

高圧水素環境下長時間使用での材料特性の研究開発 —水素材料強度特性研究チームの取り組み—

松岡三郎, 近藤良之, 濱田 繁, 野口博司, 村上敬宜

・高圧水素環境下における強度・変形過程の解明
(基礎, ナノ・メゾスケール解析)

・水素機器に使用される金属材料・非金属材料の
強度評価(水素分析, データベース)

・水素機器の設計・製造における部品・接合材の強
度評価(部品・部材)

目標: 指導原理に立脚した長期設計法・データの骨組みの構築

水素機器に使用される金属材料・非金属材料の強度評価

課題研究内容	19	20	21	22	23	24	到達目標
	年	年	年	年	年	年	
水素侵入メカニズムの解明	← 測定法開発 → ← 水素量測定 →						圧力、温度、時間の影響を把握できる水素侵入測定法を開発し、長期間侵入水素量の予測を可能にする。
強度特性評価とフラクトグラフィ	← 強度評価 → ← フラクトグラフィ →						高圧水素環境下における引張、シヤルビニー衝撃、疲労に関する強度評価法、破断様相、脆性変形等に関するフラクトグラフィを確立する。
摩擦・摩耗・劣化特性評価	← 評価 →						高圧水素ガス雰囲気中でバルブの磨耗、ゴム・樹脂の劣化に関する特性評価を可能にする。
最適耐水素材料探索指針の提案	← 評価 →						水素環境強度データベースを整備し、水素機械の材料選択基準を確立するとともに、最適耐水素材料探索指針を作成する。
材料劣化判定法の提案	← 評価 →						高圧水素環境下で使用される材料の損傷・解析・診断、タンク、搬送器等の部品の非破壊検査を可能にする。

技術的背景

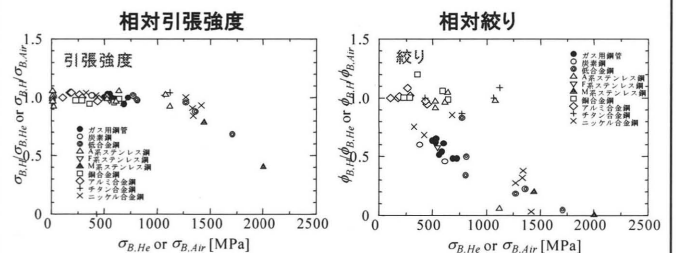
水素機器に使用される金属材料・非金属材料の強度評価

- * 水素侵入量
- * データベース
 - ・金属材料(SUS304, SUS316L, SCM435炭素鋼)
 - ・引張特性, 靱性, 疲労
 - ・非金属材料(ゴム, 樹脂)
 - ・引張特性, ??, ??
- * 水素脆化メカニズム
 - ・格子脆化説 ⇔ 局所変形助長説

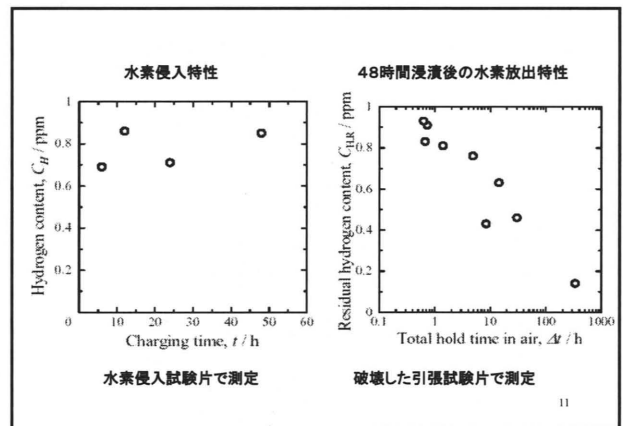
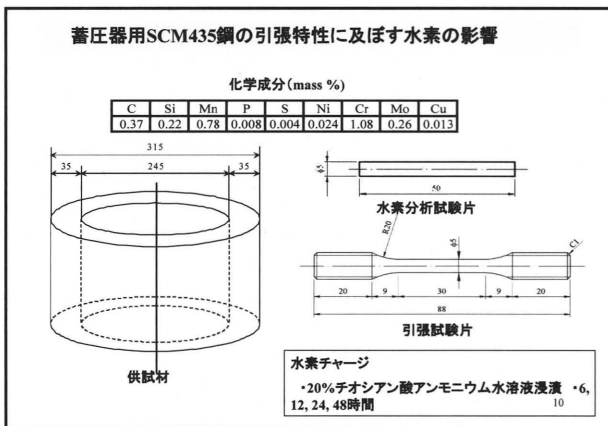
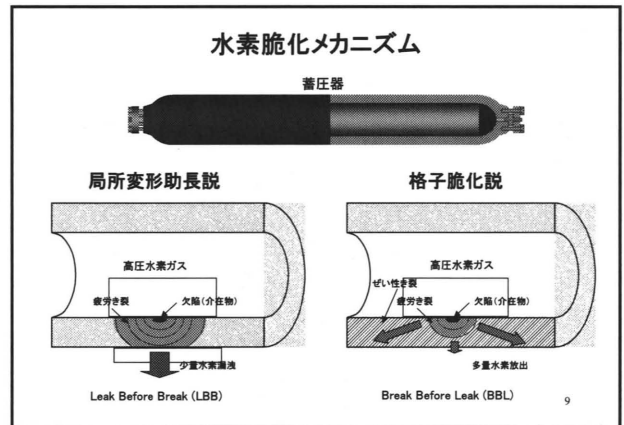
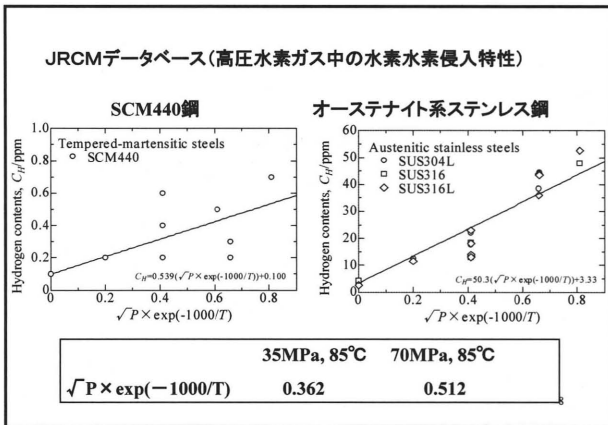
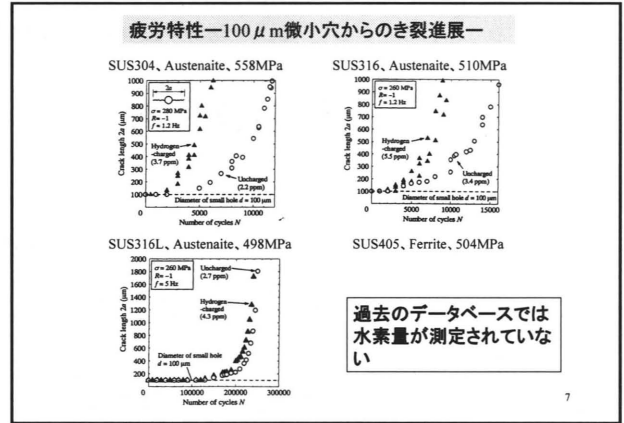
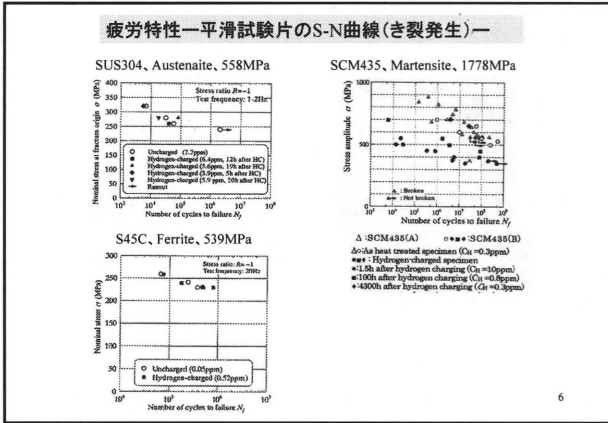
NASAデータベース(69MPa水素ガス中の引張特性)

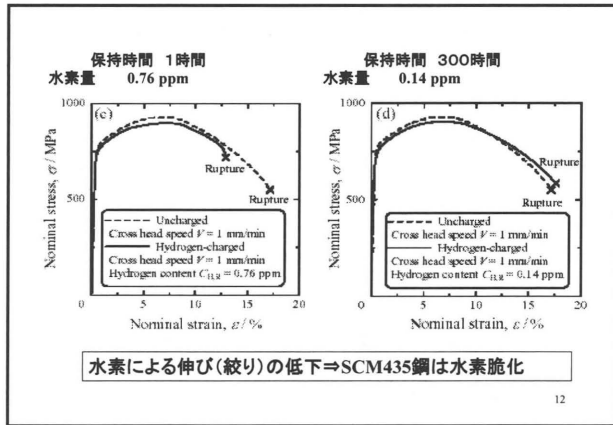
Material	Hydrogen Pressure, ksi	Notched Specimen Strength, ksi				Unnotched Specimen Reduction of Area, %			
		K ₁	H ₂	He	Ratio H ₂ /He	He	H ₂	Ratio H ₂ /He	
1880-250 MAR Steel	10	8.4	420	50	0.12	55	3.5	0.05	
16-11 Steel	10	8.4	252	43	0.22	30	0	0	
440C SS	10	8.4	149	74	0.50	2.0	0	0	
17-7 PH SS	10	8.4	359	70	0.23	43	2.5	0.06	
Inconel X-750	7	8.3	223	57	0.26	24	4	0.17	
Fe-Ni-4Cu-0.20C	10	8.4	347	89	0.34	47	15	0.32	
Inconel 718-AT2	10	8.4	274	124	0.46	26	1	0.04	
AlSiC-102-00(N)(D2)	10	8.4	313	125	0.40	18	2	0.13	
AlSiC-102-00(N)(D1)	10	8.4	186	37	0.20	12	2	0.16	
AlSiC-102-00(N)(D2)	10	8.4	280	77	0.27	30	11	0.34	
AlSiC-102-00(N)(D1)	10	8.4	148	44	0.43	30	28	0.94	
ASTM A-372 Class IV	10	8.4	200	148	0.74	43	18	0.34	
Inconel 625	7	8.3	152	121	0.78	43	23	0.37	
AlSiC-1042-00(N)(D1)	10	8.4	153	115	0.75	38	27	0.46	
Inconel 718-AT1	10	8.4	225	258	0.76	34	18	0.53	
Waspaloy-TMP	7	8.3	272	281	0.79	34	15	0.44	
ASTM A-313-315-Norm.	10	8.4	111	75	0.68	27	34	1.26	
Nickel 270	10	8.4	77	54	0.70	29	47	0.75	
Armco Iron-Armstrong	10	8.4	121	105	0.87	23	20	0.86	
AlSiC-102-00(N)(D1)	10	8.4	164	115	0.70	41	20	0.54	
AlSiC-102-00(N)(D2)	10	8.4	224	164	0.73	26	43	0.63	
AlSiC-102-00(N)(D1) Armstrong	10	8.4	103	90	0.86	40	32	0.80	
AlSiC-102-00(N)(D2) Armstrong	10	8.4	205	142	0.81	45	29	0.67	
75-5Al-3.0Si-0.011	10	8.4	243	183	0.75	48	48	1.0	
75-5Al-4V-TTA	10	8.4	188	139	0.87	38	38	1.0	
316L SS	10	8.4	116	108	0.93	64	63	0.98	
316 SS	10	8.4	236	229	0.98	32	20	0.64	
Nitronic 60-Cast-CW	7	8.3	195	181	0.92	72	71	0.99	
Be-Cu Alloy 25	10	8.4	114	114	1.00	37	37	1.0	
3075-T71	10	8.4	114	114	1.00	37	37	1.0	
Al-705	10	8.4	114	114	1.00	37	37	1.0	
Al-706	10	8.4	114	114	1.00	37	37	1.0	
Al-707	10	8.4	114	114	1.00	37	37	1.0	
Al-708	10	8.4	114	114	1.00	37	37	1.0	
Al-709	10	8.4	114	114	1.00	37	37	1.0	
Al-710	10	8.4	114	114	1.00	37	37	1.0	
Al-711	10	8.4	114	114	1.00	37	37	1.0	
Al-712	10	8.4	114	114	1.00	37	37	1.0	
Al-713	10	8.4	114	114	1.00	37	37	1.0	
Al-714	10	8.4	114	114	1.00	37	37	1.0	
Al-715	10	8.4	114	114	1.00	37	37	1.0	
Al-716	10	8.4	114	114	1.00	37	37	1.0	
Al-717	10	8.4	114	114	1.00	37	37	1.0	
Al-718	10	8.4	114	114	1.00	37	37	1.0	
Al-719	10	8.4	114	114	1.00	37	37	1.0	
Al-720	10	8.4	114	114	1.00	37	37	1.0	
Al-721	10	8.4	114	114	1.00	37	37	1.0	
Al-722	10	8.4	114	114	1.00	37	37	1.0	
Al-723	10	8.4	114	114	1.00	37	37	1.0	
Al-724	10	8.4	114	114	1.00	37	37	1.0	
Al-725	10	8.4	114	114	1.00	37	37	1.0	
Al-726	10	8.4	114	114	1.00	37	37	1.0	
Al-727	10	8.4	114	114	1.00	37	37	1.0	
Al-728	10	8.4	114	114	1.00	37	37	1.0	
Al-729	10	8.4	114	114	1.00	37	37	1.0	
Al-730	10	8.4	114	114	1.00	37	37	1.0	
Al-731	10	8.4	114	114	1.00	37	37	1.0	
Al-732	10	8.4	114	114	1.00	37	37	1.0	
Al-733	10	8.4	114	114	1.00	37	37	1.0	
Al-734	10	8.4	114	114	1.00	37	37	1.0	
Al-735	10	8.4	114	114	1.00	37	37	1.0	
Al-736	10	8.4	114	114	1.00	37	37	1.0	
Al-737	10	8.4	114	114	1.00	37	37	1.0	
Al-738	10	8.4	114	114	1.00	37	37	1.0	
Al-739	10	8.4	114	114	1.00	37	37	1.0	
Al-740	10	8.4	114	114	1.00	37	37	1.0	
Al-741	10	8.4	114	114	1.00	37	37	1.0	
Al-742	10	8.4	114	114	1.00	37	37	1.0	
Al-743	10	8.4	114	114	1.00	37	37	1.0	
Al-744	10	8.4	114	114	1.00	37	37	1.0	
Al-745	10	8.4	114	114	1.00	37	37	1.0	
Al-746	10	8.4	114	114	1.00	37	37	1.0	
Al-747	10	8.4	114	114	1.00	37	37	1.0	
Al-748	10	8.4	114	114	1.00	37	37	1.0	
Al-749	10	8.4	114	114	1.00	37	37	1.0	
Al-750	10	8.4	114	114	1.00	37	37	1.0	

NASAデータベース(69MPa水素ガス中の引張特性)



引張強度	絞り	疲労き裂発生	疲労き裂進展
低下せず	低下せず	影響なし	影響なし
低下せず	低下	影響なし	加速
低下	低下	早まる	加速





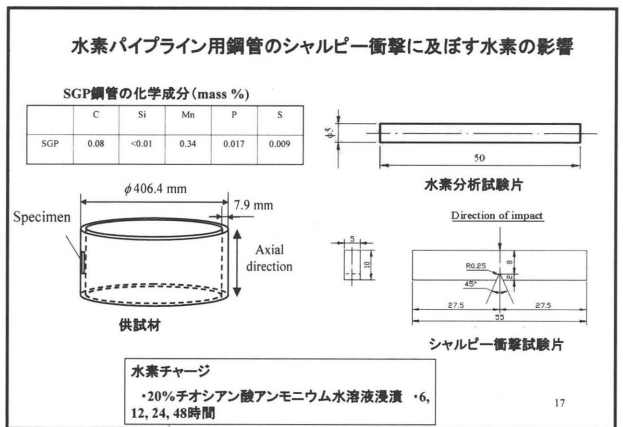
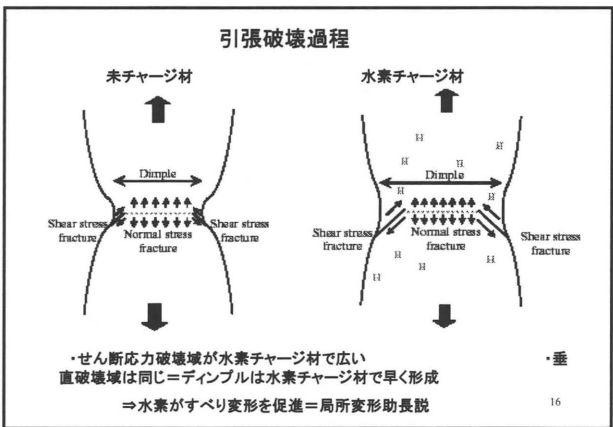
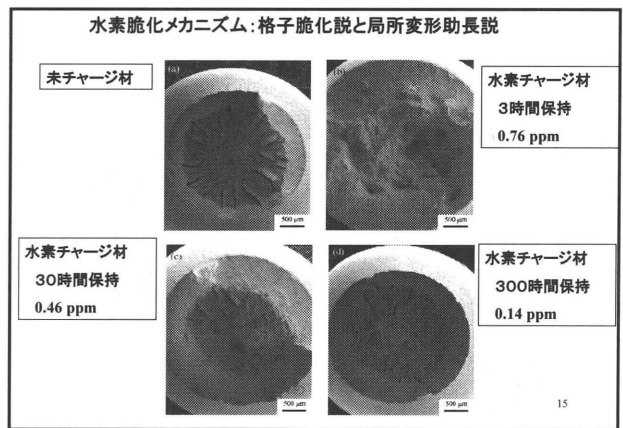
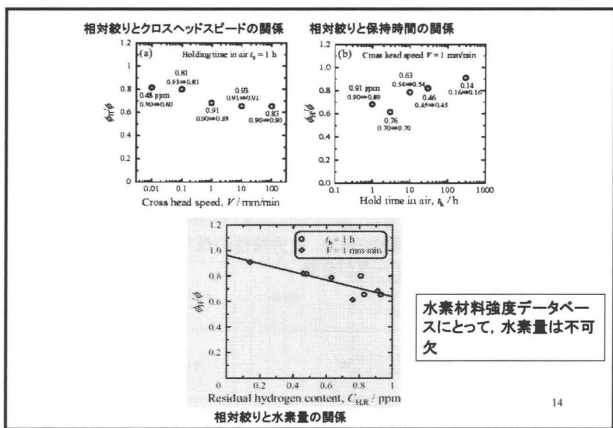
蓄圧器用SCM435鋼のデータベースイメージ
—水素量を含むことが特徴—

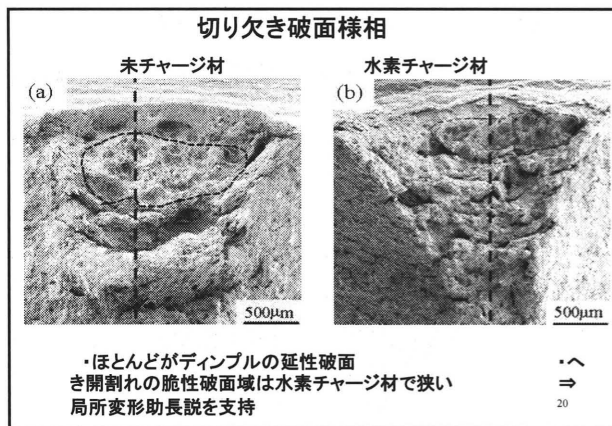
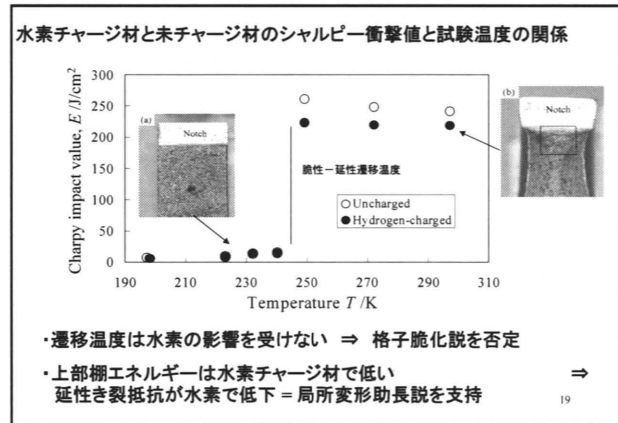
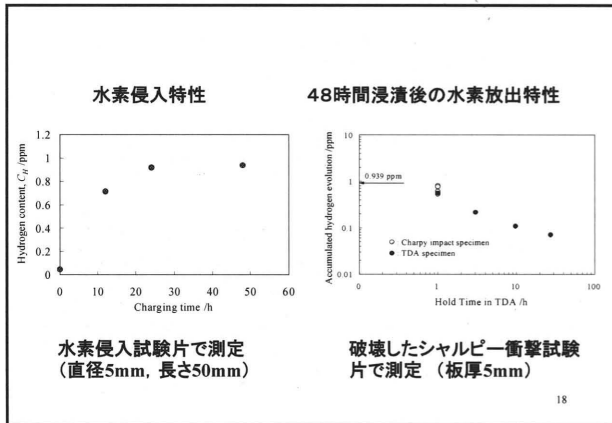
未チャージ材

V / mm/min	t_h / h	$\sigma_{0.2}$ / MPa	$\sigma_{0.1}$ / MPa	δ / %	ϕ / %	Δt / h	$C_{H, R}$ / ppm
1	-	767	927	17.2	71.7	-	0

水素チャージ材

V / mm/min	t_h / h	$\sigma_{0.2}$ / MPa	$\sigma_{0.1}$ / MPa	δ / %	ϕ / %	Δt / h	$C_{H, R}$ / ppm
100	1	700	945	13.0	46.8	0.67	0.83
10	1	767	931	13.9	46.8	0.63	0.93
1	1	773	936	13.0	48.9	0.73	0.91
0.1	1	777	928	16.4	57.3	1.40	0.81
0.01	1	764	915	15.1	58.4	8.53	0.48
1	3	754	900	13.1	44.1	4.92	0.76
1	10	747	899	14.2	56.3	14.47	0.63
1	30	782	914	15.1	58.7	30.43	0.46
1	300	755	904	17.6	64.6	340.00	0.14





目標: 指導原理に立脚した長期設計法・データの骨組みの構築

水素脆化は局所変形助長説に従う

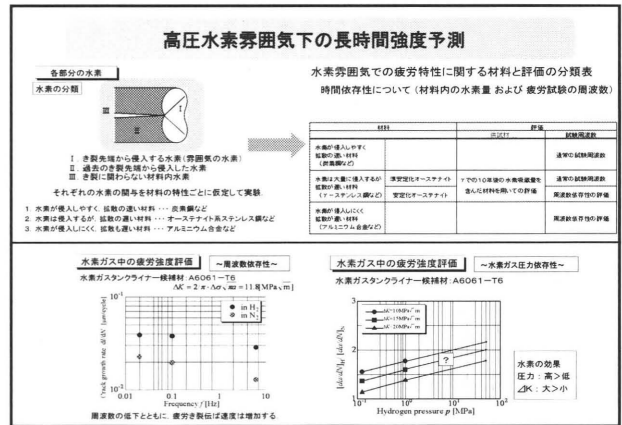
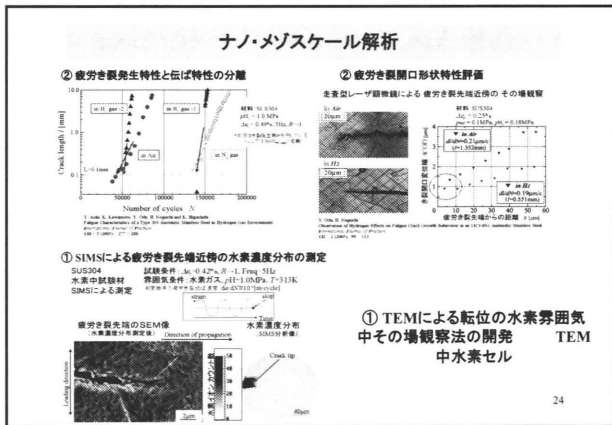
- ①水素脆化に対し、従来の設計法が使用可能
蓄圧器や水素タンクでLBB (Leak Before Break) が成立
- ②水素による引張特性、靱性、疲労特性の低下のため、
新しい設計法、設計データが必要

高圧水素環境下における強度・変形過程の解明

課題研究内容	18年度	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度	24年度	到達目標
ナノ・メソレベルにおける強度・変形過程の解明	← 手法開発		← 実過程の解明					SIMS による局所水素濃度測定法、TEM による転位の水素雰囲気中その観察法を開発し、ナノ・メソレベルで強度・変形過程を明らかにする。
高圧水素下における疲労き裂発生と伝ば機構の解明	← 試験技術開発		← き裂発生・伝ばの解明					高圧水素材料評価試験技術を開発し、き裂開口量、マルテンサイト量、残留応力の測定を通じて、疲労き裂発生・伝ばに及ぼす高圧水素の影響を明らかにする。
水素ぜい化・疲労メカニズムの解明	←		←					水素ぜい化、水素ぜい化と疲労の相互作用に関する基本メカニズムを解明し、高圧水素雰囲気での長時間強度が予測できる評価法を確立する。

技術的背景: 水素環境下における強度・変形過程の解明

- (1) 基礎
- (2) ナノ・メソスケール解析 (SIMS, TEM)
- (3) 高圧水素雰囲気下の長時間強度予測



水素機器の設計・製造における部品・接合材の強度評価

課題研究内容	16年度	17年度	18年度	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度	24年度	到達目標
疲労強度に及ぼす製造加工プロセスの影響評価	●	●	●	●	●	●	●	●	●	水素侵入した材料の疲労強度特性に及ぼす、加工時の塑性変形、溶接、切欠きなどの影響評価を可能とする
部品に作用する応力状態の影響把握	●	●	●	●	●	●	●	●	●	平均応力、フレット疲労への影響、変動応力下の疲労特性への影響把握を可能とする
極端環境の影響の評価法	●	●	●	●	●	●	●	●	●	巨大地震等により極低サイクル疲労応力を受けた後の機械構造の高サイクル疲労健全性評価を可能とする
機械要素設計法の構築	●	●	●	●	●	●	●	●	●	高圧水素環境下における機械要素設計法を構築する。

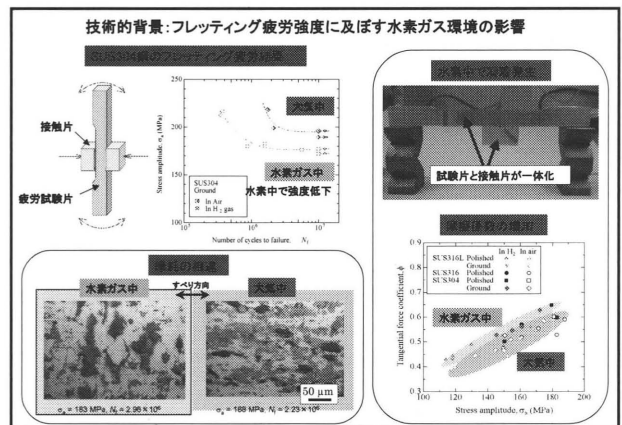
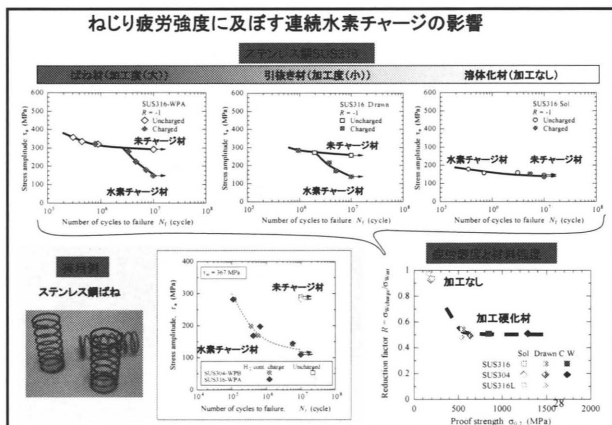
26

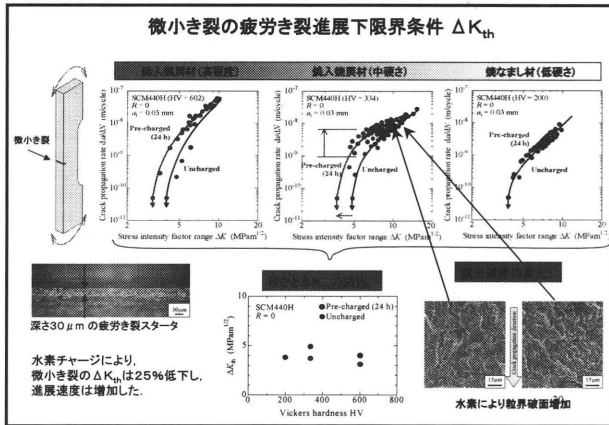
技術的背景: 水素機器の設計・製造における部品・接合材の強度評価

(1) 部品・部材
影響因子の評価

- 加工時の切り欠き
- 応力状態 (ねじり応力, フレット疲労)

27





目標：指導原理に立脚した長期設計法・データの骨組みの構築

水素脆化は局所変形助長説に従う

- ①水素脆化に対し、従来の設計法が使用可能
蓄圧器や水素タンクでLBB(Leak Before Break)が成立
- ②水素による引張特性、靱性、疲労特性の低下のため、
新しい設計法、設計データが必要

しかしながら、

- ③ナノ・メソスケールに立脚した水素脆化・疲労メカニズムの
説明が不可欠
- ④高圧水素雰囲気下の長時間強度データは不足
- ⑤部品・部材の設計法の構築のためには、多くの影響因子の
評価が必要

31

最新機器・試験機の活用

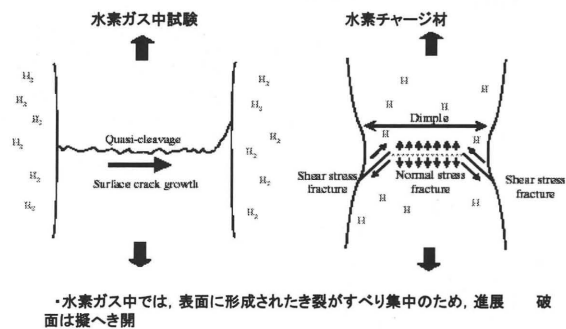
装置名	台数	水素環境
2次イオン質量分析計SIMS	1台	
固体発光分光分析装置	1台	
結晶方位測定付き走査電子顕微鏡	1台	1MPa
FIB	1台	
マイクロフォーカスX線CT装置	1台	
昇温脱離分析装置TDS	2台	
TEM水素環境ホルダー	1台	0.01MPa
フェムト秒レーザー	1台	
100MPa水素大型容器	1台	100MPa
100MPa水素疲労試験機	1台	100MPa
1MPa水素疲労試験機	10台	1MPa
液体水素中疲労試験機	1台	液体水素

青字：平成18と19年度で整備

32

33

引張破壊過程

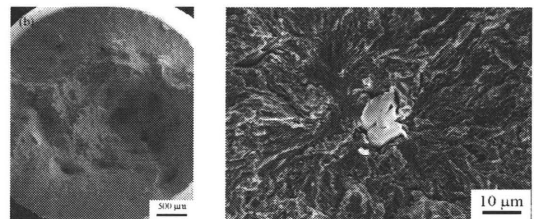


34

水素チャージ材における介在物起点の擬へき開破面

水素量 0.76 ppm

介在物起点の擬へき開破面



35