

発表No.B2-14

水素社会構築技術開発事業／大規模水素エネルギー利用
技術開発／液化水素の輸送貯蔵機器大型化
および受入基地機器に関する開発

川崎重工業(株)

TBグローバルテクノロジーズ(株)

(株)IHI回転機械エンジニアリング

(株)荏原製作所

委託先：JAXA、(株)IHI

2022年7月14日

連絡先：

川崎重工業(株) <https://www.khi.co.jp/>

TBグローバルテクノロジーズ(株) <https://www.tbgttech.co.jp/>

(株)IHI回転機械エンジニアリング <https://www.ihico.jp/irm/>

(株)荏原製作所 <https://www.ebara.co.jp/>

事業概要

1. 期間

開始 : 2019年7月

終了 : 2023年3月

2. 最終目標

①大型輸送・貯蔵技術の開発

A) 大型貯蔵容器の開発

- ・ 蒸発率 (Boil Off Rate: BOR) が0.26%/日となる5万m³級の貯蔵容器の基本構造を確立させる。

B) 海上輸送用大型液化水素タンクの開発

- ・ 蒸発率が0.4%/日となる4万m³級タンクの基本構造、設計技術などを確立させる。

②商用ローディングアームの開発

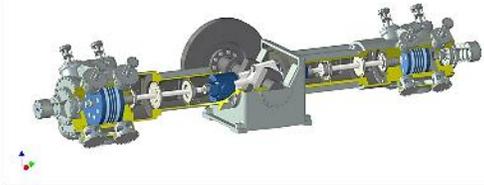
- ・ 大口径緊急離脱機構、大口径船陸継手について試作機を製作して液化水素での試験を行い、それぞれ切り離し時の安全性、安全に分離できる昇温特性を把握する。

③低温水素ガス圧縮機の開発

- ・ 試作機を製作し、圧縮機表面に液化空気が発生しないこと、関連部品の破損や異常摩耗がないことを確認する。
- ・ 商用機の性能予測技術の確立

④液化水素昇圧ポンプの開発

- ・ 軸スラストバランス機構、ポンプ材料の確立
- ・ ポンプ設計技術の確立



3.成果・進捗概要

①大型輸送・貯蔵技術の開発

A) 大型貯蔵容器の開発

- 構造材料の低温データを取得し、適用可能性の目途を得た。

B) 海上輸送用大型液化水素タンクの開発

- 試験タンクを製作・完成させて、タンクの製作性・施工性を確認した。タンクシステムのオペレーションを実証して、オペレーション手法およびシミュレーション予測技術を構築した。低温性能試験を実施して、大型液化水素タンクの設計データを取得した。
- 蒸発率が**0.4%/日**となる**4万m³級**タンクの基本構造、設計技術などを確立した。

②商用ローディングアームの開発

A) 大口径緊急離脱機構

- 理論外部流出量は目標値以下の**5ℓ**程度となった。試作機を製作してテストしたが、低温強度試験でリークがあったため改善が必要となり今後検討する。低温切り離し試験では正常な切り離しが行われ切り離し性能が確認された。製品化に向けては課題が残ったが、今回の試験を通じて技術的価値の高い内容が得られ、今後の製品開発に大きな成果となった。

B) 大口径船陸継手

- 重量は目標値の**1ton**以下に対し、**500Kg**程度になり目標を達成した。試作機を製作してテストを行い合格し製品化への目途がついた。

3.成果・進捗概要

③低温水素ガス圧縮機の開発

- A) 液空生成に対し安全性を確保する構造の開発
 - ・ 試作機を製作し、低温水素ガスを用いた実ガス試験にて圧縮機外表面に液空を発生させない真空容器構造を実証した。
- B) シールガスの液化を防ぐ軸シール構造および摺動部材の開発
 - ・ 同実ガス試験にて窒素シールガスが液化しない軸シール構造を実証し、商用機の摺動部材の目途付けをした。
- C) 商用機の設計技術および性能評価技術の開発
 - ・ 2022年度に改良を実施した上で再度実ガス試験を実施し、有効データを取得、解析にフィードバックして、商用の真空容器シリンダの性能予測技術を確立した。

④液化水素昇圧ポンプの開発

- A) 小型試作機の液化水素運転試験による検証
小型試作機の液化水素運転試験をJAXA能代ロケット実験にて実施し、ポンプ性能及び機能に関する良好な結果が得られ、液化水素での貴重なポンプ運転実績とそのノウハウを蓄積できた。
- B) 液化水素昇圧ポンプの設計技術の確立
液化水素運転試験結果から液化水素昇圧ポンプの設計技術を確立できた。

1. 事業の位置付け・必要性

液化水素サプライチェーンの商用化に向けた一連の事業

2020年

パイロット実証：褐炭からの水素製造および長距離大量海上輸送の技術・安全・運用上の成立性を実証



~2022年度

本事業

：商用化実証および商用化を実現するために必要な機器/大型化開発



2020年代半ば
商用化実証

：機器サイズは商用規模（大型化）としつつ、プラント構成はミニマム系列として経済性を含めた商用化の成立性を見極める実証事業



2030年
商用化

：設備導入から運用に至るまで経済的に自立し利益を生む実ビジネス

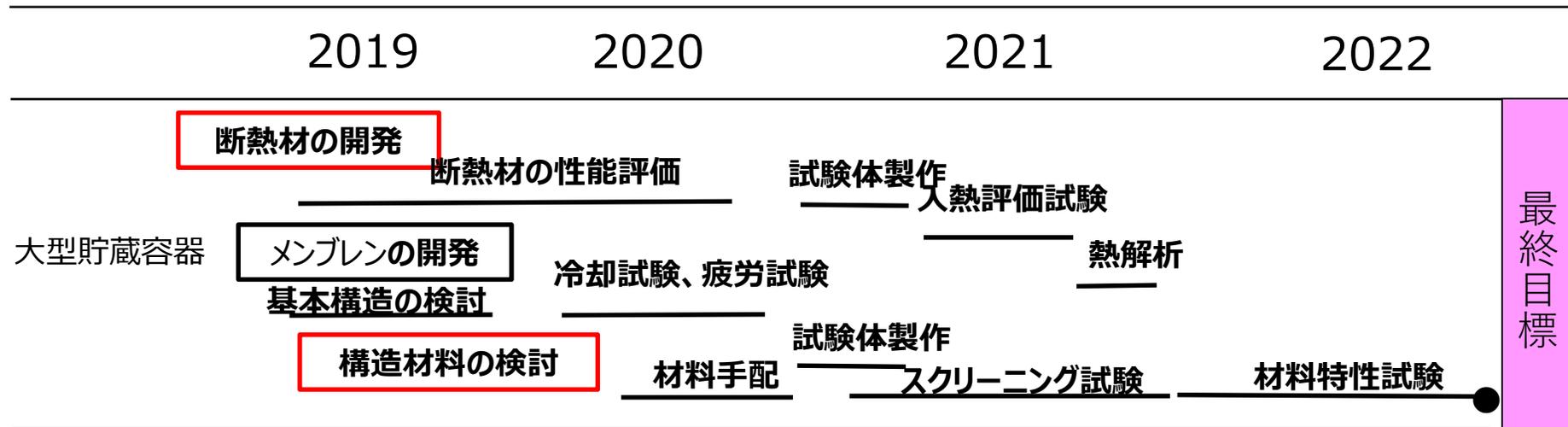


2. 研究開発マネジメントについて

①大型輸送・貯蔵技術の開発

A) 大型貯蔵容器の開発

- 研究開発の目標設定
 - 0.26%/dを達成する断熱構造確立
 - 構造材料の特性試験による適用判断
- 研究開発のスケジュール



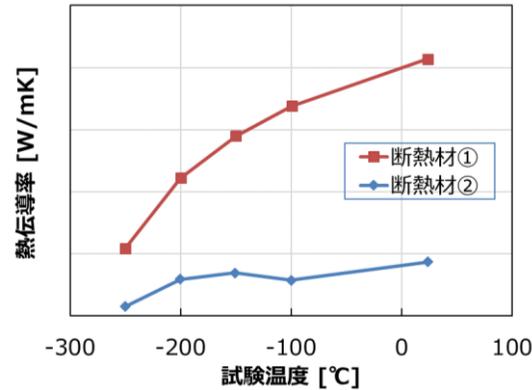
3. 研究開発成果について

- 研究開発の成果と意義

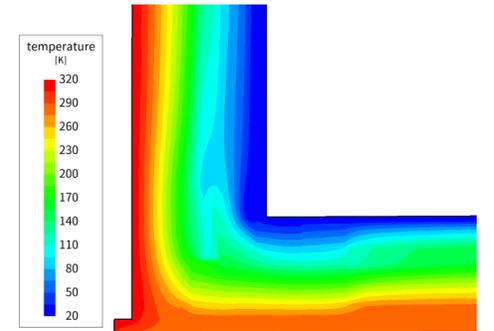
商用5万m³クラスの貯蔵容器で断熱性能0.26%/dを達成する断熱構造を確立した。
 構造材料の低温データを取得し、適用可能性の目途を得た。



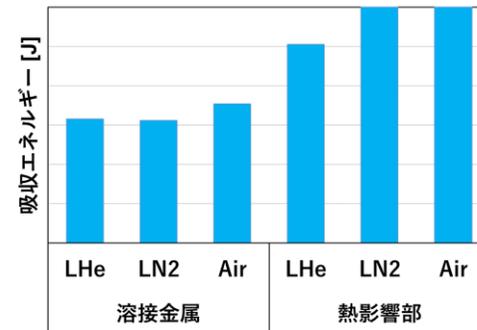
平底円筒容器 概念図



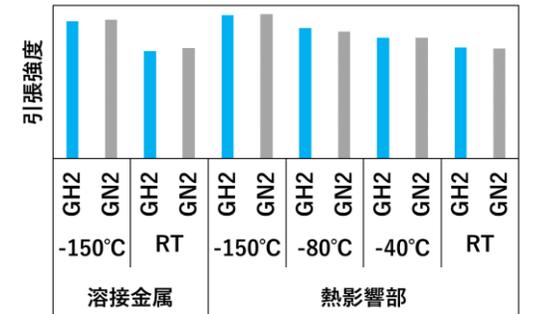
断熱材の極低温試験結果



断熱構造の熱流動解析結果



構造材料の極低温衝撃試験結果



構造材料の各ガス雰囲気でのSSRT*試験結果

*Slow Strain Rate Test(低歪み速度試験)

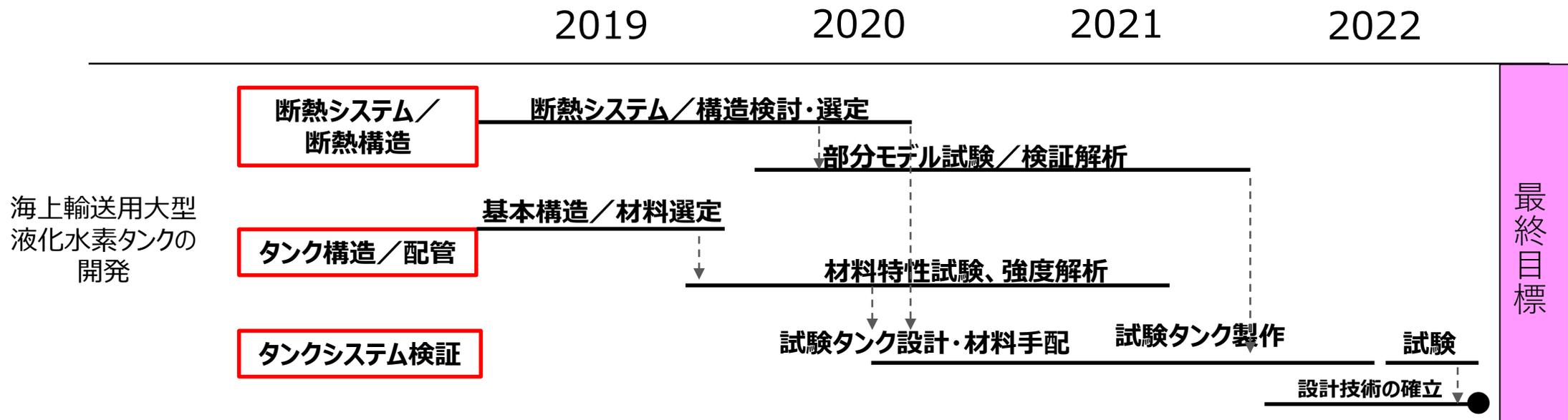
- 特許や論文、学会発表、広報等の取り組み
 - 特許 : 2022年度 1件、2021年度 2件
 - 論文 : 2021年度 当社技報にて紹介
 - 対外発表 : 2022年3月 FC-EXPOで発表

2. 研究開発マネジメントについて

①大型輸送・貯蔵技術の開発

B) 海上輸送用大型液化水素タンクの開発

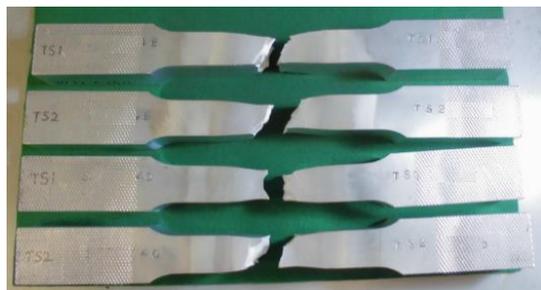
- 研究開発の目標設定
 - 断熱構造の部分モデル試験などを実施して、基本設計データを取得
 - 試験タンクを製作し、製造性確認、設計データの取得、解析技術の構築、オペレーション手法の構築を行う。
- 研究開発のスケジュール



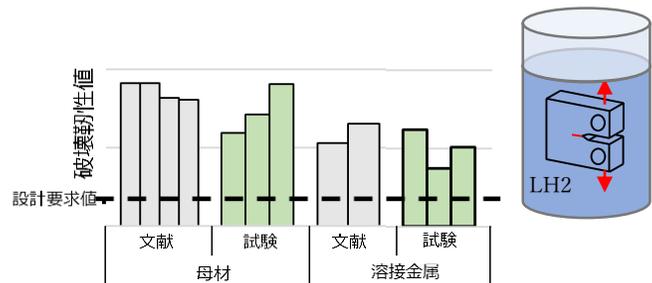
3. 研究開発成果について

・研究開発の成果と意義

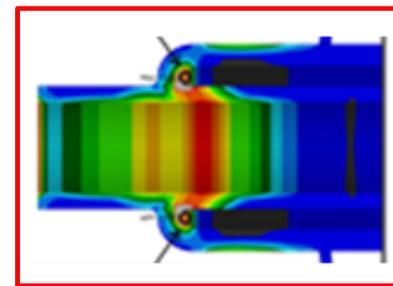
材料特性試験・強度解析、断熱構造の部分モデル試験・検証解析を実施して、基本設計データを取得



溶接継手引張試験

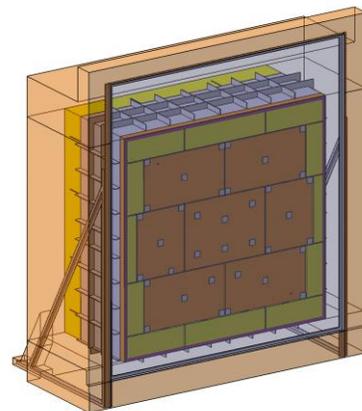
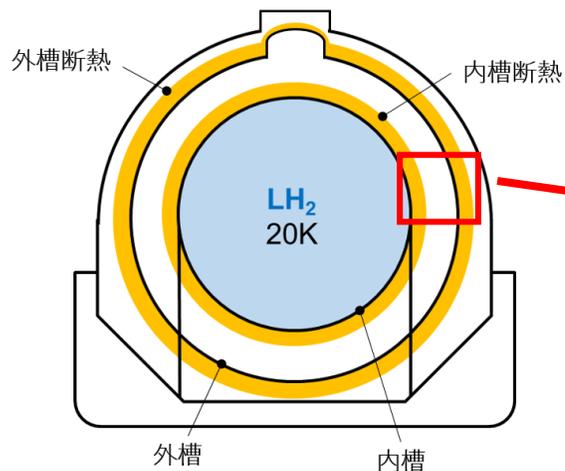


破壊靱性試験

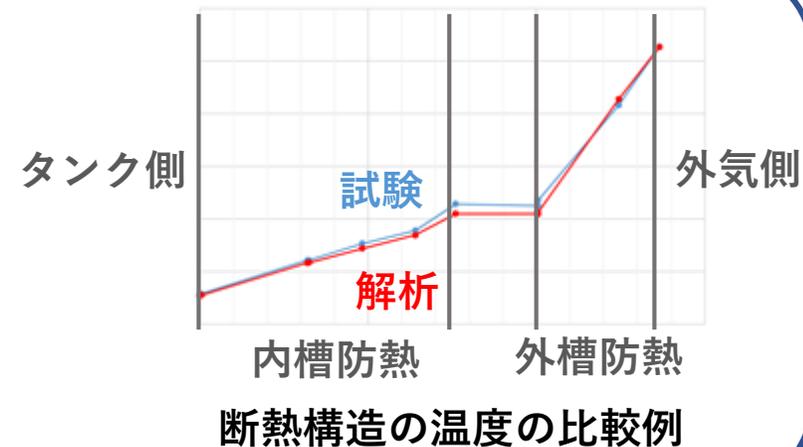


配管接続部の強度解析

材料特性試験、強度解析



部分モデル試験



3. 研究開発成果について

- 研究開発の成果と意義

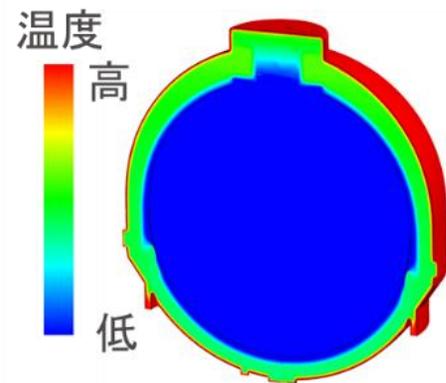
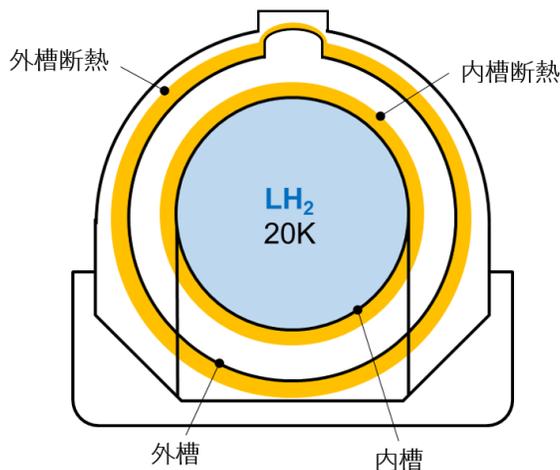
蒸発率が0.4%/日となる4万m³級タンクの基本構造、設計技術などを確立した。

- 特許や論文、学会発表、広報等の取り組み

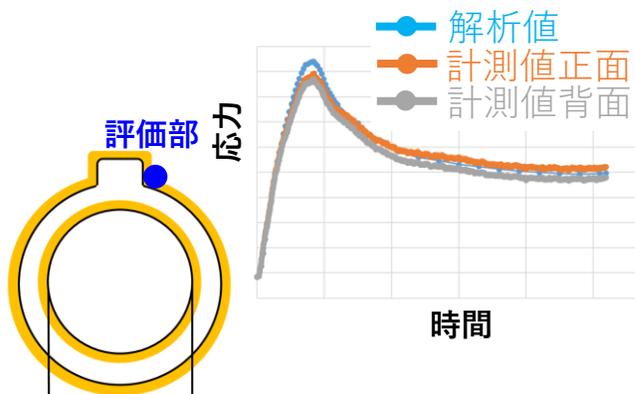
特許出願：15件、学会発表：1件



タンクの製造技術構築



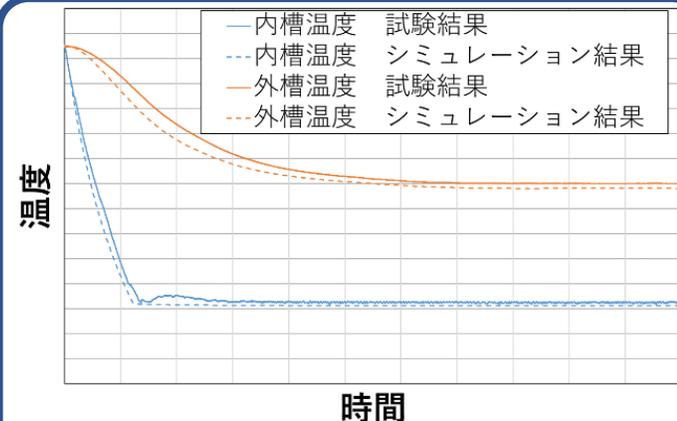
熱流動解析技術構築



構造解析技術構築



試験タンク



オペレーション予測技術構築

3. 研究開発成果について

■ 研究開発の成果と意義

- 2021年4月に、日本海事協会から貨物格納設備（CCS）の設計基本承認（AiP）を取得
- 2022年4月に、日本海事協会から160,000m³型液化水素運搬船の基本設計承認（AiP）を取得



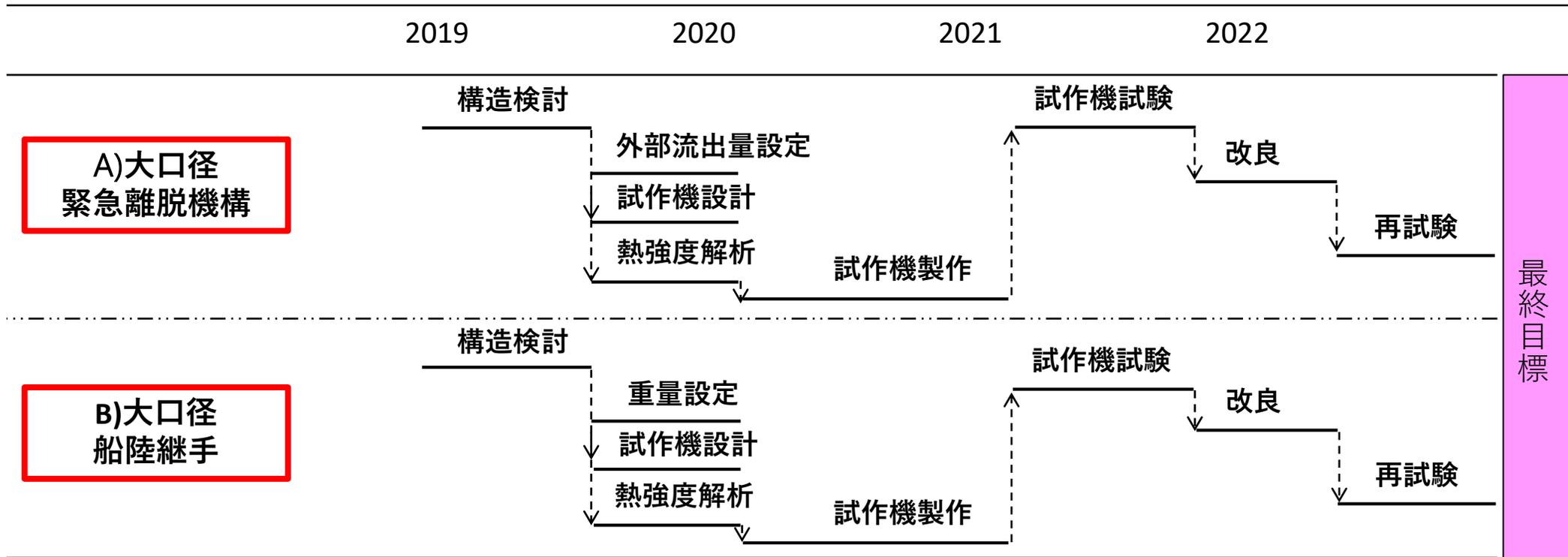
2. 研究開発マネジメントについて

①商用ローディングアーム

・ 研究開発の目標設定

- A) 大口径緊急離脱機構 : 切離時の外部流出量を125L以下とする。
試作機を製作して、所定の試験に合格する。
- B) 大口径船陸継手 : 重量が1ton以下で2~3人で操作可能な構造とする。
試作機を製作して、所定の試験に合格する。

・ 研究開発のスケジュール

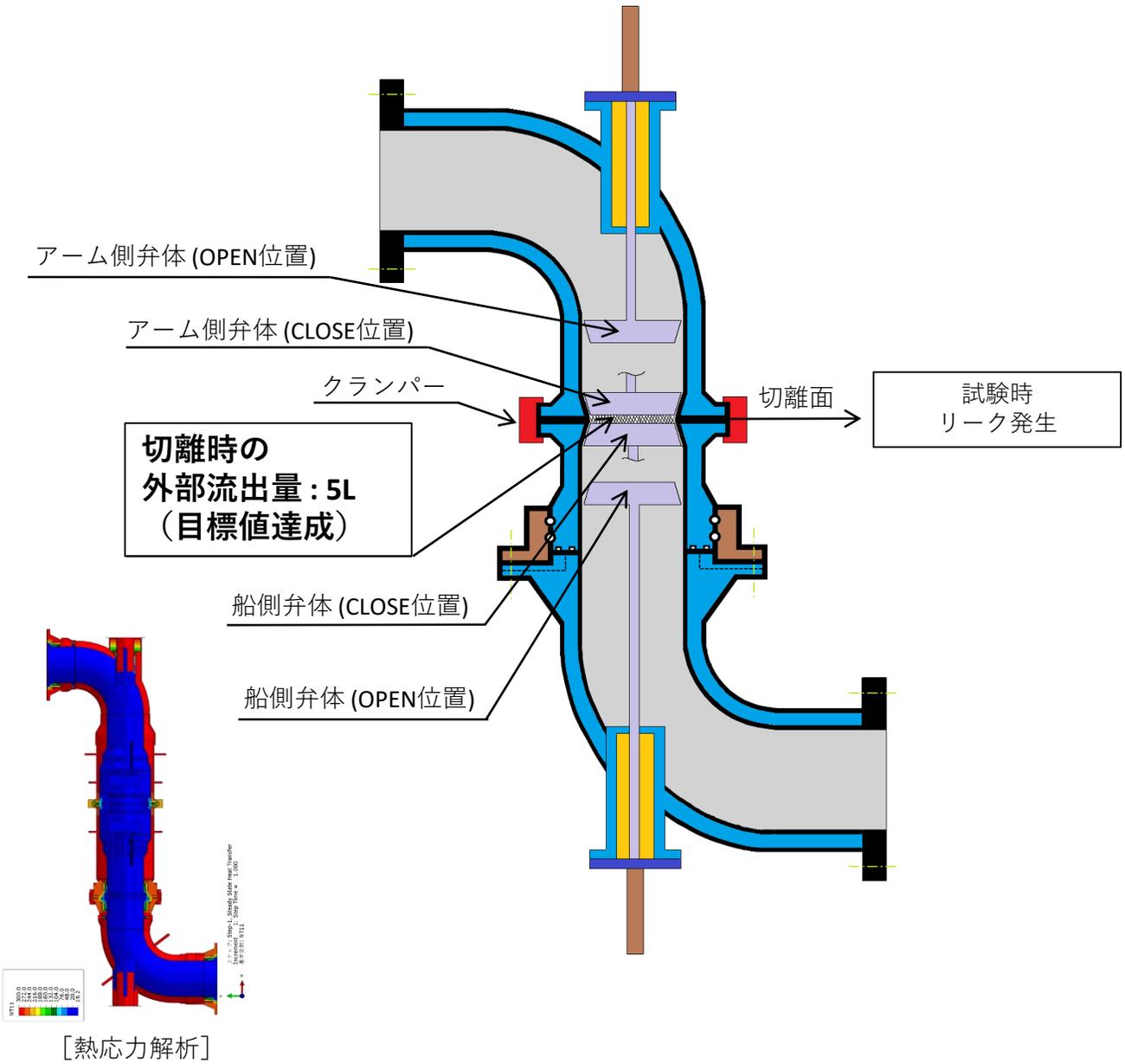


3. 研究開発成果について

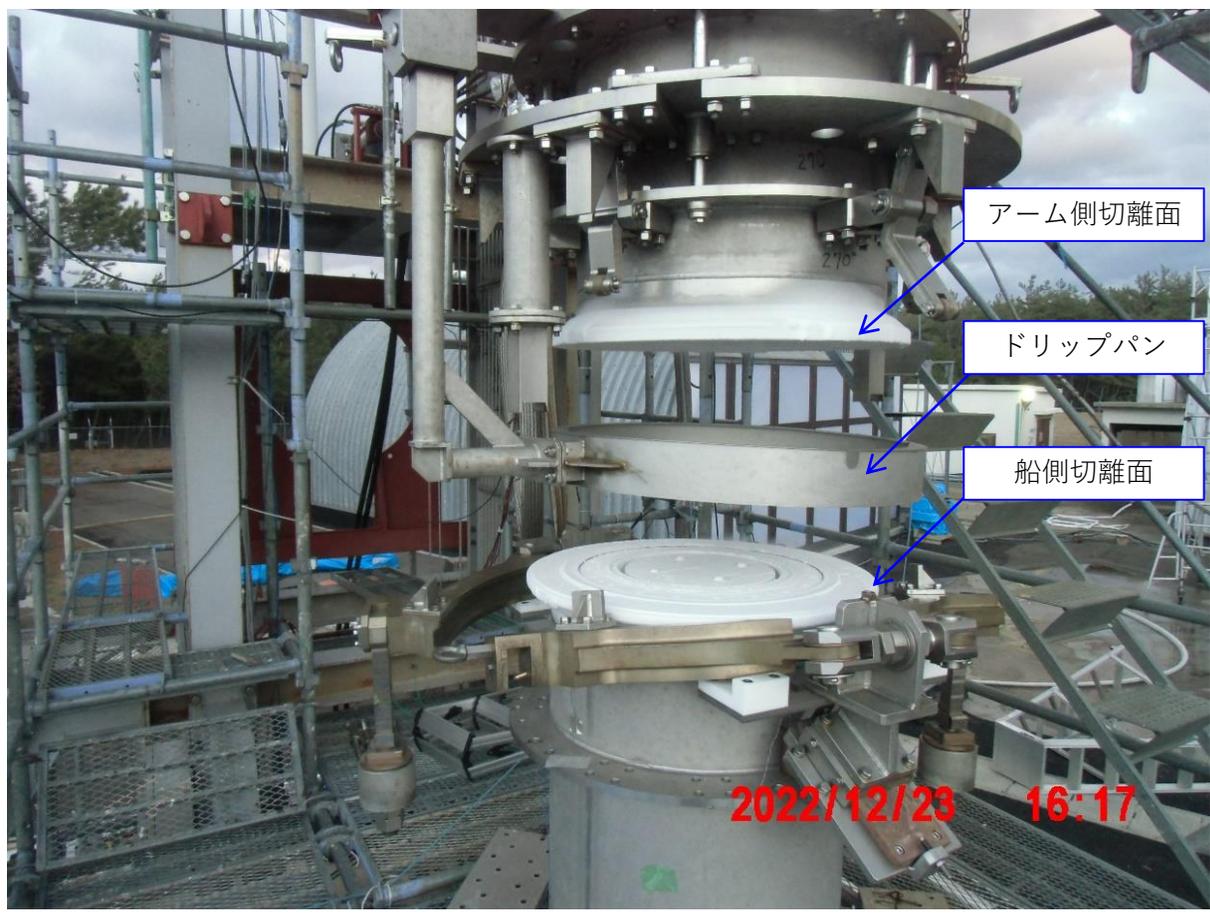
A) 大口径緊急離脱機構

- 研究開発の成果と意義
切離時の外部流出量は、アーム側弁体と船側弁体が切離前にCLOSEする構造にした為、5Lとなり目標値を達成した。

- 特許や論文、学会発表、広報等の取り組み
特許 : 特許1件 (KHI殿と共同出願)
論文 : なし
対外発表 : なし



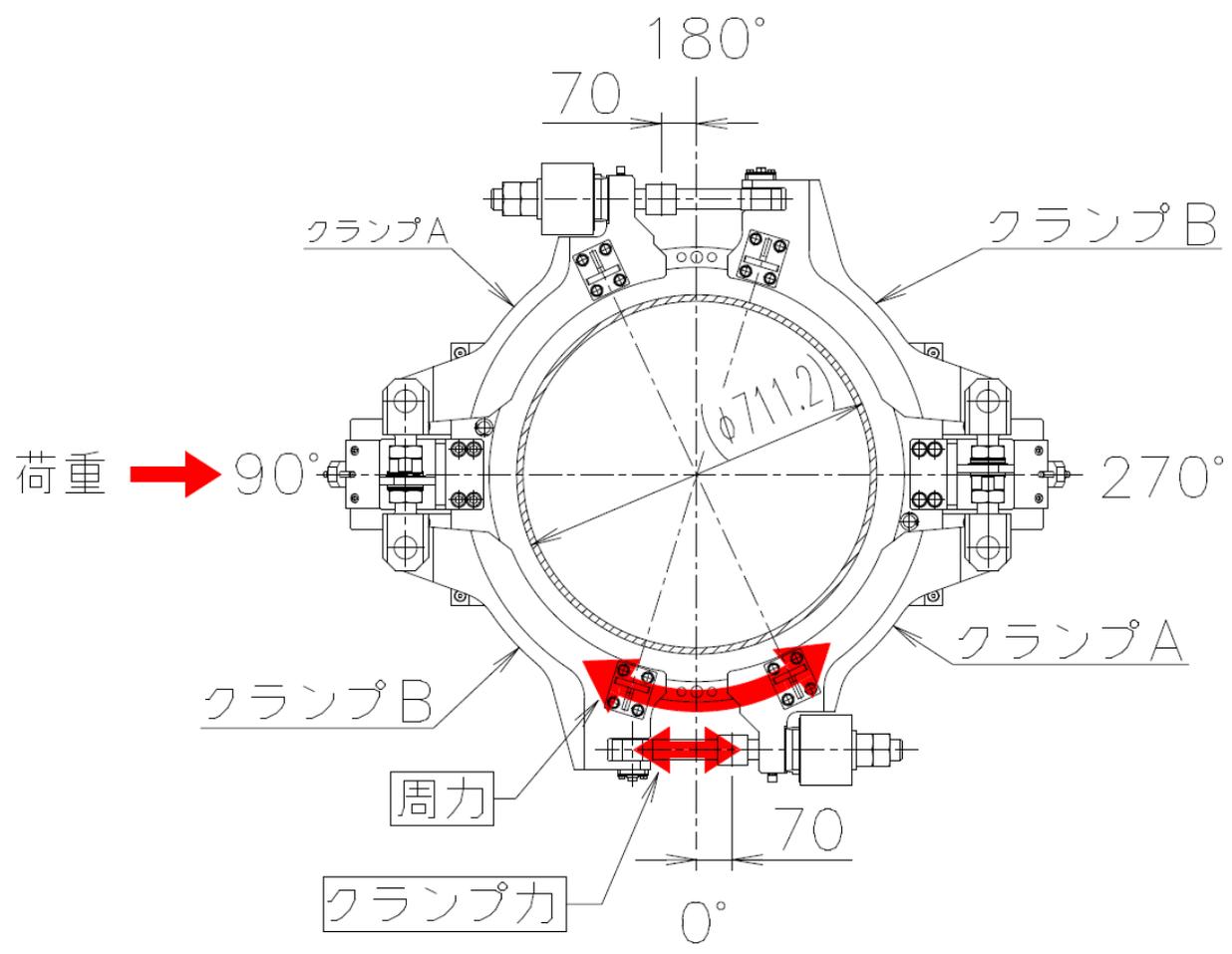
3. 研究開発成果について



切離後の状況
CIMG0079

低温切離試験では、切離は設計時間内に正常に動作して、切離性能が確認された。

低温切離試験結果



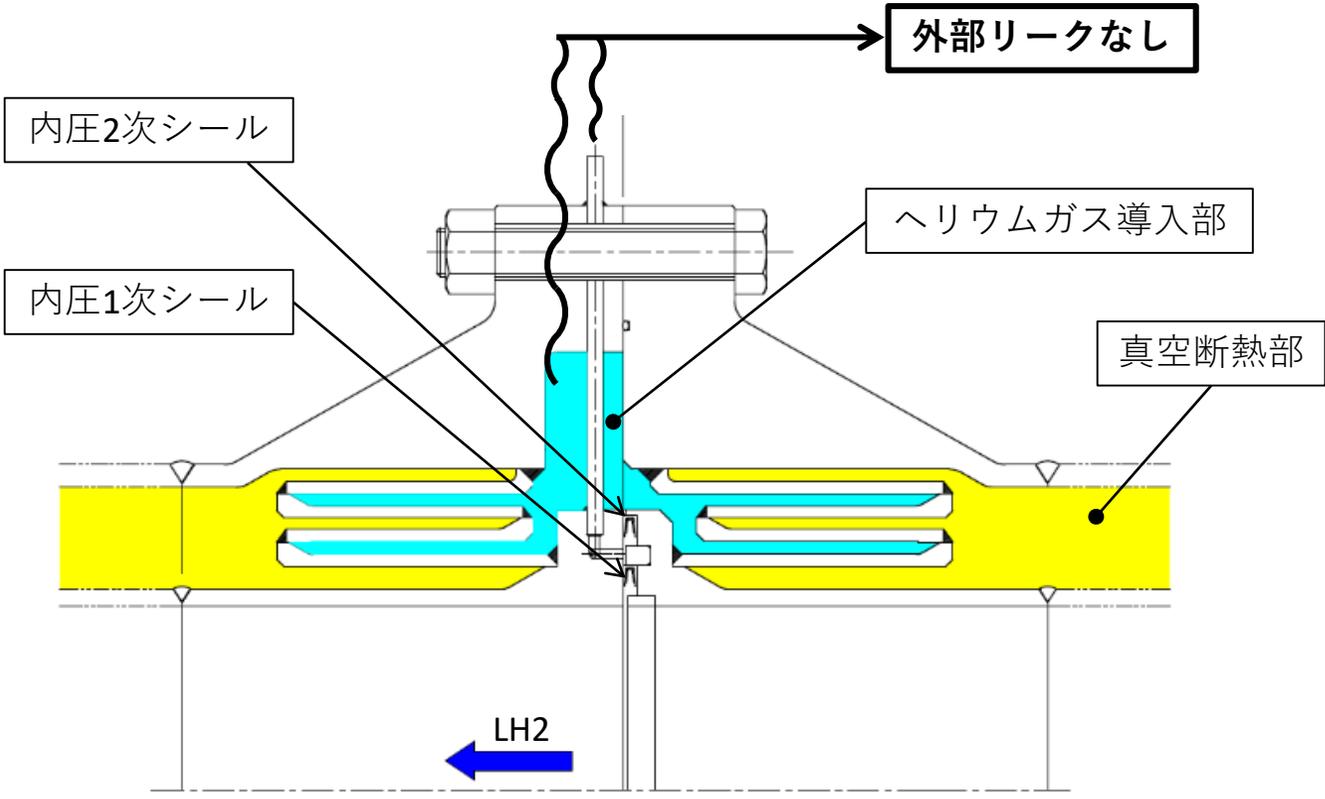
低温強度試験において、切離面からリークが発生し、今後改造を検討する。

低温強度試験検討

3. 研究開発成果について

B) 大口径船陸継手

- 研究開発の成果の意義
重量は500Kg以下となり、目標を達成した。
試作機を製作して試験を実施した。
低温強度テストにおいて、1次シール及び2次シールからのリークはなく、合格した。



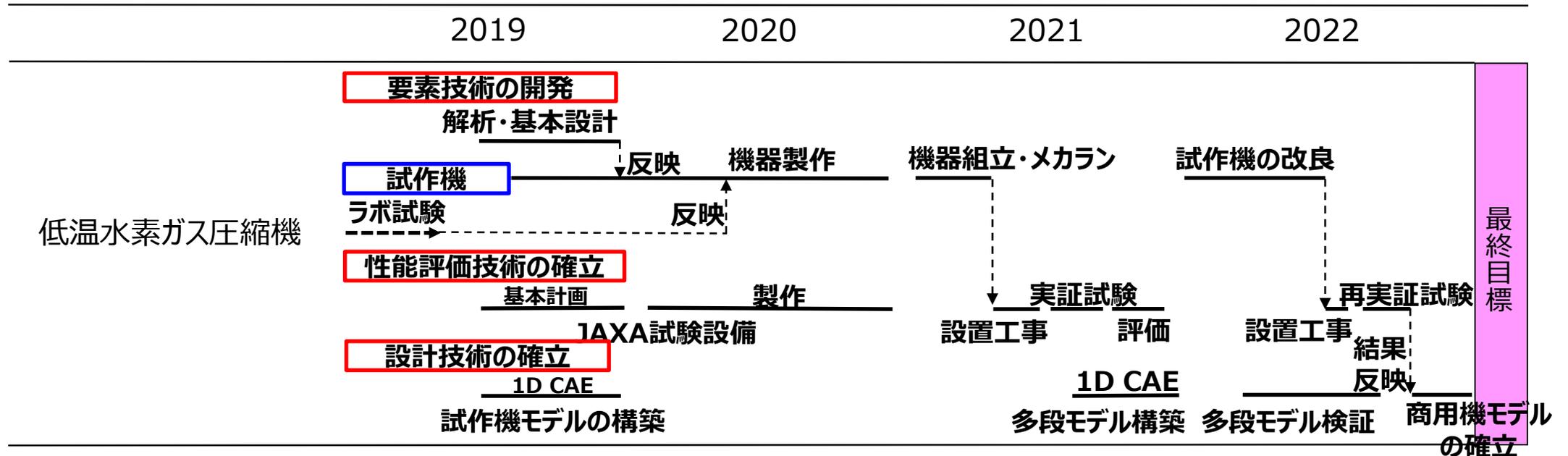
- 特許/論文 : なし
- 対外発表 : なし

低温テスト状況

2. 研究開発マネジメントについて

③低温水素ガス圧縮機の開発

- 研究開発の目標設定
 - 液空を発生させないシリンダ／真空容器構造の確立（表面温度; -183°C 以上）
 - 熱変位を吸収するサポート構造の確立（各部の損傷無し、振幅; $250\mu\text{m p-p}$ 以下）
 - シールガスが液化しない軸シール構造の確立・摺動部材の目途付け（摩耗量; 摩耗代の $1/3$ 以下）
 - 低温水素ガス温度域での運転データ計測技術・性能評価技術の確立
 - 1D CAEを用いた商用機の吐出温度・性能予測技術の確立（期待精度; 温度 $\pm 15^{\circ}\text{C}$, 流量 $\pm 10\%$ ）
- 研究開発のスケジュール



3. 研究開発成果について

- 研究開発の成果と意義

- ▶ 低温水素ガスを用いた試作機の実ガス試験にて圧縮機外表面に液空が発生することなく、最低表面温度は -30°C 以上(解析結果と概ね一致)で、振動は $10\mu\text{m}$ 程度で損傷なし。
- ▶ 圧縮機内での窒素シールガスの液化、軸シールの異常摩耗がないことを目視にて確認した。

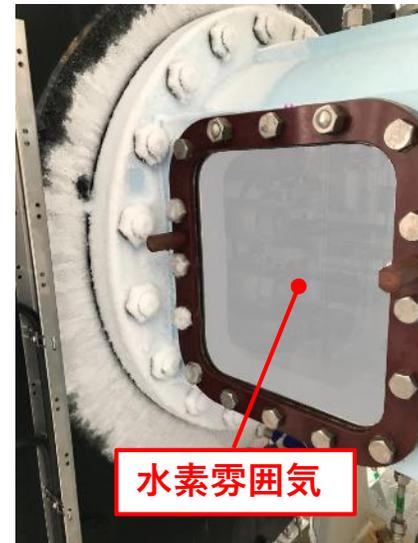
意義：貯蔵タンクからの蒸発ガスをプレヒーティングすることなく、低温のまま吸入可能な安全性を有するシリンダ／真空容器構造を確立した。



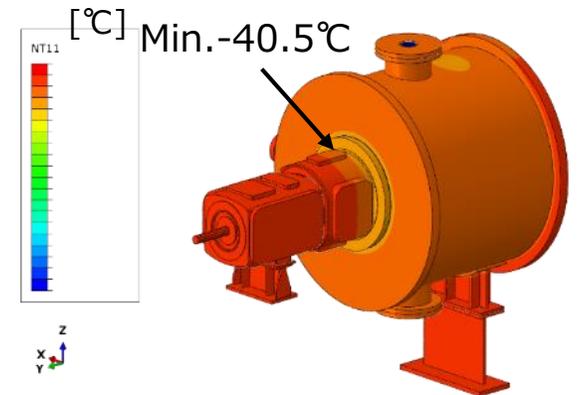
試作機外観（真空容器側）



試作機外観（圧縮機フレーム側）



最低表面温度部（着霜は想定内）



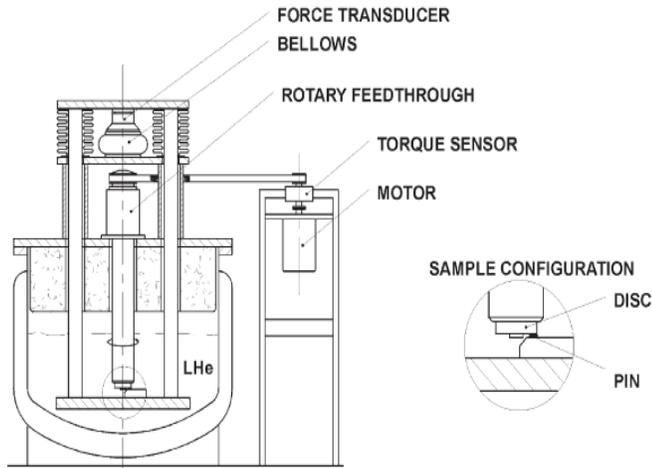
伝熱解析による予測温度

3. 研究開発成果について

- 研究開発の成果と意義

- ラボ試験結果から選定した2種類の摺動部材にて実ガス運転を実施し、商用機で使用可能な材料の目途を付けた。
- 既存材（PTFEベース）の方が良好で摩耗量は摩耗代の約1.5%（通常の初期摩耗レベル）
2022FYの再試験においても既存材にて良好な摺動特性の再現を確認した。

意義：商用機においても信頼性のある長時間連続運転が期待できる。



[出典] : Tribology International 34(2001)225-230 “Low temperature tribometers and the behavior of ADLC coatings in cryogenic environment”

| 項目 | 単位 | 仕様 |
|---------|--------------------|------------------------|
| 圧縮機型式 | - | 1段1筒往復動圧縮機 |
| ストローク | mm | 200 |
| シリンダ径 | mm | 155⇒175(2022FY) |
| 回転数 | rpm | 360 |
| モータ定格出力 | kW | 55 |
| 定格流量 | Nm ³ /h | 550 |
| 吸入圧力 | MPa | 0.05 |
| 吸入温度 | ℃ | -240, -220, -200, -180 |
| 吐出圧力 | MPa | 0.55 |
| 予想吐出温度 | ℃ | -200~-140 |

試作機的主要仕様



ライダーリング ピストンと摺動部材

| 状態 | 既存材 (PTFEベース) | 新素材 (PTFEベース) |
|---------------|------------------|------------------|
| 運転前隙間 [mm] | 3.75 | 3.70 |
| 運転後隙間 [mm] | 3.70 | 2.65 |

2種類のリング材でのピストン下部スキマ
(運転前後の変化量がライダーリングの摩耗量を意味する)

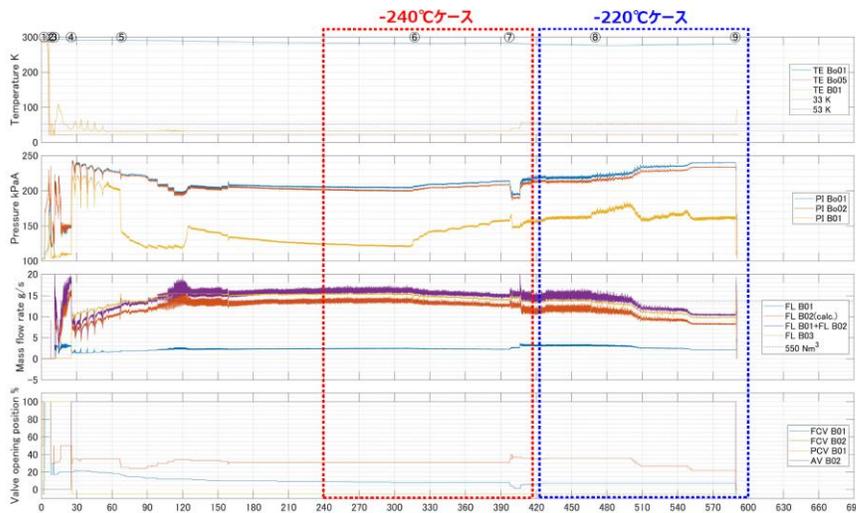
低温水素ガス雰囲気での摩耗試験

3. 研究開発成果について

- 研究開発の成果と意義

- 2021FYの試作機に対して、2022FYはシリンダを早期に冷却する改善策と内部漏れ低減の改良を実施した上で、各吸入ガス温度における流量と吐出温度の有効データを取得した。
- 多段1D CAEモデルの構築では、各段吐出温度の精度に課題を残したが、単段の真空容器シリンダの1D CAEモデルについては、試験データをフィードバックし、精度ある解析手法を確立した。

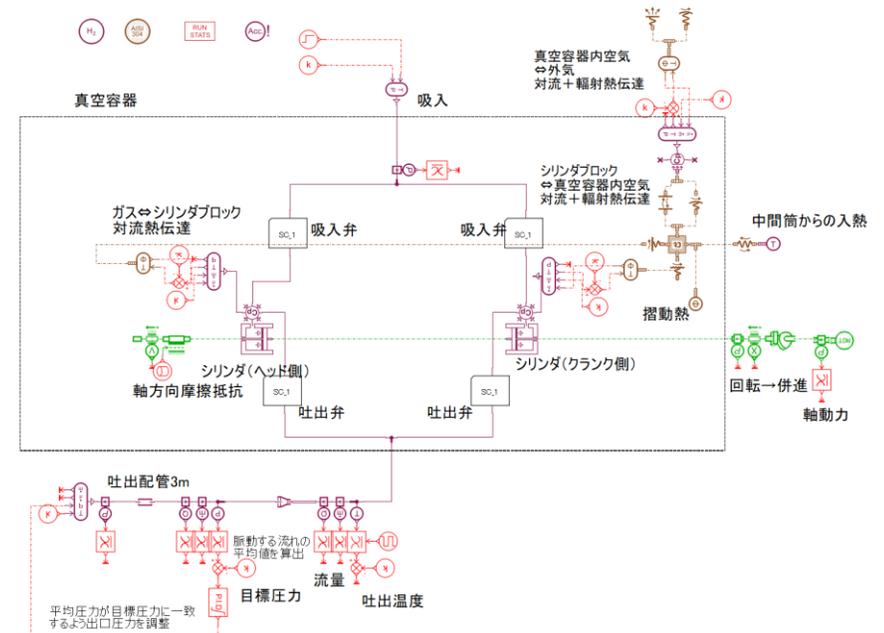
意義：直接吸入・圧縮する圧縮機の性能面での優位性が実証され、最も重要となる性能（流量、1段吐出温度）に関し、精度ある商用機の性能予測が可能になった。



各吸入温度での計測データ

| 吸入温度 | 単位 | 実測値との誤差 |
|--------|--------|---------|
| -240°C | 流量 | -3.5 % |
| | 吐出ガス温度 | -5.2 °C |
| -220°C | 流量 | 1.9 % |
| | 吐出ガス温度 | -2.8 °C |
| -200°C | 流量 | 1.2 % |
| | 吐出ガス温度 | 0.5 °C |

LH2単段 1D CAEモデルの精度検証



低温水素ガス圧縮機 試作機の改良1D CAEモデル 19

- 特許や論文、学会発表、広報等の取り組み
 特許/論文 : なし、対外発表 : なし

2. 研究開発マネジメントについて

④ 液化水素昇圧ポンプの開発

- 研究開発の目標設定(2022年度目標)
 - ▶ 小型試作機の液化水素運転試験によるポンプ性能/機能の評価、分析
 - ▶ 液化水素昇圧ポンプの設計技術の確立
- 研究開発のスケジュール



3. 研究開発成果について

④ 液化水素昇圧ポンプの開発

- 研究開発の成果と意義（～2021年度）

(1) 軸スラストバランス機構の設計

新型構造を設計し、運転範囲にて軸スラストがバランスすることを計算上、確認

(2) ポンプ材料の選定

材料試験により材料特性を評価し、液体水素環境下で使用可能なポンプ材料を選定

低温脆化特性の評価

3種類の温度条件下で試験を実施
(室温、77K、4K)

水素脆化特性の評価

試験片に水素チャージを施し、試験を実施

(3) 液化水素でのポンプ性能/機能確認

- 上記成果を反映した小型試作機を製作
- 液化水素運転試験設備を設計、製作 (JAXA)

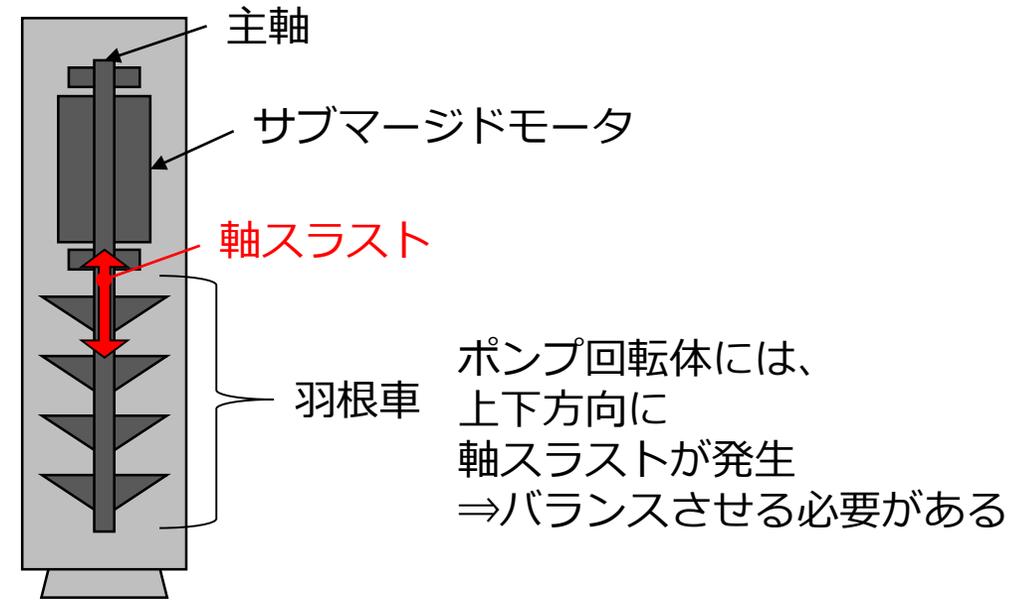


Fig. LH2昇圧ポンプ概念図



Fig. 極低温(4K)試験装置の外観
(写真提供；(株)コベルコ科研)

3. 研究開発成果について

④ 液化水素昇圧ポンプの開発

- 研究開発の成果と意義（2022年度）

▶ 小型試作機の液化水素運転試験によるポンプ性能/機能の評価、分析

- 2020年度までの成果（新型軸スラストバランス機構および液化水素用ポンプ材料）を反映した小型試作機の液化水素運転試験をJAXA能代ロケット実験にて実施し、ポンプ性能・機能を評価した。
- ポンプの揚程、動力、効率や吸込性能といった主要性能が所定の値を満足する良好な結果が得られた(下記グラフ)。
- 新型スラストバランス機構が正常に機能することや試験後の分解検査で材料・構造の健全性が確認できた。

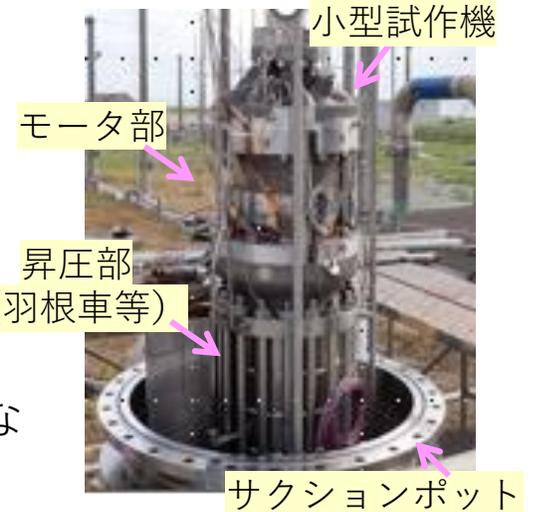


Fig. 据付中の小型試作機

▶ 液化水素昇圧ポンプの設計技術の確立

- 小型試作機の液化水素試験結果から液化水素ポンプの性能設計方法が妥当であることが確認できた。
- 軸スラストバランス機構も正常に機能したことから、当該部の設計方法の妥当性が確認できた。
- 以上より、液化水素昇圧ポンプの設計技術が確立できた。
- さらに、液化水素での貴重なポンプ運転実績とそのノウハウを蓄積できた。
- これら設計技術、運転実績およびノウハウを商用クラスのポンプに適用し、近い将来の水素社会の実現に貢献していきたい。

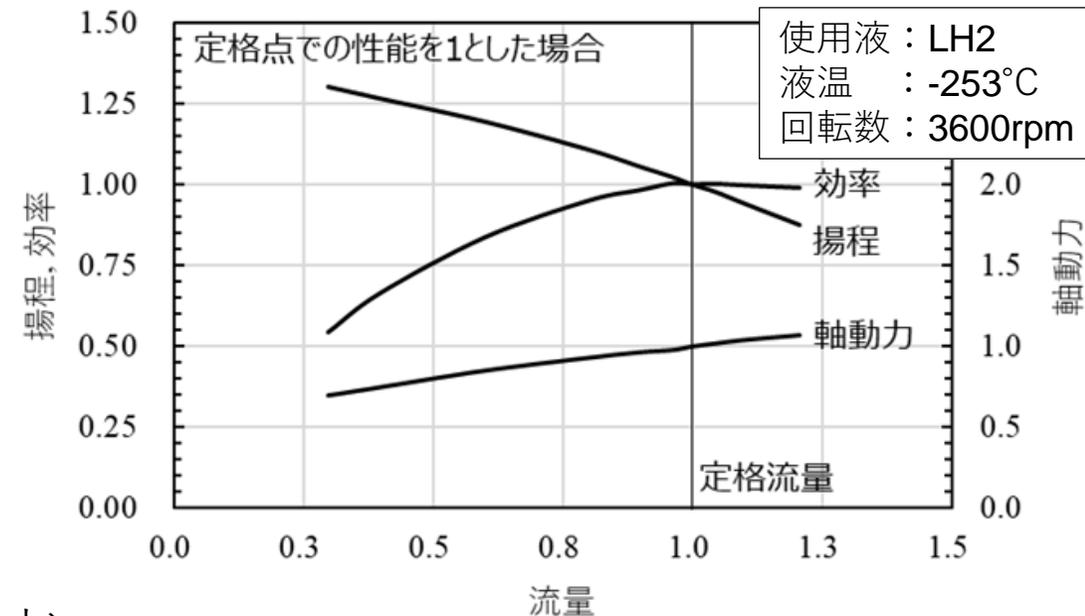


Fig. 小型試作機の液化水素性能

3. 研究開発成果について

④液化水素昇圧ポンプの開発

- 特許や論文、学会発表、広報等の取り組み

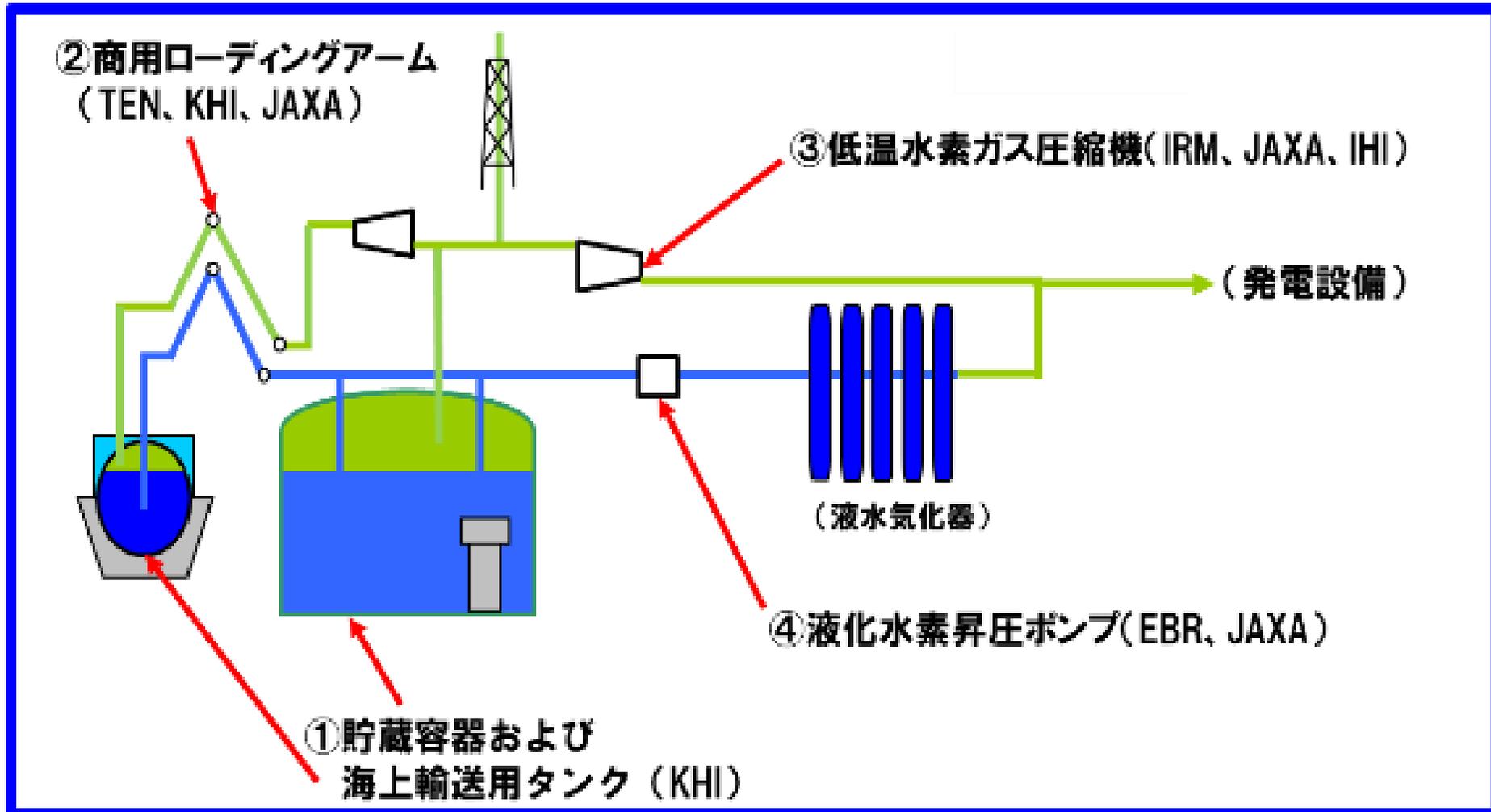
特許 : 特許 1 件を出願

対外発表 : 下表の通り

| No. | 年 | 月 | 雑誌名・学会名・イベント名等 |
|-----|------|----|---------------------------------------------------------|
| 1 | 2022 | 10 | ADIPEC 2022 |
| 2 | 2022 | 8 | FC-EXPO |
| 3 | 2022 | 8 | 当社ウェブサイト |
| 4 | 2022 | 9 | Gastech |
| 5 | 2022 | 9 | Oil & Gas Asia(OGA) |
| 6 | 2022 | 9 | Turbomachinery & Pump Symposium 2022 |
| 7 | 2022 | 9 | WETEX & Dubai Solar Show |
| 8 | 2023 | 3 | 2023年 FC-EXPO 春展 |
| 9 | 2023 | 3 | The 11th China International Fluid Machinery Exhibition |
| 10 | 2023 | 3 | 環境ビジネスオンライン |
| 11 | 2023 | 3 | 当社ウェブサイト |
| 12 | 2023 | 7 | <掲載予定> ターボ機械協会協会誌 月刊「ターボ機械」 |

4. 今後の見通しについて

各機器の開発により、商用スケールの荷役設備および発電設備への水素供給設備が成立し、水素基本戦略の2030年発電容量100万kW（火力発電所1基相当）の実現に貢献する。



まずは、2021年度から開始したグリーンイノベーション基金事業の一環である、商用化実証サプライチェーンへの納入を目指す。