

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、能見基彦、渡邊聡、田中禎一
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
国立大学法人 九州大学 大学院工学研究院 (再委託)
独立行政法人 国立高等専門学校機構 熊本高等専門学校 (再委託)
発表日 : 2023年7月14日

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

事業概要

1. 期間

開始：2021年4月

終了：2023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試験装置の構築、計測技術の開発・検証

- ① 液化水素試験の実施、液体窒素試験装置の構築、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センサの開発と流動状況マップの作成（早稲田大学）
- ② 液体窒素ポンプ試験を対象とした流体シミュレーションを実施し、性能マップを作成。設計点の揚程予測誤差10%以下達成。（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を把握する試験装置、流体解析技術の構築。（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）（東北大学）
- ⑤ ポンプ逆流抑制デバイスの開発とデバイス付きポンプの熱流動解析による逆流・吸込み性能の予測、キャビテーションモデルの構築のため熱力学的効果を考慮した均質媒体気泡流モデルの構築とCFD解析による検証（九州大学）
- ⑥ 液体窒素作動下の吸込性能試験から、液体水素作動下における最適な羽根形状を考察（熊本高専）

3. 成果・進捗概要

- ① 極低温試験装置の構築と実験計測の実施：ポンプ性能計測、流動不安定計測、流れの可視化が可能な液体窒素試験装置の構築、臨界点をまたぐ水素流動の計測用装置の開発、液化水素を用いた水素二相流の様相の可視化
- ② 革新的計測技術の開発：ボイド率計測センサー、蒸気温度計測センサーの設計・開発と極低温流体を用いた実験による検証
- ③ 液水大容量昇圧ポンプの設計と性能・流動予測：液化水素用多段ポンプの設計と圧縮性考慮の流体性能予測
- ④ 液化水素流体シミュレーションの高度化：液化水素物性を考慮したキャビテーションから高い圧力まで安定に解析できる解析手法の構築、熱力学的効果を精度良く解析可能なキャビテーションモデルの開発
- ⑤ 液化水素の流動現象把握と課題の抑制：遠心ポンプ羽根車形状によるキャビテーション性能の影響検討、コーティングによるボイルオフガスの低減、ポンプ逆流制御デバイスの開発、臨界点をまたぐ低温流体の不安定性の把握と解明

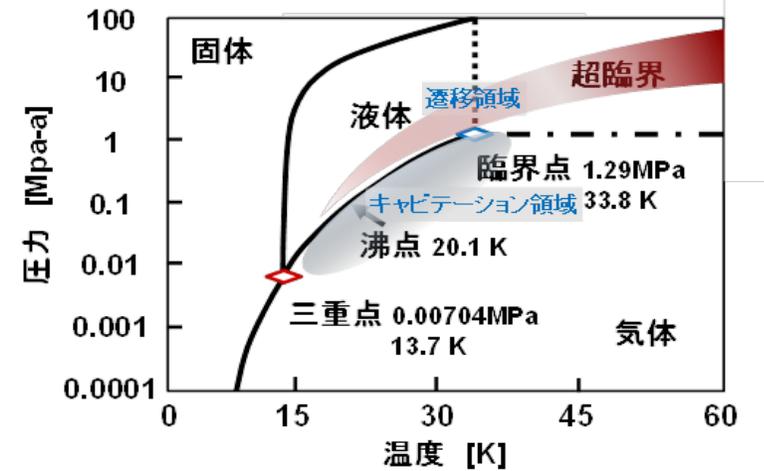
1. 事業の位置・必要性

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

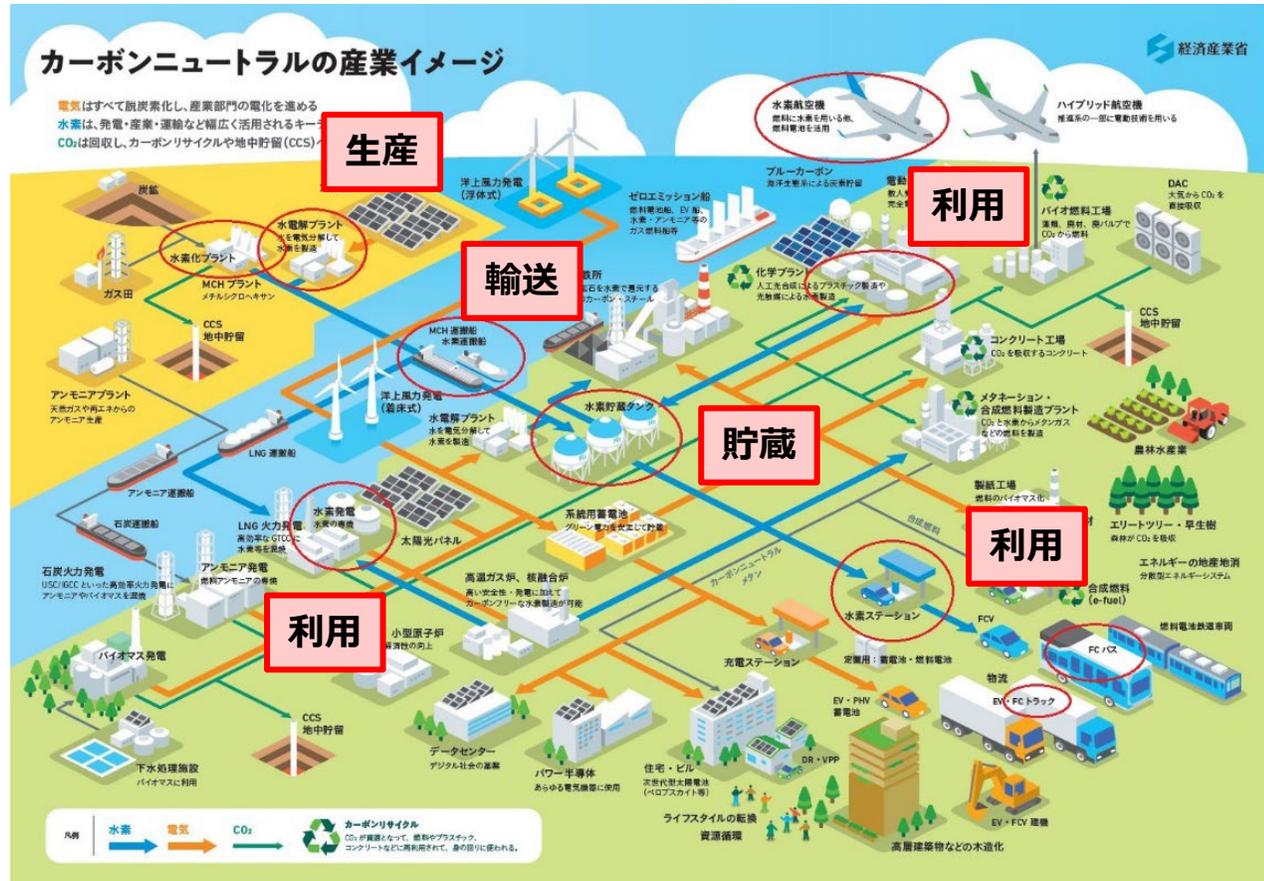
◆ 液化水素の特異な性質（**圧縮性、沸点、臨界点**）がボトルネックとなり、**基盤流体技術は未確立**である。

➡ 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. ポンプの輸送能力喪失の主要因である**キャビテーション**
(液化水素が持つキャビテーション抑制効果の把握と抽出)
- 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

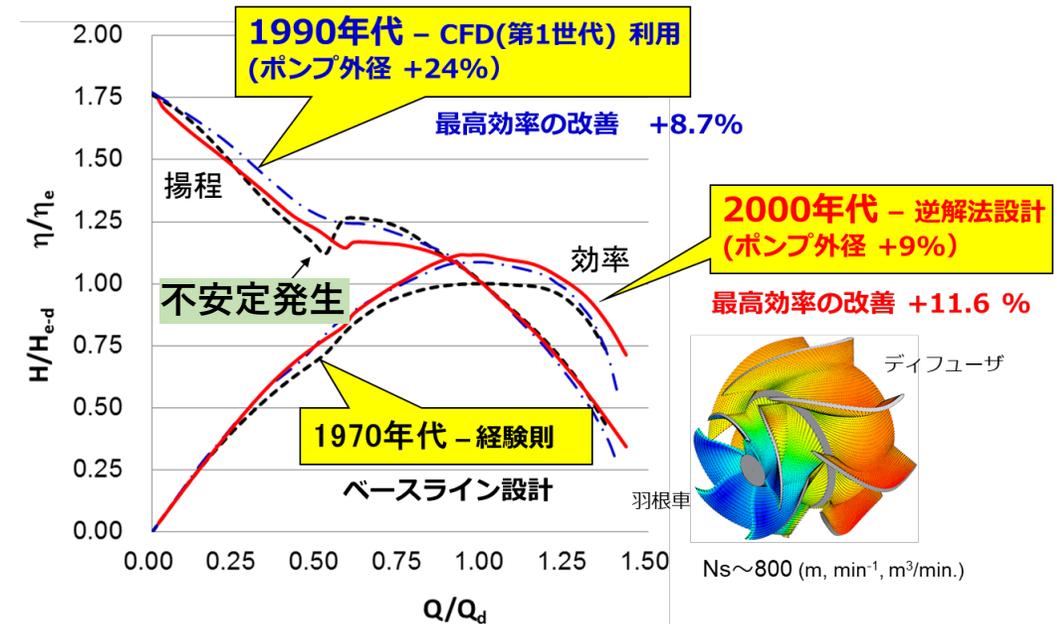
- 物性急変を伴う流体シミュレーションの安定化、高精度化

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



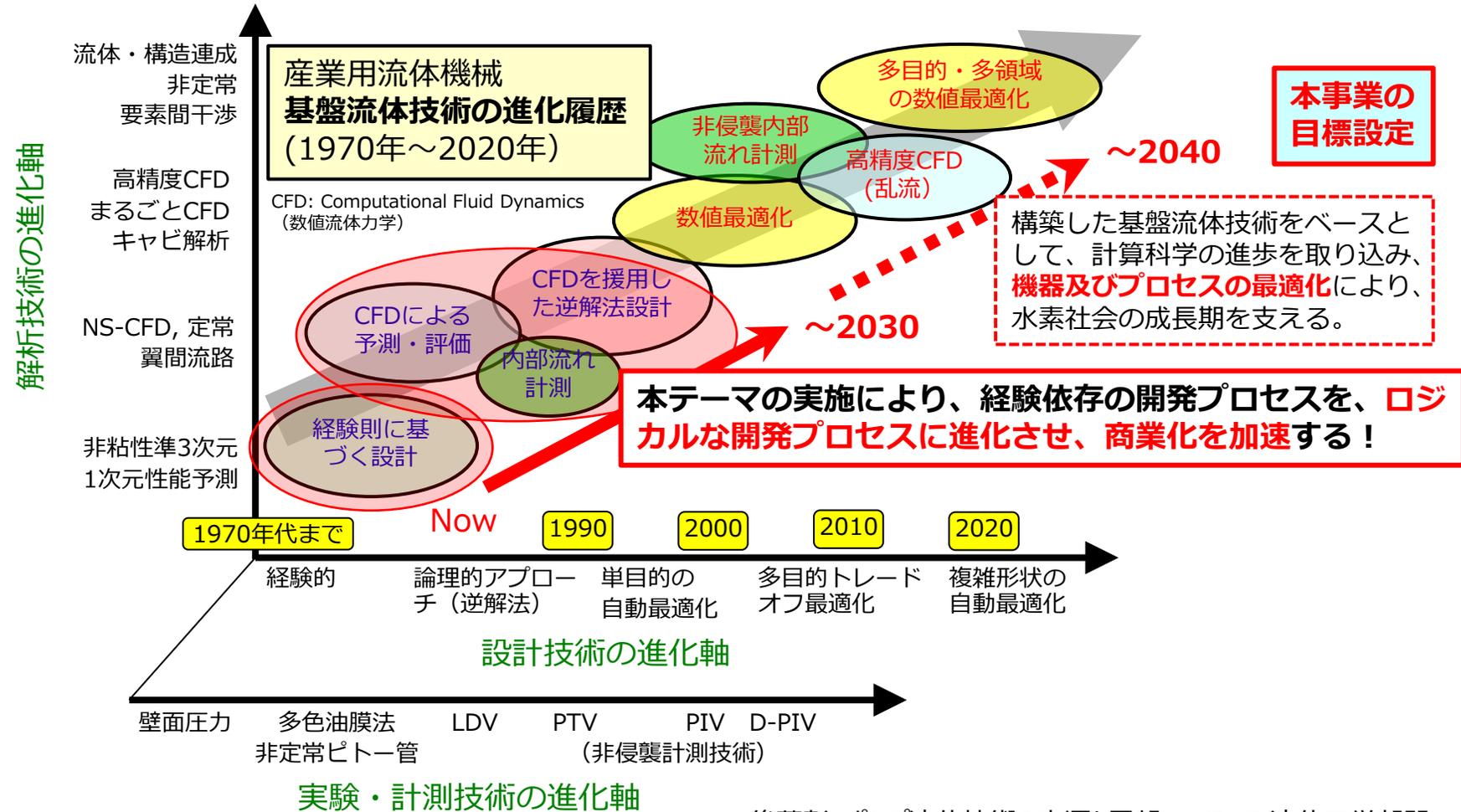
ポンプ流体技術の変遷と展望

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～、エバラ時報、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）

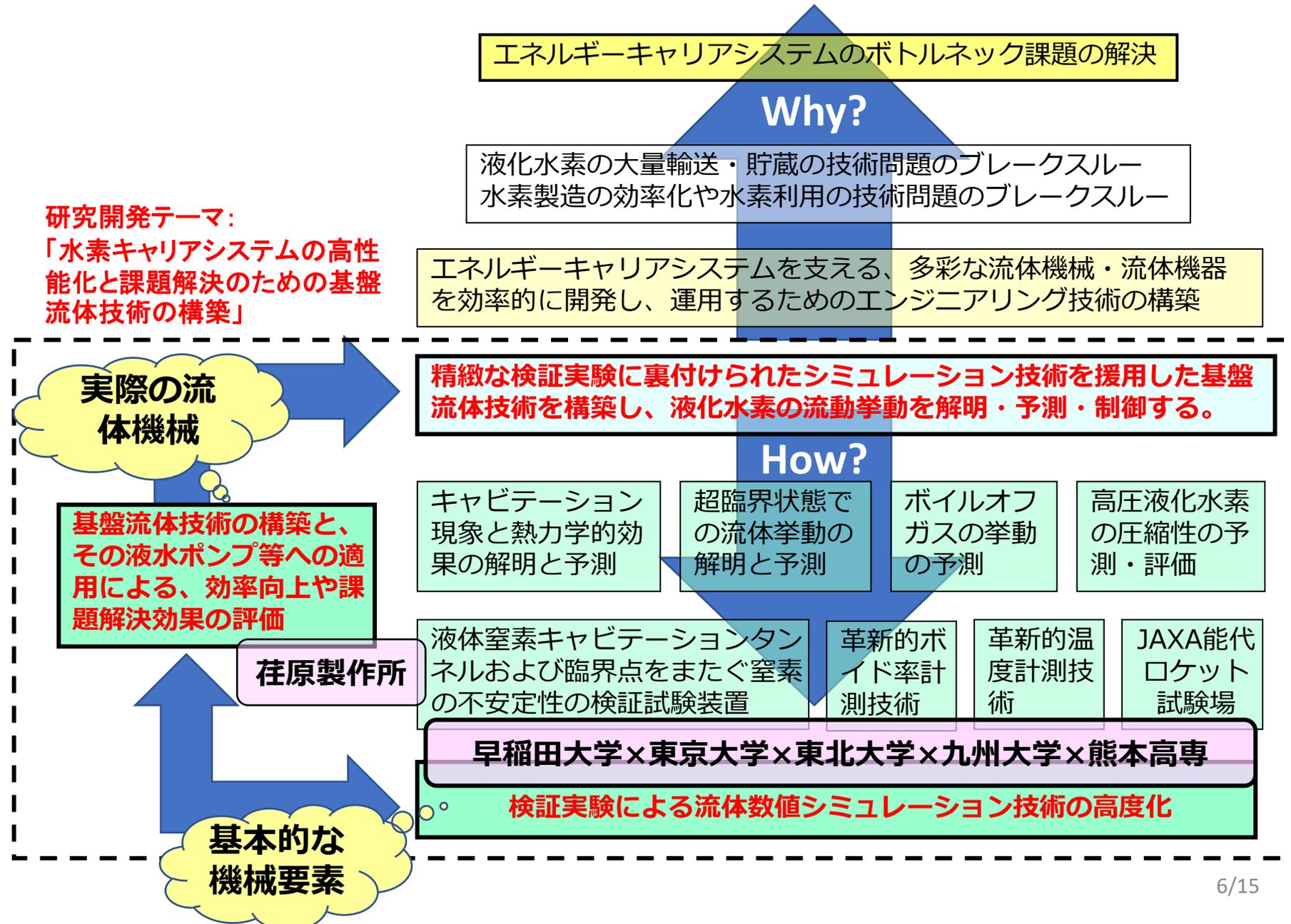
発展期／成熟期にある産業用流体機械の基盤流体技術の変遷を根拠とし、来るべき**水素社会の成長期を支え、加速するための基盤流体技術の目標を設定**した。その有効性を、水素キャリアシステムを構成する**主要流体機械に適用・実証**する。



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～、エバラ時報、No.252、2016-10

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

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

- ・ 国内外の論文、学会に投稿、発表 論文4件、海外発表5件、国内発表10件、表彰2件
今後、開催される会議を利用して発表・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

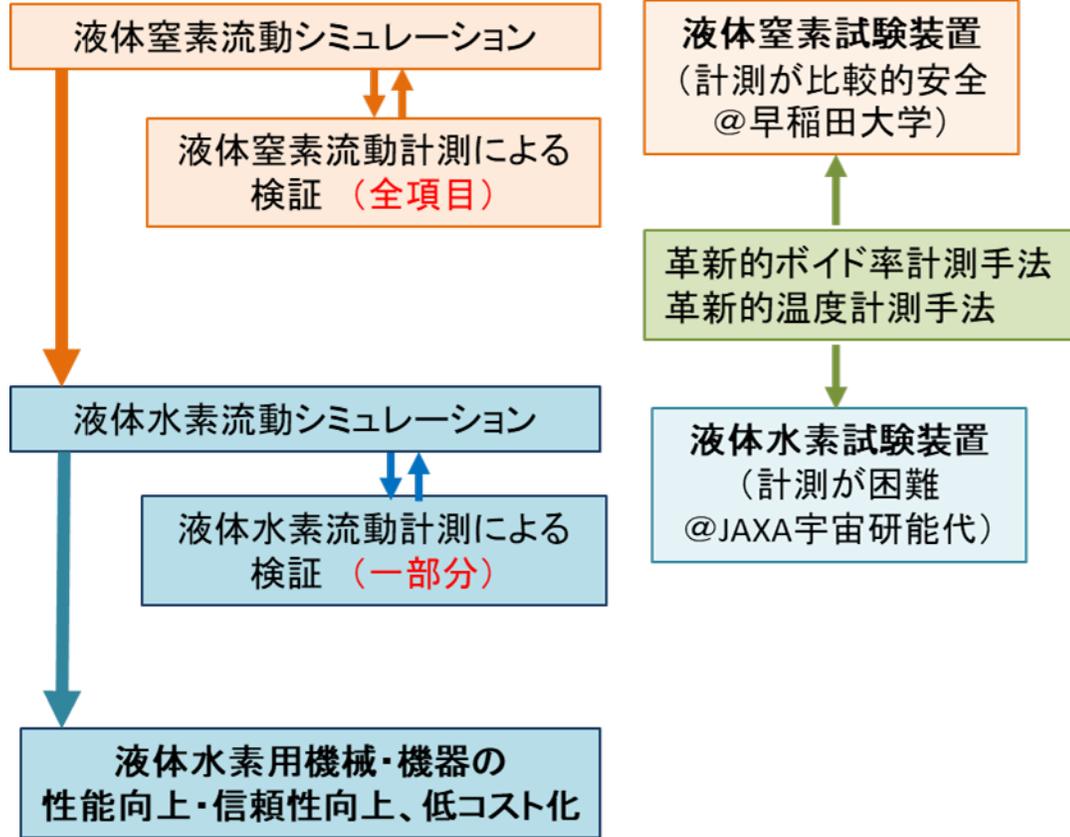
- ・ 成果は、要素技術として製品技術に適用することが可能

4. 社会実装に対するステアリング

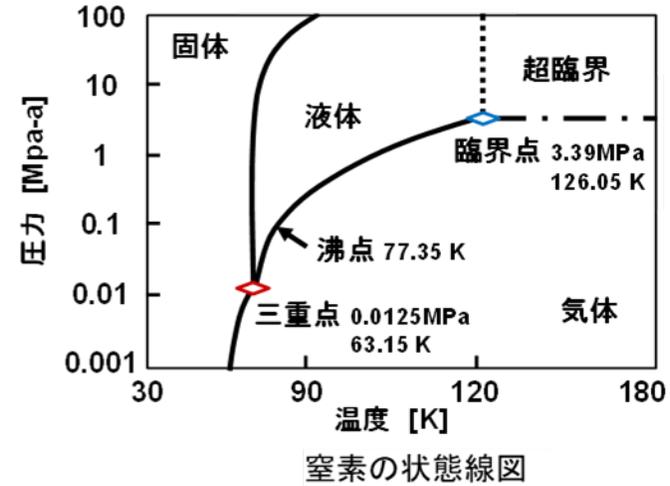
- ・ 液化水素の流体機械・機器への予測のニーズは高く、自動車メーカー、重工業メーカー、ガスインフラなどの会社が成果の使用を検討中、コンソーシアムを形成し、本成果を展開
- ・ 高精度温度計、ボイド計に関しては計測器メーカーに製品化の働きかけ中。本研究成果を反映していく
- ・ 流体解析ベンダーには、本結果をベンチマークとして製品に反映することを依頼済み

3. 研究開発成果について (アプローチ方法)

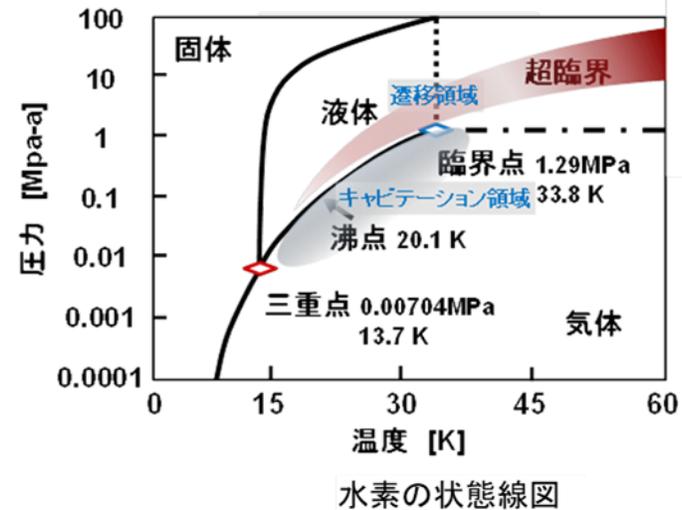
液化水素用流体機械・機器の流動の予測高度化 (超臨界、沸騰、キャビテーション)



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)



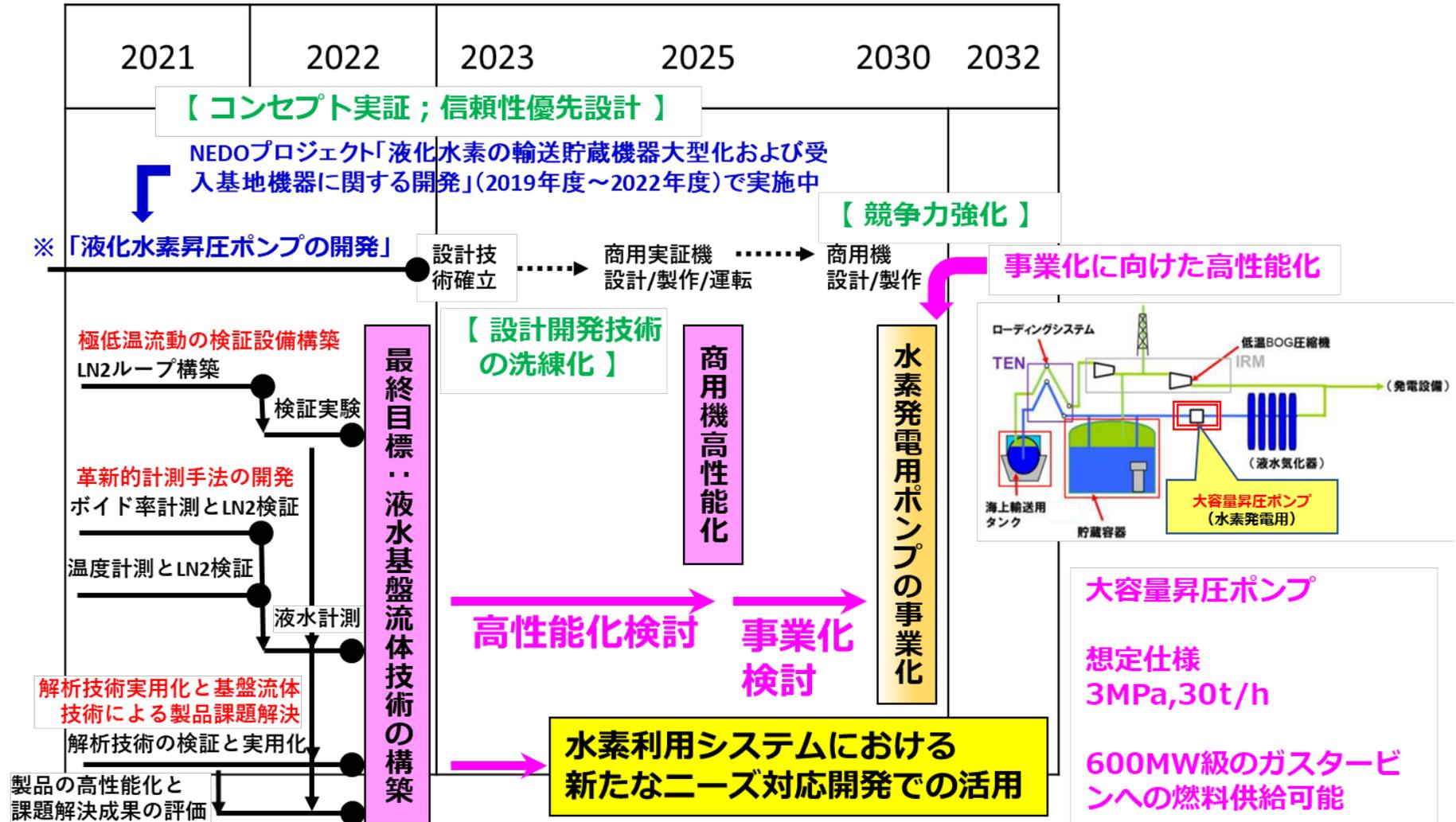
4. 今後の見通しについて（成果イメージと実用化・事業化に向けた具体的取り組み）

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



4. 今後の見通しについて（社会実装にむけた取り組み：コンソーシアムの形成と運用）

液化水素基盤流体技術

社会実装

液化水素アプリケーション展開

NEDO事業チーム

早大・東北大・東大・九大・熊本高専・JAXA他

シミュレーション技術

沸騰・キャビテーション・超臨界・圧縮性
高精度センサ
ボイド率計、温度計、流量計
検証実験
液体窒素実験、液化水素実験

学協会まとめコンソーシアム 例)ターボ機械協会

シミュレーションベンダー(流体解析、構造解析など)
液化水素インフラメーカー・ユーザー
(自動車、ガス、ポンプ、バルブ、タービン、タンクなど)
液化水素要素メーカー
(シール、軸受、センサー、計装など)

基盤技術コンソーシアム

荏原製作所他

機械、自動車、航空機、ガス、プラントなど

○シミュレーション技術

性能向上
(効率、圧力、キャビテーション)
信頼性向上
(振動、流動不安定)
設計最適化

○標準化、グループ化

コスト低減
品質の確保
中小企業の参入

○流体機械

大容量昇圧ポンプ
プランジャーポンプ
エキスパンダー
タービン
航空機・自動車用
液水ポンプ
など

○流体機器

各種配管
タンク
バルブ
など

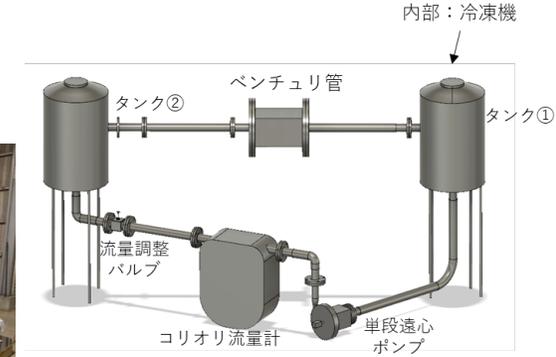
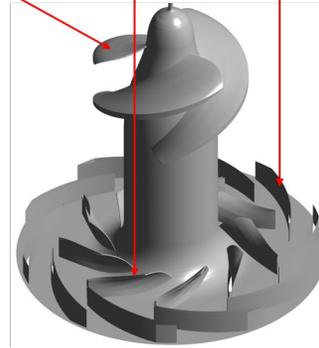
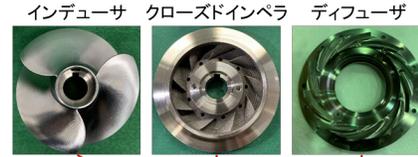
研究開発成果 ①-1 液化水素用流体解析の高度化と流動不安定の抑制 (早稲田大学)

□ 目的

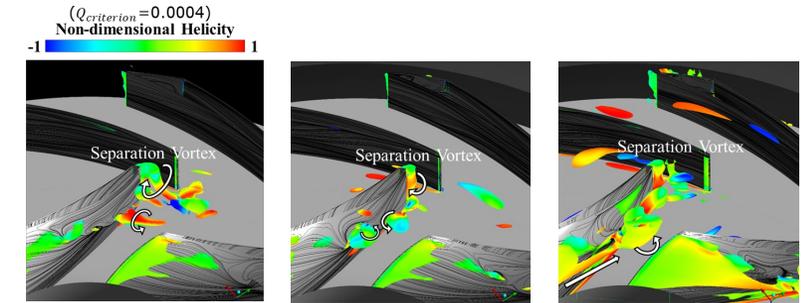
- 複雑な物性を有する液化水素用ターボポンプの性能予測技術の構築
- キャビテーションによる流動不安定現象評価技術の構築

□ 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、設計製作構築
ポンプからモーターまで同軸の極低温ポンプを製作し、トルクの直接計測可能
- 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
性能曲線、渦構造からLN2、LH2の類似性、H2Oの相違を確認
- キャビテーション領域から吐出90MPaまでの広い範囲での安定な解析を可能とする方法を構築
- 流体解析によりキャビテーション体積変動によるキャビテーションサージを模擬、解析の安定性、精度の評価を尾実施



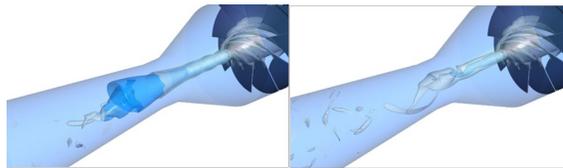
液体窒素ループの構築



LN2

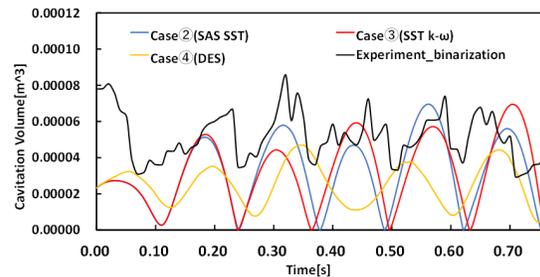
LH2

H2O

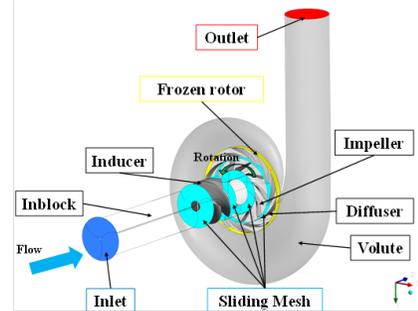


ベンチュリ管スロート中央断面

キャビテーションと渦の関係

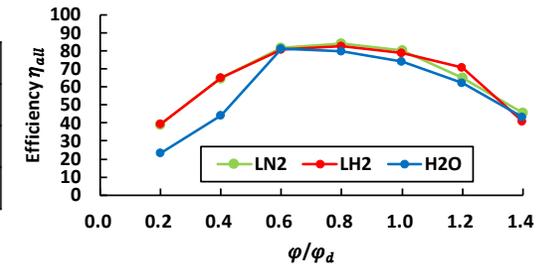


キャビテーション体積変動の予測



設計したポンプと解析領域

	翼枚数
Inducer	3
Impeller	9
Diffuser	10



流動解析によるポンプ効率・内部流れ比較

□ 目的

- 極低温水素二相流の計測・制御に焦点をおき、ボイド率計測やボイルオフガスの低減を実用レベルに近づける。
- 全体プロジェクトの目的である「流体シミュレーション技術」の精度検証を行うための希少なデータ取得。
- ボイド率センサーは、機器のヘルスマモニタリング、二相流の流量計として、コーティング技術は、ボイルオフガス低減への使用を目的。

□ 進捗状況、成果

- オール金属タイプ極板型センサー(図1)の開発
3MPaでの耐圧、気密性実証(GN2)。常温流体（層状流模擬）による精度検証（誤差6.5%）、LH2でも計測可能(図2)（精度検証は未実施）
- テーパー型センサー(図3)の試作、試験完了
平行型が優れていることを確認、常温流試験で、定性的に計測可能であることを確認
- 液化水素を用いた実証試験設備の完成、試験実施
光学計測、ボイド率計測、キャビテーション温度計測を実施(液体窒素試験完了。水素では漏れが発生し、中断)
- マルチメータの原理検証
深層学習(LSTM)を利用した分類モデルにより、16分類モデルで最高96.7%の判別精度を達成。回帰モデルにより、流量計測を実施(図5)。追従はするが、精度は改善の余地あり。
- コーティングによるボイルオフガスの低減
耐久性の高いコーティング手法の獲得(図6)。LN2実験により、ボイルオフガスを最大78%低減(図7)。LH2実験では、効果が確認されず(今後、原因究明と対策)
- 今後、ボイド率計、流量計の精度向上と実用化研究(キャビテーション計測)



図1. オール金属タイプ極板型センサー

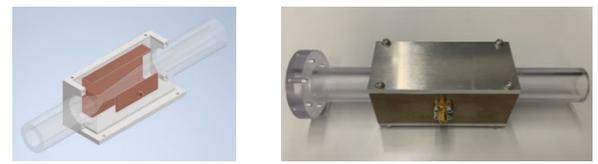


図3. テーパー型センサー

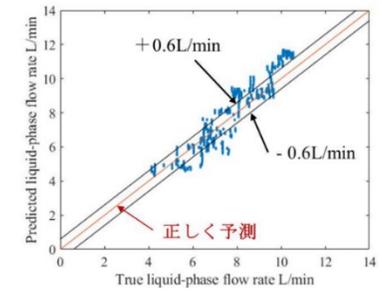


図5. マルチメータによる流量計測



図6. 表面コーティングの例

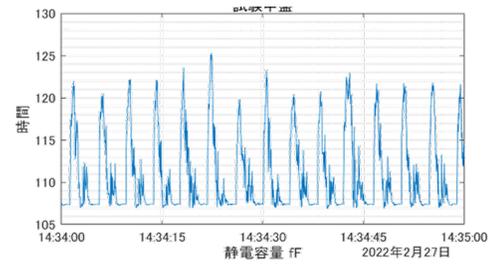


図2. 液化水素試験結果

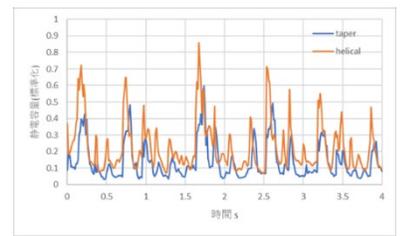


図4. テーパー型(青)と螺旋型(橙)の比較(スラグ流)

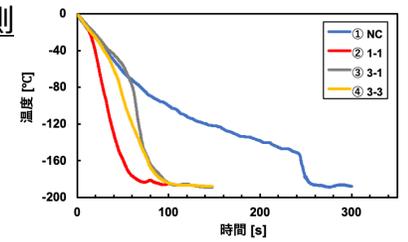


図7. 予冷曲線(LN2) コーティング無し(青)、あり(その他)

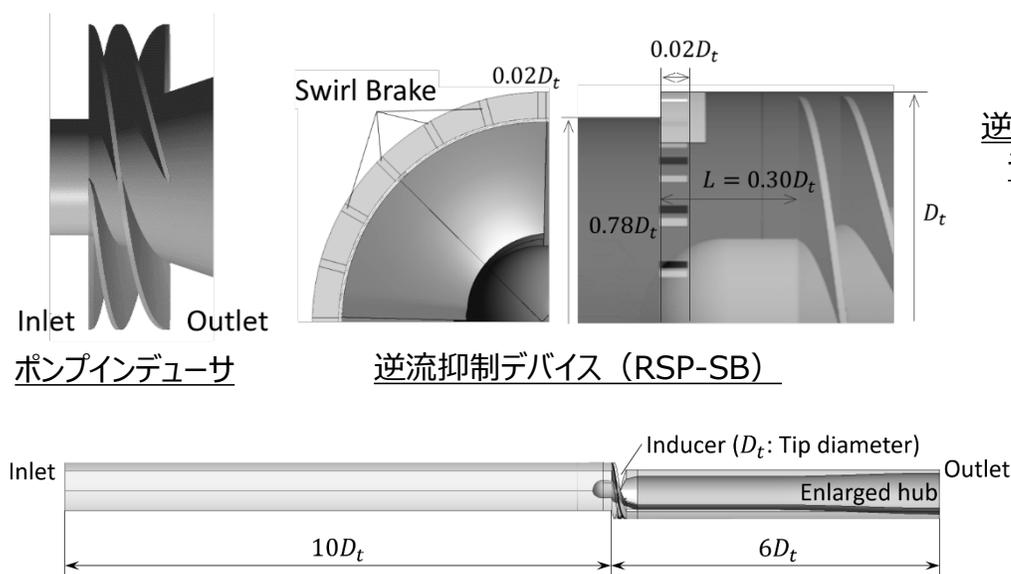
□ 目的

- ポンプ逆流抑制デバイスの開発：九大考案^[1]の逆流抑制デバイス付きポンプの熱流動解析による逆流・吸込み性能の予測
- キャビテーションモデルの構築：熱力学的効果を考慮した均質媒体気泡流モデルの構築とCFD解析による検証

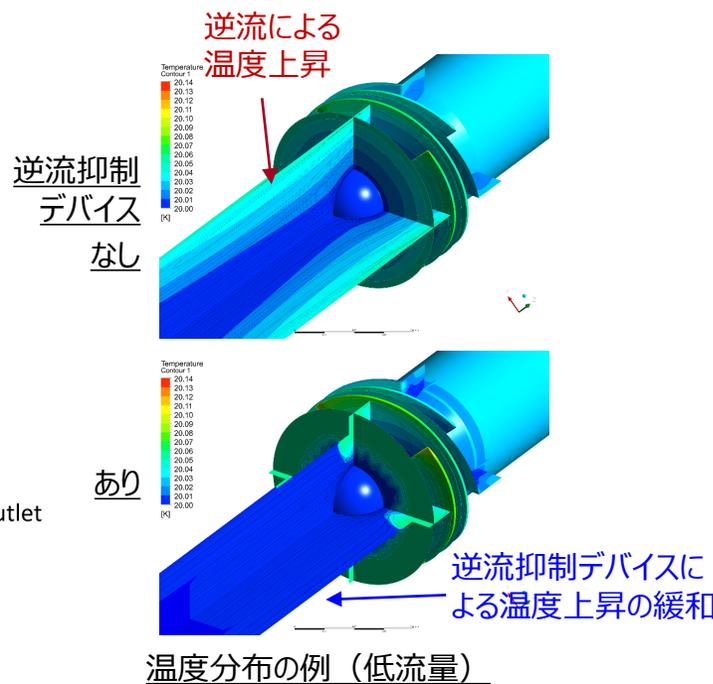
□ 成果① ポンプ逆流抑制デバイスの開発

本提案で用いたポンプ逆流抑制デバイスにより

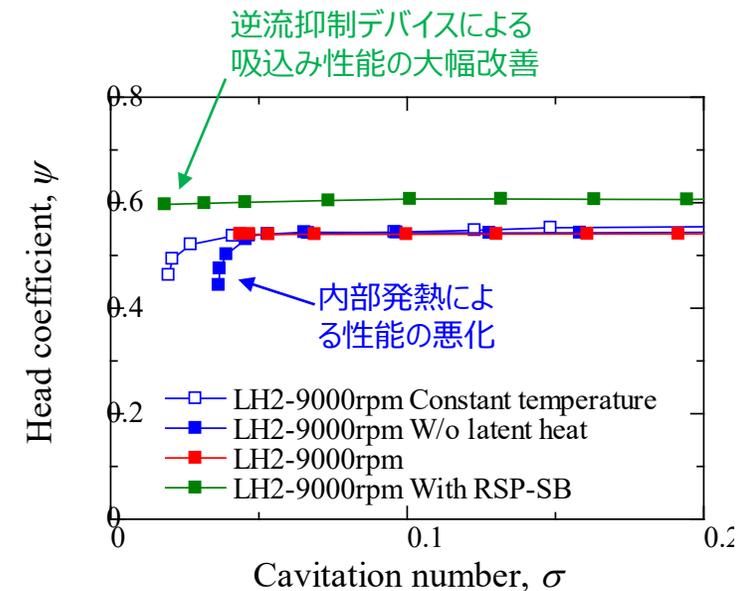
- 大流量においてもインデューサの性能を大きく損なうことなく、小流量での逆流抑制効果を実現
- 液化水素特有の熱力学的効果による吸込み性能向上が見込めることを確認



解析モデル



温度分布の例 (低流量)



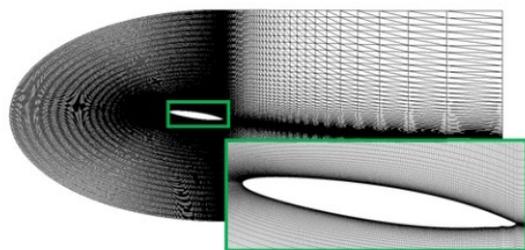
逆流抑制デバイスによる吸込み性能の改善例 (低流量の場合)

[1] Tanaka et al., ASME J. Fluids Eng. (2022).

□ 成果② キャビテーションモデルの構築

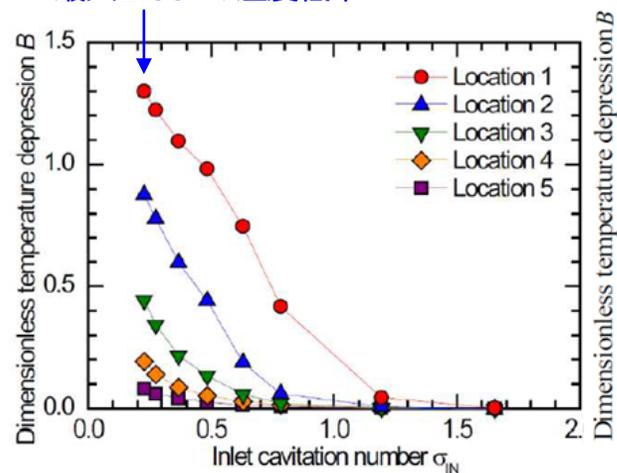
九州大学で独自に開発・改良を実施している多重プロセス型モデル(ただし一温度モデル)の適用により

- 高い計算精度が期待される既往の別手法と比べて, 熱力学的効果に伴う温度低下量をより良好に予測可能であることを確認
新たに独自開発した気液両相の温度を考慮可能な二温度モデルの適用により
- 多重プロセス型モデルにおける温度低下量の過小評価傾向の改善が期待されることを定量的に確認



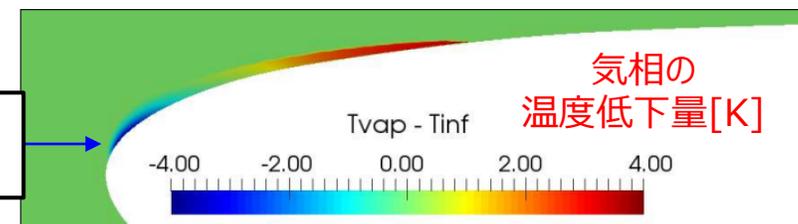
単独翼(NACA16-012)

実次元換算では
最大2.35Kの温度低下

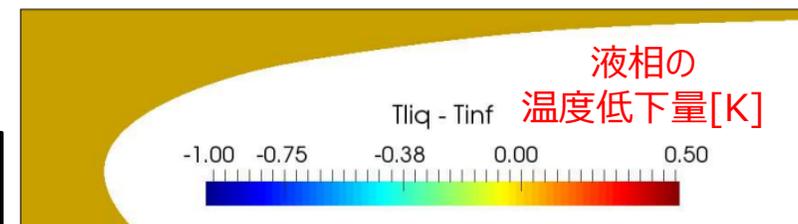
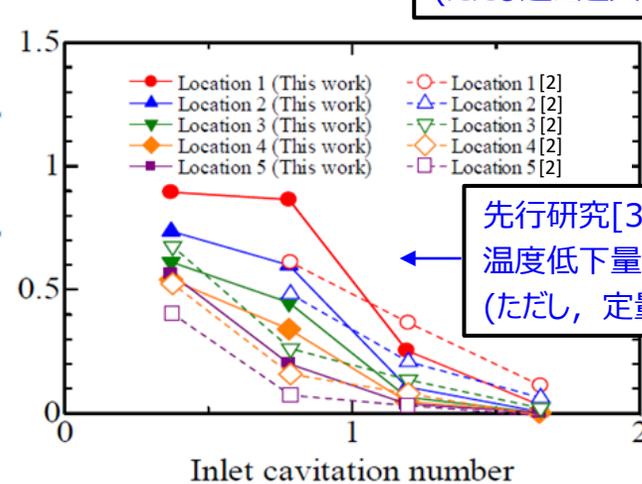


NACA16-012翼上面5点の温度低下量 (左: 実験[2], 右: 多重プロセス型モデル)

蒸気内温度低下量は最大で4K程度
(ただし逆に過大評価の可能性有り)



先行研究[3]に比べて,
温度低下量は実験[2]に近い
(ただし, 定量的には過小評価)



二温度モデルによる温度低下量の計算結果例(NACA16-012翼前縁近傍)

[2] Niiyama et al., Proc. CAV2012, (2012).
[3] 武田ら, キャビテーションに関するシンポジウム(第17回), (2014).

□ 目的

- 液体窒素作動下の吸込性能試験から、液体水素作動下における最適な羽根形状を考察
- 成果を「流体シミュレーション技術」の解析予測精度の向上に活用。

□ 成果

- キャビテーションの熱力学的効果による吸込性能改善確認
冷水時よりも液体窒素作動時の方が、揚程降下時のキャビテーション係数が小さくなっており、キャビテーションの熱力学的効果が発生していることが確認された。
- 熱力学的効果による温度降下量の推定
熱力学的効果による温度降下量は、キャビテーションの発生量が少ないと推定される設計流量点 ($\phi/\phi_r=1.0$)で最も小さい。また、過大流量、あるいは部分流量であれば、キャビテーション発生量が増大するため、温度降下量は大きくなることが明らかとなった。一方、流量がさらに少ない場合は、キャビテーション発生量が少なくなるため、熱力学的効果が減少し、温度降下量が小さくなることも明らかとなった。

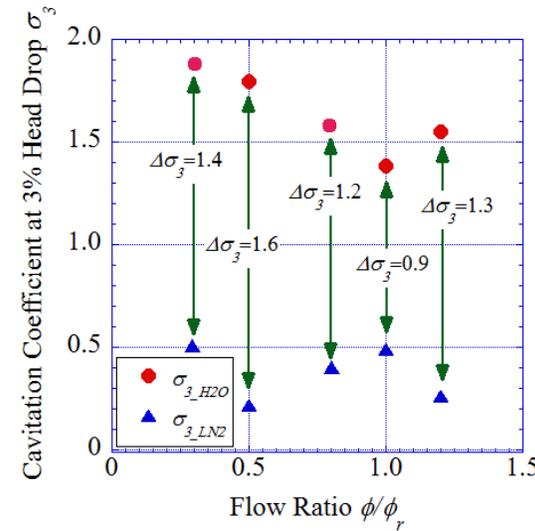


液体窒素循環試験設備

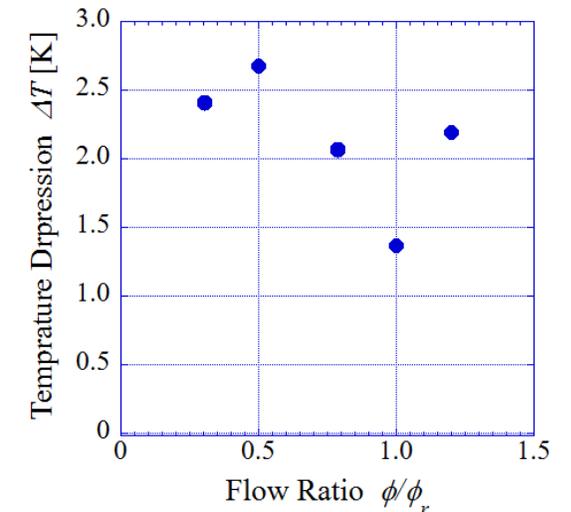


(5枚羽根)

製作した遠心羽根車の例



作動流体の違いによる揚程降下時のキャビテーション係数



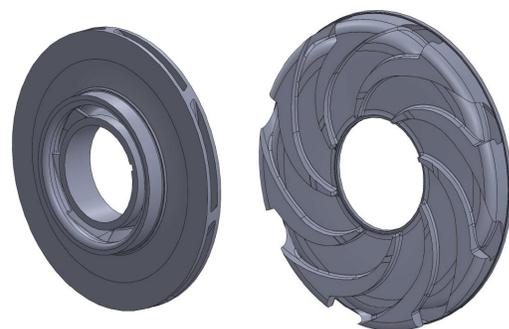
キャビテーションの熱力学的効果による温度降下量の予測

□ 目的

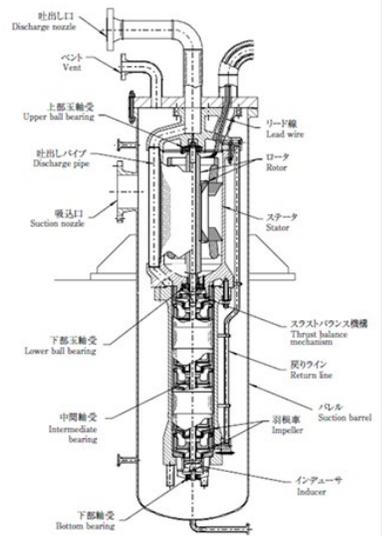
- 液化水素ポンプの数値流体解析技術の基盤確立
- 商用コードをベースとした流体解析技術の高度化と精度向上
- 液化水素用多段ポンプの設計と流体解析による性能の予測

□ 進捗状況・成果

- 多段ポンプの設計と内部流れの解析を実施。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ングな仕様となる質量流量30t/h、出口静圧3MPa以上とした。
- それぞれ単段であるポンプ遠心羽根車+ディフューザ-流路を対象に、状態方程式群をプログラム化したREFPROPを用いる圧縮性液化水素の流体解析を、ANSYS CFXを用いて実施、性能マップ（性能曲線）を取得した。質量流量30t/hの設計点流量で、出口静圧3MPa以上に達した。
- 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。
- LN2と液化水素のポンプの解析を実施し、REFPROPの状態方程式を用いた圧縮性解析に関しては、予測精度を順次確認予定。
- 実験結果との比較による精度検証を十分に重ね、真に信頼性のある設計開発ツールとして実用化していく作業は今後も必須。キャビテーションを含んだ流れに関しては、今後も基盤的な研究が不可欠。

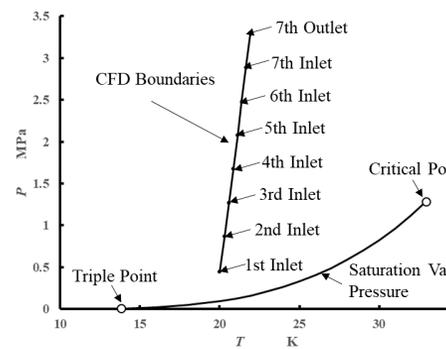


インペラー
リターンチャンネル
(ディフューザ+戻り案内羽根)

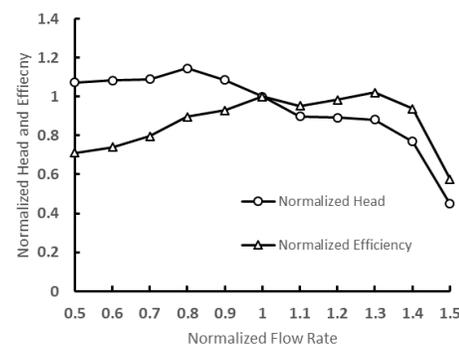


多段ポンプの参考例
(松村,荏原時報No.213,
(2006-10),pp15-22)

液水大谷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



液化水素ポンプ初段の性能曲線

7段の多段解析の計算結果。最終段の出口で3MPaに達成。

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

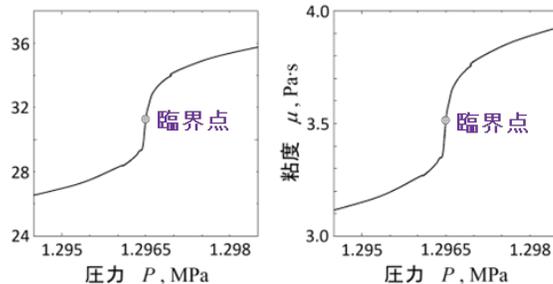
- 臨界点をまたぐ低温流体は大きな物性変化を伴うため流動不安定の発生が懸念。臨界点をまたぐ水素の配管網，機器において水素の流体シミュレーション精度の向上を図り、今後のグリーン液化水素社会を実現するエネルギーキャリアシステムの信頼性向上に寄与する。
- 液化水素と類似の挙動を示す液体窒素を用いて流動不安定性を模擬する実験設備、シミュレーション技術を構築。

□ 成果

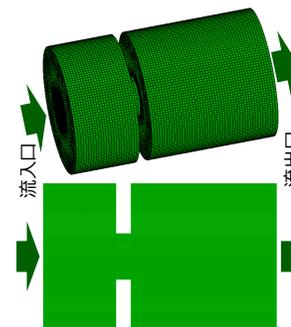
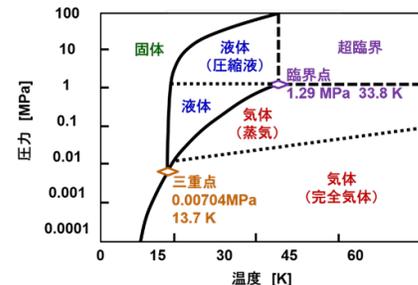
- 液体窒素加圧により窒素の臨界点3.4 MPa, 126 K (-147 °C) を越える超臨界窒素の生成、熱交換器による圧力・温度の制御、出口バルブによる流量制御により検証試験流路内で緩やかに臨界点をまたがせ（超臨界窒素→液体窒素）、流れの不安定状態を意図的に作成し定量計測可能な装置を構築。
- 汎用流体シミュレーションコードにおいて低温流体の実物性値を用いた上で、臨界点をまたぐ試験流路にオリフィスを設置した数値シミュレーションを実施し、流れの不安定状態を再現できることを確認。
- 遷臨界流れが不安定性を有する根本原因を推定するため、オリフィス流れを用いて臨界点をまたぐ数値解析を実施。遷臨界のオリフィス内流速をCase1では臨界点の物性値で密度，熱伝導率，粘度を固定した非圧縮性流体とした解析を、Case2ではRefPropによる実物性値を用いた圧縮性流体として臨界点をまたぐ解析結果を示す。Case2ではオリフィス下流の不安定性を模擬できた。
- 遷臨界流れが不安定性を有する根本原因は、臨界点の物性値の絶対値ではなく、臨界点近傍での温度変化・圧力変化に対する物性値の変化である。ゆえに、実物性値との連携が必須。



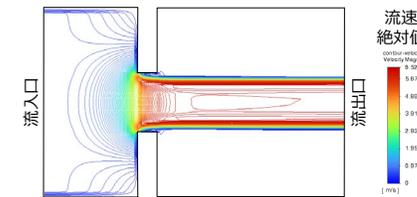
遷臨界液体窒素試験装置



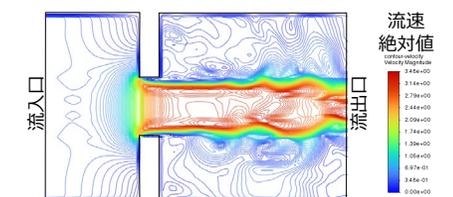
液化水素物性値



計算対象オリフィス



Case1 臨界点の物性値で固定・非圧縮性



Case2 実物性値・圧縮性

遷臨界のオリフィス内の流速

□ 目的

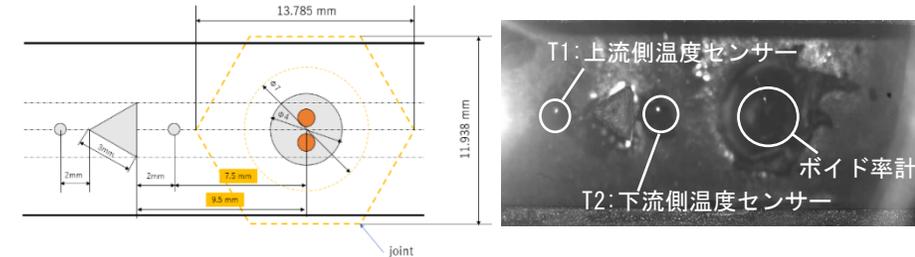
- 液化水素中のキャビテーションでは熱力学的抑制効果が発生、シミュレーション技術ではその抑制量の正確な予測が必要。
- 高速液化水素流れ中に発生するキャビテーションの内部温度計測を高精度で行い、構築する流体シミュレーションのベンチマークデータとして用いることにより、液化水素流れシミュレーション技術の高精度化に貢献。

□ 進捗状況・成果

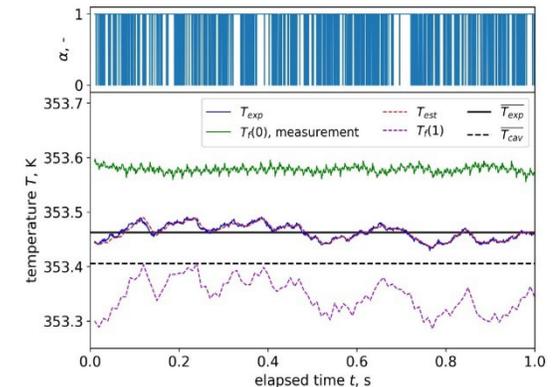
- **水素二相流の様相を可視化**することができた。リークしない測定部の構造・仕様、耐圧・リーク試験の手順、機材の防爆仕様等の液体水素可視化試験のノウハウを得た。
- 最大限の断熱を試みても液体水素流れは二相化してしまったことから、液体水素を輸送する水素ポンプ等の流体機械は二相状態を前提とした設計が必要であると言える。
- 水素キャビテーション内部の1K程度の温度低下を高精度に計測できる白金測温抵抗体を用いた**温度計測手法とその校正法を確立**した。本温度センサーは17Kから25Kまでの温度範囲における計測で**±0.024Kの不確かさ**を有する。
- 窒素気液二相流の温度計測を実施し、本温度計測手法で妥当な温度が得られること、および本温度計測プローブの強度が十分にあることが確認された。
- 温度センサーの時定数が大きいため**これまで困難とされてきた非定常キャビテーションの温度計測において蒸気温度を推定する手法を構築**した。
- 非定常キャビテーション温度推定手法を用い80℃高温水における非定常キャビテーションの温度計測を行った結果、蒸気暴露率75%の非定常キャビテーション流れでは、実測値は液相側温度に引きずられ、平均実測温度は過大評価となることが示された。また、計測誤差+0.057Kは温度センサーとして用いたサーミスターの拡張不確かさ0.019Kよりも大きな値となったことより、非定常キャビテーション流れの温度計測には本温度推定手法が必要であることが示された。



水素キャビテーション流動試験の様子 (JAXA能代ロケット実験場、一部既設)



温度およびボイド率計測プローブ配置の様子



開発した非定常キャビテーション流れにおける蒸気温度推定手法

ご清聴ありがとうございました。