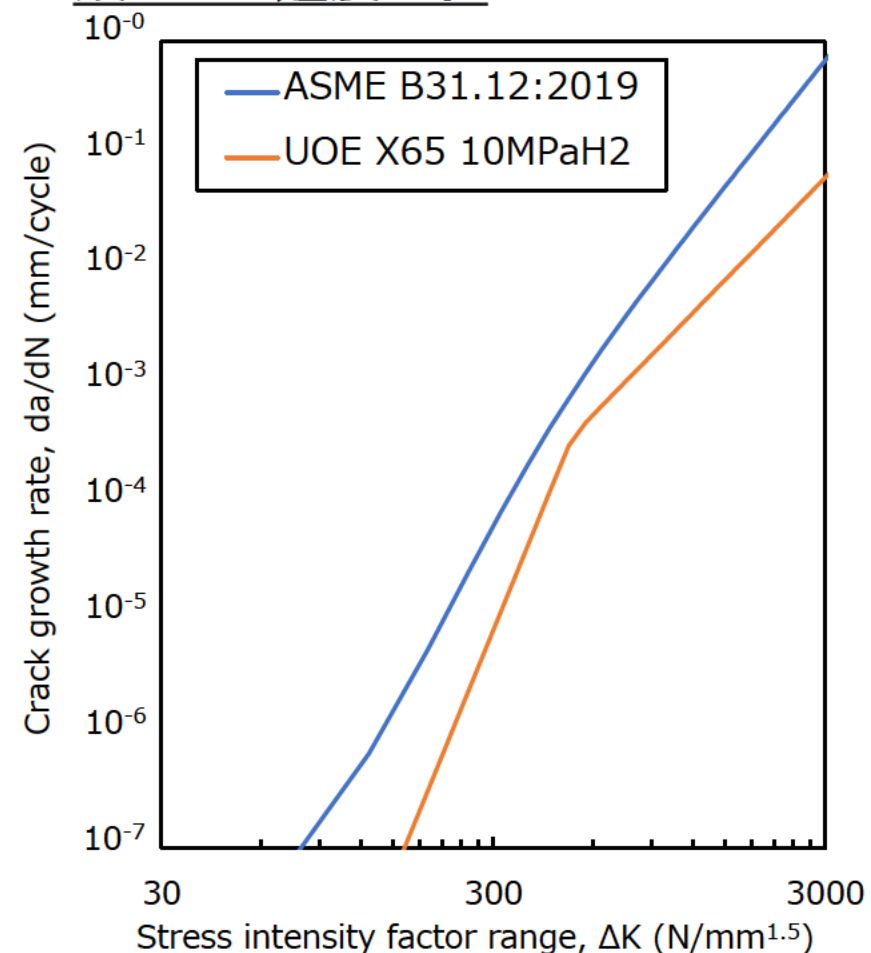
$a/c \approx 0.33$ と仮定 (API 579)

➤ 欠陥(き裂)サイズ/内圧変動

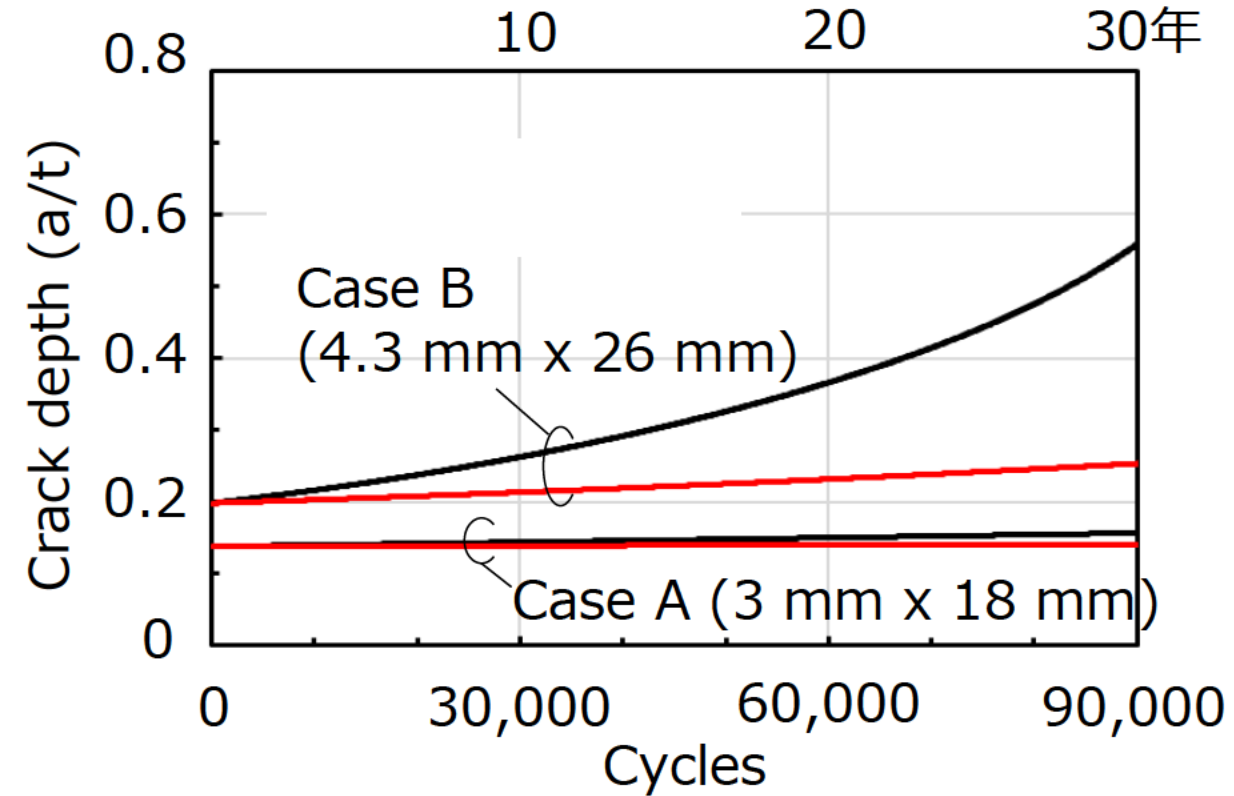
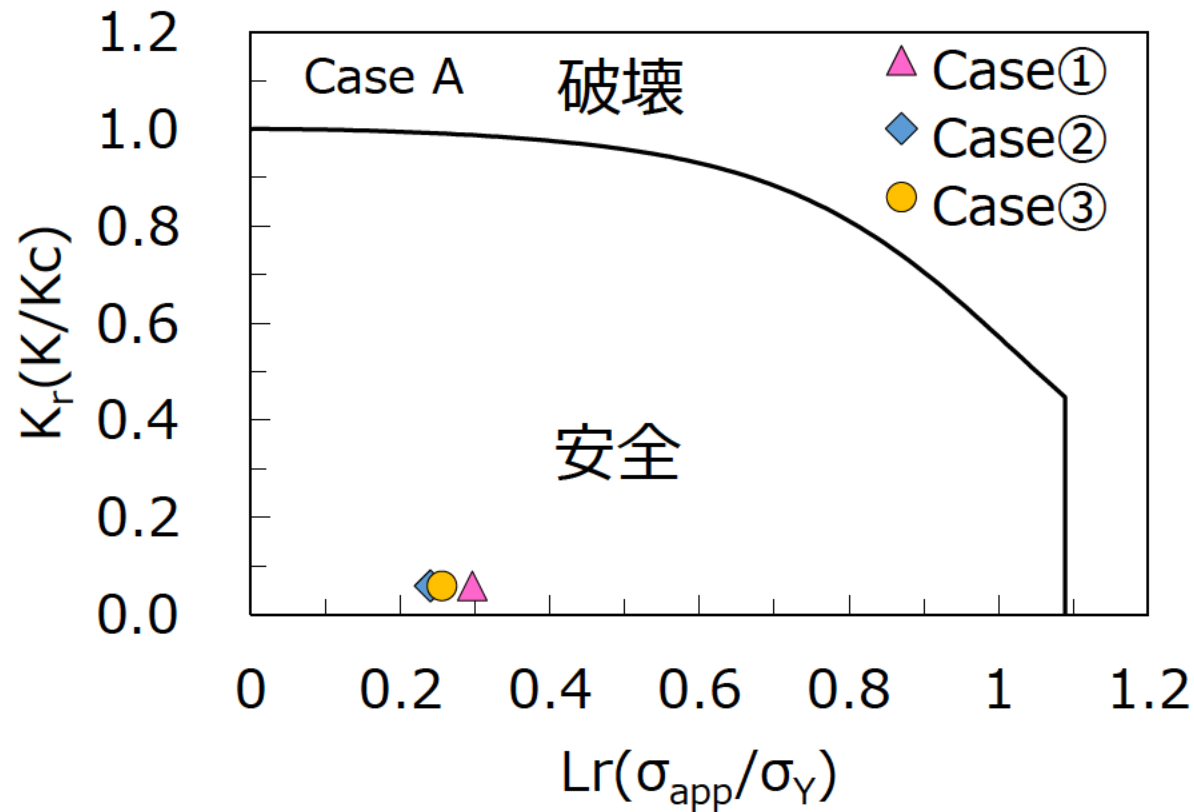
Input parameters	Case A* ¹	Case B* ²
a (mm)	3	4.3
$2c$ (mm)	18	26
R	0.5 (10-5MPa)	
Cycles/y	3000	



➤ 疲労き裂進展特性



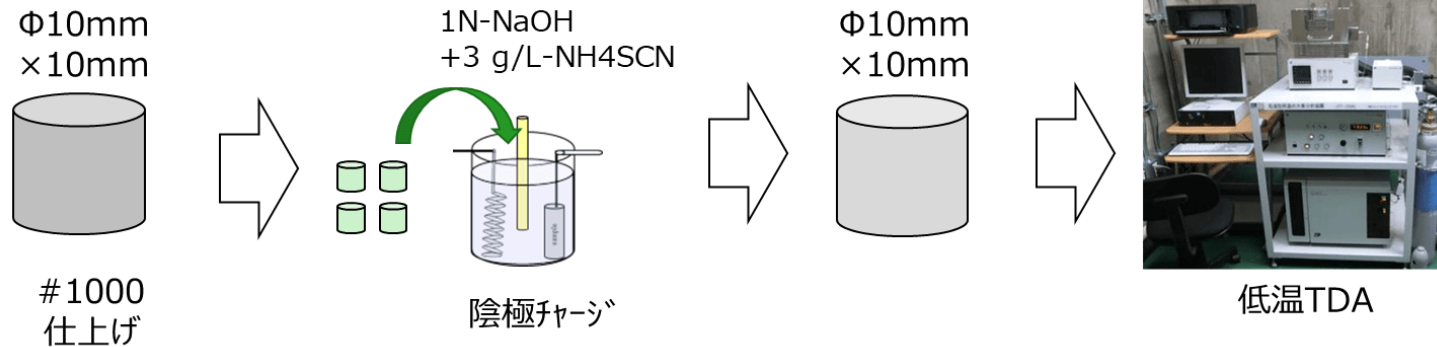
3. 研究進捗：（4）破壊安全性評価（計算結果）



- 非破壊検査で検知可能な欠陥寸法から破壊に至ることはない。
- Case Aの場合は50%の圧力変動を受けても、き裂はほとんど進展しない
- Case Bの場合は、ASME設計曲線では一定量のき裂進展が予想されるが、実測データを用いた場合はき裂進展は極めて小さい

3. 研究進捗：（5）耐震設計のため水素中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:

UOE, SMLS : 1N-NaOH+3g/L NH₄SCN

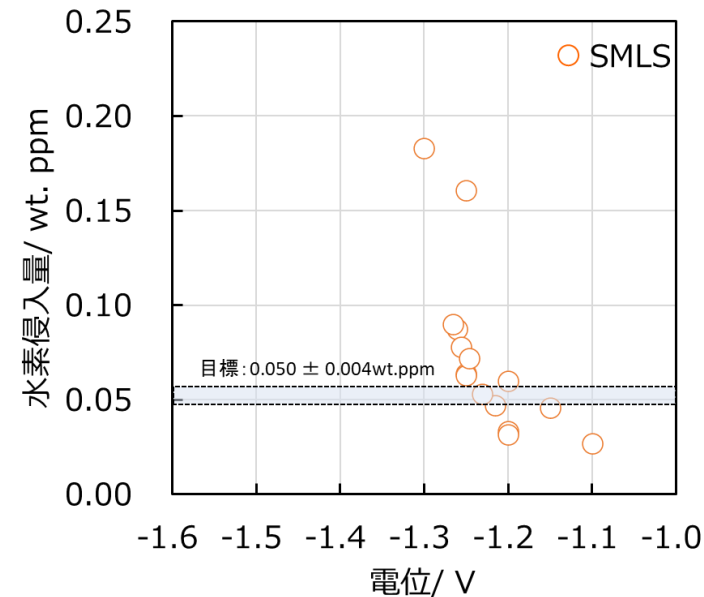
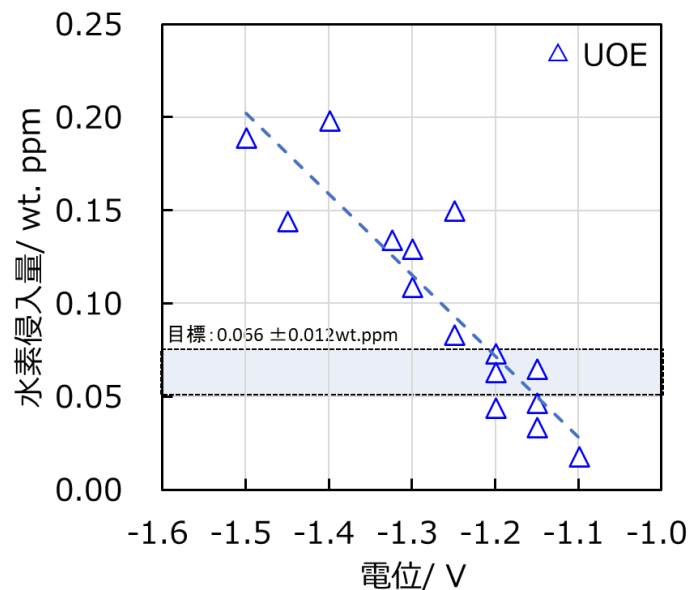
ERW : 3%NaCl+ 3g/L NH₄SCN

電位: -1.50~-1.15V vs. SSE

水素時間: 72hr以上

温度: 室温

➤ 水素侵入量と陰極チャージ電位の関係



• 目標水素量

UOE : 0.066 wt.ppm

SMLS : 0.050 wt.ppm

ERW : 0.022 wt. ppm

10 MPa相当となる陰極チャージ電位

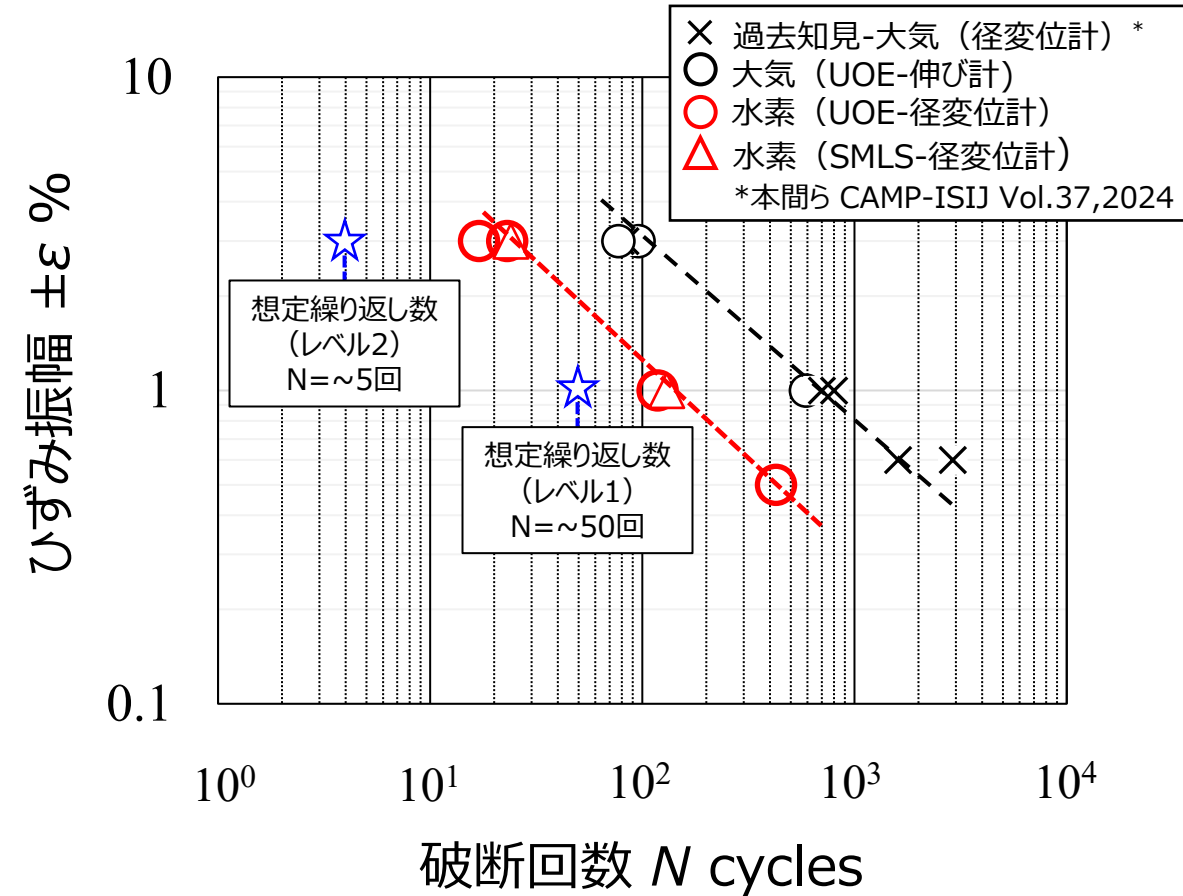
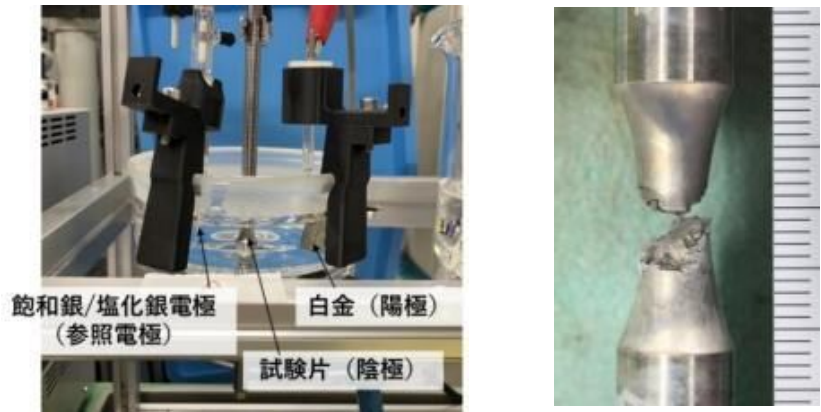
① UOE (BM) : **-1.20V vs SSE**

② SMLS (BM) : **-1.25V vs SSE**

③ ERW (BM) : 調査中

3 . 研究進捗：（5）耐震設計のため水素中データ取得および解析

	条件等
材料	X65 (UOE, SMLS), Φ6
陰極水素チャージ	・溶液：0.1N NaOH+3 g/L NH ₄ SCN ・電位：-1.2~1.25 V(vs. Ag/AgCl) ・プレチャージ時間：72h ⇒ 10 MPa水素ガス環境相当
ひずみ速度	0.1 %/s



想定地震回数を超えて破断。水素中破断寿命は想定地震回数の2倍以上。

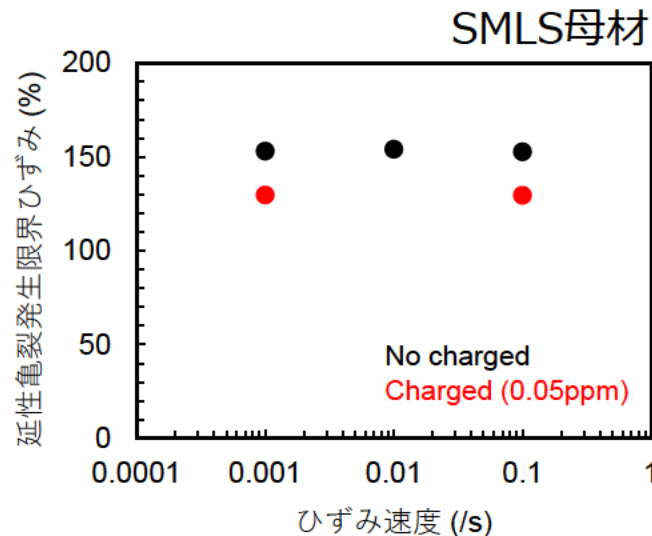
3. 研究進捗：(6) 水素拡散/破壊機構

➤ 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

➤ 機械的特性に及ぼす水素量，負荷速度の影響



延性亀裂発生限界ひずみ：

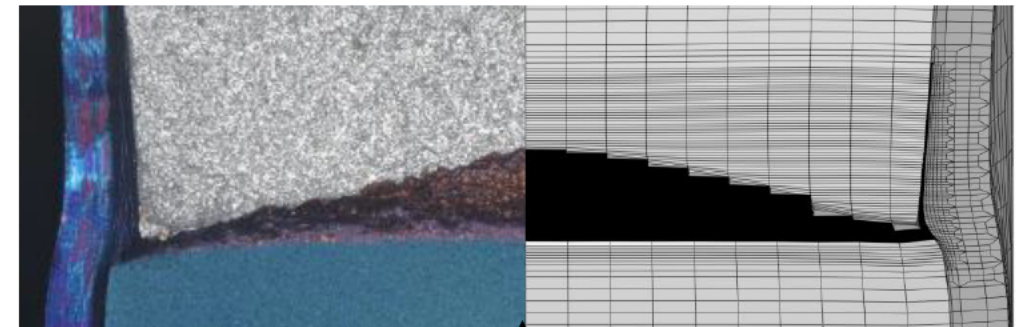
$$\ln \frac{A_0}{A}$$

A_0 ：初期面積, A ：破面の面積

➡ 水素による延性亀裂発生
限界ひずみの低下
(ひずみ速度 $1.0 \times 10^{-3}/s$)

➤ 延性損傷モデルを用いた 破壊靱性の予測

シームレス母材
(水素チャージ無し)

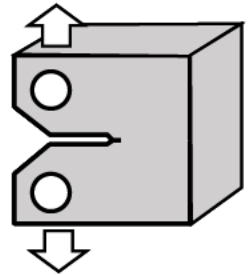


実験

板厚中央

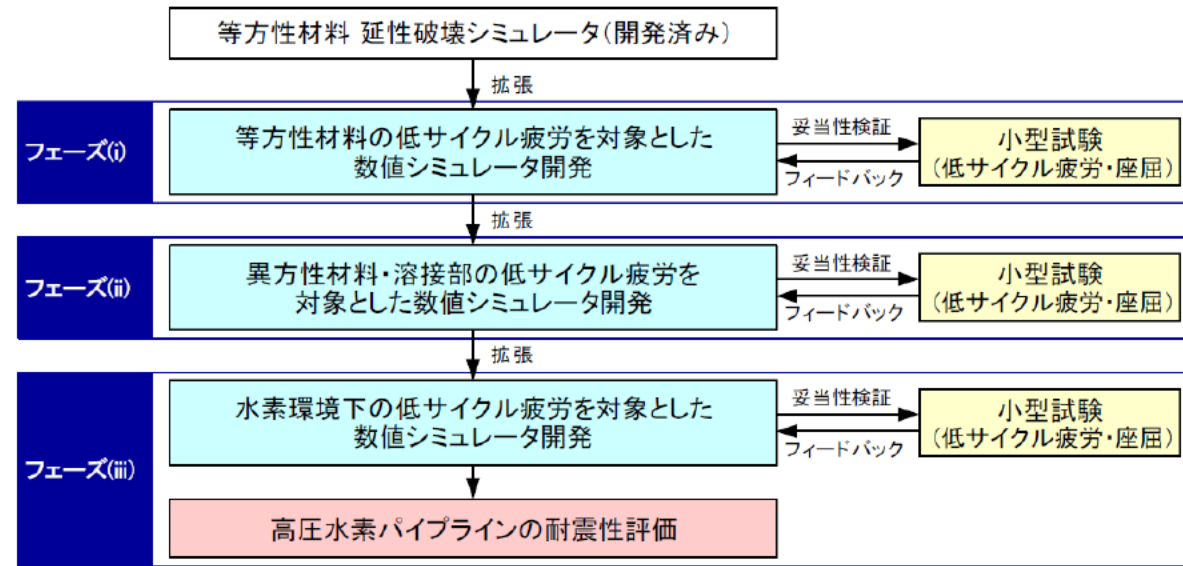
シミュレーション

水素損傷数理モデルを構築し、
水素拡散を伴った破壊挙動の機構解明を行う

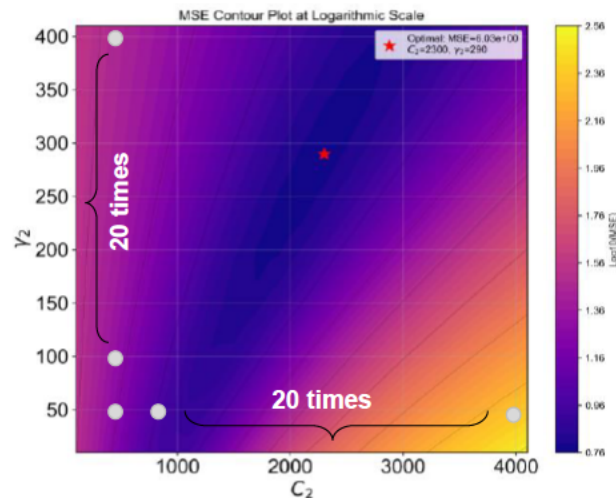


3. 研究進捗：（7）耐震性のための数値シミュレーション手法開発

□ シミュレーションの開発手順



□ 開発2：材料定数の同定手法の構築



勾配法および黄金分割法を組み合わせることで、繰返し硬化の材料定数の同定手法を最適化

工学的に十分な精度・ロバスト性を実現する数値シミュレーション手法を開発中

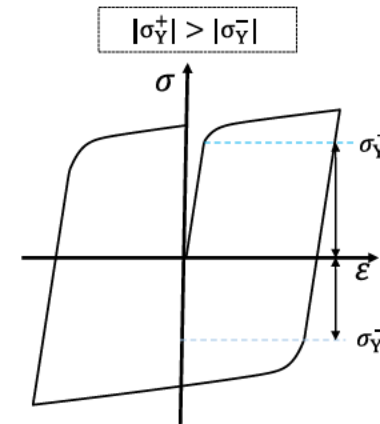
□ 開発1：低サイクル疲労現象のモデル化

・Chabocheモデル*¹および Cyclic void growth-shrinkageモデルを基礎モデルとして選定し、**AbaqusのUMATに実装することで標準化**。

*¹：Chaboche モデル

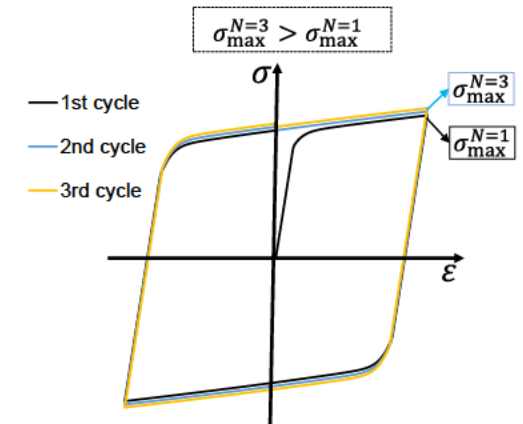
バウシinger効果

反転荷重時に降伏応力が低下する現象：



繰返し硬化

繰返して滞回ループの最大応力が上がる現象：



Chaboche モデル

3 . 研究進捗：（8）海外研究機関との国際連携

連携先	プロジェクト名	内容
SINTEF/NTNU （ノルウェー）	HyLINE II	• HyLINE IIはノルウェーの国家プロジェクト。パイプライン材料の水素脆化特性を基礎的実験および解析により解明することを目的としている。 • 2024年9月に関係者10名が来日し、打合せを実施。両プロジェクト間の連携について合意。 • 両国間で覚書（MoU）および秘密保持契約（NDA）を締結。 • 2026年6月5日にトロンハイムで合同ワークショップを開催。
Sandia国立研究所 （米国）	HyBlend	• 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。 • オーステナイト系ステンレス鋼の水素中特性に関する取組や、国際規格策定における連携の実績あり。 • 米国国内の状況を踏まえつつ、パイプライン材料に関する今後の連携拡大を模索。
European Pipeline Research Group (EPRG)	国際ラウンドロビン試験	• 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を目的とし、世界各国29機関が参加。 • 2026年1月に試験片を受領。今後、順次試験を実施し、破壊靱性の物理的意味の解釈や試験方法の確立に関する議論を実施。

今後の見通し

➤ 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	
破壊安全性評価による水素適合性評価			Engineering Critical Assessment (ECA解析)	
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		モデル作製	水素量、負荷速度依存性解明	
水素PL耐震CAE			モデル作製	水素中評価
国際連携	-----			
PL材料水素適合性検討会	第1回	第2回	第3回	第4回



国内水素PLの
実現のために活用

➤ 今後の課題

検討会を経てDB化し、必要とする水素PL事業者が利用可能に

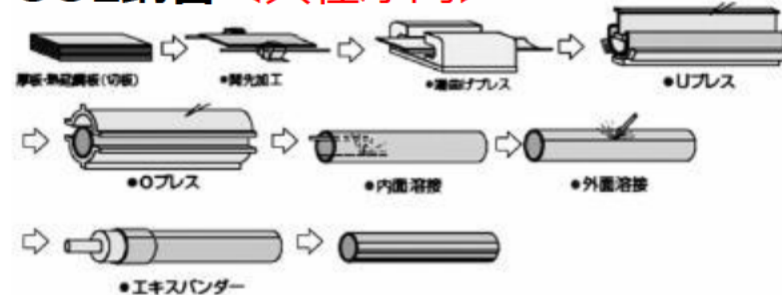
- 溶接部（シーム/円周溶接）の水素ガス中材料特性評価
- 高圧ガス導管**液状化耐震設計指針**に対応した耐震安全性の確保と評価内容の議論 ⇒ **26年度開始**
- 本事業成果（取得データ）の**技術基準・ガイドラインへの反映方法** ⇒ JH2A:**PL材料安全基準体系検討タスクフォース**

補足資料

国内の高圧ガスパイプラインと導管材料の種類

□ 導管材料の種類と用途

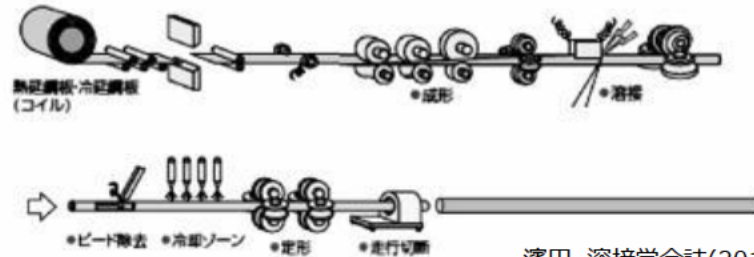
➤ UOE鋼管 <大径厚肉>



➤ シームレス鋼管 (SMLS) <小径厚肉>

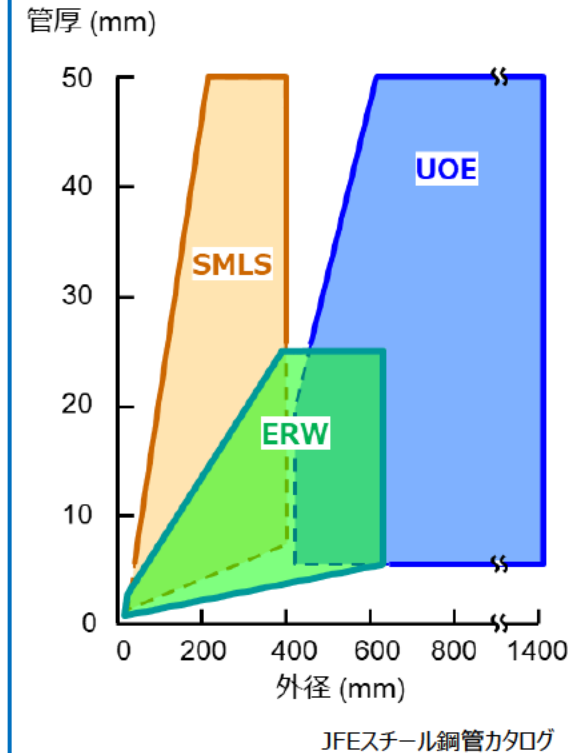


➤ 電縫溶接鋼管 (ERW) <小径薄肉>



濱田、溶接学会誌(2011)

各種鋼管の製造可能範囲



- 高圧ガスパイプラインにはUOE鋼管とSMLS鋼管が長年使用
- 製造・検査技術の発達により、近年高圧にもERWが使用される