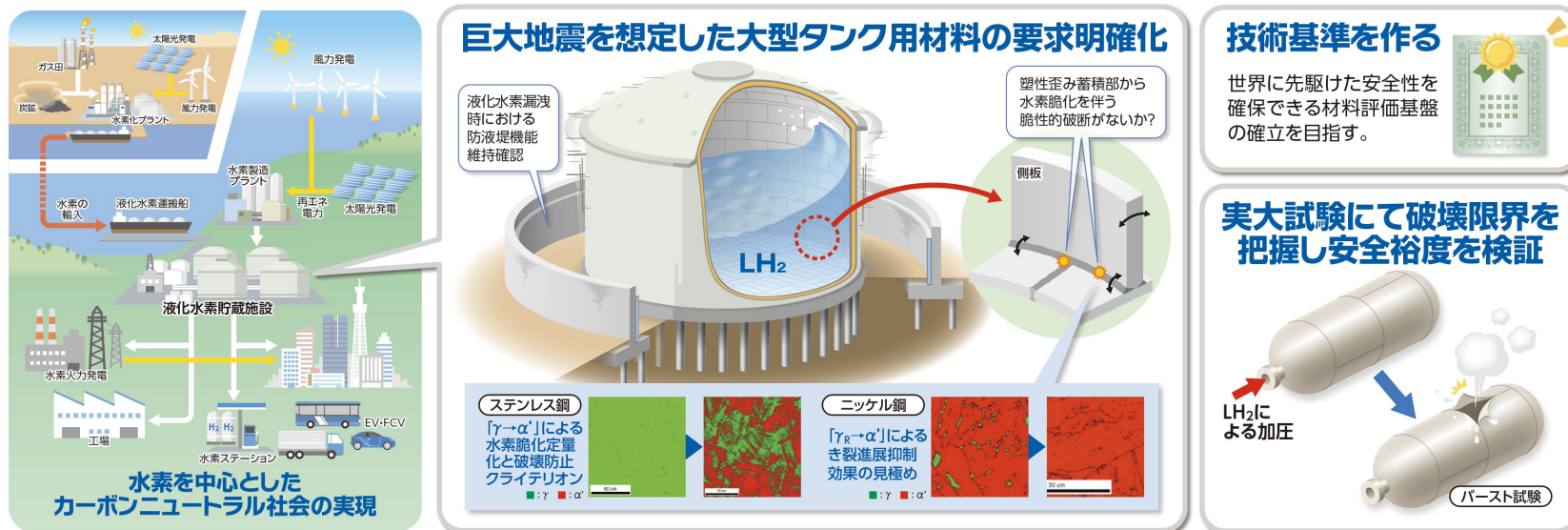


NEDO水素・燃料電池成果報告会2024

発表No.B2-14

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／大規模水素サプライチェーンの構築に係る技術開発／ 大型液化水素貯槽実現に向けた極低温・水素環境下材料信頼性評価確立および社会受容のための実大試験

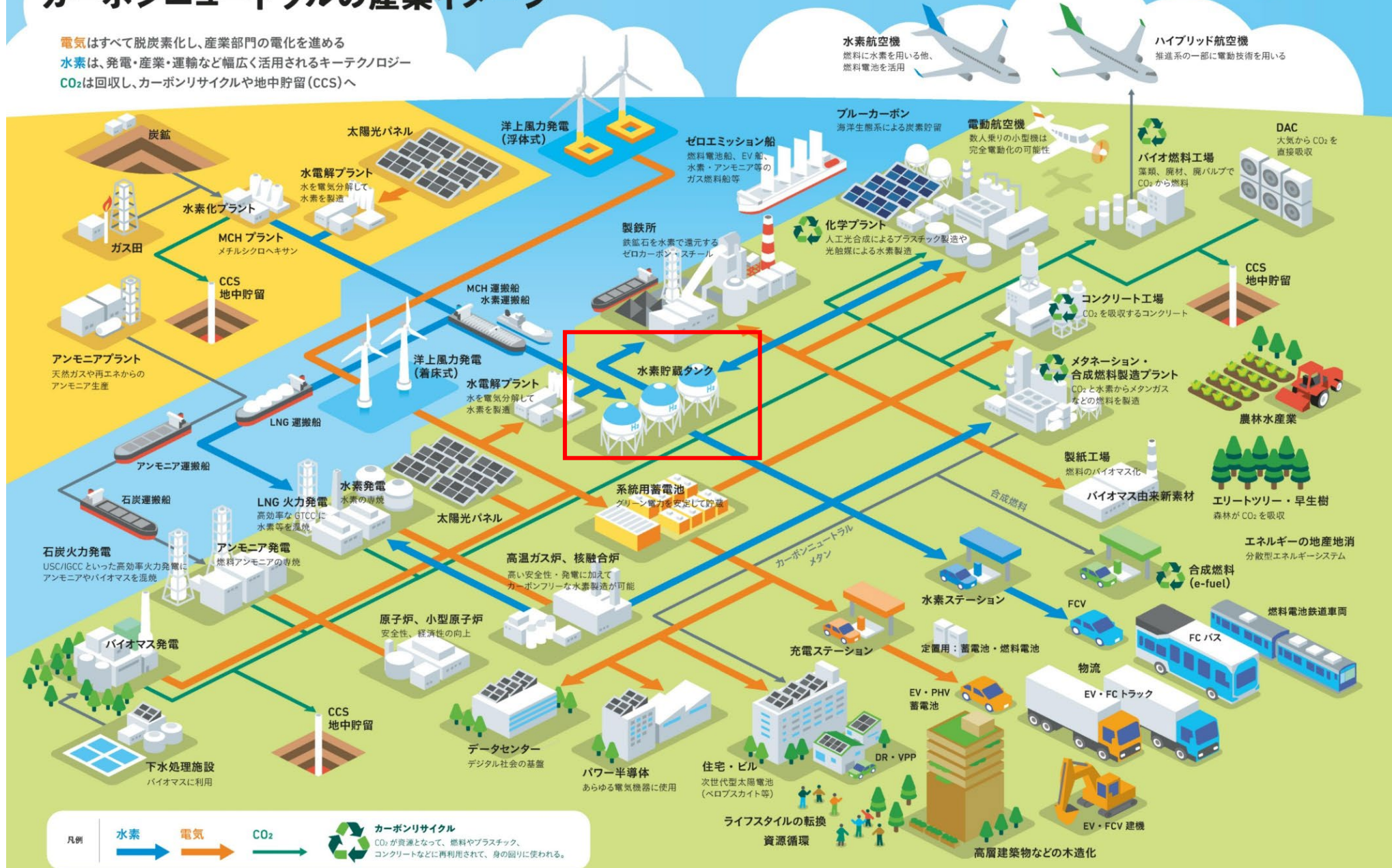


国立大学法人 東京大学
(再委託先)宇宙航空研究開発機構
発表日 7月16日

連絡先：川畑友弥
国立大学法人 東京大学
(kawabata@fract.t.u-tokyo.ac.jp、
03-5841-6517)

カーボンニュートラルの産業イメージ

電気はすべて脱炭素化し、産業部門の電化を進める
水素は、発電・産業・運輸など幅広く活用されるキーテクノロジー
CO₂は回収し、カーボンリサイクルや地中貯留 (CCS) へ



1. 研究開発計画

背景

現在の主力燃料貯蔵設備：LNGタンク

3.5%
Ni鋼

1941 球形



1944 円筒

爆発事故



East Ohio Gas Explosion accident

9%Ni鋼

1963 円筒

1969 円筒(地下)



根岸LNG基地の建設

7%Ni鋼

2015 円筒(PC)



高Mn鋼

2019 円筒(PC)



LNG 貿易量 (2023)

400 MT/y
with +3.6% y/y.



23万kLタンク(7%Ni初適用)



日本固有事情

- 国内水素生産困難
- 水素の輸入が不可欠

貯蔵温度

111K

20K

将来の主力燃料貯蔵設備候補：LH₂タンク

アンモニアキャリアシナリオと並び極めて大きい将来需要予測

<航空宇宙分野>

SUS鋼

1955 航空機搭載燃料タンク



1965 ロケット燃料用陸上タンク 球形

Ti合金

1967 ロケット搭載燃料タンク



Al合金

1981 ロケット搭載燃料タンク



SUS鋼

1994 ロケット燃料用陸上タンク 球形



2018 ロケット燃料用陸上タンク 球形



最大容量：4,700m³



種子島宇宙センター

<民生エネルギー分野>

2030 陸上タンク 円筒

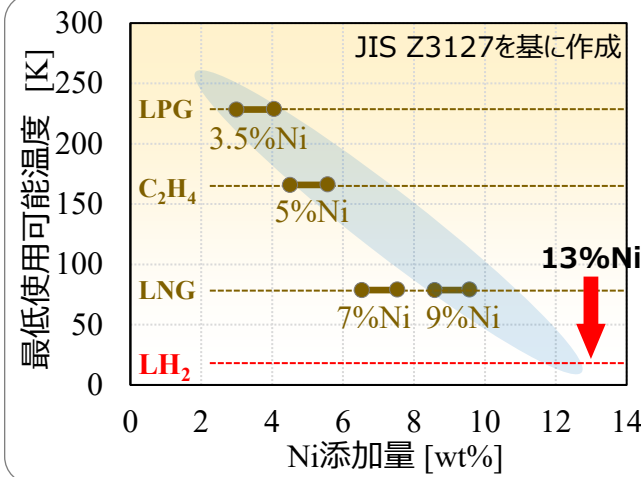
当初目標：50,000m³



NEDOプロジェクトより

材料候補

- SUS316L
- Ni鋼
- 高Mn鋼



事業概要

1. 期間

開始 : (西暦) 2023年4月
終了 : (西暦) 2027年3月

2. 最終目標

世界に先駆けて、水素発電の本格的な導入と大規模な水素サプライチェーンを構築することで、水素源の権益や輸送・貯蔵関連技術の特許等の多くを掌握し、産業競争力の強化とエネルギーセキュリティの向上に貢献すること

3. 成果・進捗概要

本事業は、競争的な水素サプライチェーン構築に向けて、大型液化水素貯槽（50,000m³）の構造評価および極低温・水素環境下における材料信頼性評価手法の確立を目指すものである。最も過酷な条件とされる京浜地区への設置を想定し、レベル2地震動下での構造解析を実施。これにより、破壊駆動力の定量化に成功し、設計時に考慮すべき靱性の要求水準を明確にした。内槽材の第一候補であるオーステナイト系ステンレス鋼SUS316Lに対しては、特に溶接金属部の靱性がクリティカルであることを確認したが、実大スケール（8000ton）の引張試験によって、想定される破壊駆動力を上回る靱性を有することが示された。一方で、さらなる大型化を見据え、より高い設計応力への対応が可能な13%Ni鋼（LNG貯槽用9%Ni鋼の延長）についても調査を開始。複数の溶接法による継手の衝撃特性を比較し、いずれの方法でも極端な靱性低下は見られなかった。さらに、世界で初めて20Kの極低温下での破壊靱性試験を実施し、安定破壊であったこと、かつ小型試験よりも有利な評価結果が得られたことを確認している。水素環境下でのき裂進展評価については、従来法（SSRT）が必ずしも十分ではないと判断され、新たに評価装置を設計・設置し、網羅的な条件での試験に向けた体制を整備した。

1. 事業の位置付け・必要性

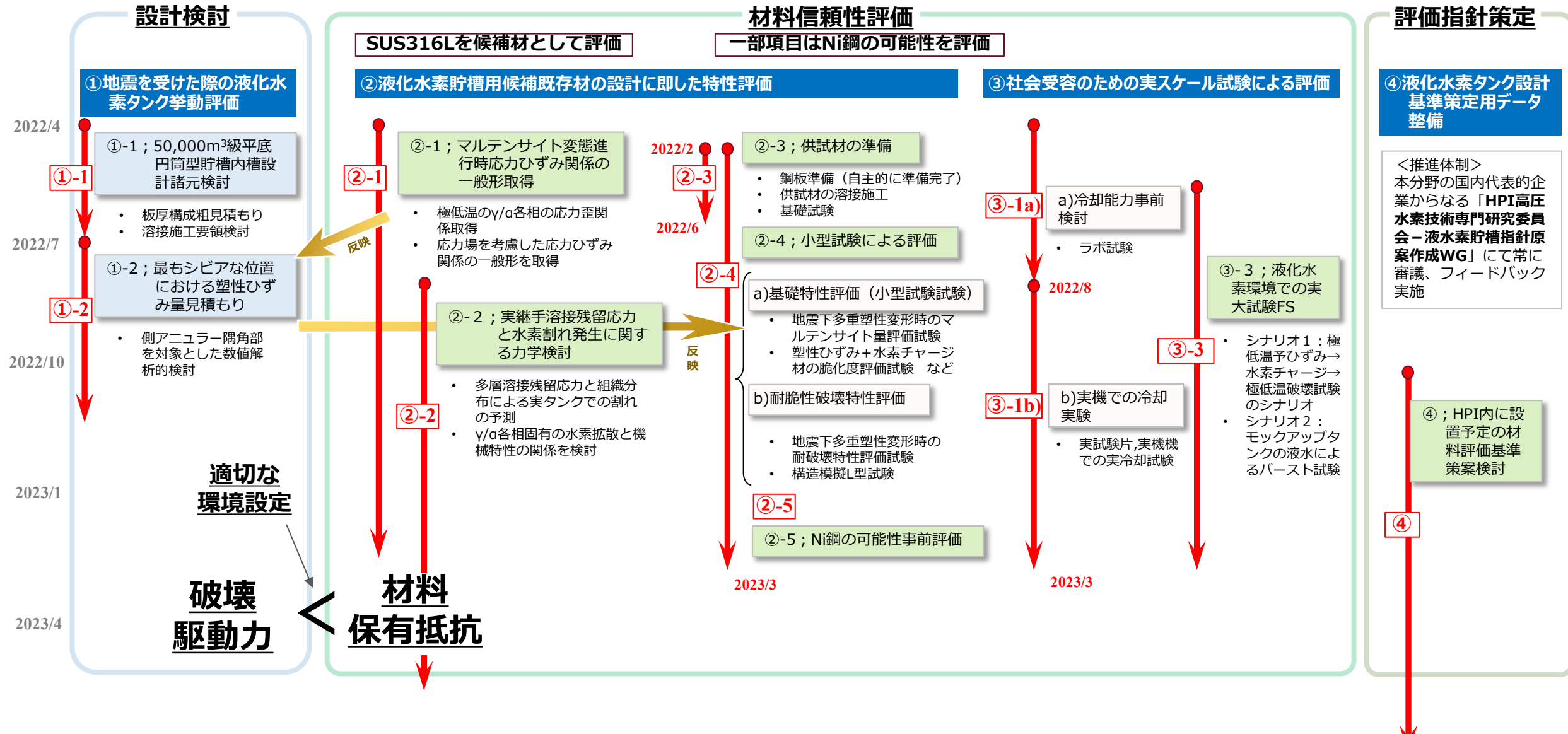
「水素利用等先導研究開発事業」基本計画に記載されているように、我が国のエネルギー政策は2017年12月、2023年6月に取りまとめられた『水素基本戦略』に基づき、エネルギー安全保障と温暖化対策の切り札として水素を取り扱っている。また、本研究テーマは「再生可能エネルギーからの高効率低コスト水素製造技術、水素の長距離輸送、長時間貯蔵を容易にするためのエネルギーキャリア技術及び大規模水素利用技術の先導的な研究開発に主として取り組む」とする本事業の精神に合致したものである。本研究テーマの最終的なゴールは以下の2点である。

- ✓ これまでWE-NET事業などで提案されてきた有望な材料（母材・溶接部）を用い、平底円筒型大型貯槽が最もシビアな状態である大規模地震に見舞われた後を想定した評価試験を多面的に実施することにより、同状況でも強度および耐破壊特性の面で健全性を損なわないことを評価する手法およびクライテリアを開発すること
- ✓ さらに社会受容の面で不可欠な貯槽構造物一部の実大模型を用いた液化水素温度での評価試験方法は世界に存在しないことから、これを実現し、候補材の安全性を確認すること。

2. 研究開発マネジメントについて

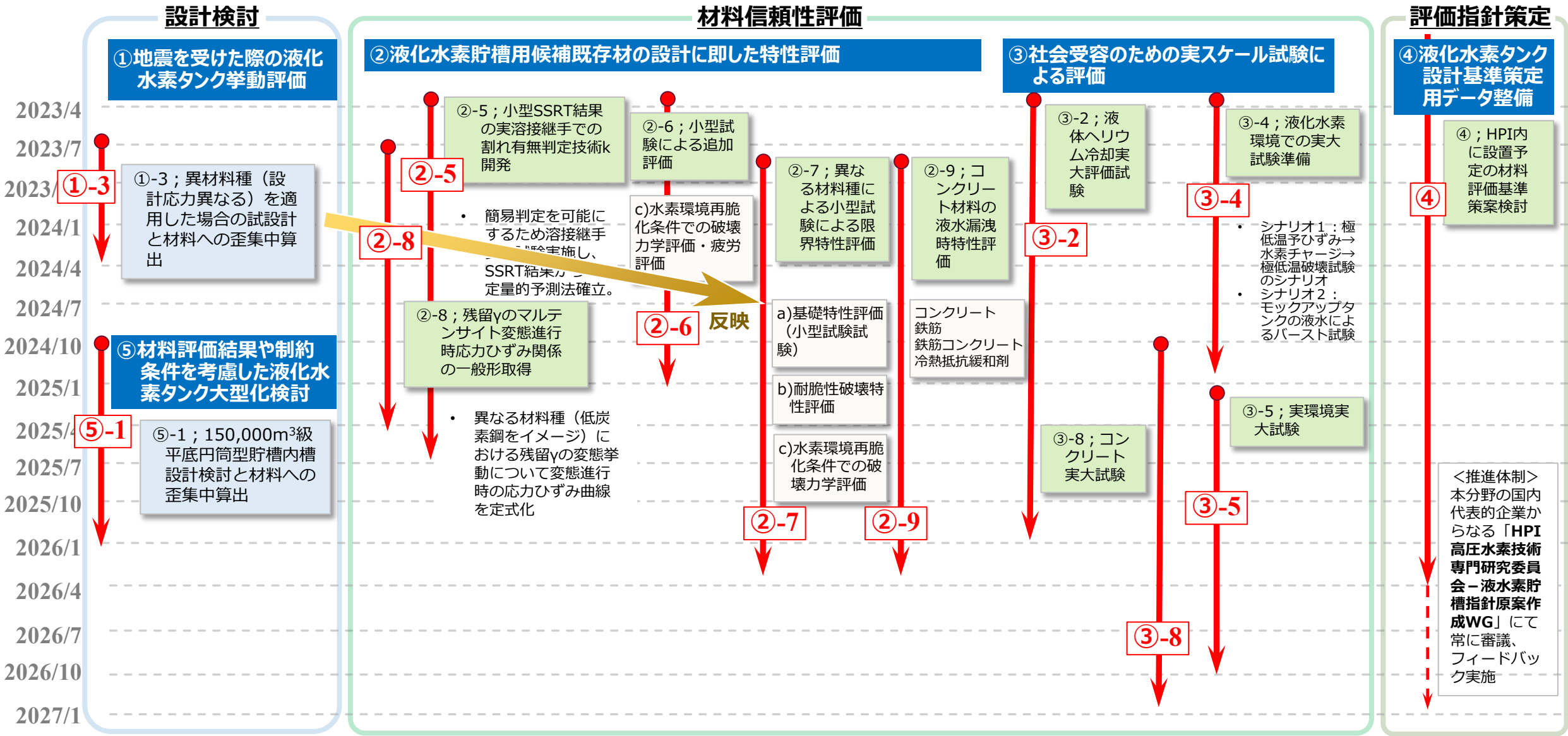
2022Fy事業における研究成果

★本事業の目的；大型液化水素貯槽を社会実装できる材料信頼性評価設備を整備するとともに、評価手法を開発し指標を提案する。最終的に法規制の基礎となる技術基準策定に資するデータを提供する



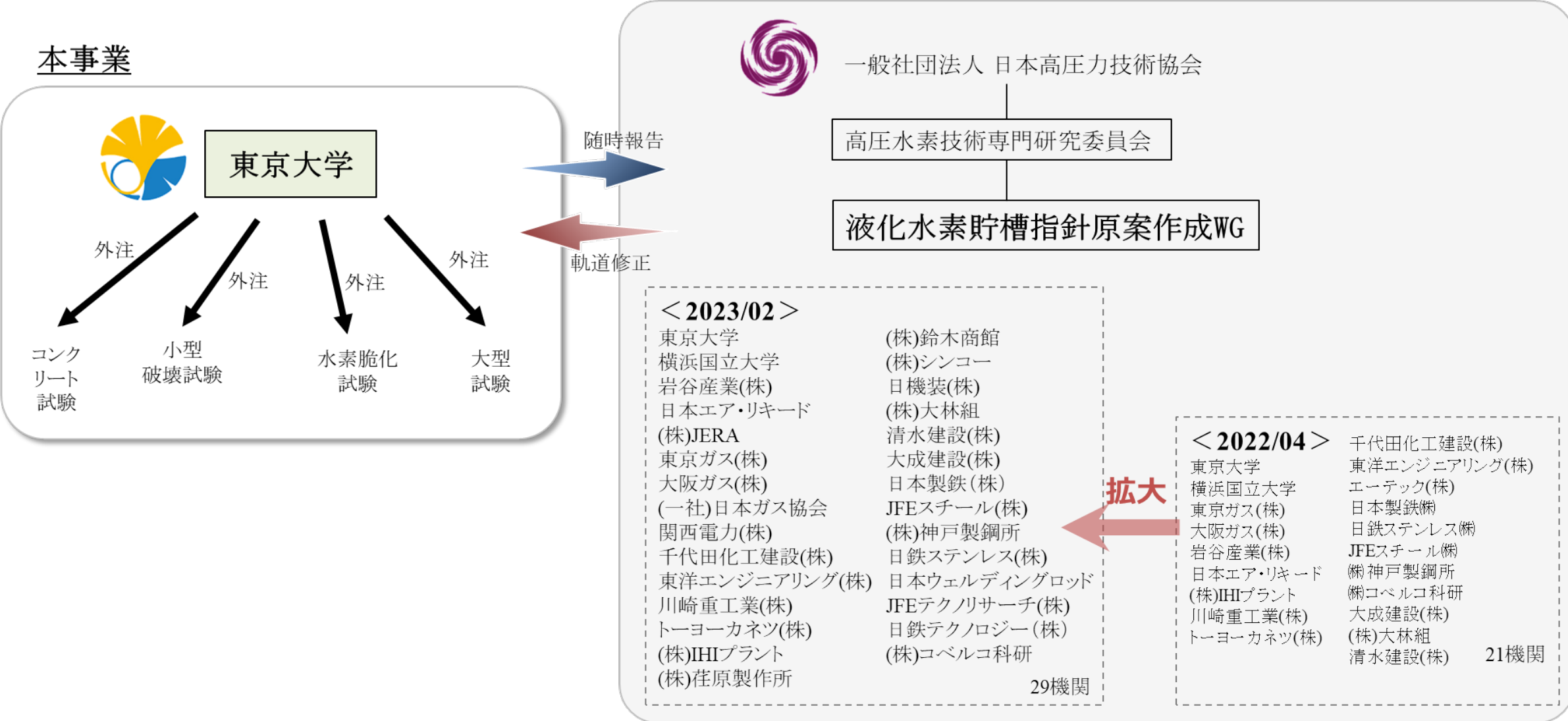
2. 研究開発マネジメントについて

2023年度以降の研究計画（4か年計画）



2 . 研究開発マネジメントについて

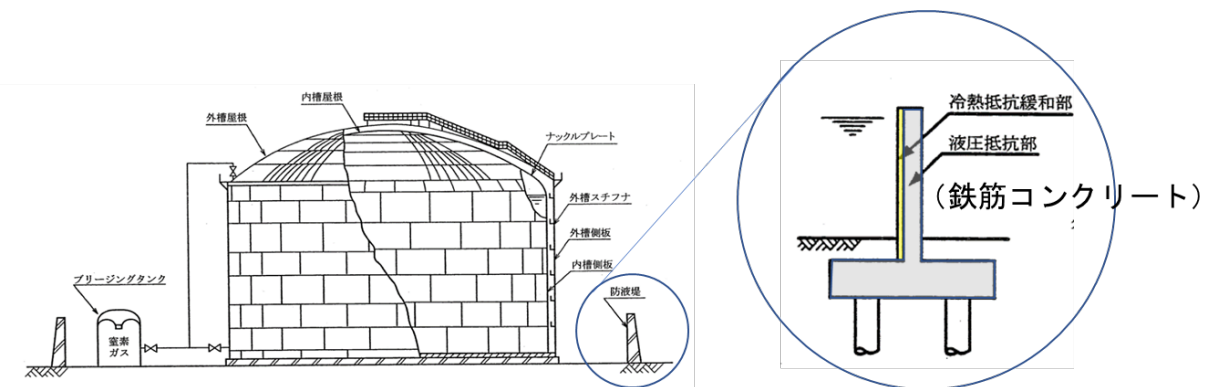
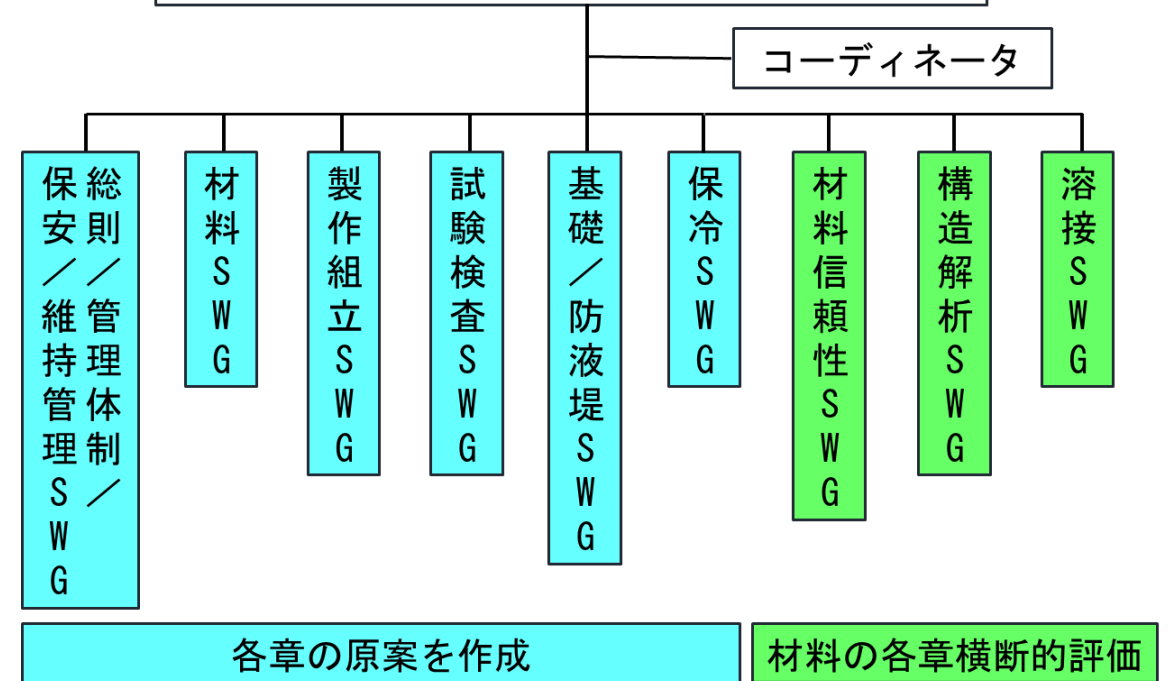
・ 研究開発の実施体制



2. 研究開発マネジメントについて

- 構造解析SWG 8回
- 材料信頼性SWG 2回,
- 溶接SWG 3回
- 総則SWG 2回
- 構造設計SWG 1回,
- 製作組み立てSWG 3回,
- 試験検査SWG 3回,
- 基礎防液堤SWG 8回,
- 保安SWG 5回

大型液化水素貯槽指針原案作成WG



金属二重殻貯槽の概念図

防液堤の構造形式例

3. 研究開発成果について

Overview of 2024Fy progress

材料信頼性SWG

6) 新しい水素脆化評価設備完成

SSRTに代わる新しい評価試験を模索。
CT試験による水素き裂進展速度を評価
可能な定荷重試験機完成

溶接SWG

7) SUS316L溶金靱性改善

方針について目途を得た。共同出願特許検討中。

材料信頼性SWG

8) 13%Ni鋼の基本特性評価

9) 13%Ni鋼の水素脆化特性調査

構造解析SWG

1) 50,000 m³タンク地震時破壊駆動力定量化

最も過酷な応力および歪がもたらされる**最下段×アニュラー部**に着目し、レベル2地震動を受けるSUS316L貯槽に最もシビアな初期き裂が存在した場合の破壊駆動力を算出。さらに、設計上最大応力が付与された場合のケースも計算し、材料に対する靱性要求値が明確化できた。

2) SUS316L最大厚でのタンク容量最大値の導出

明確化できた。また地震時駆動力は50000m³での検討結果と同等以下であった。

材料信頼性SWG

3) SUS316L破壊靱性実大評価試験

実大規模の溶接金属部破壊靱性試験を実施。20Kに試験体を冷却するという世界初の試みであり、また試験成功にハードルの試験であったが、問題なく評価できた。不安定破壊は起きず、さらに小型試験に比べ緩拘束状況であることから、破壊靱性評価値が大きくなることが確認できた。

土木コンクリートSWG

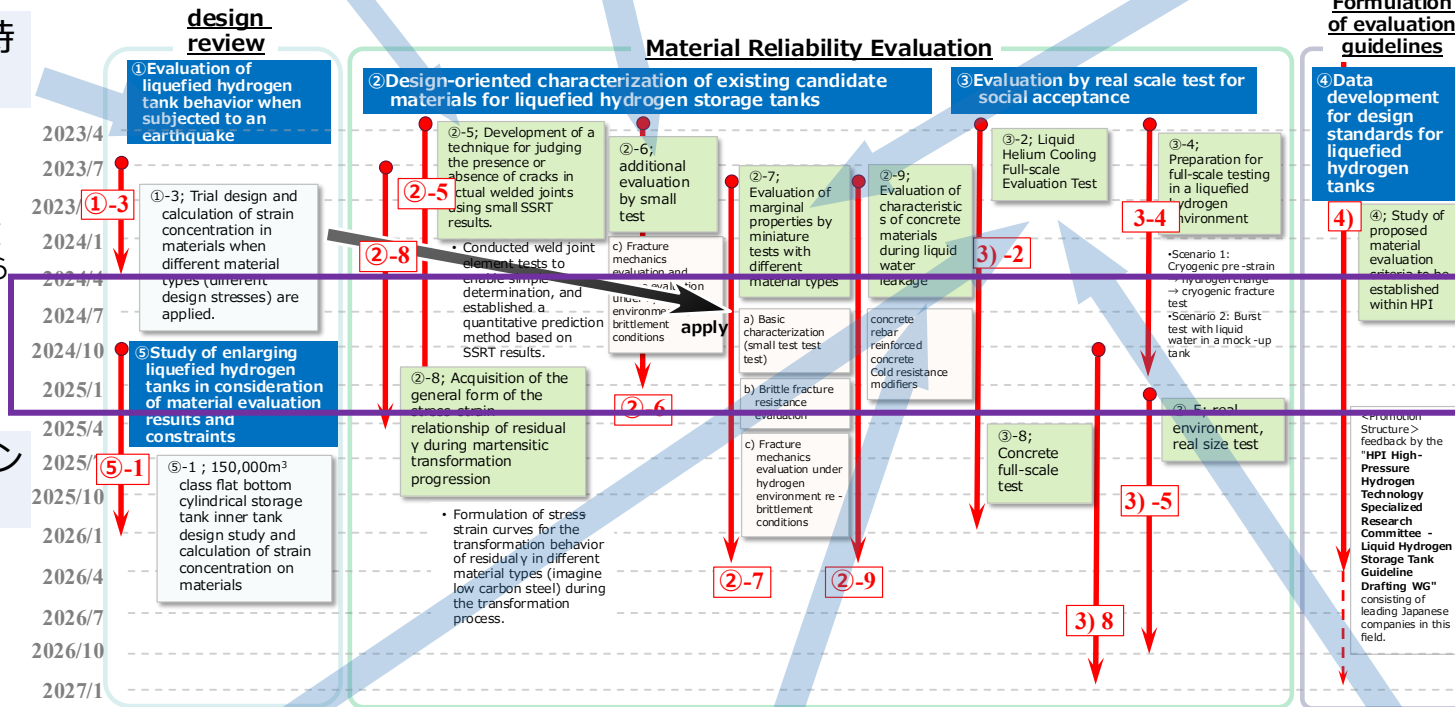
4) 鉄筋、PC鋼材の耐水素脆化特性評価試験

常温および200K条件での破断無しを確認。

材料信頼性SWG

5) L形構造要素における地震時耐破壊特性、低サイクル疲労特性

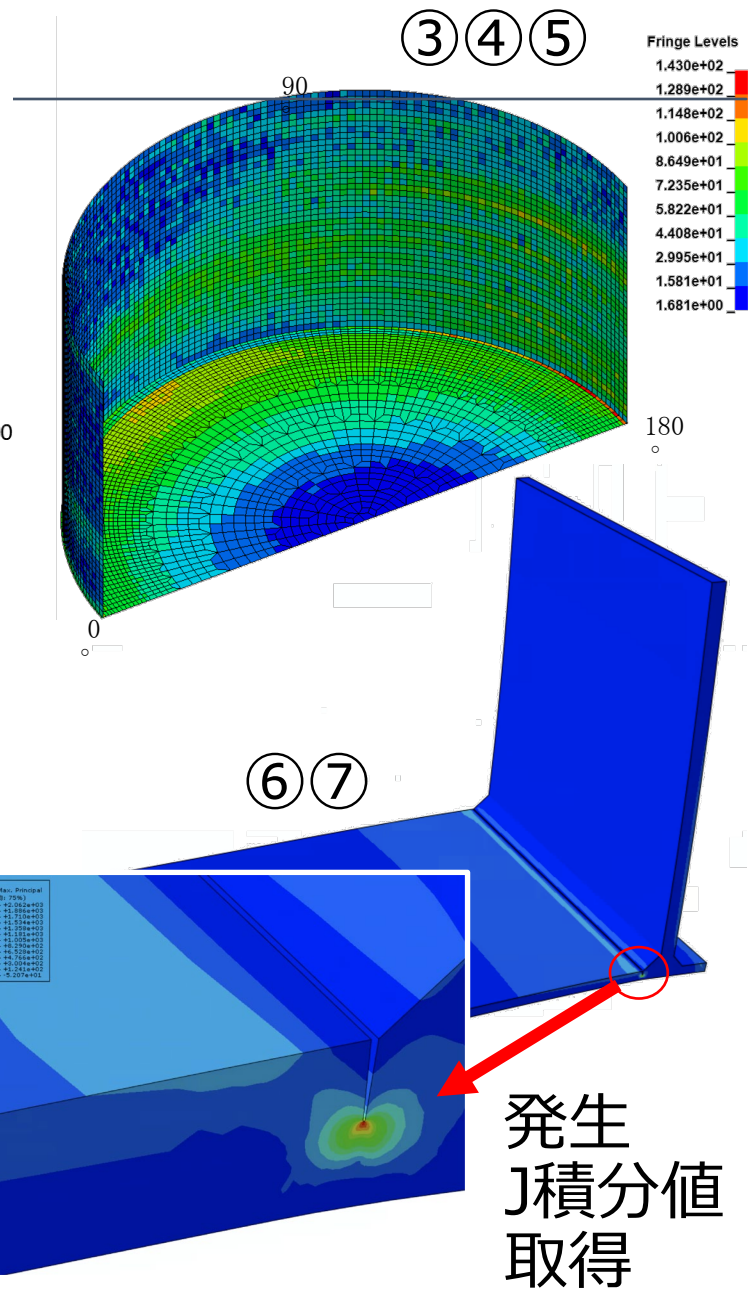
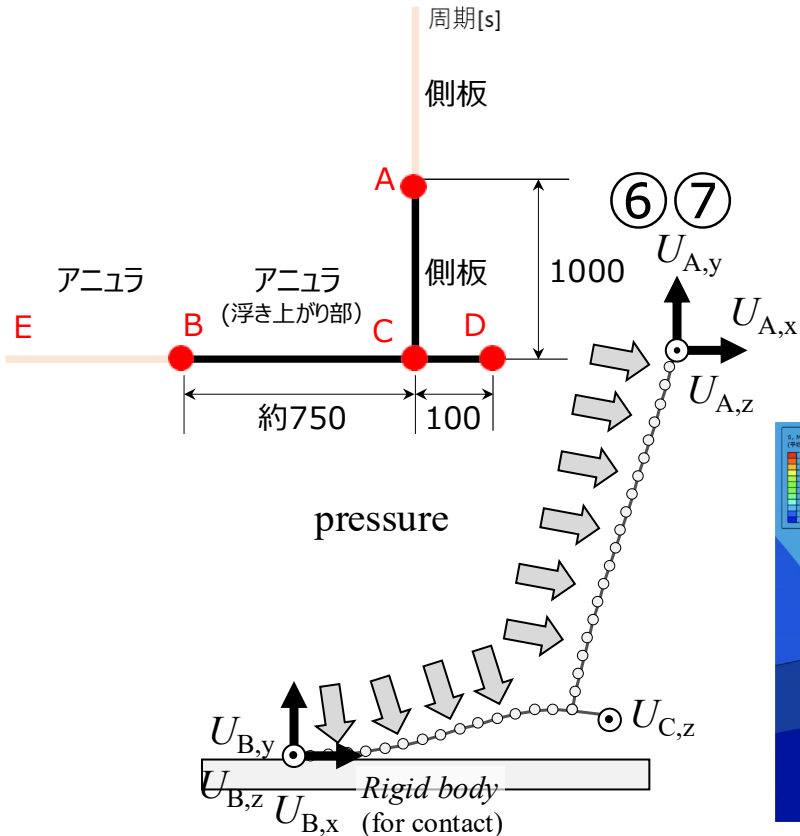
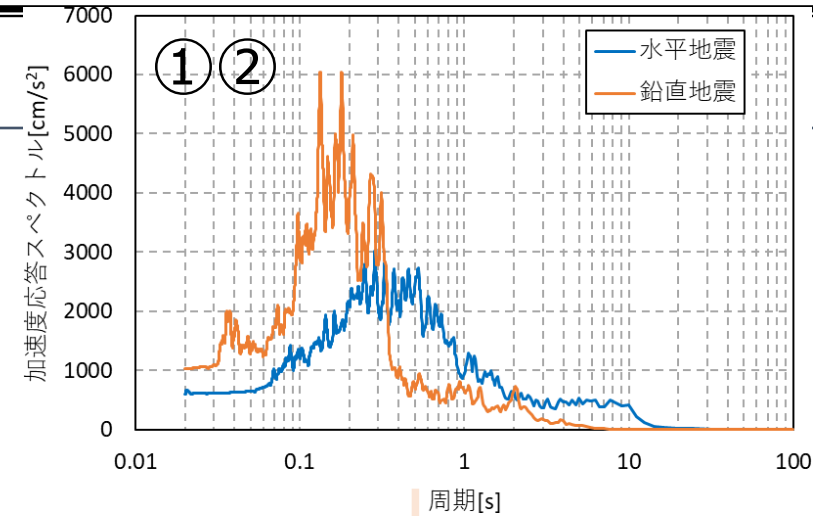
延性破壊は生じないことを余裕を持って確認できた。低サイクル疲労き裂進展速度について定量化できた。



3. 研究開発成果について <レベル2 地震時50000m³タンク変形解析結果>

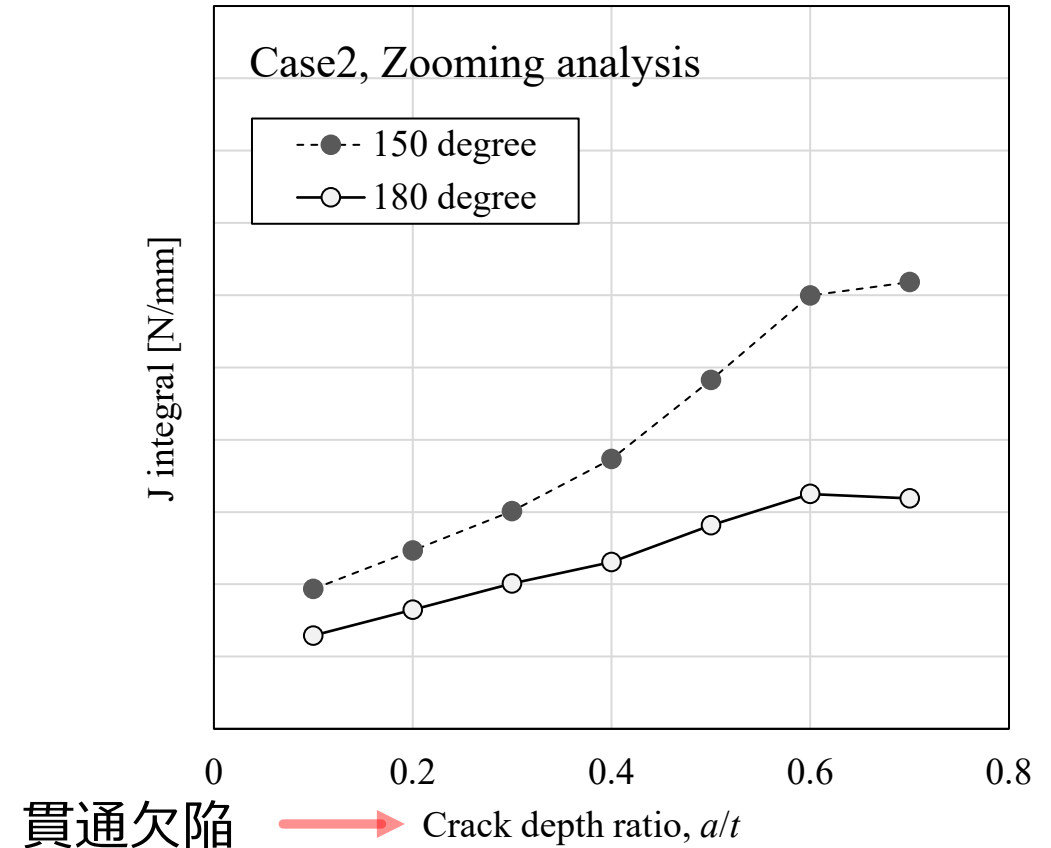
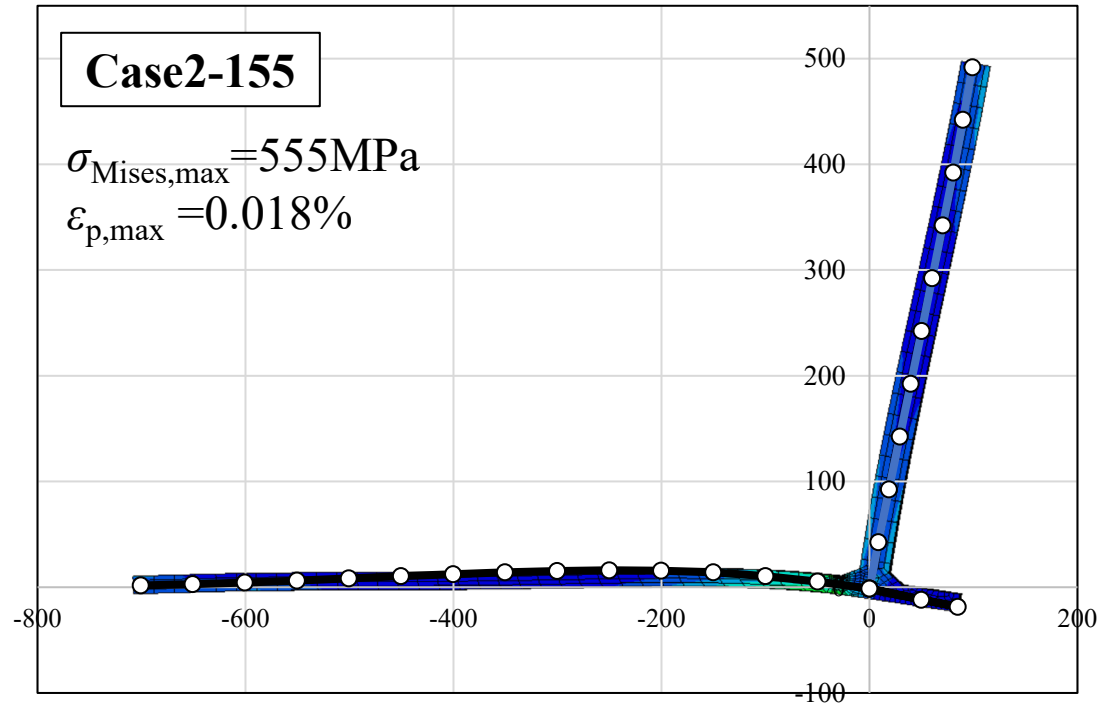
構造解析最終結果

- ①サイトスペシフィック地震動の選定
- ②時刻歴応答解析による地表面波形の計算
- ③50,000m³タンクの試設計
- ④タンクの時刻歴応答解析
- ⑤修正震度法静的解析
- ⑥ズームアップ3次元ソリッド解析
- ⑦ソリッド解析によるき裂進展解析



3. 研究開発成果について <レベル2 地震時50000m³タンク変形解析結果>

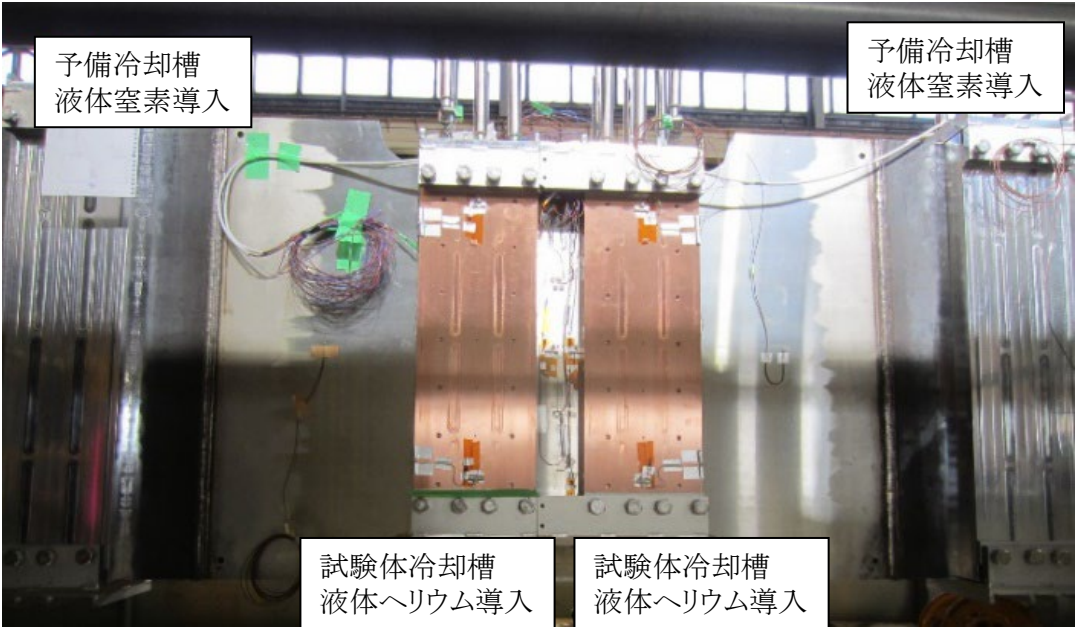
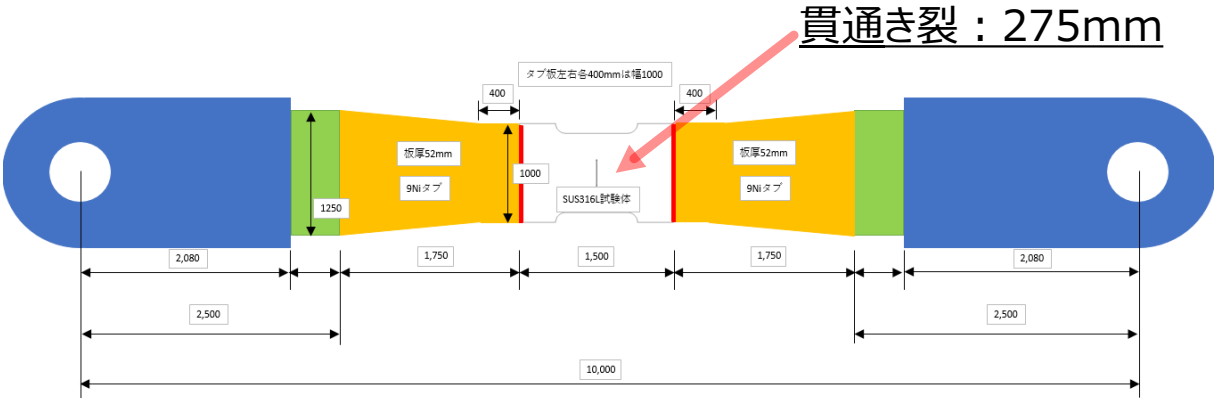
構造解析最終結果



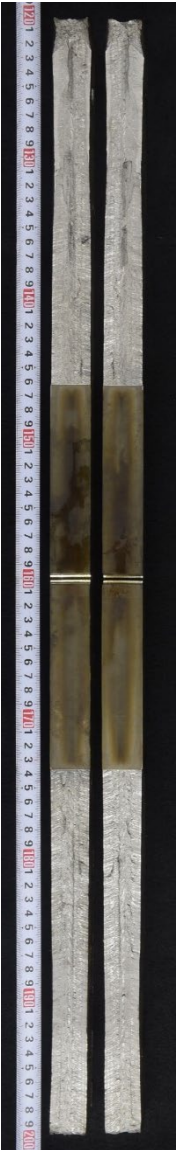
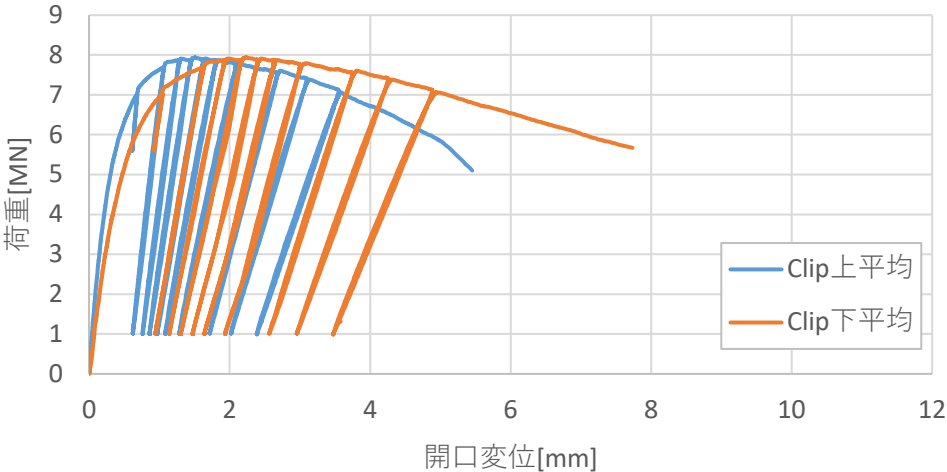
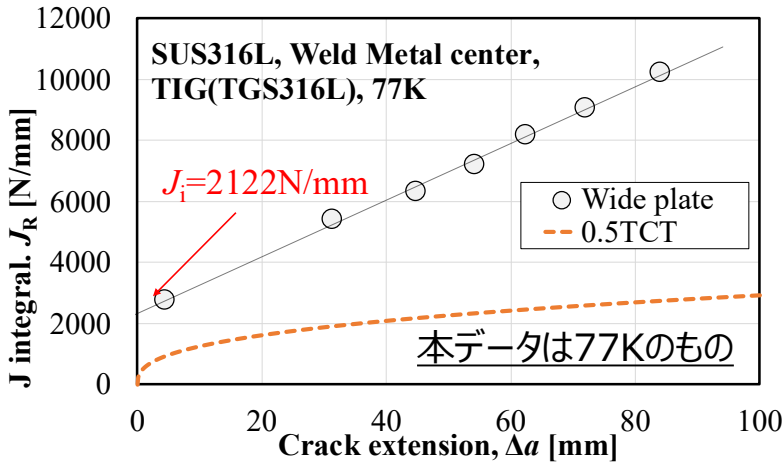
開発したソリッド解析方法はタンク全体解析の状況をうまく再現できている。また亀裂を導入した解析の結果発生する破壊駆動力をJ積分の形式で取得することができた

3. 研究開発成果について < 3. 実大規模溶接継手引張試験片による破壊靱性評価結果 >

20Kでの広幅引張試験成功

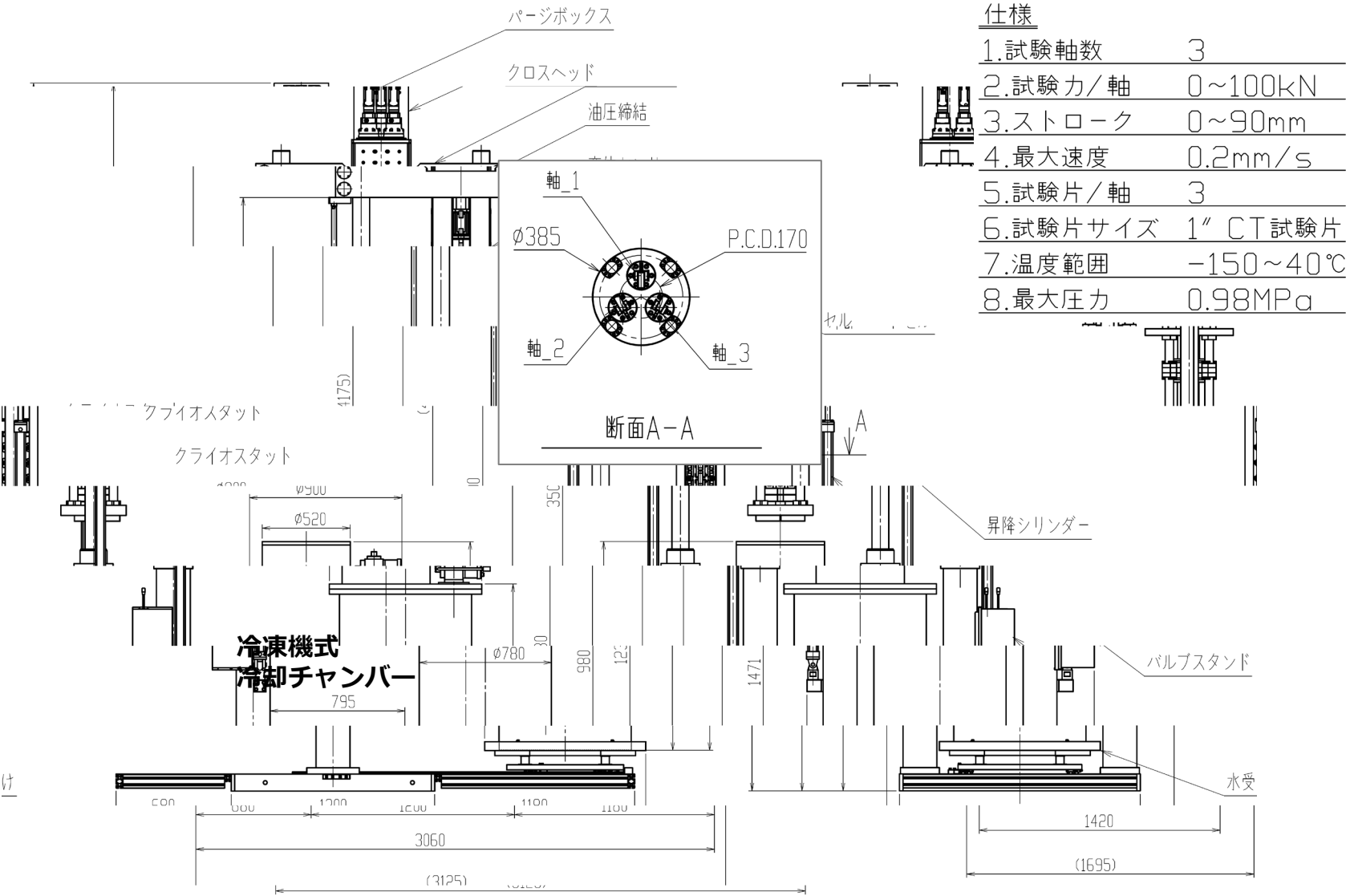


20Kでの広幅引張試験に世界で初めて成功。リアルな拘束状態で破壊靱性を取得できた。

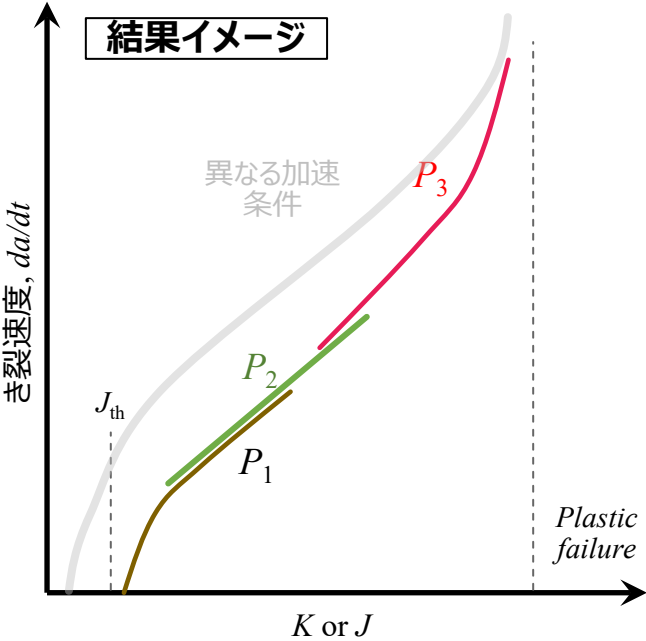


3. 研究開発成果について <破壊安全性評価と水素脆化特性評価計画>

SUS316Lの液水貯槽適用可否検討



日本製鉄(株)技術開発本部の水素供給経路及び防爆対応済み建屋に最大9試験片（同荷重3試験片）の载荷を可能にする「**3 軸サーボモータ式低温水素環境試験装置**」を製作中(~2025/03)。

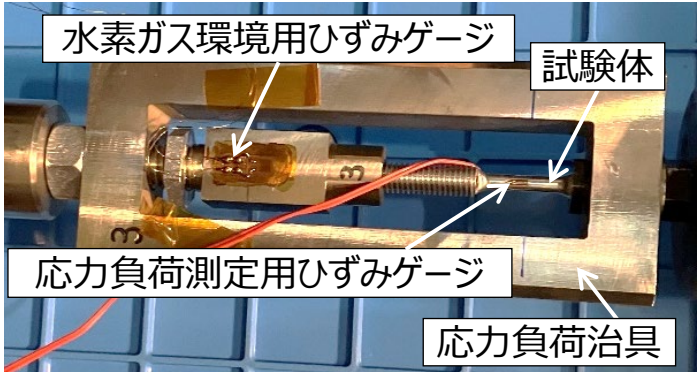


3. 研究開発成果について <鉄筋、PC鋼材の耐水素脆化特性評価試験>

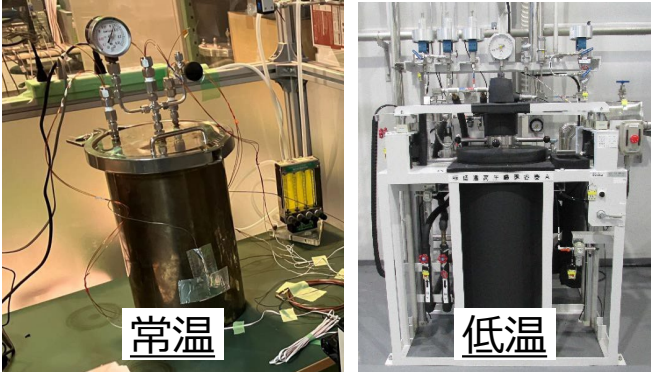
土木材料（鉄筋、PC鋼材）の液化水素に対する使用可否を判断

媒体：水素ガス
温度：常温、低温
試験方法：一定荷重を負荷した状態で水素ガス環境下に暴露
期間：10日間

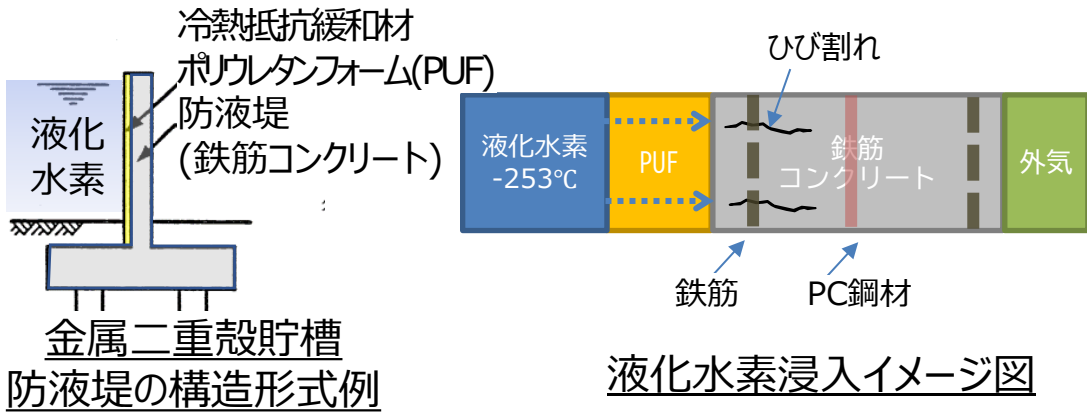
分類	規格・サイズ	応力負荷 (目標値)	結果	
			常温	200K
鉄筋	SD345 D13	0.9YS	破断無し	破断無し
		塑性変形	破断無し	-
PC鋼線	SWPR1AN 9mm	0.7TS	破断無し	破断無し
PC鋼棒	C種1号 9.2mm	0.7TS	破断無し	破断無し



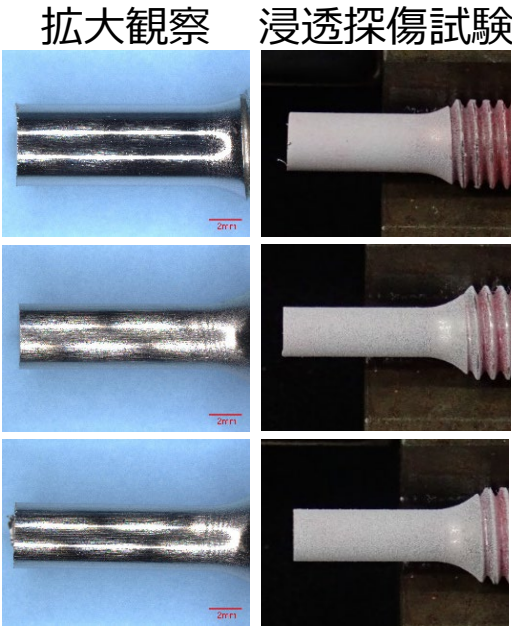
応力負荷状況



水素曝露試験状況



拡大観察、浸透探傷法を用いて入念に確認



曝露後の観察結果

3. 研究開発成果について <外部発表実績>

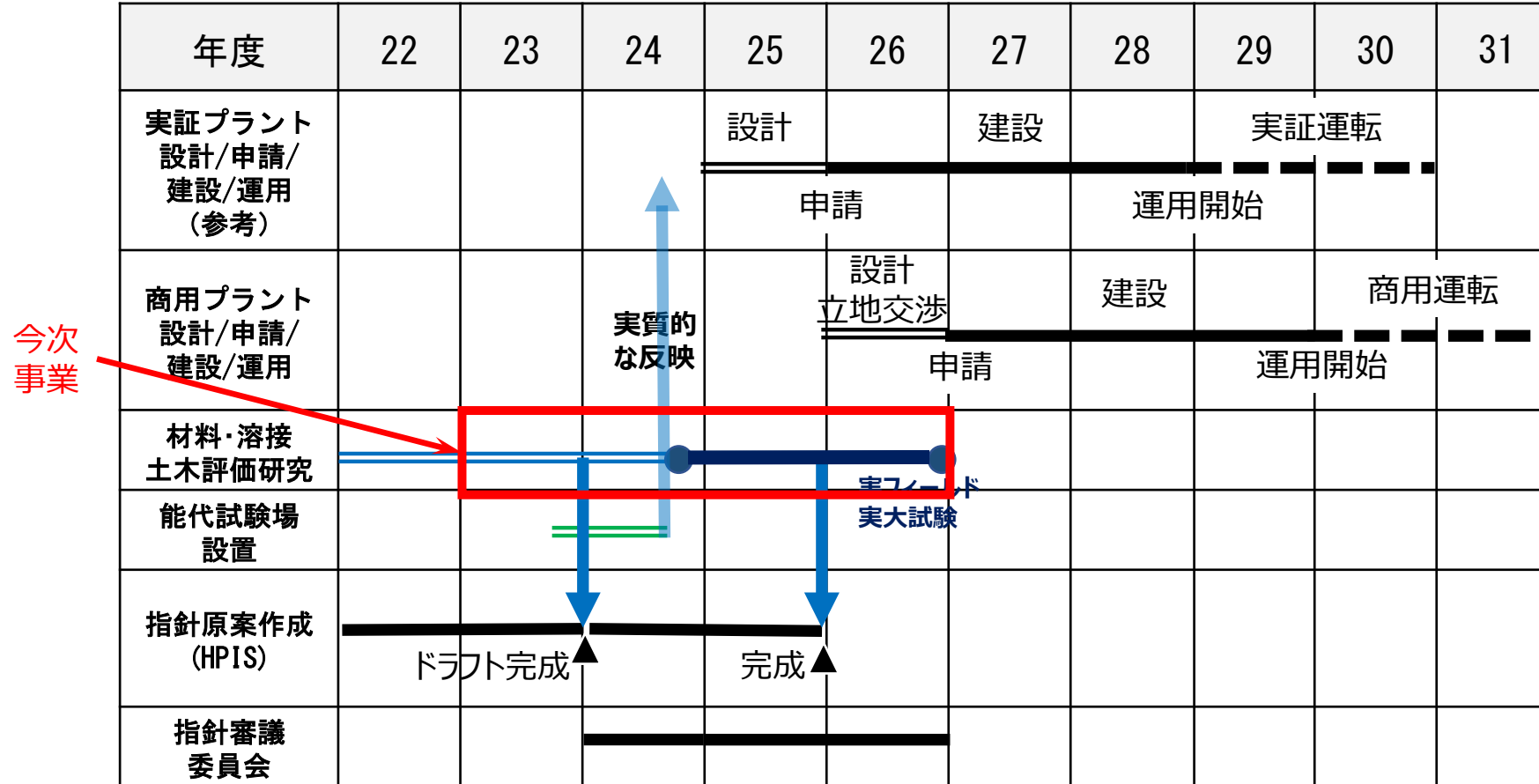
査読付き論文リスト

1	2024	8月	Chenjun Yu, Tomoya Kawabata, Taira Okita, & Shohei Uranaka (2024). First-Principles study of hydrogen solubility and embrittlement of Cr23C6 in nickel-based alloys. Computational Materials Science, 245, 113304, August 2024, https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2024.113304.
2	2024	12月	Rafael Magalhaes De Melo Freire, Shohei Uranaka, Eita Tochigi, Mitsuo Kimura, Tomoya Kawabata, Ductility Loss of a Metastable Austenitic Stainless Steel and Its TIG Weldment Due to Hydrogen Embrittlement at Low Temperatures Considering the Effect of Pre-strain at 4 K, ISIJ International, December 2024, Volume 64, Issue 14, Pages 2042-2050, https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2024-182.
3	2024	12月	Chenjun Yu, Tomoya Kawabata, Shigetoshi Kyouno, Xixian Li, Shohei Uranaka, & Daiki Maeda. (2024). Influence of welding methods on the microstructure of nickel-based weld metal for liquid hydrogen tanks. Journal of Materials Science, 59(48), December 2024, 22310-22326, https://doi.org/10.1007/s10853-024-10505-x.
4	2025	4月	Chenjun Yu, Taira Okita, Tomoya Kawabata, Shohei Uranaka, & Xixian Li, (2025). The Effects of Alloying Elements on Hydrogen-Affected Generalized Stacking Fault Energy and Dislocation Behavior in Nickel-Based Alloys. Materials Chemistry and Physics, April 2025, 130907, https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2025.130907.
5	2025	Under review	Ritsuki Morohoshi, Tomoya Kawabata “Experimental and HRR-based Analysis on the JR Value of Pre-strained SUS316L at Cryogenic Temperatures”, Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. (under review)
6	2025	Under review	Rafael Magalhaes de Melo Freire, Shohei Uranaka, Eita Tochigi, Mitsuo Kimura, Tomoya Kawabata, The role of martensite and delta ferrite in the austenitic stainless steel weldments, International Journal of Offshore and Polar Engineering, under review
7	2025	Under review	Rafael Magalhães de Melo Freire, Mitsuo Kimura, and Tomoya Kawabata, Theoretical model for hydrogen environment embrittlement in metastable austenitic stainless steel, Materials & Design, under review
8	2025	Under review	Rintaro Tsuda, Ritsuki Morohoshi, Noriyuki Tsuchida, Tomoya Kawabata, “Development of a new FEM module that accounts for the stress–field dependency of strain–induced martensite transformation via the secant method”, International Journal of Hydrogen, Under review.
9	2025	Under review	Yuji Ando, Ritsuki Morohoshi, Shohei Uranaka, and Tomoya Kawabata. Effect of TRIP on Crack Opening and Closure Behavior of Low Cycle Fatigue in Metastable Austenitic Stainless Steel, International Journal of Offshore and Polar Engineering, under review

特許出願	論文発表	外部発表	受賞等
0 (1)	4 (5)	44	3

() : 準備中, 論文は査読中

4. 今後の見通しについて



本事業において大型液化水素貯槽候補材の詳細特性評価および実大試験の準備を実施できた。さらに必要特性の見極めてを経て技術指針策定を目指す。策定する指針は2030年に政府ロードマップに従って実現すべき貯槽製作の技術的基礎となるだろう。

今後も液化水素貯槽の技術基盤確立のために尽力し、地球環境問題に貢献するとともに、我が国の今後の技術資産形成の一翼を担いたい。