

水素利用等先導研究開発事業
エネルギーキャリアシステム調査・研究

水素キャリアシステムの高性能化と 課題解決のための基盤流体技術の構築

発表者名 : 宮川和芳、佐藤哲也、能見基彦、伊賀由佳
団体名 : 学校法人 早稲田大学 理工学術院
株式会社 荏原製作所 技術・研究開発統括部
国立大学法人 東京大学 大学院工学系研究科
国立大学法人 東北大学 流体科学研究所
発表日 : 2022年7月29日

連絡先 : 早稲田大学 理工学術院 宮川和芳
E-mail : k-miyagawa@wasaeda.jp
TEL : 03-5286-2736

事業概要

1. 期間

開始：2021年4月

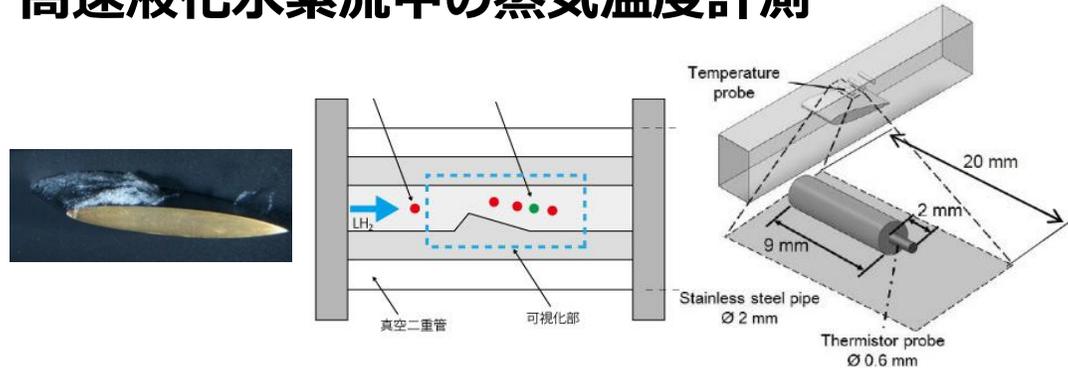
終了：2022年3月

2. 最終目標

液化水素ポンプ性能の数値予測のためのシミュレーション技術と計測技術の検証

- ① 液化水素試験部の構築、キャビテーション不安定発生クライテリアの設定、極低温流キャビテーションのボイド率計測による流動状況マップの作成（学校法人早稲田大学）
- ② 液体窒素ポンプ試験を対象に、流体シミュレーションを実施、性能マップを作成。設計点の揚程予測誤差10%以下を達成。（株式会社 荏原製作所）
- ③ 低温流体を用いる流体機械・機器の臨界点をまたぐことによる不安定性流動範囲マップの作成（国立大学法人東京大学）
- ④ 高速液化水素流中の蒸気温度計測（-1Kの水素蒸気流の温度低下を不確かさ0.1Kで計測）（国立大学法人東北大学）

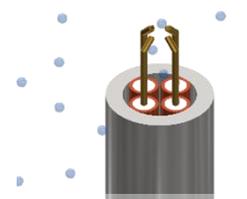
高速液化水素流中の蒸気温度計測



世界で2例目となる水素キャビテーションの内部温度計測結果を流体シミュレーションのベンチマークデータとして用いることにより、液化水素流れシミュレーション技術の高精度化に貢献。

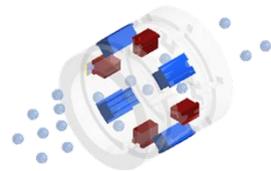
液体水素用ボイド率測定技術の開発

先端部に気泡が到達したときの静電容量変化から気液検知



探針型ボイド率計

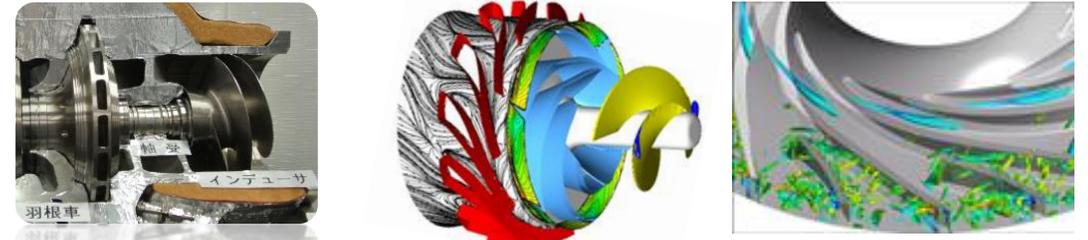
配管中の静電容量変化からキャビティ存在量を測定



極板型ボイド率計

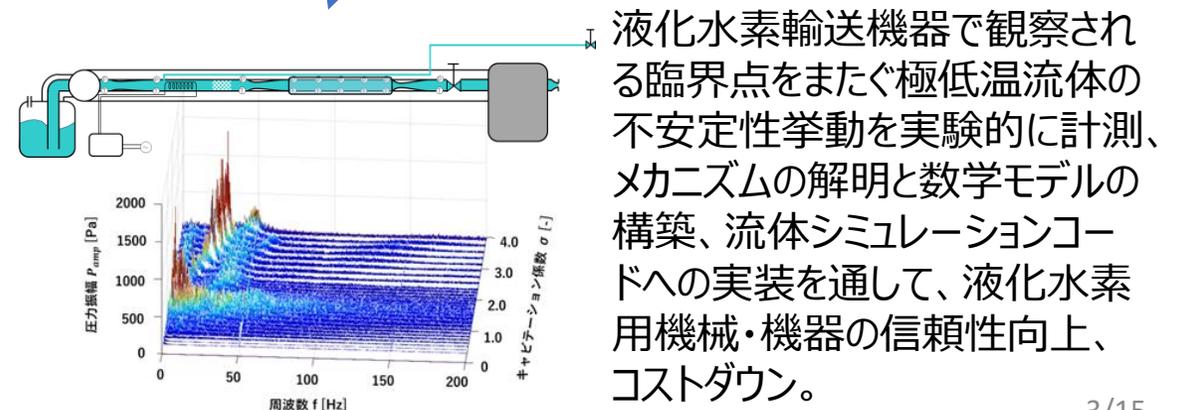
ポンプへの気泡吸い込み量・キャビテーション発生量定量的測定のため高精度ボイド率計の開発、液体水素による実液実証試験。

インデューサ+遠心羽根車のポンプ内部の流体シミュレーション



液化水素は強い圧縮性、臨界点近傍の密度や圧力などの物理量の急変、低い沸点、相変化時の大きな熱力学的効果のため、流体シミュレーションは困難。先端的な計測結果に基づき、精度を検証しながら流体シミュレーションのロバストな実施を確立、大容量液化水素ポンプ等の商用化を加速する基盤技術を構築。

臨界点をまたぐ極低温流体の不安定性挙動の解明



液化水素輸送機器で観察される臨界点をまたぐ極低温流体の不安定性挙動を実験的に計測、メカニズムの解明と数学モデルの構築、流体シミュレーションコードへの実装を通して、液化水素用機械・機器の信頼性向上、コストダウン。

3. 成果・進捗概要

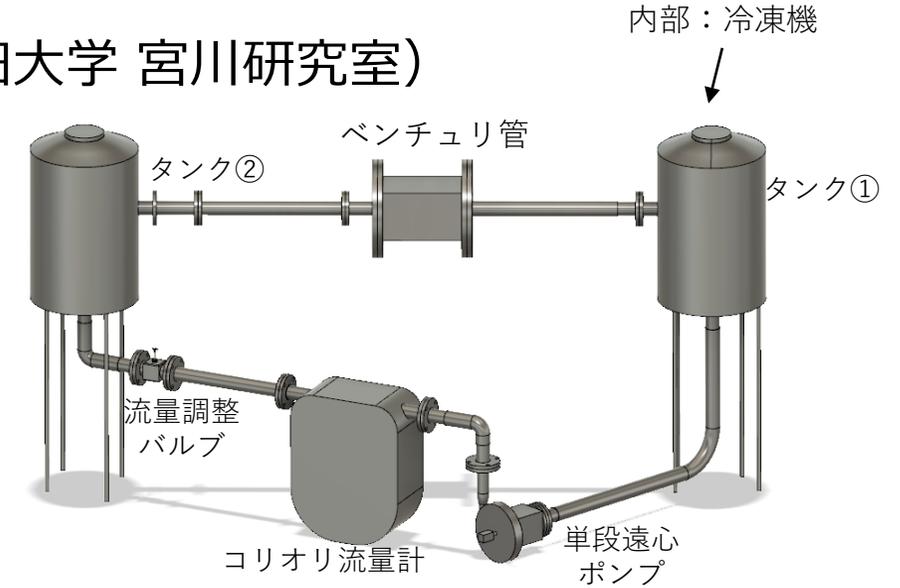
①-1 液化水素用流体解析の高度化と流動不安定の抑制（早稲田大学 宮川研究室）

□ 目的

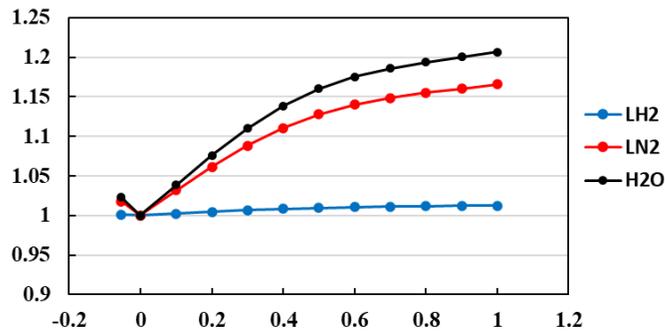
- 複雑な物性を有する液化水素用ターボポンプの性能予測技術の構築
- キャビテーションによる流動不安定現象評価技術の構築

□ 進捗状況・成果

- 液体窒素試験装置の設計・製作・構築
配管・タンク真空断熱、温度制御方法を検討し、設計
- 液化水素解析技術の高度化
圧縮性を考慮した液化水素流体解析技術の構築と評価
- 液化水素システムの流動不安定予測
キャビテーションサージ予測のための内部流動評価

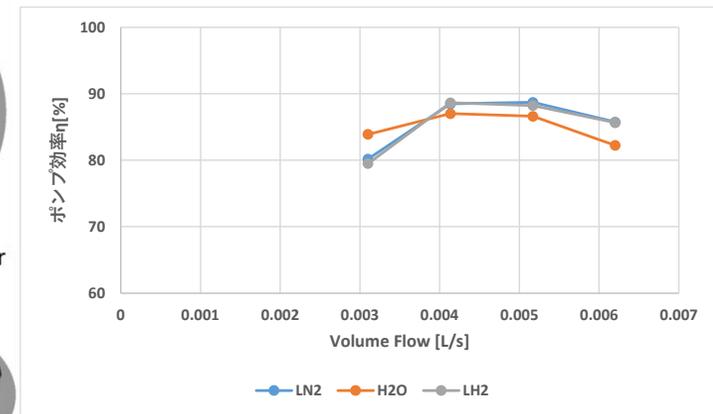
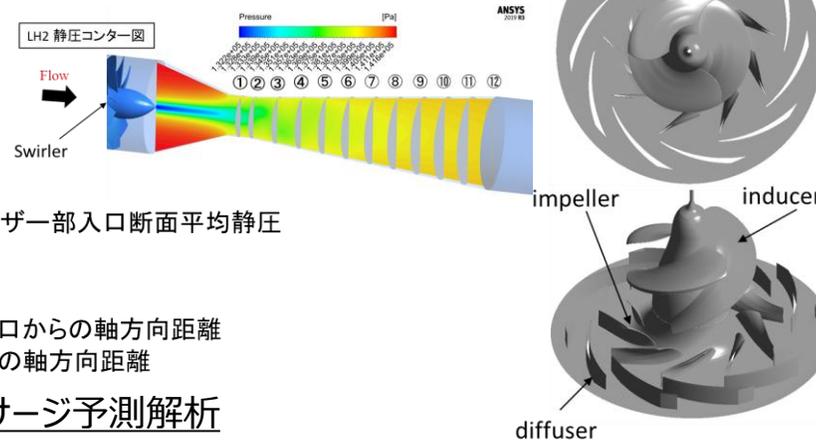


液体窒素ループの構築



$P^* = P/P_{dif,inlet}$
 P : 断面平均静圧
 $P_{dif,inlet}$: ディフューザー部入口断面平均静圧
 $z^* = z/l_{dif}$
 z : ディフューザー入口からの軸方向距離
 l_{dif} : ディフューザーの軸方向距離

キャビテーションサージ予測解析



流動解析によるポンプ効率予測

3. 成果・進捗概要

①-2 革新的液化水素予冷・計測技術の研究開発（早稲田大学 佐藤研究室）

□ 目的

- 水素など、極低温二相流の計測・制御のため、基礎研究でのアイデア、技術（ボイド率計測、ボイルオフガスの低減）を実用レベルに近づける。
- 成果をプロジェクト主目的「流体シミュレーション技術」の精度検証の希少なデータとする。

□ 進捗状況・成果

■ ボイド率センサーの設計開発

オール金属タイプ極板型センサの設計/試作
沸騰水素二相流のボイド率変動を計測

■ 液化水素を用いた実証試験

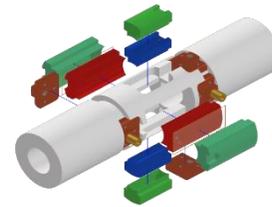
試験装置の改修設計完了
液体水素を用いた探針型センサーの予備試験の実施

■ マルチフローメーターの常温流体での原理検証

ボイド率計計測値と深層学習併用のボイド率・流量のリアルタイム計測器の原理を検証

■ コーティングによる予冷の効率化に関する基礎研究（液体水素プール沸騰実験）

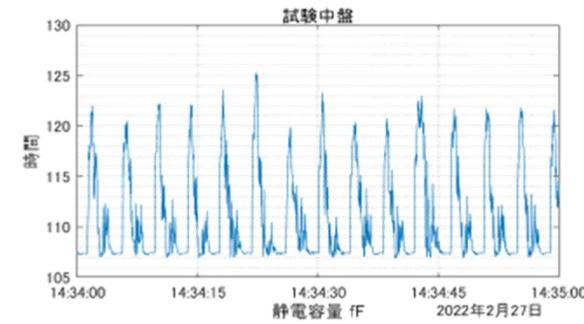
液化水素プール沸騰実験により沸騰曲線を取得。被膜最適化実施



構造設計



常温流体による流動試験



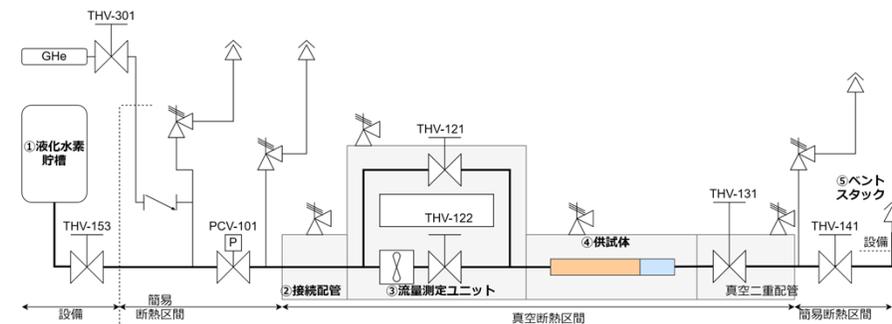
沸騰水素流動試験 (@能代)

ボイド率センサー（探針型）の開発

液化水素を用いた実証試験

※JAXA能代ロケット実験場で実施

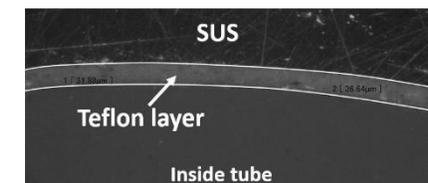
任意のカビテーションを生成



申請者は液体水素を用いた試験実績があり
それらの知見を最大限活用して試験を構築

世界的にも些少な水素の実測
データでCFD技術発展に貢献

液化水素試験部の設計製作



テフロン被膜（35 μm）を施したステンレス配管の断面図

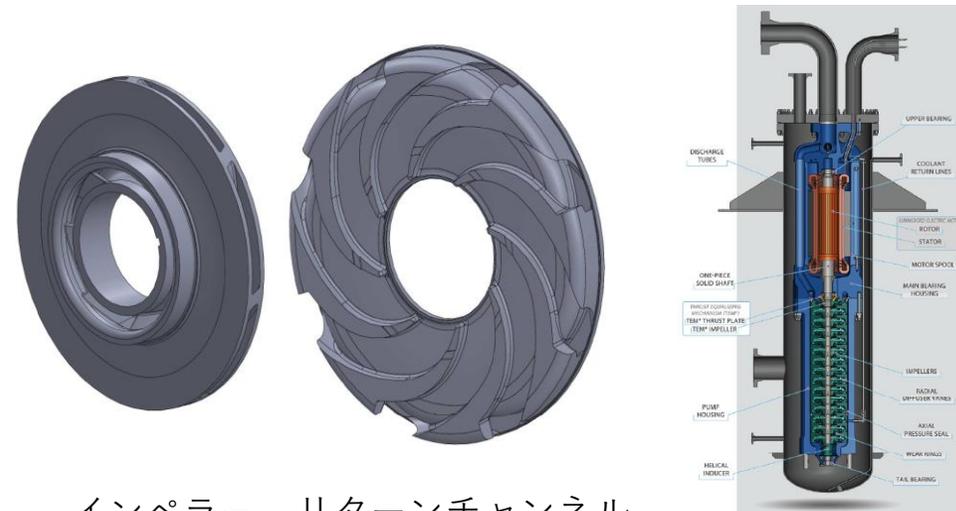
3.成果・進捗概要

② 流体機器内部流動予測・評価技術の開発（荏原製作所）

□ 進捗状況・成果

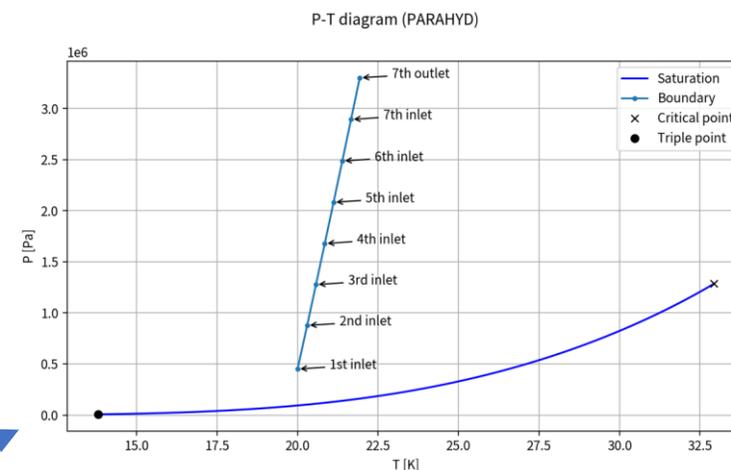
- 液化水素の数値流体解析技術の基盤確立のため、ポンプの内部流れの解析を実施した。ポンプの想定設計要目は、ケーススタディとしてチャレンジな仕様となる質量流量30t/h、出口静圧3MPa以上とした。この静圧上昇達成のため多段ポンプとなる。
- それぞれ単段であるポンプ遠心羽根車＋ディフューザー流路を対象に、作動流体を圧縮性の液体水素とした流体数値解析を、Ansys CFXを用いて実施し、性能マップ（性能曲線）を取得した。
- ポンプ遠心羽根車＋ディフューザー流路を対象に、作動流体を圧縮性の液体水素とした多段解析をAnsys CFXを用いて実施。質量流量30t/hの設計点流量で、出口静圧3MPa以上に達した。
- 羽根車とディフューザーを組合わせたポンプ流路で、圧縮性を考慮した液体水素の解析を行い、性能特性（性能マップ）が得られた。ポンプヘッドおよびポンプ効率の計算法として全ポリトロープヘッドと全ポリトロープ効率を用いた。
- ポンプ出口部の計算結果を次の解析の入口境界条件に用いることにより、液体水素の多段解析が安定に解析できることを確認した。

7段の多段解析の計算結果。各段の入口の静圧と温度を図示。最終段の出口で3MPaに達する結果。初段はキャビテーションが発生するため、今回は解析を実施せず。



インペラー リターンチャンネル
（ディフューザー＋戻り案内羽根） 多段構成の参考例：
（LNGポンプの事例）

液水大容量昇圧ポンプの流体力学的設計



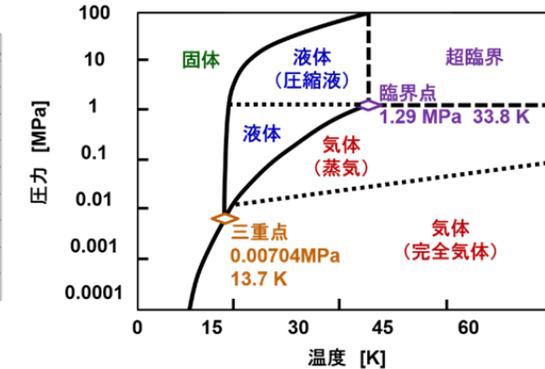
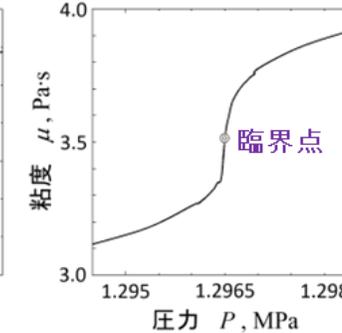
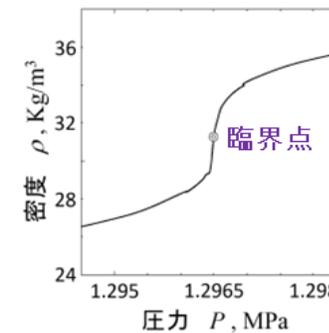
7段ポンプ各段入口静圧・温度

3.成果・進捗概要

③ 臨界点をまたぐ低温流体の不安定性の予測と抑制 (東京大学)

□ 目的

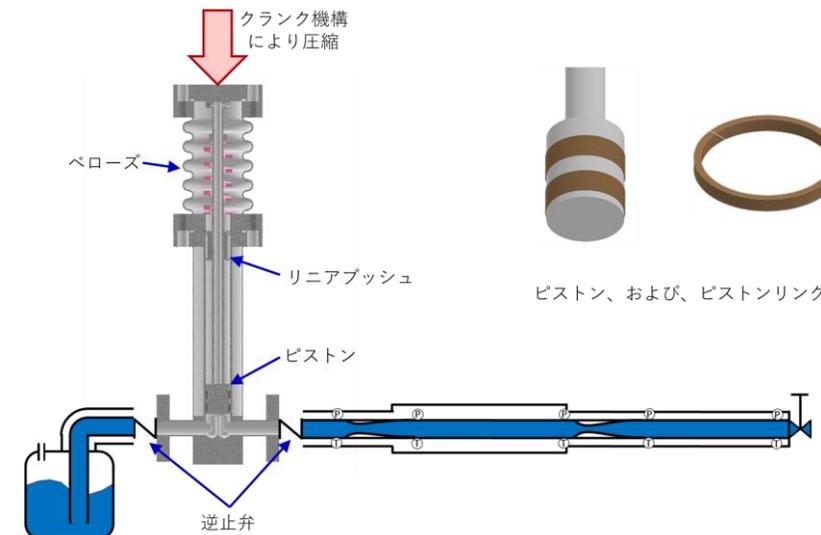
- 液化水素を用いる配管網、機器では、臨界点をまたぐことによる流動不安定を生ずる場合があるが、その取扱いは現在の技術レベルでは予測困難。臨界点をまたぐ水素と類似の挙動を示す窒素に着目し、臨界点をまたぐ液体窒素の不安定性挙動研究のため流動装置による解析と実験により挙動の予測技術を構築、液化水素臨界点不安定予測に展開する。



□ 進捗状況・成果

- 臨界点をまたぐ液体窒素試験装置の計画、設計と製作を実施。
- 装置内のベンチュリによるジュール・トムソン膨張により流路中心部のみ温度低下させ計測部で不均一な温度分布を意図的に生成する試験装置を設計。
- 商用流動解析コードに液体窒素物性データに関して状態方程式から導出可能な物性値は熱伝導率・粘性係数などの輸送物性値は温度の関数として与え臨界点を緩やかに跨ぐように境界条件をコントロール、安定な解析結果を得る手法を構築。
- 実験結果による解析手法の早急なチューニングが可能なように解の制御方法を考案。

液化水素物性値



臨界点をまたぐ窒素を生成する液体窒素用ポンプの設計・製作

3. 成果・進捗概要

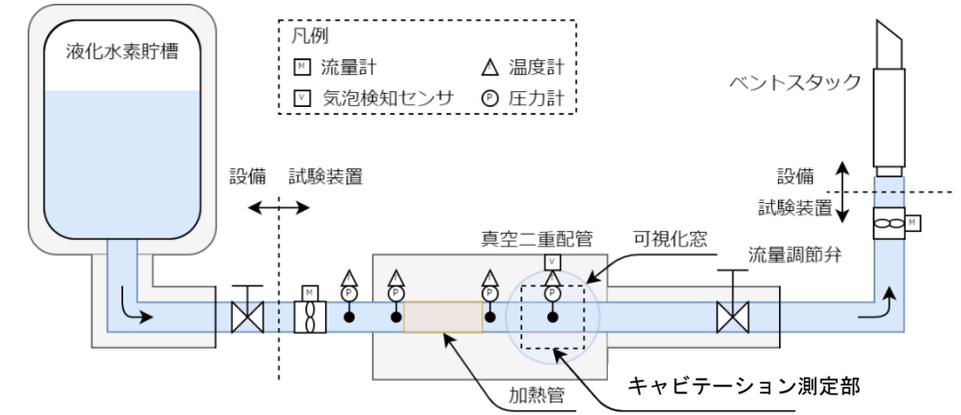
④ 高速液化水素流中の蒸気温度計測 (東北大学)

□ 目的

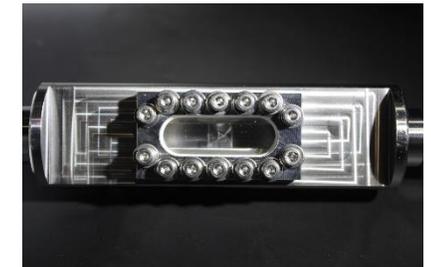
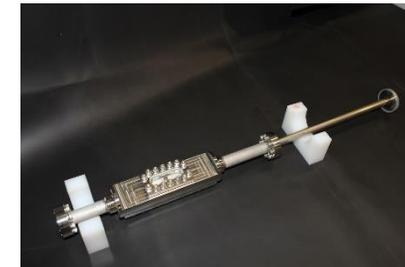
- ポンプの性能低下の原因となるキャビテーションの発生を予測し、抑制するために流体シミュレーション技術が必要であるが、液化水素の流体シミュレーションは、液体単相流であってもまだ有用な結果が得られておらず、蒸発・凝縮を伴う高速気液混相流であるキャビテーションに至っては未だ未踏の領域。液化水素中で発生するキャビテーションでは、熱力学的抑制効果が発生するがシミュレーション技術で抑制量を正確に予測することが求められる。本研究では、世界で2例目となる高速液化水素流れ中に発生するキャビテーションの内部温度計測を高精度で行い、流体シミュレーションのベンチマークデータとして用い液化水素流れシミュレーション技術の高精度化に貢献する。

□ 進捗状況・成果

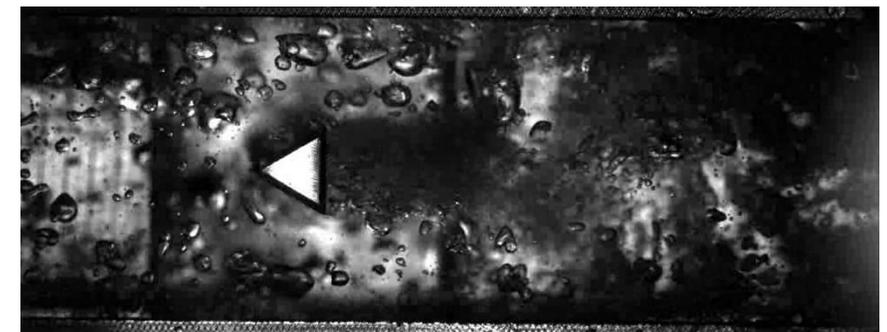
- 応答時間の限界のためこれまで不可能であった非定常キャビテーション中の蒸気温度を推定する手法を開発した。現在、推定精度の向上を試みている。
- 液体ヘリウムを用いて20K以下から高精度に温度センサーを校正できる校正システムを設計した。11月の水素キャビテーション温度計測実験に向けて今後、センサーの校正を実施する。
- 水素キャビテーション測定部を設計・製作し、能代実験場にて水素キャビテーションの可視化実験を実施した。今回は、実際の液体水素輸送中の状況に近い気液二相流となったが、流体シミュレーションのベンチマーク用として、次回は液体水素単相流中の可視化を試みる。



液化水素流動試験設備概略図 (JAXA能代ロケット実験場、一部既設)



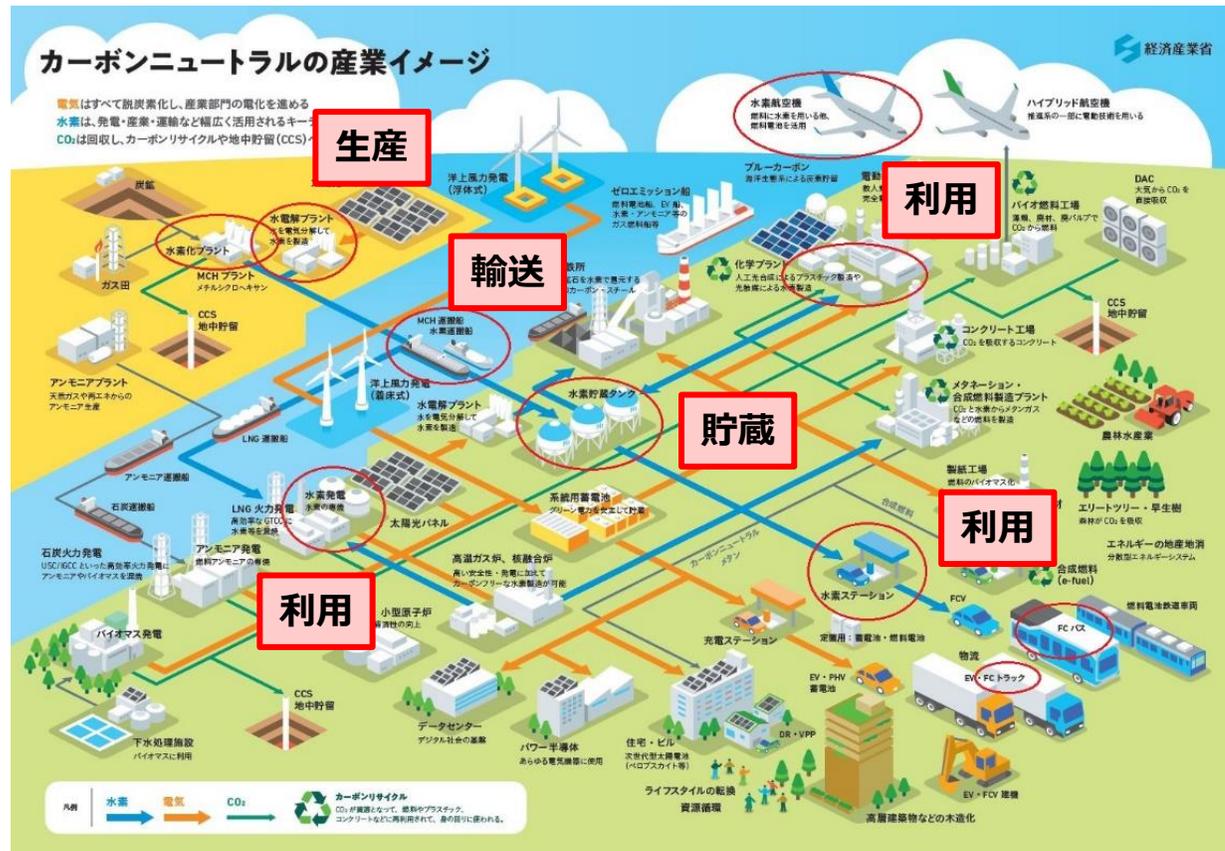
キャビテーション計測用測定部



三角柱まわりの気液二相水素流

1. 事業の背景・目的

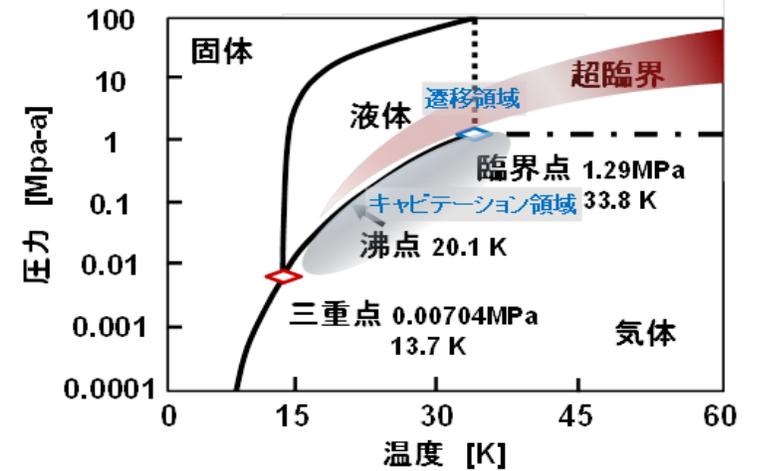
二次エネルギーである水素のカーボンフリーのためのエネルギーとしての地位確立に向けて、長距離輸送，長時間貯蔵のためのエネルギーキャリアシステムの大型化／コストダウンと、各種利用シーンでの製品競争力強化により加速するために、多彩な流体機械・機器の開発基盤としての、流体シミュレーションを中核とする基盤流体技術の構築を進める。



本事業期間で取り組む内容

◆ 液化水素の特異な性質（圧縮性、沸点、臨界点）がボトルネックとなり、基盤流体技術は未確立である。

➡ 詳細な検証実験データを取得し、流体シミュレーション技術を中核とする基盤流体技術を構築する。



◆ 宇宙分野での液化水素利用が先行しているが、運用形態（オフ・デザイン運転、長時間運転）やコスト要求が異質であることなどにより、水素社会向け大型設備の具体化には多くの技術課題が残されている。

➡ 基盤流体技術を、代表的な流体機械装置に適用し、技術課題への適用性を評価し、実用化する。

1. 事業の位置付け・必要性

液化水素性質（圧縮性、沸点、臨界点）がボトルネック

- a. ポンプ・配管内の圧力低下に伴う蒸発現象である**キャビテーション**における熱力学的効果
(極低温流体が蒸発潜熱を奪う事でキャビテーションの成長を抑制する効果)
- b. **臨界点近傍** (気体と液体が共存できる限界の温度・圧力条件の周辺) で生じる流体物性の急変現象
- c. 外部入熱により発生する**ボイルオフガス** (沸騰現象)

1. 極低温流体試験装置（液体窒素、液化水素）と革新的計測技術の構築、検証データの取得

- 高精度静電容量ボイド計、極低温キャビテーション内部温度の高精度計測手法の開発
- 実験と解析による臨界点近傍 (気体と液体が共存できる限界の温度・圧力条件の周辺) で生じる流体物性急変現象の把握、リスク評価と制御

2. 液化水素流体シミュレーションの高度化

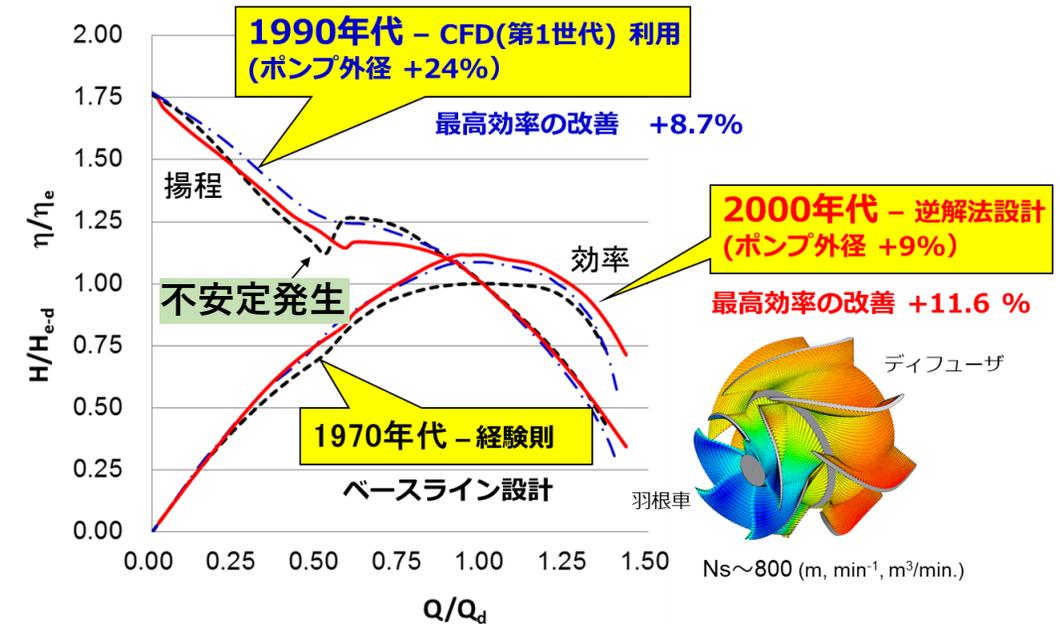
- 物性急変を伴う流体シミュレーションの安定化、高精度化

3. 液化水素の現象把握と課題の抑制

- 熱力学的効果の利用、流路内面コーティングによるボイルオフガス抑制
- 流動不安定現象 (キャビテーションサージ) 予測と抑制

液化水素基盤流体技術整備とシミュレーション高度化

- 設備イニシャルコストの低減
- 革新的プロセスの創案
- 機械・機器高性能化によるランニングコストの低減



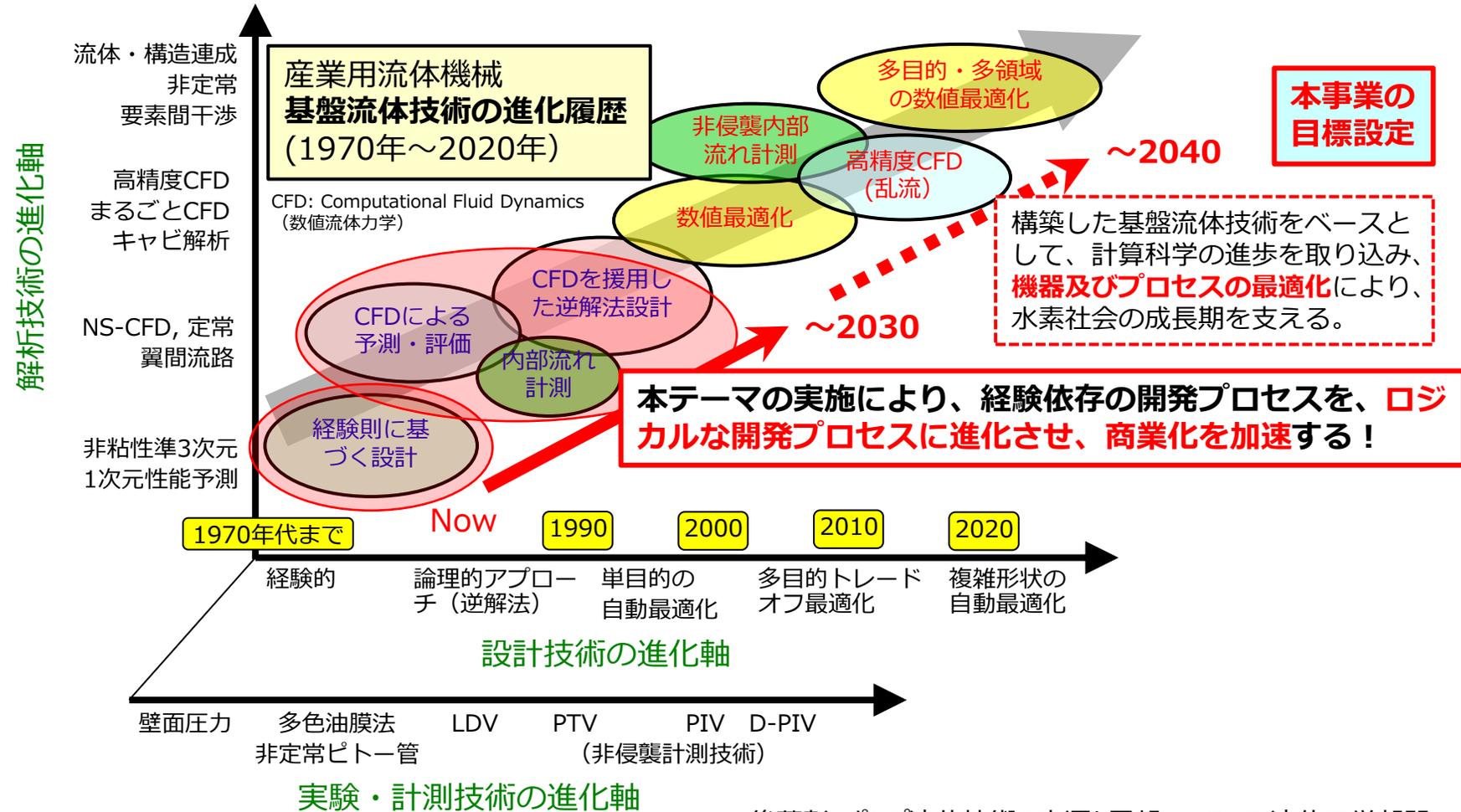
ポンプ流体技術の変遷と展望

流体シミュレーション技術向上により
効率向上、吸込性能向上、不安定抑制を達成

後藤彰、ポンプ流体技術の変遷と展望～ASME 流体工学部門
Fluid Machinery Design Award を受賞して～、エバウ時報、No.252、2016-10

2. 研究開発マネジメントについて（目標設定とその根拠・スケジュール）

発展期／成熟期にある産業用流体機械の基盤流体技術の変遷を根拠とし、来るべき**水素社会の成長期を支え、加速するための基盤流体技術の目標を設定**した。その有効性を、水素キャリアシステムを構成する**主要流体機械に適用・実証**する。

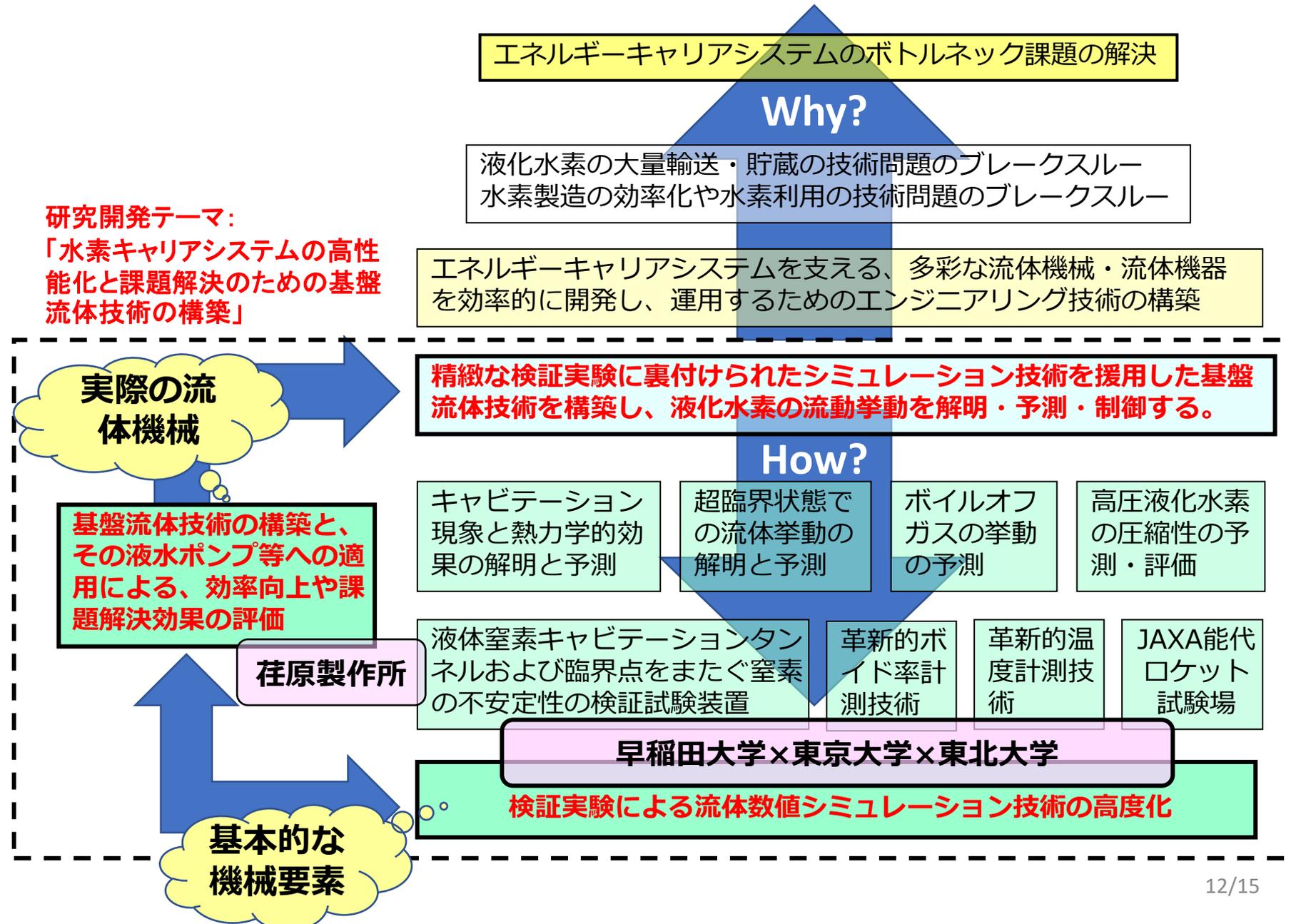


2. 研究開発マネジメント(実施体制と課題)

- 研究の質管理
 - 学会分科会等を利用した第三者（ユーザー、アカデミア）の評価と取り組みへのフィードバック
 - 有識者レビューの実施
液化水素技術の有識者による定期的評価

- 進捗管理
 - 予見できない状況（感染症、紛争等）による影響のコントロール
 - 進捗の相互フォロー

- 知的財産戦略
 - 知財委員会による成果公表の管理
 - 製品化推進と知財での保護の徹底



3. 研究開発成果について（仕上げたい技術の姿）

知財・論文件数のステアリング・質の向上、成果の形、社会実装に対するポジショニング

1. 知財・論文件数のステアリング

- ・ 国内外の学会（日本機械学会、ターボ機械協会、航空宇宙学会、ガスタービン学会、ASME、AIAAなど）で今年度、来年度開催される会議を利用した発表・PR。
- ・ 要素技術として有用な成果を得ることができ、多くの分野に利用。
- ・ 液化水素に関するエネルギーキャリアの他分野への展開。

2. 質の向上

- ・ 液化水素特性の予測技術構築を、解析、実験、設計の3本柱で検証、反映。

3. 成果の形

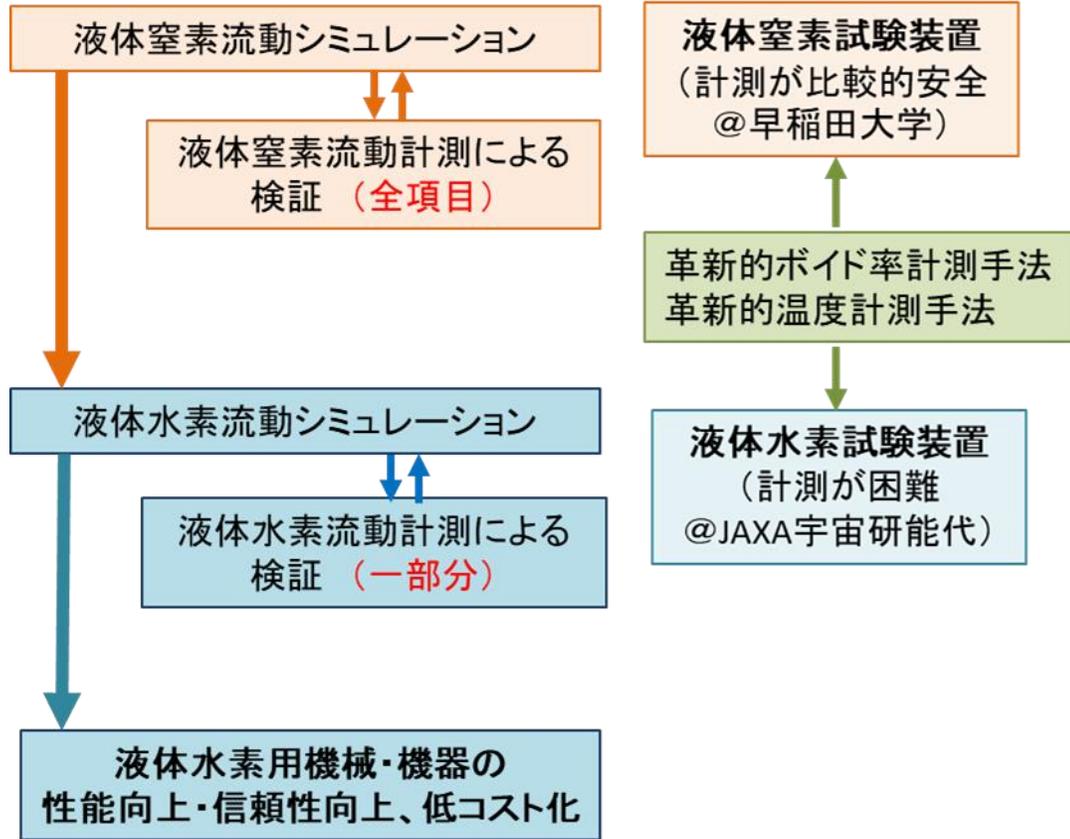
- ・ 成果は、要素技術として製品技術に適用することが可能。

4. 社会実装に対するステアリング

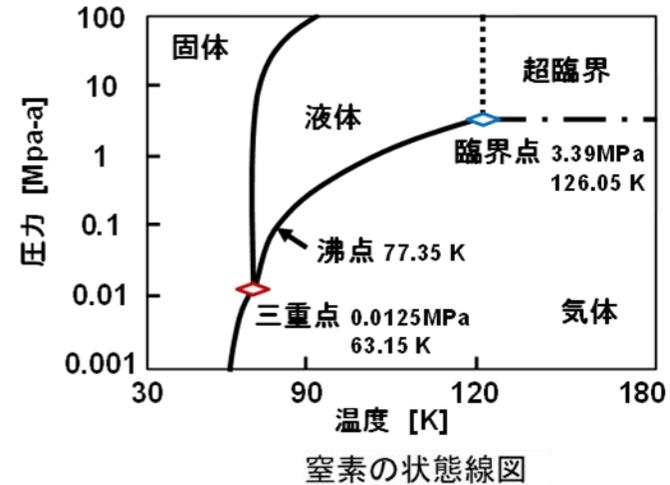
- ・ 液化水素の流体機械・機器への予測のニーズは高く、自動車メーカー、重工業メーカー、ガスインフラなどの会社が成果の使用を検討中。
- ・ 高精度温度計、ボイド計に関しては計測器メーカーに製品化の働きかけ中。本研究成果を反映していく。
- ・ 流体解析ベンダーには、本結果をベンチマークとして製品に反映することを依頼済み。

3. 研究開発成果について（アプローチ方法）

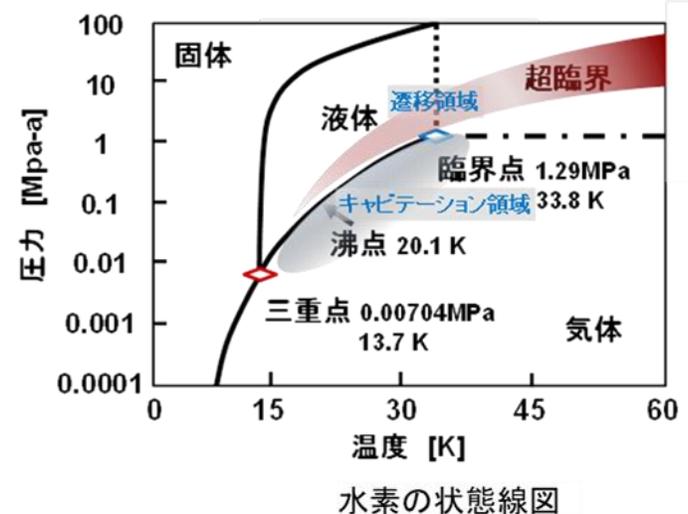
液化水素用流体機械・機器の流動の予測高度化
（超臨界、沸騰、キャビテーション）



実験検証に裏付けられた**流体シミュレーション/計算科学**に基づくアプローチを、多様な流体機械・機器設計や運転条件設定に対して汎用的に適用



物性が類似
水では不可: 臨界点(647K、22MPa)



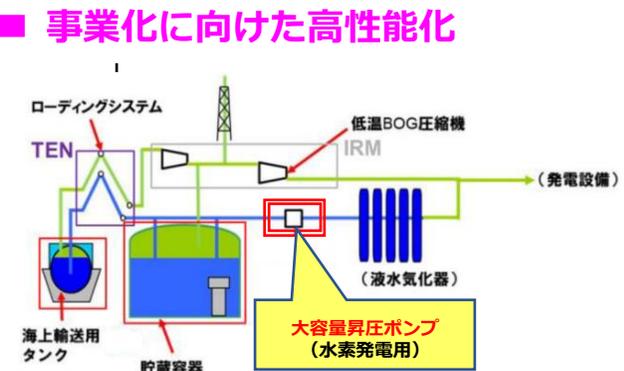
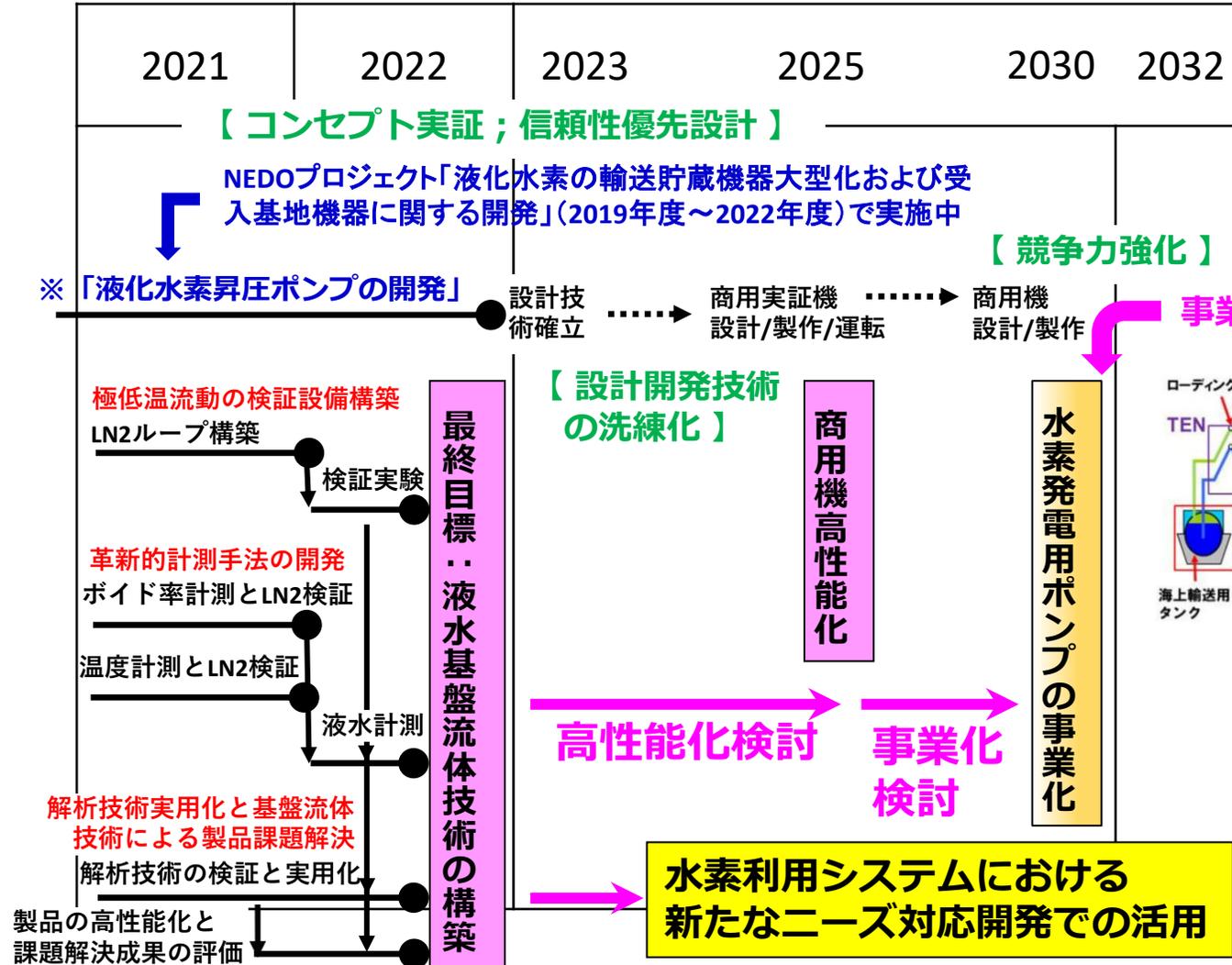
4. 今後の見通しについて（成果イメージと実用化・事業化に向けた具体的取り組み）

基盤流体技術の事業化計画

水素社会の黎明期から成長期へと、水素キャリアシステムの高度化とコストダウンを加速するには、**大容量機器開発の武器となる、基盤流体技術が不可欠**

水素キャリアコスト低減の最大の課題は「大型化」～水素キャリアの高精度の3D流動予測技術は、信頼性と競争力に優れた大型エネルギーシステムの社会実装を加速する！

→ 大型システムの「心臓」となる流体機械による検証解析で、汎用的な基盤流体技術を構築



大容量昇圧ポンプ
想定仕様
3MPa, 30t/h

600MW級のガスタービンへの燃料供給可能