



東京大学
THE UNIVERSITY OF TOKYO



2024.03.21第13回FC-Cubicオープンシンポジウム

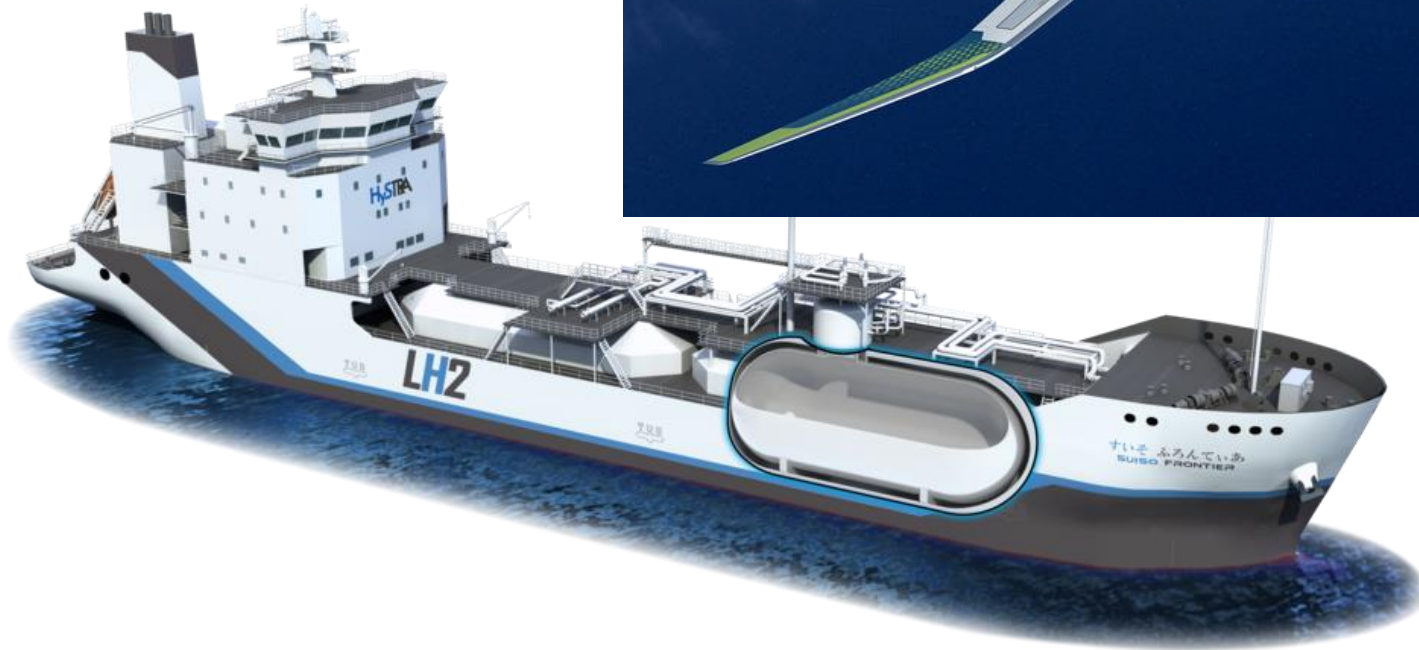
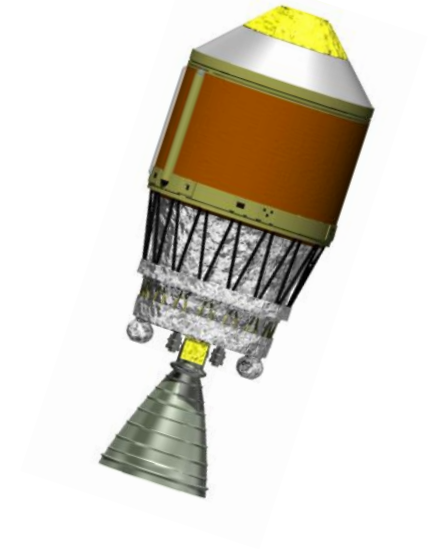
乗り物に載せた極低温流体の動きと圧力を操る

CFM : Cryogenic Fluid Management

東京大学 航空宇宙工学専攻 姫野 武洋

UT JET PROPULSION LABORATORY

水素貯蔵技術



水素貯蔵技術

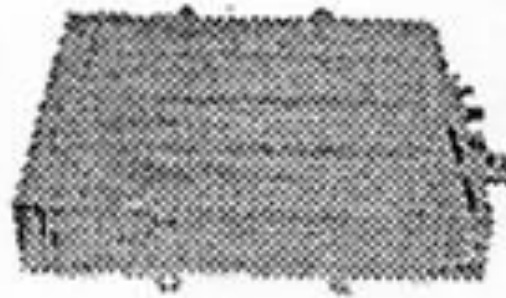


高圧水素タンク



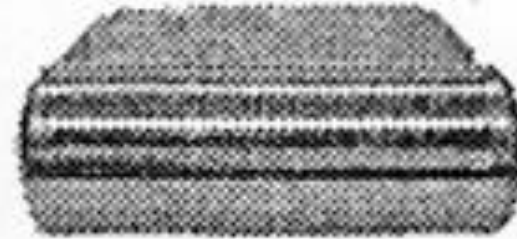
課題： 容積

水素吸蔵合金タンク



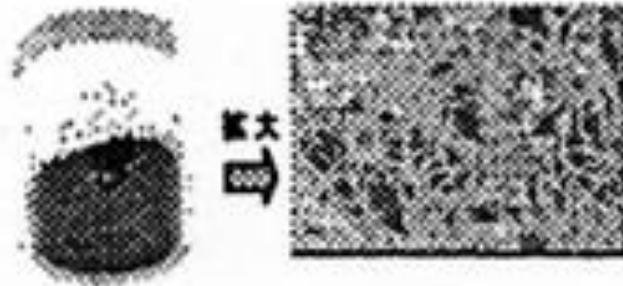
重量

液体水素タンク



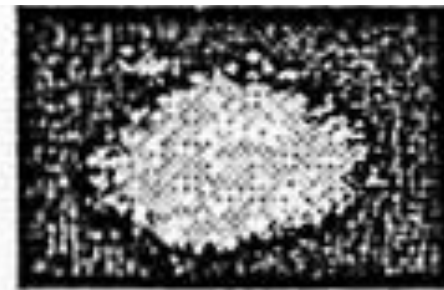
蒸発

カーボンナノチューブ



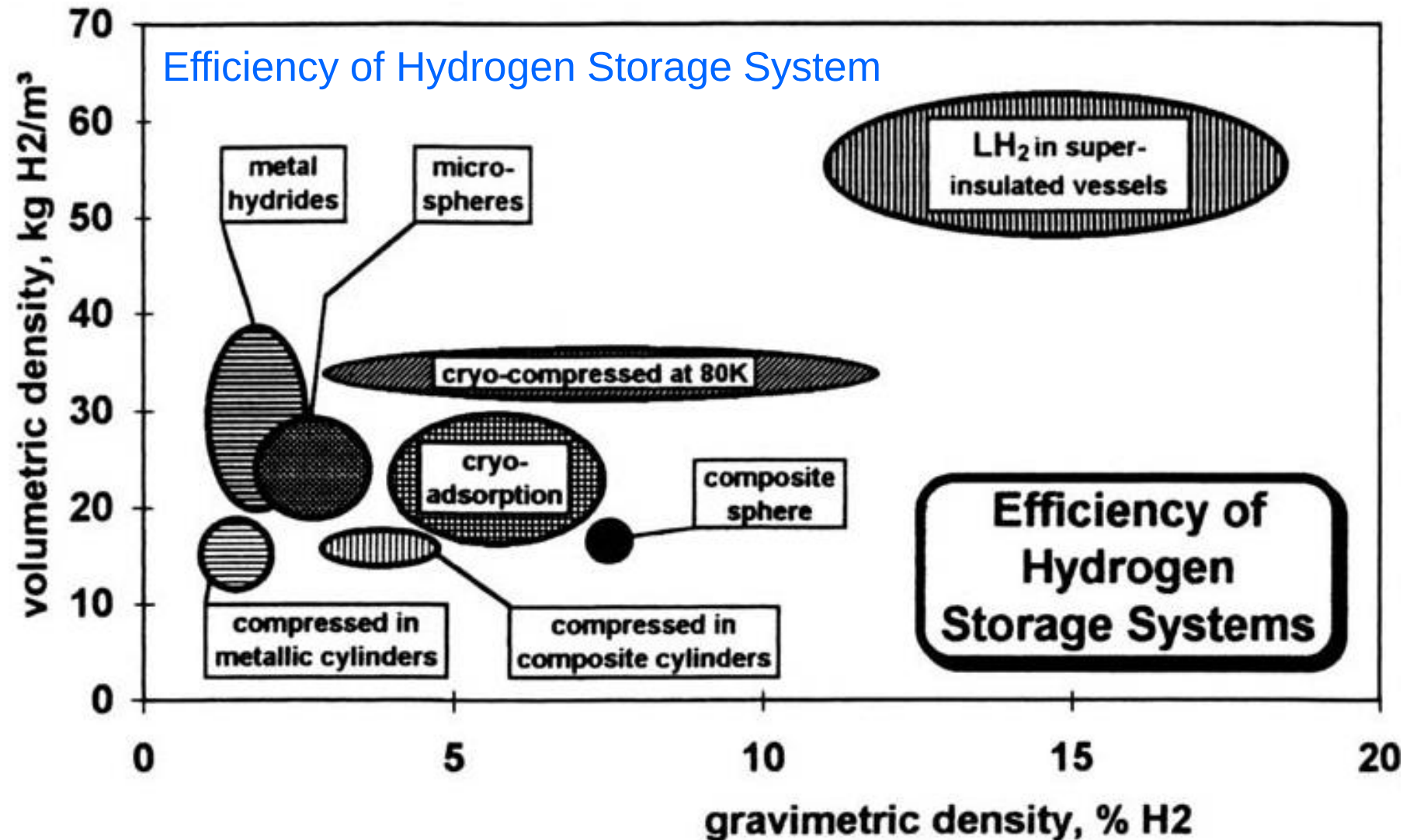
課題： 実力は？

ケミカルハイドライド



回収/リサイクル

水素貯蔵技術



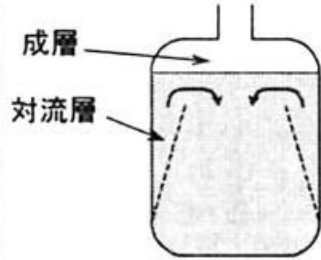
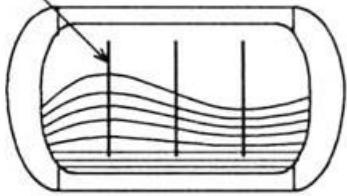
出展：F. Michel, et. al., "Onboard equipment for liquid hydrogen vehicles", the proceedings of the 11th World Hydrogen Energy Conference, 23-28 June, 1996, Stuttgart, Germany, p.1063-1077

モビリティ全般に関係する自由表面流

移動式タンクにおける熱流体管理・予測



定置式タンクと移動式タンクの熱流動比較

	定置式タンク	移動式(コンテナ)タンク
蒸発ガス ライン状態	通常、大気開放状態で、気相圧力はほぼ大気圧状態	移動中は閉状態で、気相圧力は容器設計圧力以内の大気圧以上
液体水素の 動的挙動	静定状態で外部入熱による自然対流発生	移動中の振動、加速度等の外乱によりスロッシング(液揺動)が発生
液体水素の 熱的挙動	液表面に成層(Thermal Stratification)を形成	液とタンク内壁との熱接触及び運動エネルギーの熱散逸で蒸発促進 液内部の混合による液面温度低下で蒸発抑制
流動模式図		

(出典) 固体高分子形燃料電池/水素エネルギー利用成果報告会予稿集
 ー水素エネルギー利用技術(WE-NET)第Ⅱ期研究開発
 NEDO水素エネルギー技術開発室(2003.3.12)

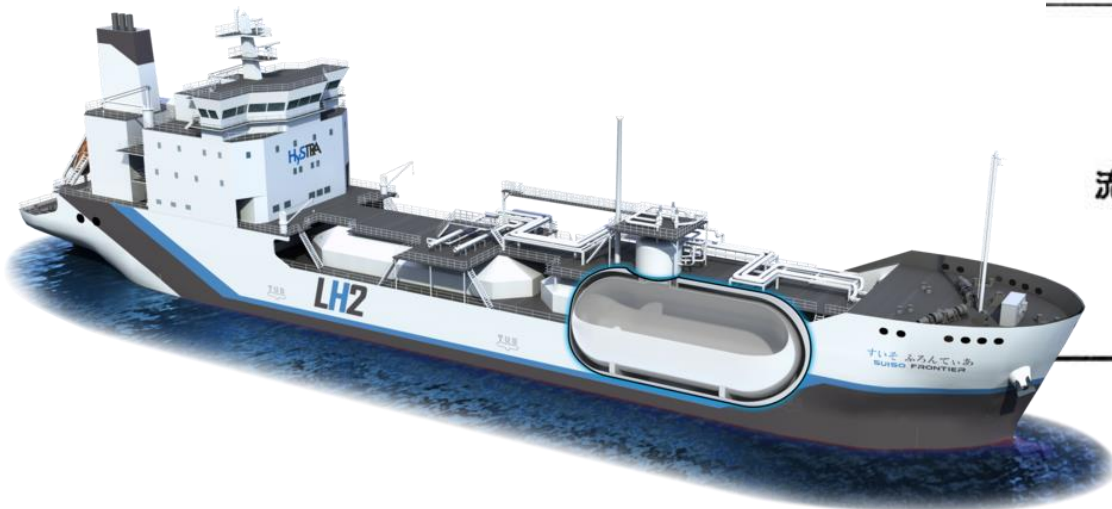


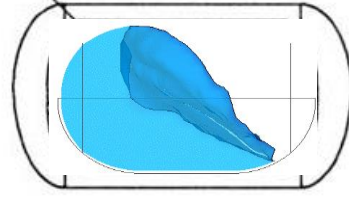
モビリティ全般に関する自由表面流

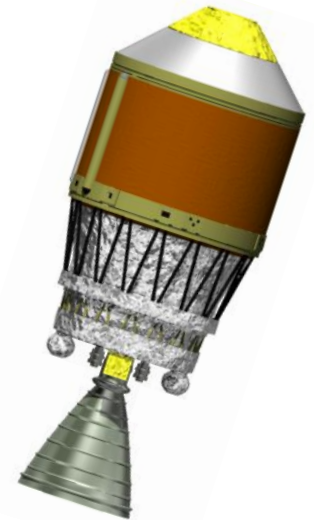
移動式タンクにおける熱流体管理・予測



移動式タンクの熱流動.

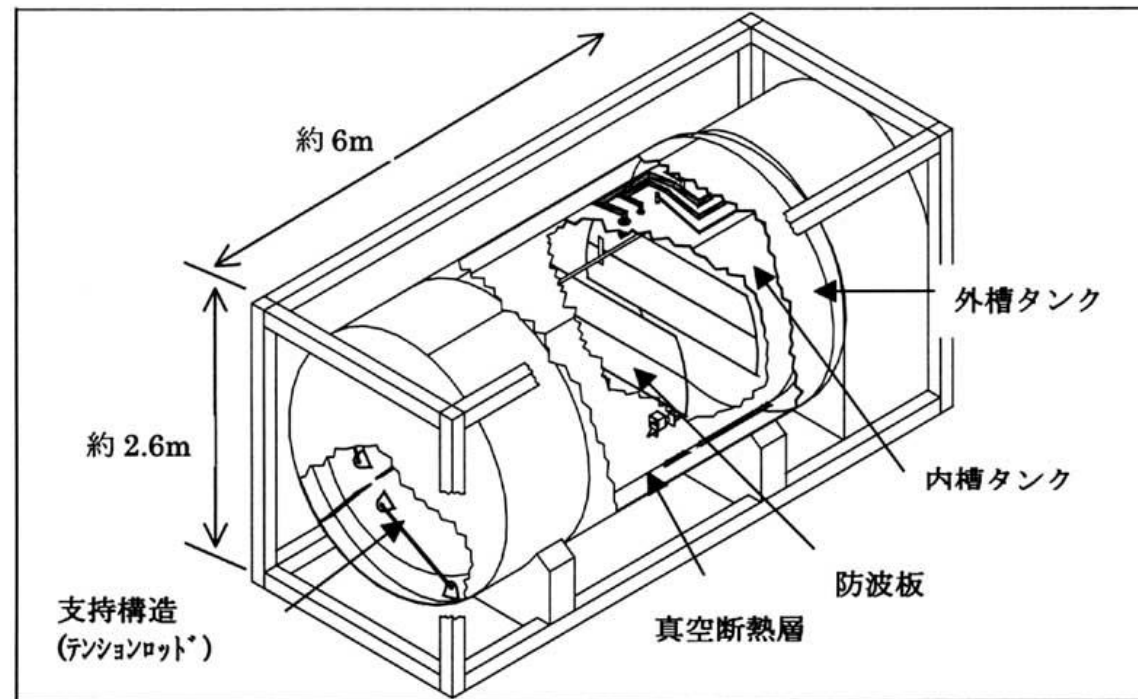


	移動式(コンテナ)タンク
蒸発ガス ライン状態	移動中は閉状態で、気相圧力は 容器設計圧力以内の大気圧以上
液体水素の 動的挙動	移動中の振動、加速度等の外乱 によりスロッシング(液揺動)が発 生
液体水素の 熱的挙動	液とタンク内壁との熱接触及び運 動エネルギーの熱散逸で蒸発促進 液内部の混合による液面温度低 下で蒸発抑制
流動模式図	防波板 



極低温 のなかでも 特に 極低温

圧力を下げる方法が限られている (低コストな手段が無い)



液体水素コンテナ (容量 15m³) の概略図

蒸発・圧力上昇の原因

- ・ 内槽タンクへの外部入熱
- ・ スロッシングエネルギー散逸
- ・ 揺動液体と上部壁との熱交換
- ・ 揺動液体による攪拌効果

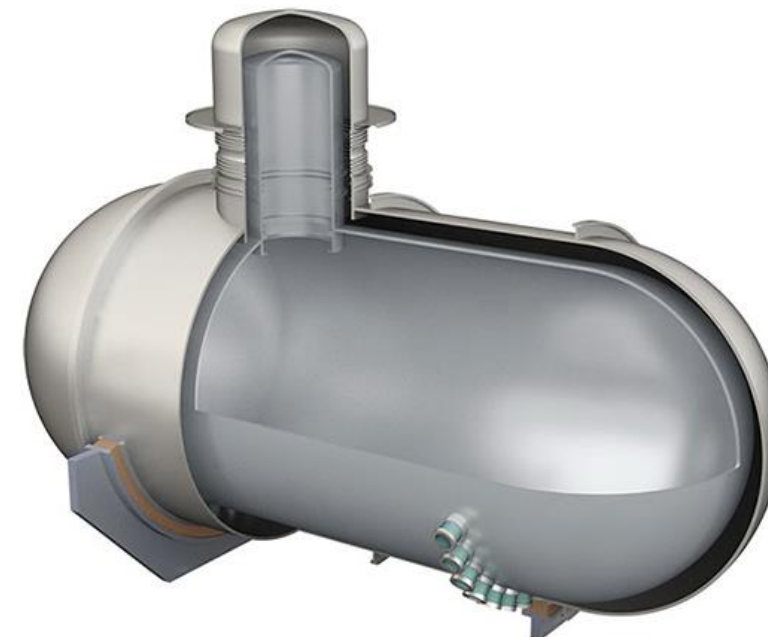


高度な断熱技術が必要

(出典) 固体高分子形燃料電池/水素エネルギー利用成果報告会予稿集
— 水素エネルギー利用技術 (WE-NET) 第II期研究開発
NEDO水素エネルギー技術開発室 (2003.3.12)

極低温 のなかでも 特に 極低温

圧力を下げる方法が限られている (低コストな手段が無い)



蒸発・圧力上昇の原因

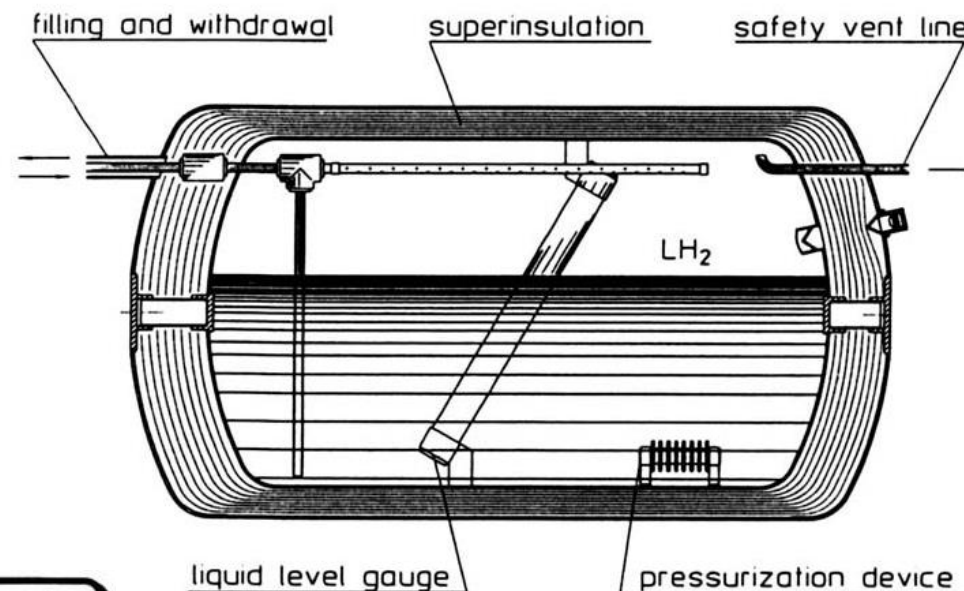
- ・ 内槽タンクへの外部入熱
- ・ スロッシングエネルギー散逸
- ・ 揺動液体と上部壁との熱交換
- ・ 揺動液体による攪拌効果



高度な断熱技術が必要

極低温 のなかでも 特に 極低温

外界との熱的遮断を壊そうとする 要因はたくさんある



Safety tests with liquid hydrogen storage vessels



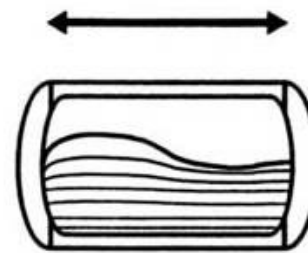
Deformation



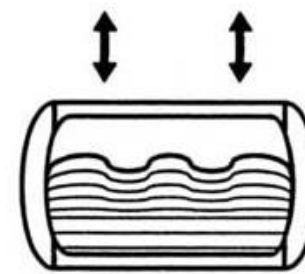
Perforation



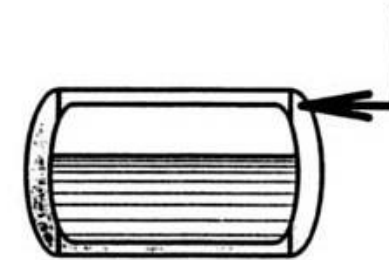
Firebrand



Acceleration



Vibration



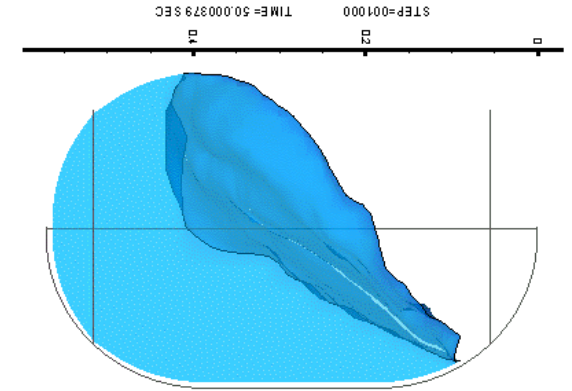
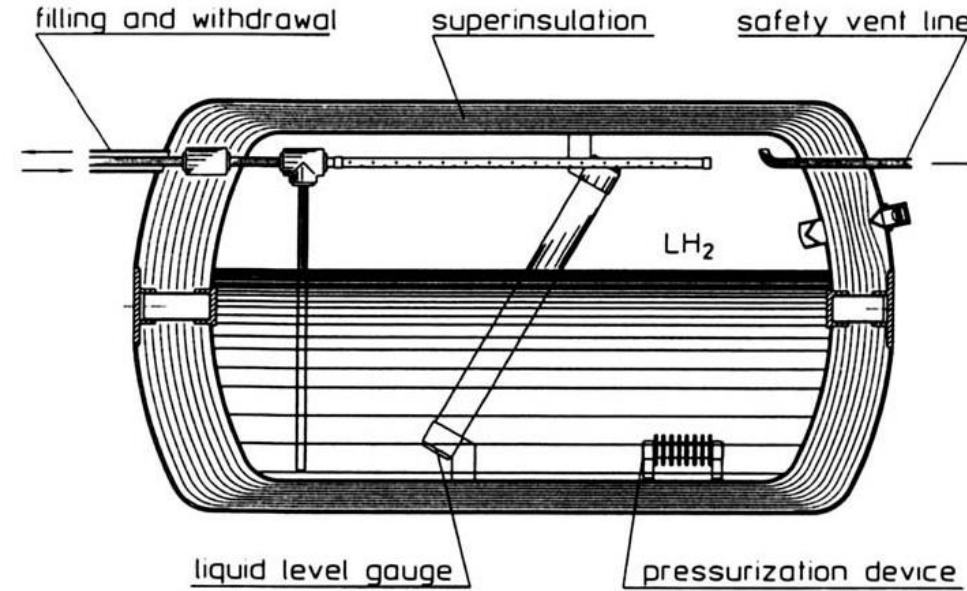
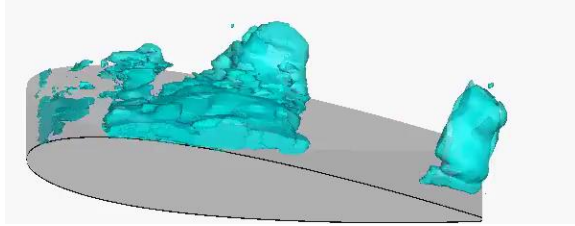
Flooding of vacuum

出展 : F. Michel, et. al., "Onboard equipment for liquid hydrogen vehicles", the proceedings of the 11th

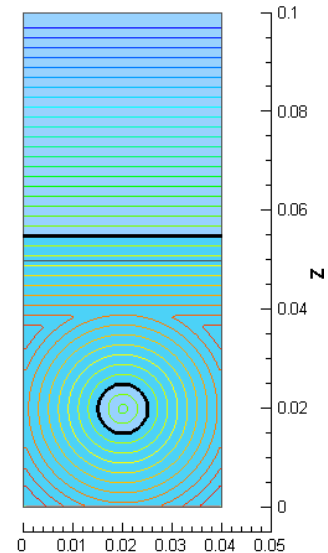
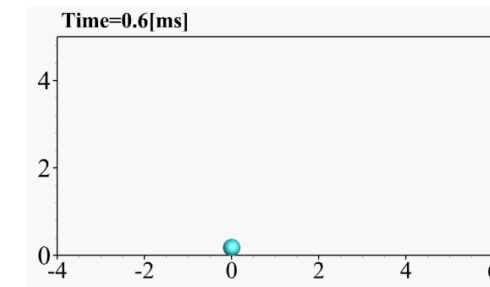
World Hydrogen Energy Conference, 23-28 June, 1996, Stuttgart, Germany, p.1063-1077

モビリティ全般に関する自由表面流

移動式タンクにおける熱流体管理・予測



0.5 [sec]



0000 TIME= 0.0000

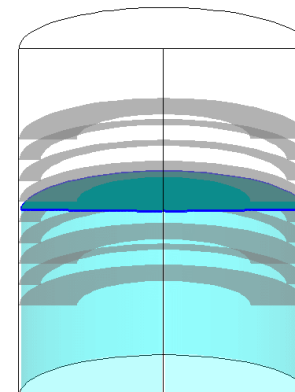


東京大学
THE UNIVERSITY OF TOKYO



UT-JAXA Collaboration

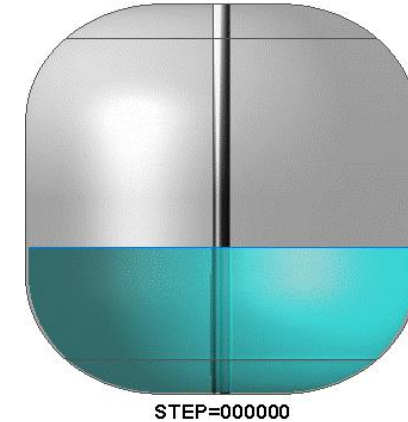
ロケット・宇宙機に関する研究例



UT JET PROPULSION LABORATORY

自由表面流

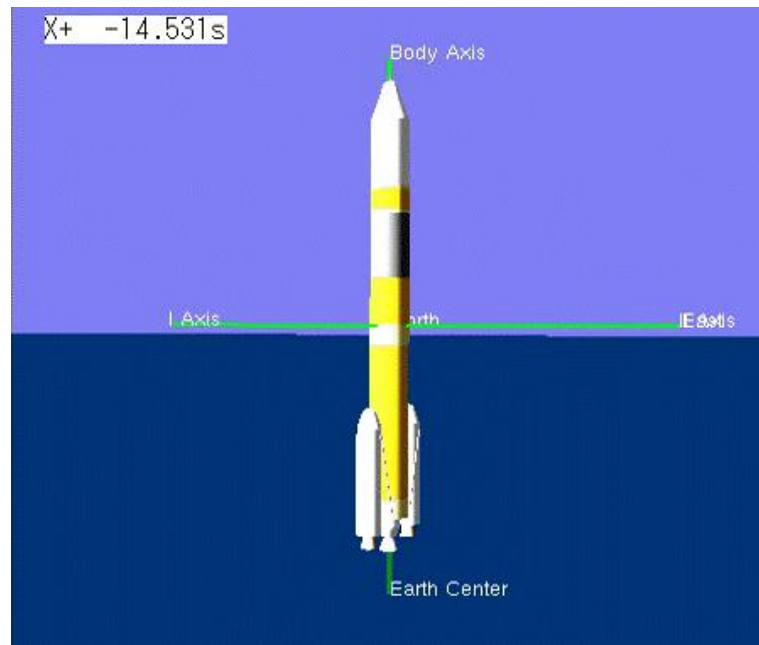
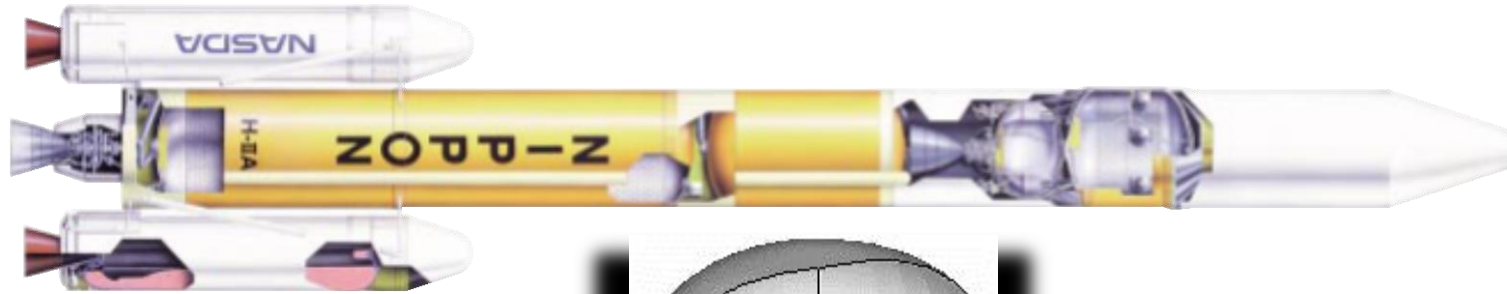
とても身近ではあるが、
形を説明したり予測するのはとても難しい。



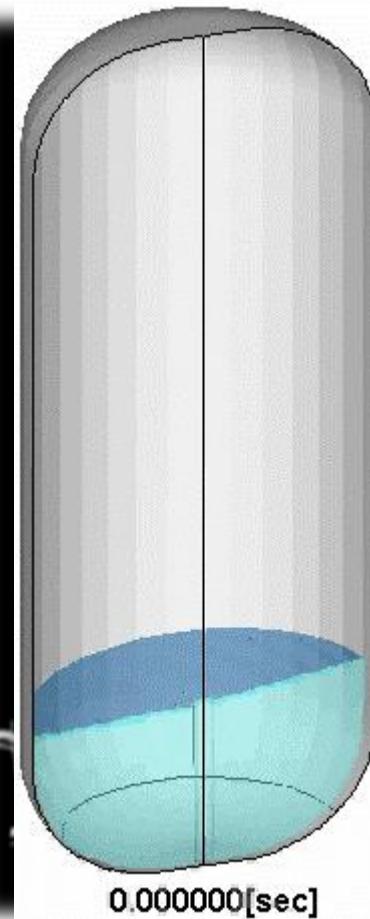
東京大学とJAXAは協力して、
航空宇宙推進機関内部の
自由表面流の熱流動を予測できる知見と技術の
獲得に努めている。



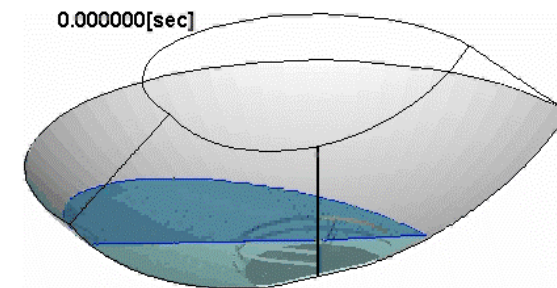
液体ロケットに関する自由表面流 二相流動の挙動管理・予測



宇宙輸送機の
姿勢変化と推力変動に伴って
内部加速度は時間的に変化する。



スロッシングは
重心移動に伴う
推力ミスアライメント
を伴うため、
航法誘導上有害
意図せぬ
熱伝達促進を伴うため、
タンク圧制御上有害



(Himeno and Watanabe 2004)

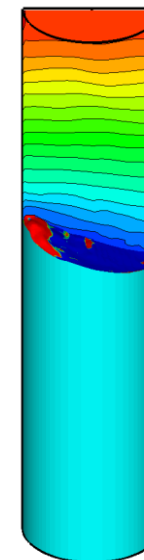
液体ロケットに関する自由表面流 相変化を伴う熱流体管理・予測



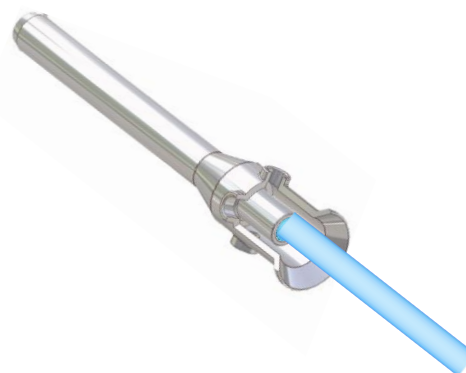
Boiling in feed line



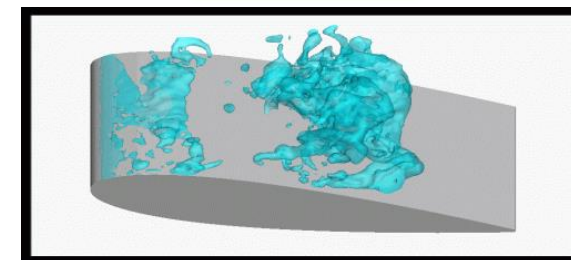
Non-isothermal Sloshing



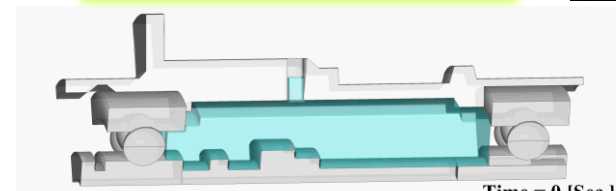
Atomization and Vaporization



Cavitation



T/P Shaft Chill-down





・・・ 着眼点

宇宙開発利用の進展に伴い、宇宙輸送システムの推進機関や軌道上構造物の熱管理機器など、地上とは異なる加速度環境で液体を利用する場面が増えつつある。

これらの流体機器を構成する液体貯蔵容器や蒸発・凝縮器の内部は、気液両相の共存系となるが、推力や姿勢変動を伴う宇宙機内部の動的加速度環境や、比重差による液体駆動を期待できない軌道上の低重力環境では、液体を望ましい位置に保持し、思い通りに搬送するという、**流体管理 (fluid management)** が非常に難しくなる。

今後、軌道上で運用される流体機器の信頼性を向上させ、同時に開発コストと運用リスクを低減するためには、その設計・計画段階から作動流体の挙動を適切に予測する技術が求められる。特に、貯蔵容器や流路内部の自由表面流を考える場合、液体の重心移動などの動力学特性に注目するだけでなく、伝熱や相変化までも考慮し、共存する気体との熱交換に起因する熱流動特性を把握することが重要である。



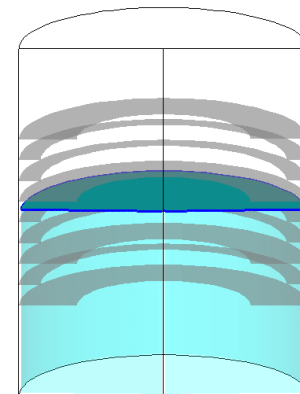
東京大学
THE UNIVERSITY OF TOKYO



UT-JAXA Collaboration



液体挙動予測
圧力変化予測
沸騰現象予測



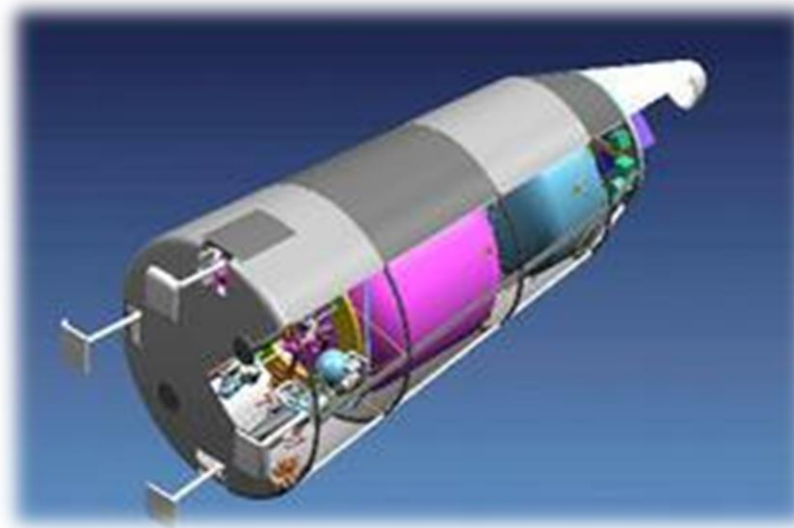
UT JET PROPULSION LABORATORY

再使用観測ロケットの推進薬管理

SRLV: Sub-orbital Reusable Launch Vehicle

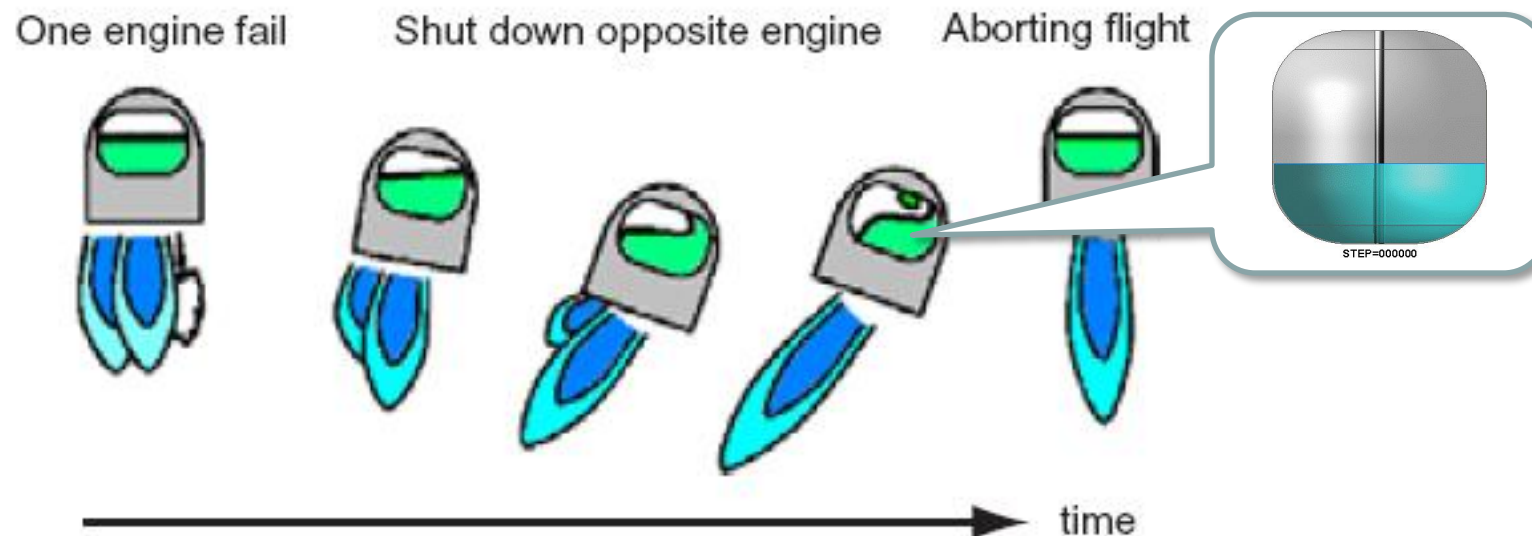


RVTから発展した開発プログラムとして
JAXA/ISAS は 再使用観測ロケット の概念設計を行い提案している。



RVT : Reusable **V**ehicle **T**esting
VTVL flight demonstrator

万一、エンジンの1基が故障した場合、
対になるもう1基のエンジンも自動停止し、
推力のミスアライメントを修復する。



故障発生から対エンジンの停止までの秒時、
推力ミスアライメントにより
機体姿勢が大きく乱される。

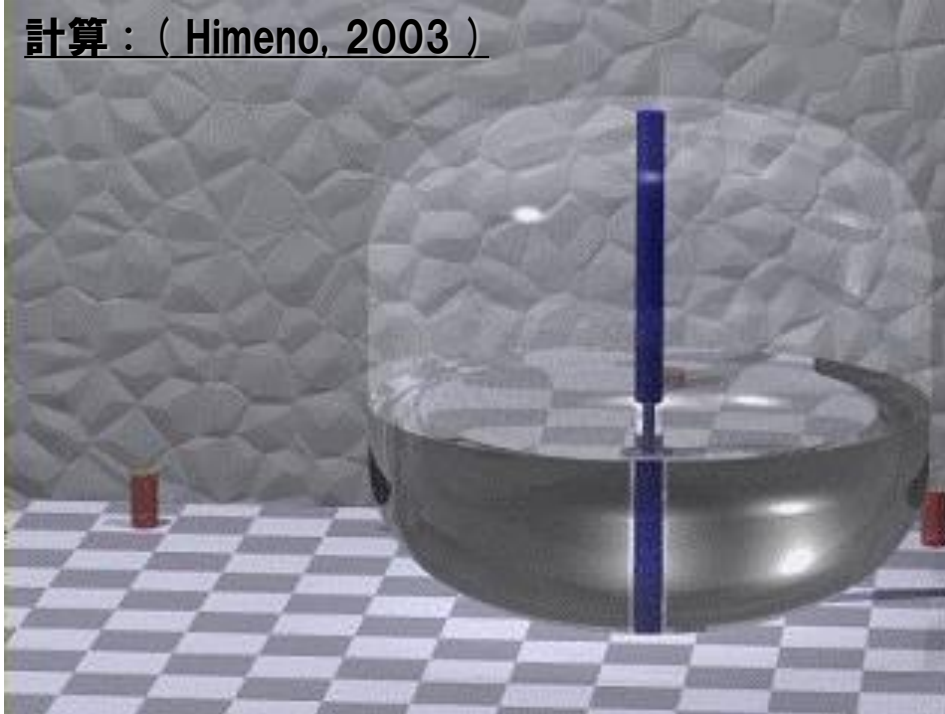
推進薬管理の観点からは、
非定常的な横加速度が
スロッシングや**ガス噛み**を
引き起こす恐れが懸念される。

液体推進薬のタンクスロッシング

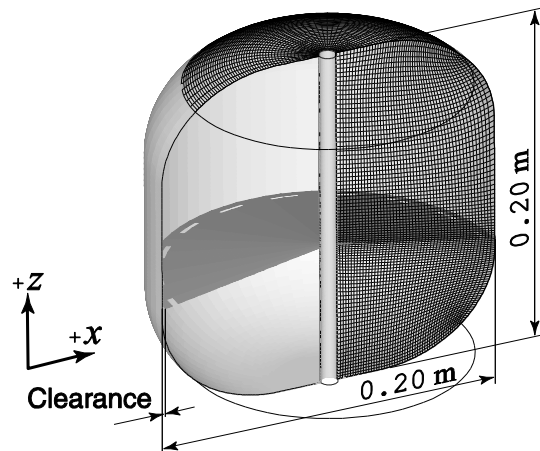
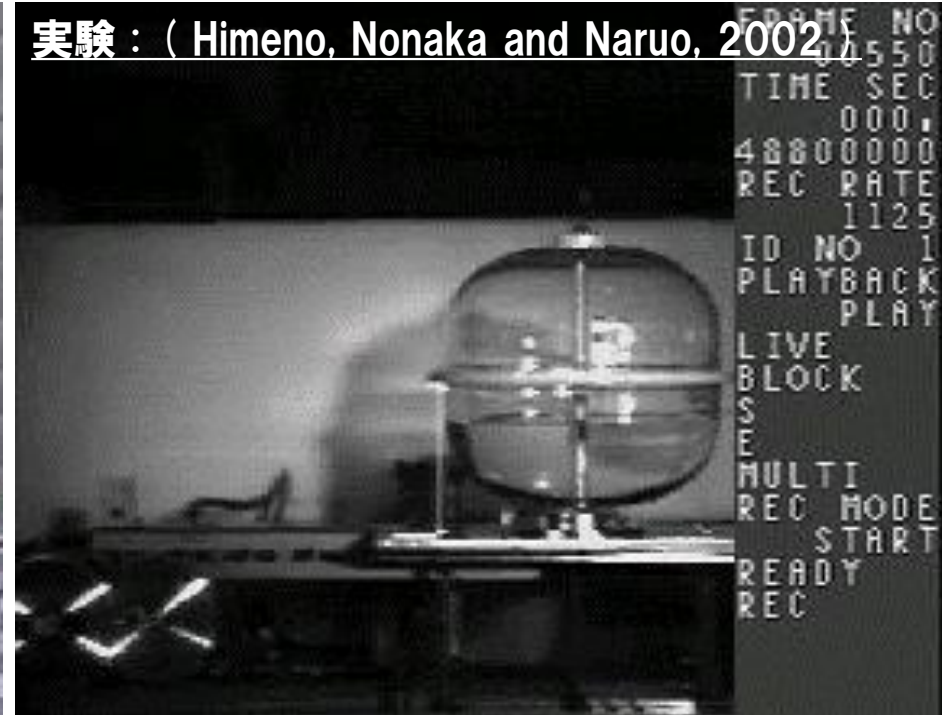
実験と数値解析によるアプローチ



計算 : (Himeno, 2003)



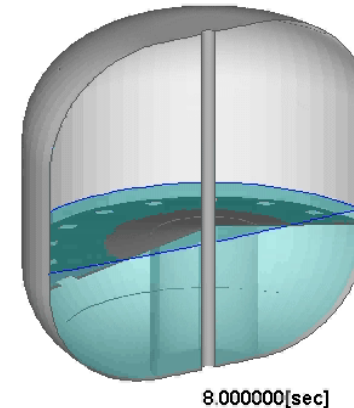
実験 : (Himeno, Nonaka and Naruo, 2002)



Ref. AIAA 2005-3931 (Himeno)

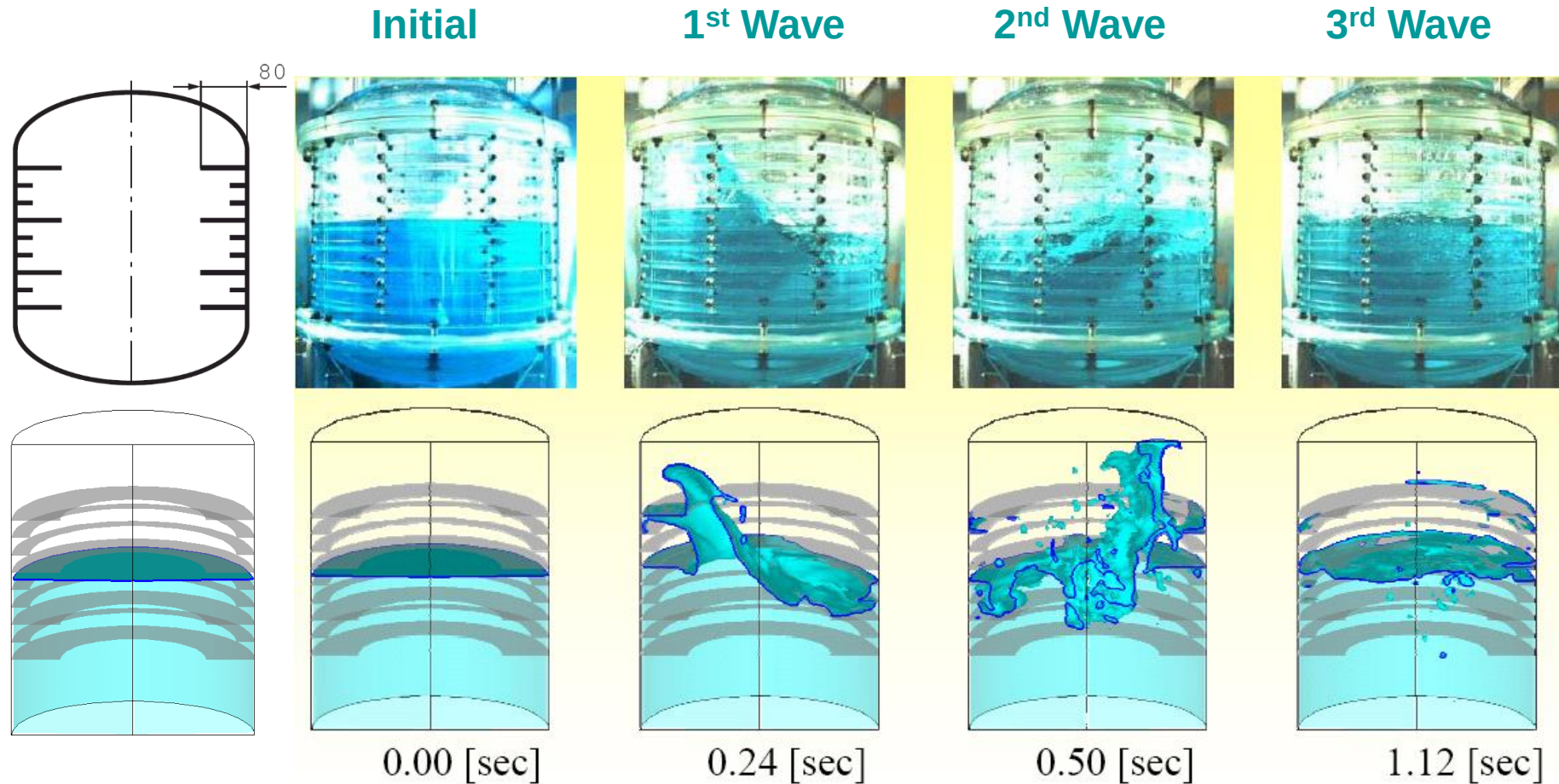
- 相似流れについて
- 実験と計算の相関を確認
- 実機飛行条件を計算で予測

CIP-LSM (東大コード) で計算



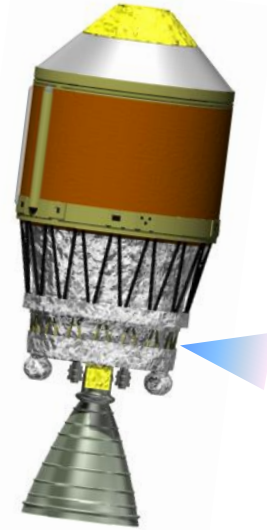
8.000000[sec]

スロッシング減衰効果予測のための基礎試験 ： 幅広 リングバッフル あり (80 mm)



- + 幅 80mm でも、第1波を遮れないが、第2波は⑥番バッフル (80mm) によって遮られる。
- + 飛沫や気泡の量は、ベースライン (30mm) 形状の場合より少ない。
- + ガス噛み防止、タンク圧制御の観点など、推進薬管理の観点からは望ましい。

液体推進薬のタンクスロッシング 実機運用事前検討への適用

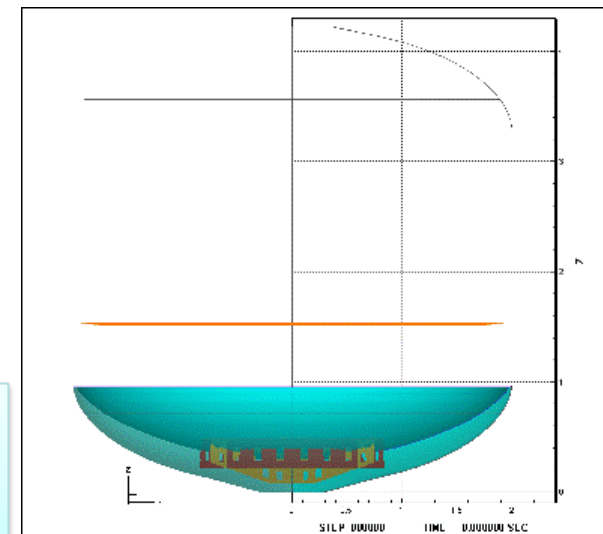
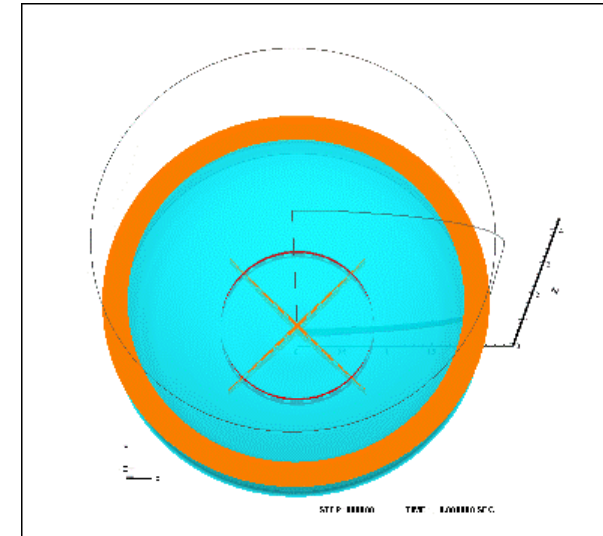


Sloshing caused by slight disturbance in lateral direction under low-g condition during coasting flight of upper stage.

Numerical code : **CIP-LSM**

Hybrid PLIC-VOF and level-set
developed in University of Tokyo

東大コードをJAXAおよびメーカーに供与
H-IIA上段高度化ミッションの成立性検討・
バッフル配置最適化検討に使用





東京大学
THE UNIVERSITY OF TOKYO

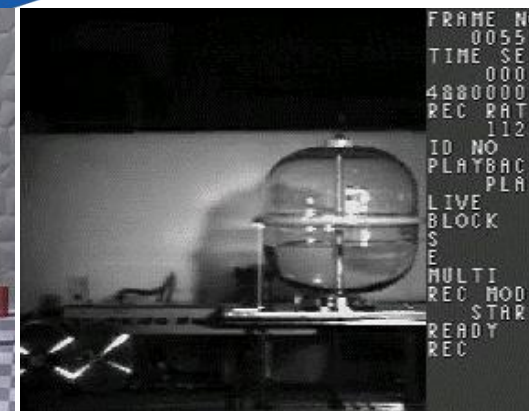
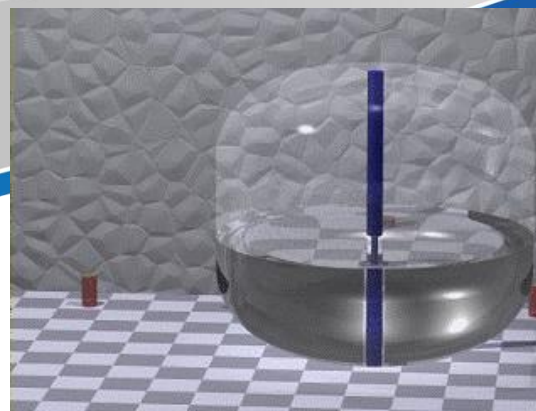


CIP-LSM

流体解法 : Thermo CIP-CUP (TCUP)

界面捕獲 : **MARS + LSM**

相変化 :



UT JET PROPULSION LABORATORY

界面捕獲: MARS + LSM

(Kunugi 1997) (Sussman 1994)



Distance Function

Distance function ϕ

From the distribution of ϕ

Normal Vector

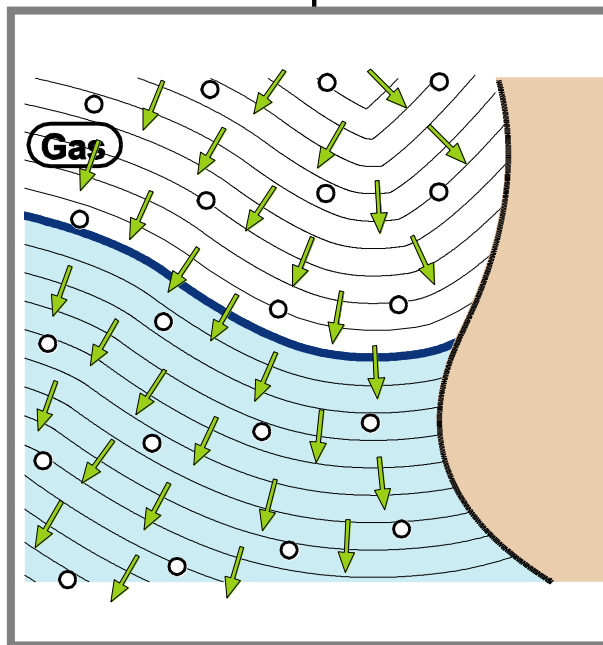
$$\vec{n}_s = \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|},$$

Curvature

$$\kappa = \nabla \cdot \vec{n}_s = \nabla \cdot \left(\frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} \right)$$

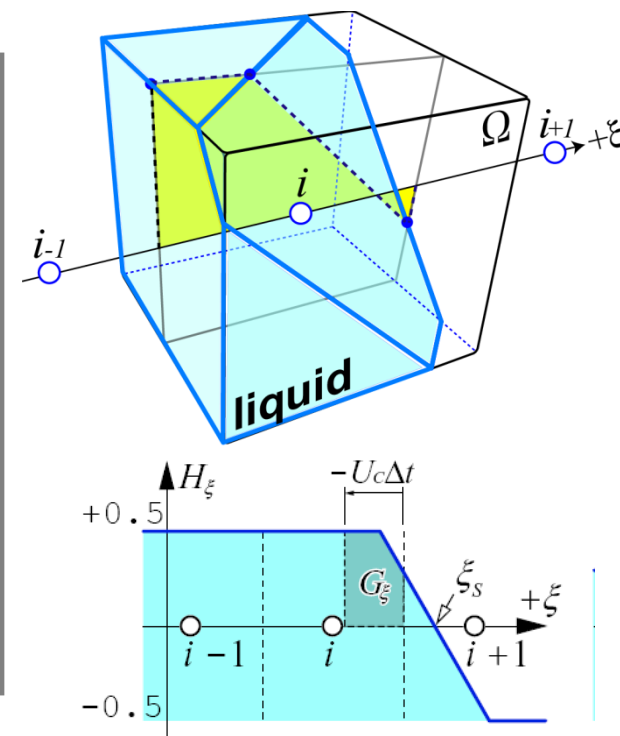
are precisely computed

Surface tension is computed by CSF model



MARS

VOF distribution



Interpolated distribution of liquid fraction

Distance Function

**Distance function ϕ
overset
around moving interface**

From the distribution of ϕ

Normal Vector

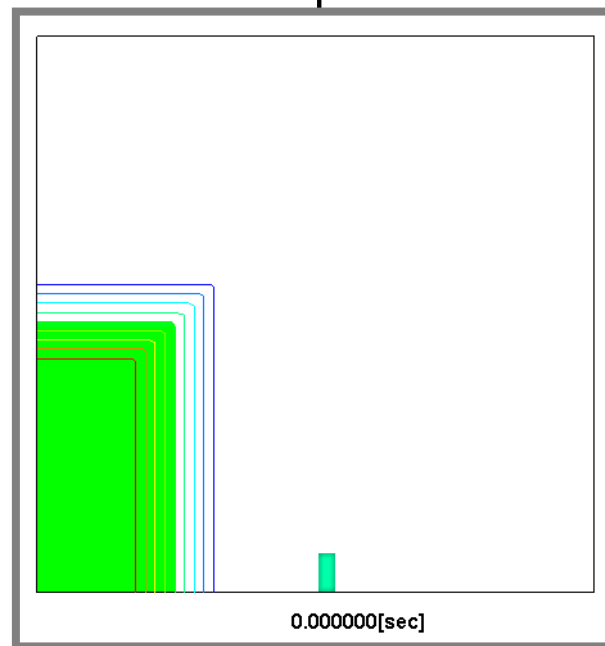
$$\vec{n}_s = \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|},$$

Curvature

$$\kappa = \nabla \cdot \vec{n}_s = \nabla \cdot \left(\frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} \right)$$

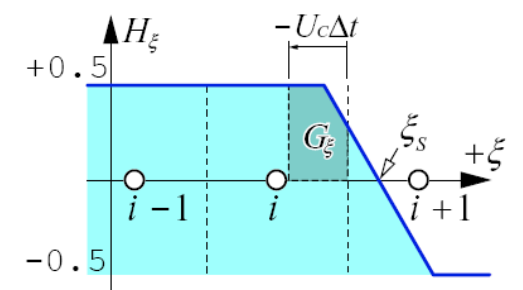
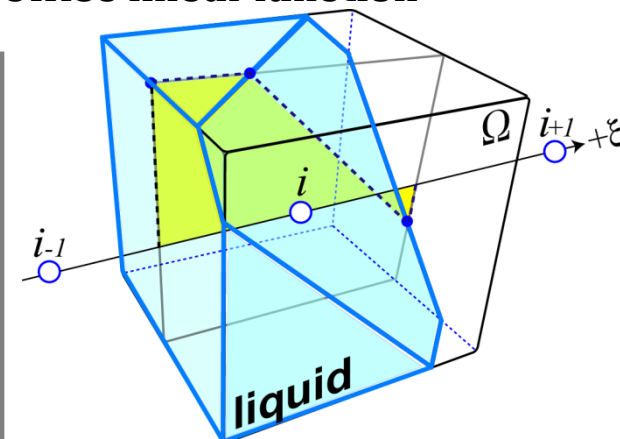
are precisely computed

Surface tension is computed by CSF model



MARS

**VOF distribution
re-constructed with
piecewise linear function**



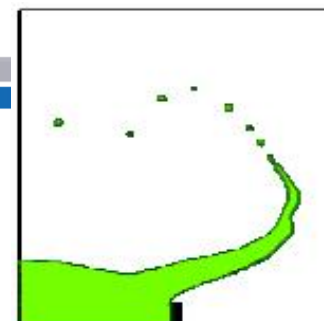
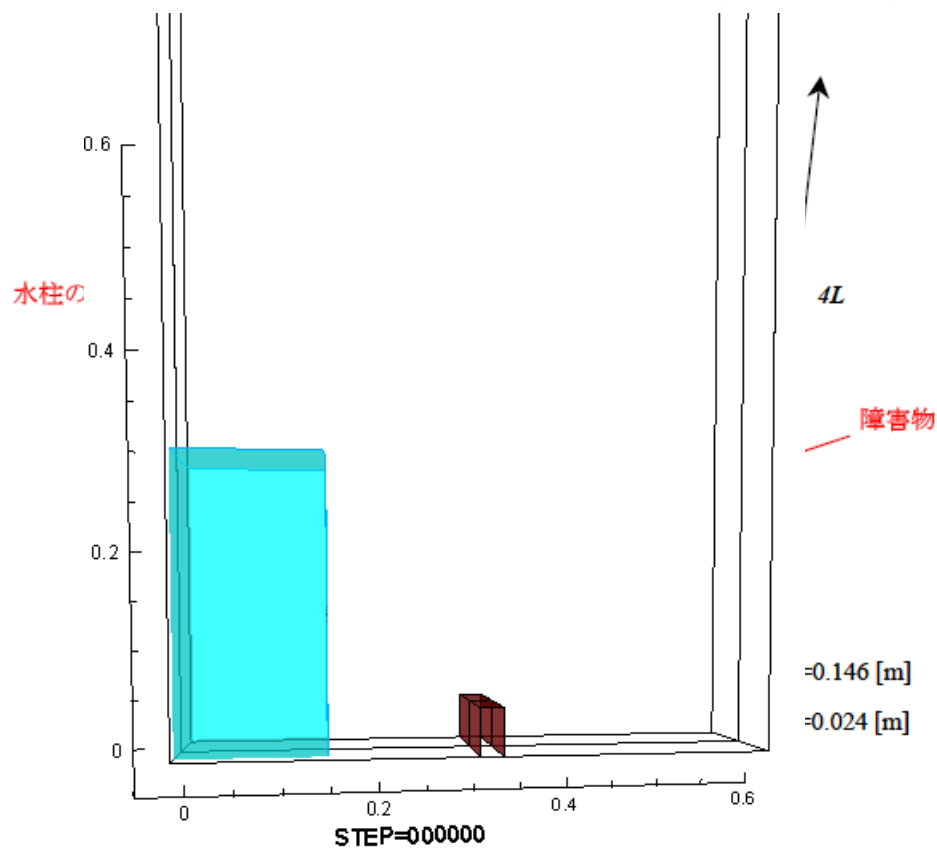
Interpolated distribution of liquid fraction

自由表面流の数値解法 : 複雑形状の液面追跡へ向けた改良

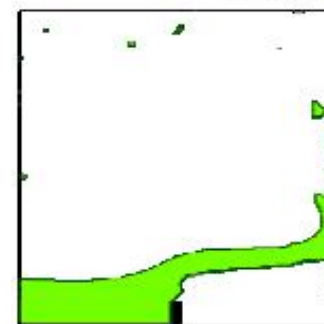
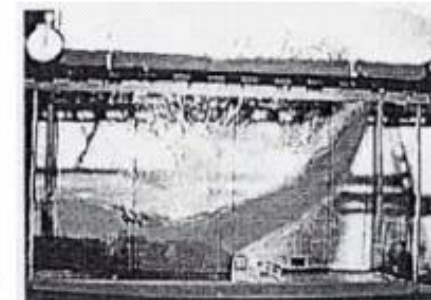


- 数値粘性を小さく (RCIP-C)
- 液面を1セルで捕捉 (平滑化排除)

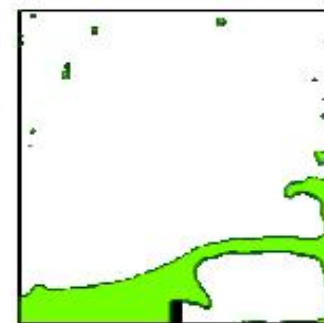
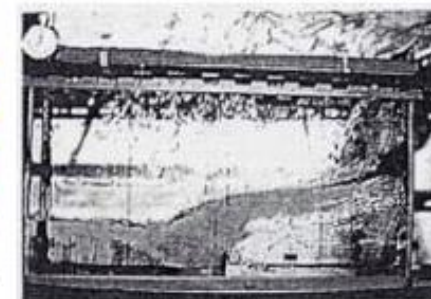
障害物を伴うダム崩壊問題 (検証用)



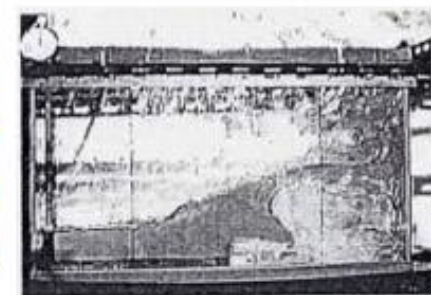
(a) 0.30 sec



(b) 0.40 sec



(c) 0.50 sec



実験 : (Koshizuka, 1995)



東京大学
THE UNIVERSITY OF TOKYO

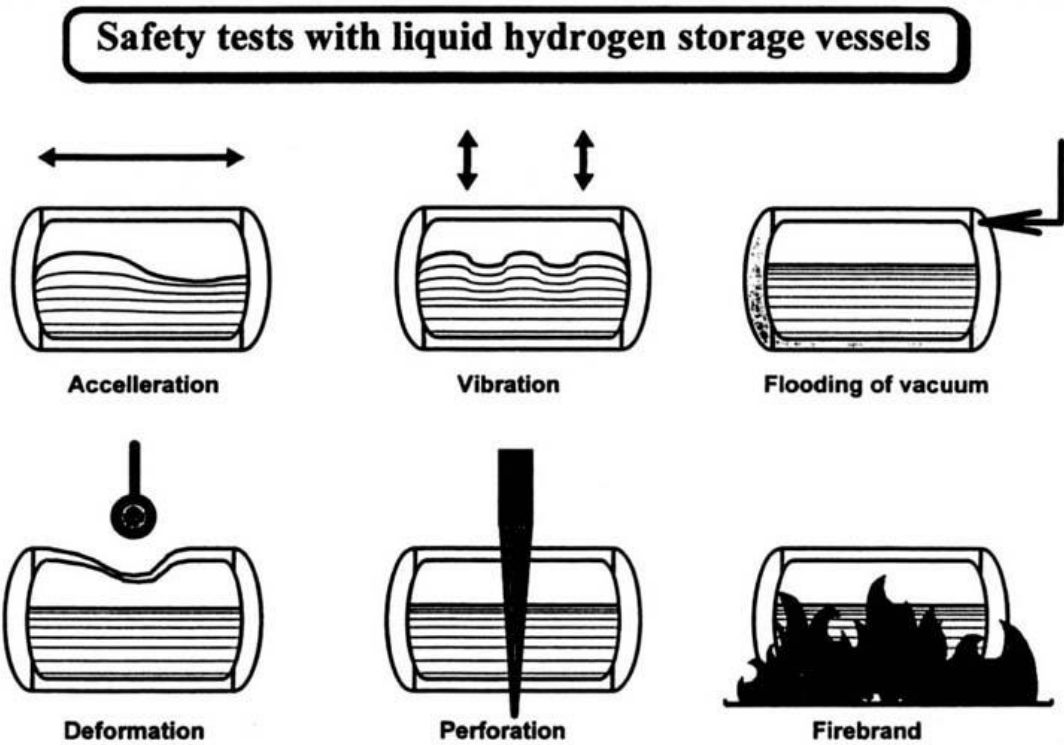


液体挙動予測
圧力変化予測
沸騰現象予測

定置式タンクと移動式タンクの熱流動比較

	定置式タンク	移動式(コンテナ)タンク
蒸発ガスライン状態	通常、大気開放状態で、気相圧力はほぼ大気圧状態	移動中は閉状態で、気相圧力は容器設計圧力以内の大気圧以上
液体水素の動的挙動	静定状態で外部入熱による自然対流発生	移動中の振動、加速度等の外乱によりスロッシング(液揺動)が発生
液体水素の熱的挙動	液表面に成層(Thermal Stratification)を形成	液とタンク内壁との熱接触及び運動エネルギーの熱散逸で蒸発促進 液内部の混合による液面温度低下で蒸発抑制
流動模式図		

ハザード事象 (実機・実液試験が困難)

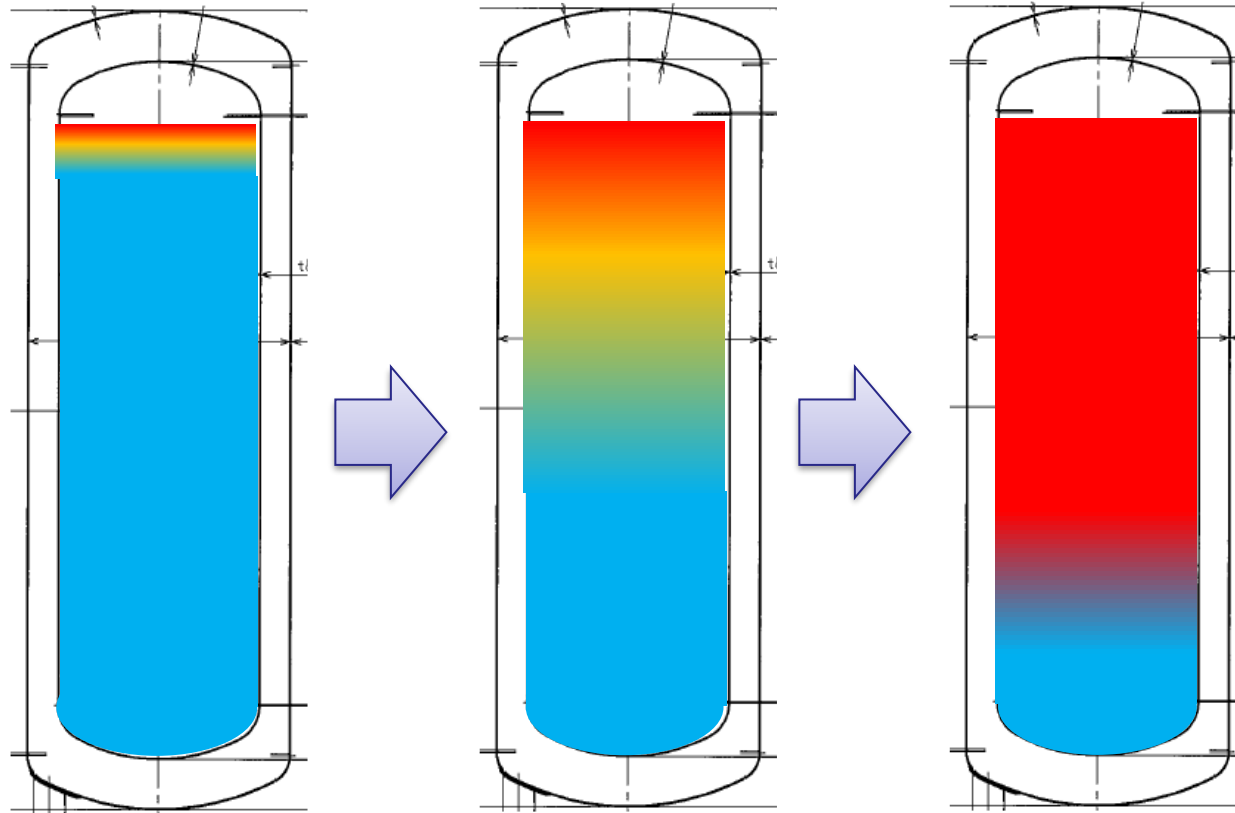


(出典) 固体高分子形燃料電池/水素エネルギー利用成果報告会予稿集
一水素エネルギー利用技術(WE-NET)第Ⅱ期研究開発
NEDO水素エネルギー技術開発室(2003.3.12)

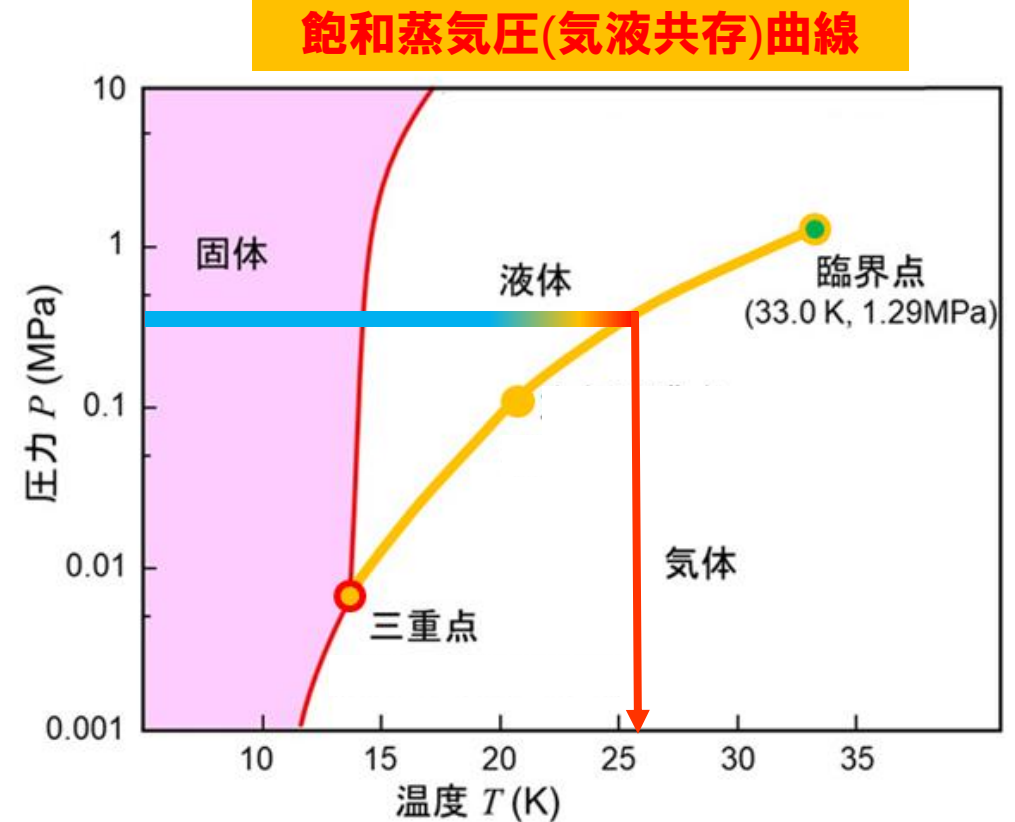
出展: F. Michel, et. al., "Onboard equipment for liquid hydrogen vehicles",
the proceedings of the 11th World Hydrogen Energy Conference, 23-28 June,
1996, Stuttgart, Germany, p.1063-1077

一成分二相系を制御する難しさ

液温成層 (飽和層)



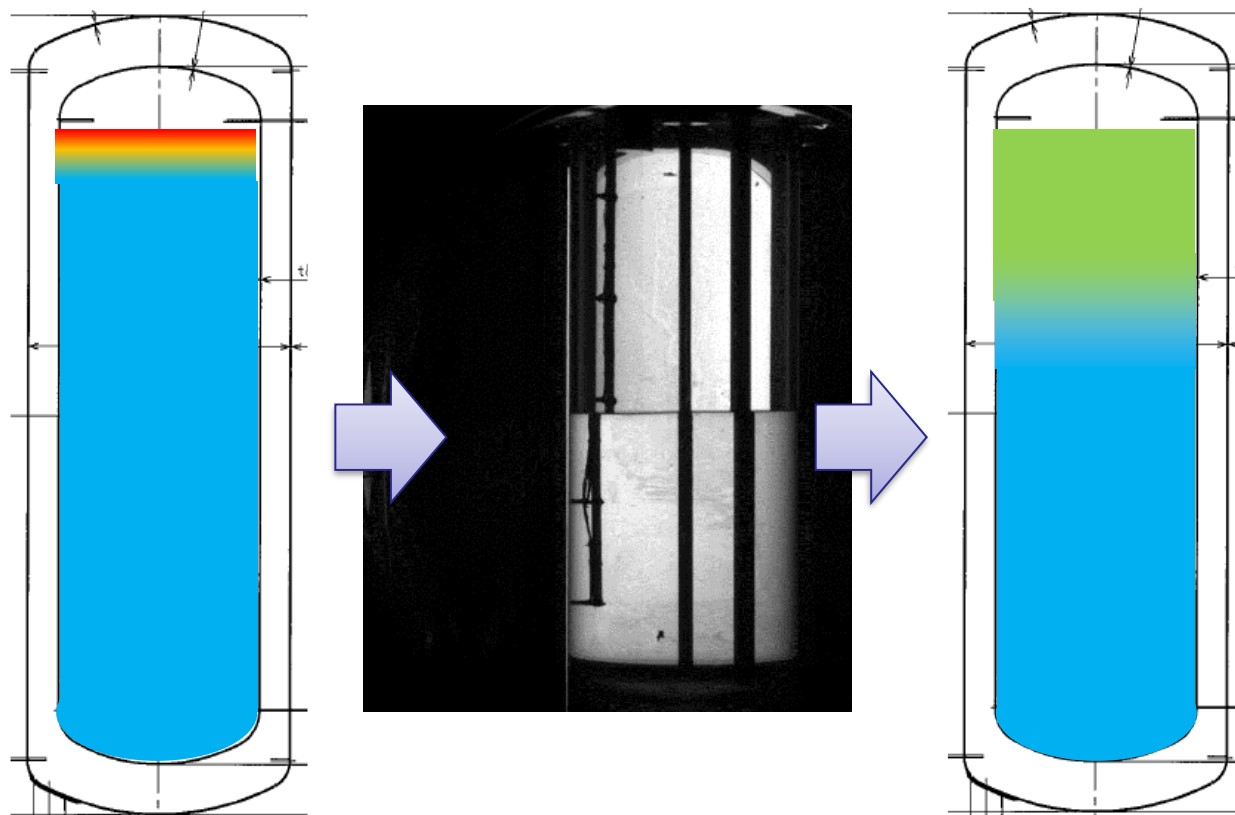
同化学種で加圧して保圧すると液温成層(飽和層)が発達する
温度分布があり、気液界面でのみ相平衡が成立している。



パラ水素 (p-H₂) の圧力・温度線図

一成分二相系を制御する難しさ

液温成層破壊 ⇒ 減圧 (スロッシング)

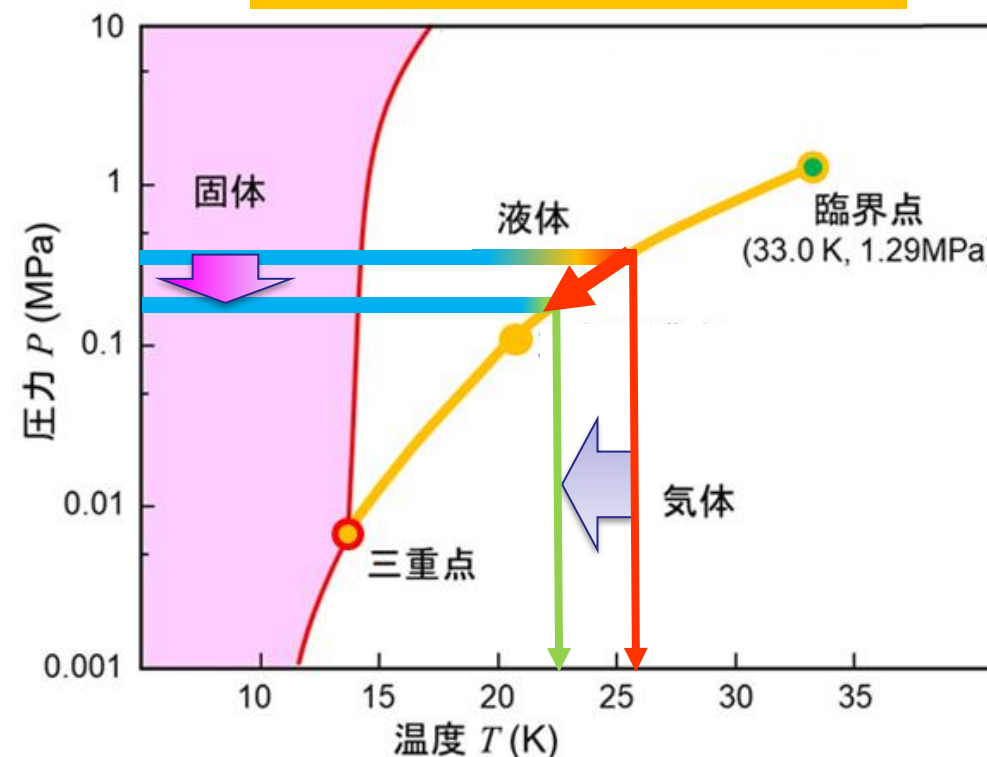


無理矢理 攪拌(スロッシング)すると、液温成層が壊れ、

冷液がガス側に露出して圧力が下がる。



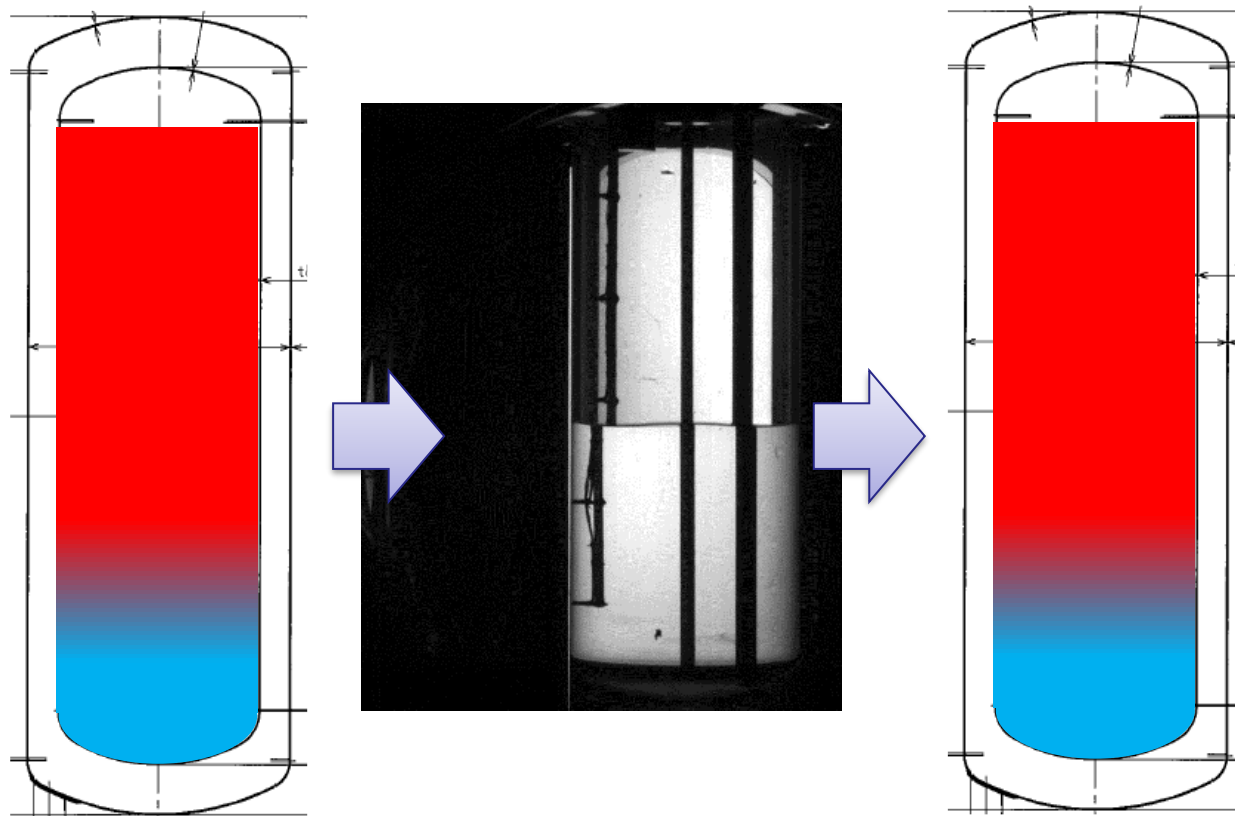
飽和蒸気圧(気液共存)曲線



パラ水素 (p-H₂) の圧力・温度線図

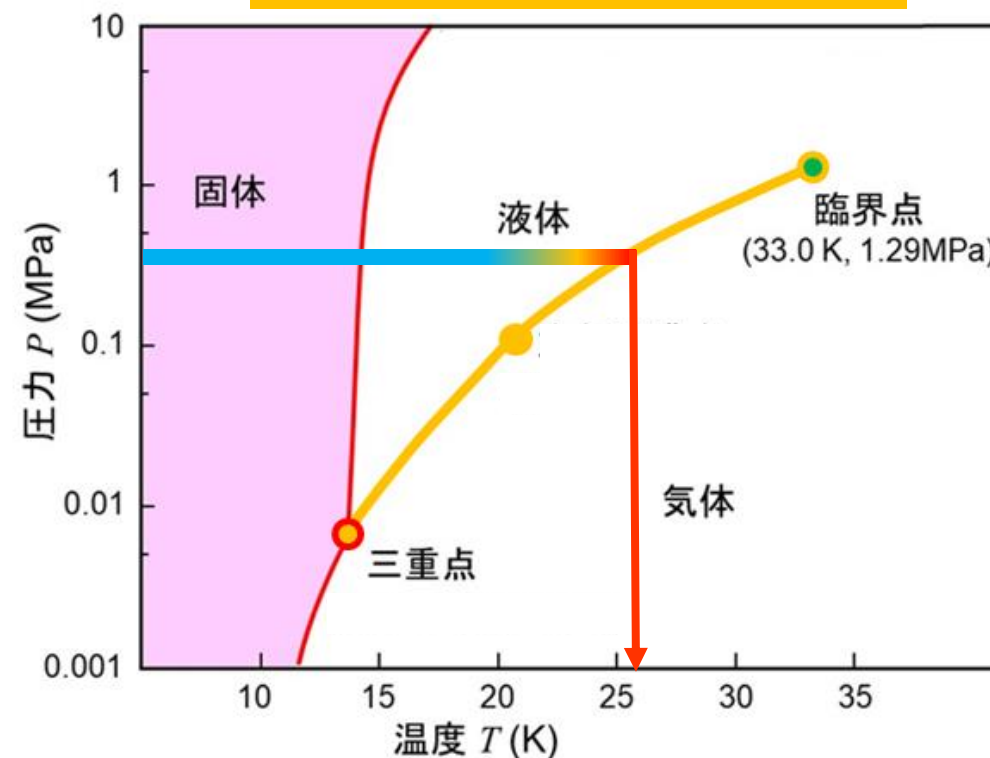
一成分二相系を制御する難しさ

液温成層破壊 ⇒ 減圧 (スロッシング)



液温成層が厚い状態からだと 攪拌(スロッシング)しても、
圧力は維持されやすい

飽和蒸気圧(気液共存)曲線



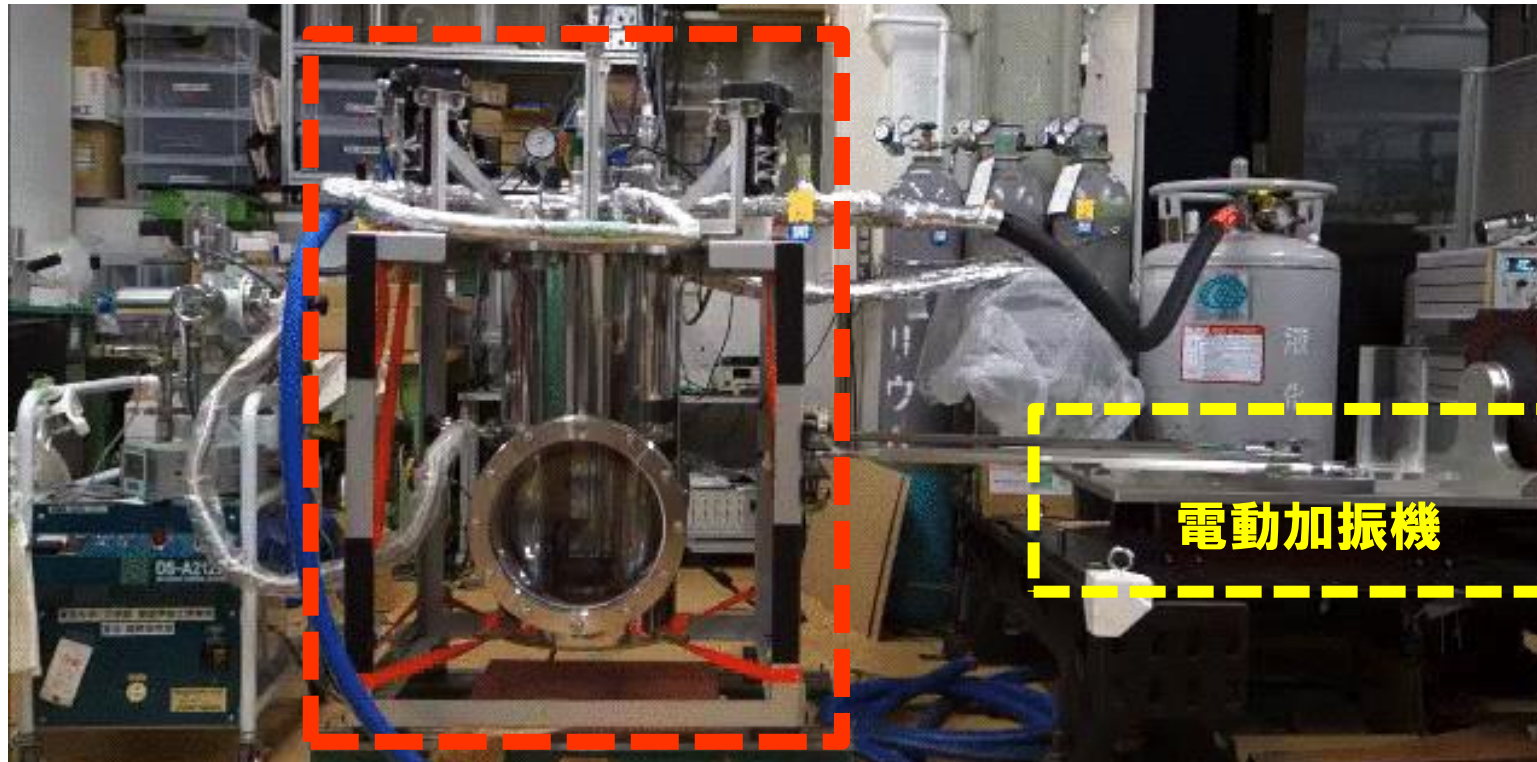
パラ水素 ($p\text{-H}_2$) の圧力・温度線図

液体推進薬のタンクスロッシング

実験装置：光学クライオスタットと電動加振機



光学クライオスタット



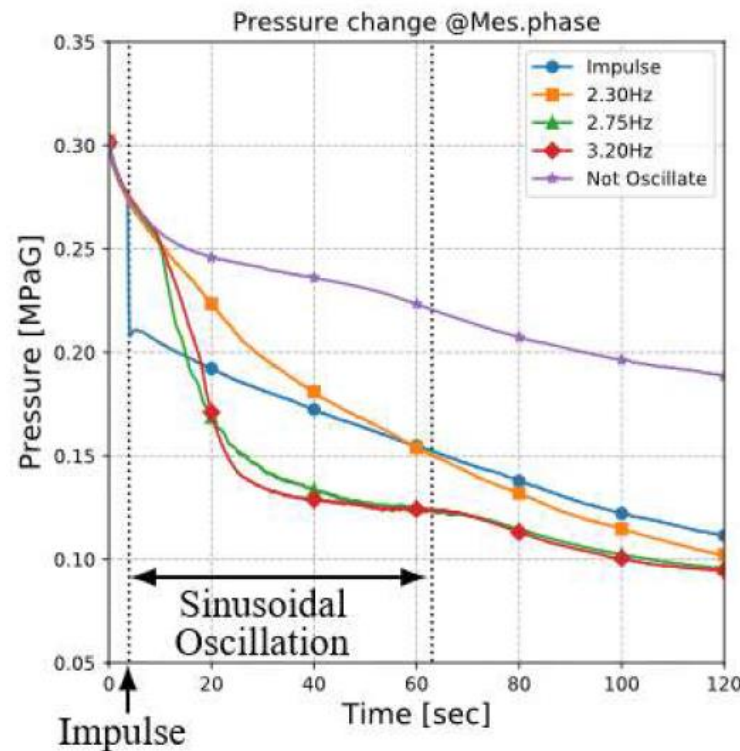
電動加振機

一成分二相系のタンクスロッシング 極低温スロッシングに伴う気液間相変化促進と圧力変化



Test ID	Liq. Level [mm]	Initial Press. [MPaG]	Initial Temp. Gas / Liq. [K]	δ [mm]	Oscillation	Peak acceleration	Notes
Case0-6	161	0.300	95.9 / 83.7	5	Impulse	1.4G	same as Case1-1
Case0-7	160	0.302	94.5 / 84.0	5	2.30Hz, 60sec	0.11G	
Case0-8	160	0.302	95.1 / 83.9	5	2.75Hz, 60sec	0.15G	
Case0-9	160	0.302	94.2 / 84.1	5	3.20Hz, 60sec	0.21G	
Case0-10	160	0.301	93.3 / 84.1	5	None	0	

Comparison between impulsive and sinusoidal oscillation



Lateral Sloshing



<1.0

① 2.30Hz



~1.0

② 2.75Hz

Swirl



>1.0

③ 3.20Hz



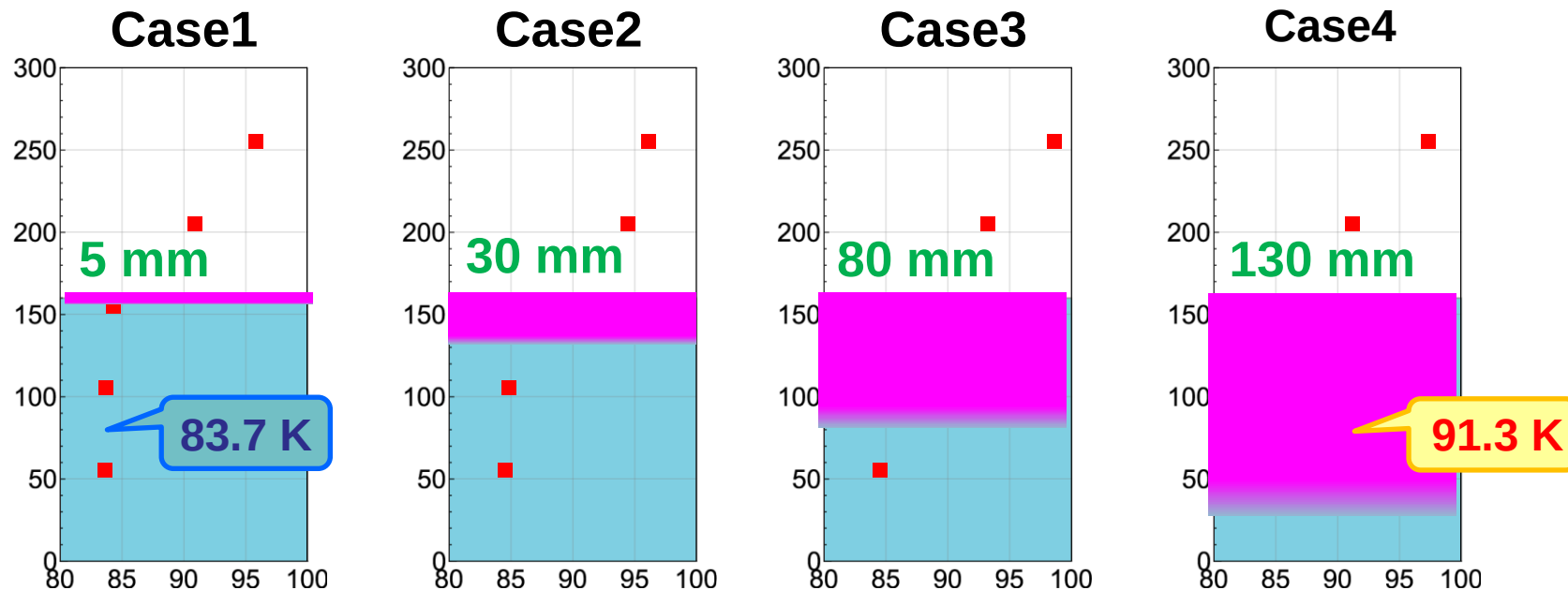
④ Impulse

一成分二相系のタンクスロッシング

液体窒素：実験結果：液温成層厚をパラメータ



液体挙動



thin

thick

Test ID	Liq. Level [mm]	Initial Press. [MPaG]	Initial Temp. [K]					δ [mm]
			T1	T2	T3	T4	T5	
Case1	161	0.300	95.9	90.9	84.3	83.7	83.6	$\delta < 5$
Case2	160	0.301	96.1	94.5	91.2	84.8	84.5	$5 < \delta < 55$
Case3	159	0.301	98.6	93.2	91.1	90.8	84.5	$55 < \delta < 105$
Case4	162	0.299	97.4	91.2	91.4	91.4	91.3	$105 < \delta$

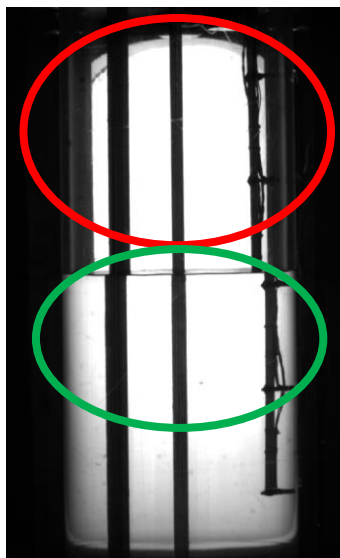
一成分二相系のタンクスロッシング

液体窒素：実験結果：液温成層厚をパラメータ



液体挙動

Case1



Case2



Case3



Case4



液体挙動に大きな違いは見られない。

霧の発生は液温成層が薄い Case 1 でのみ確認。

巻込気泡は

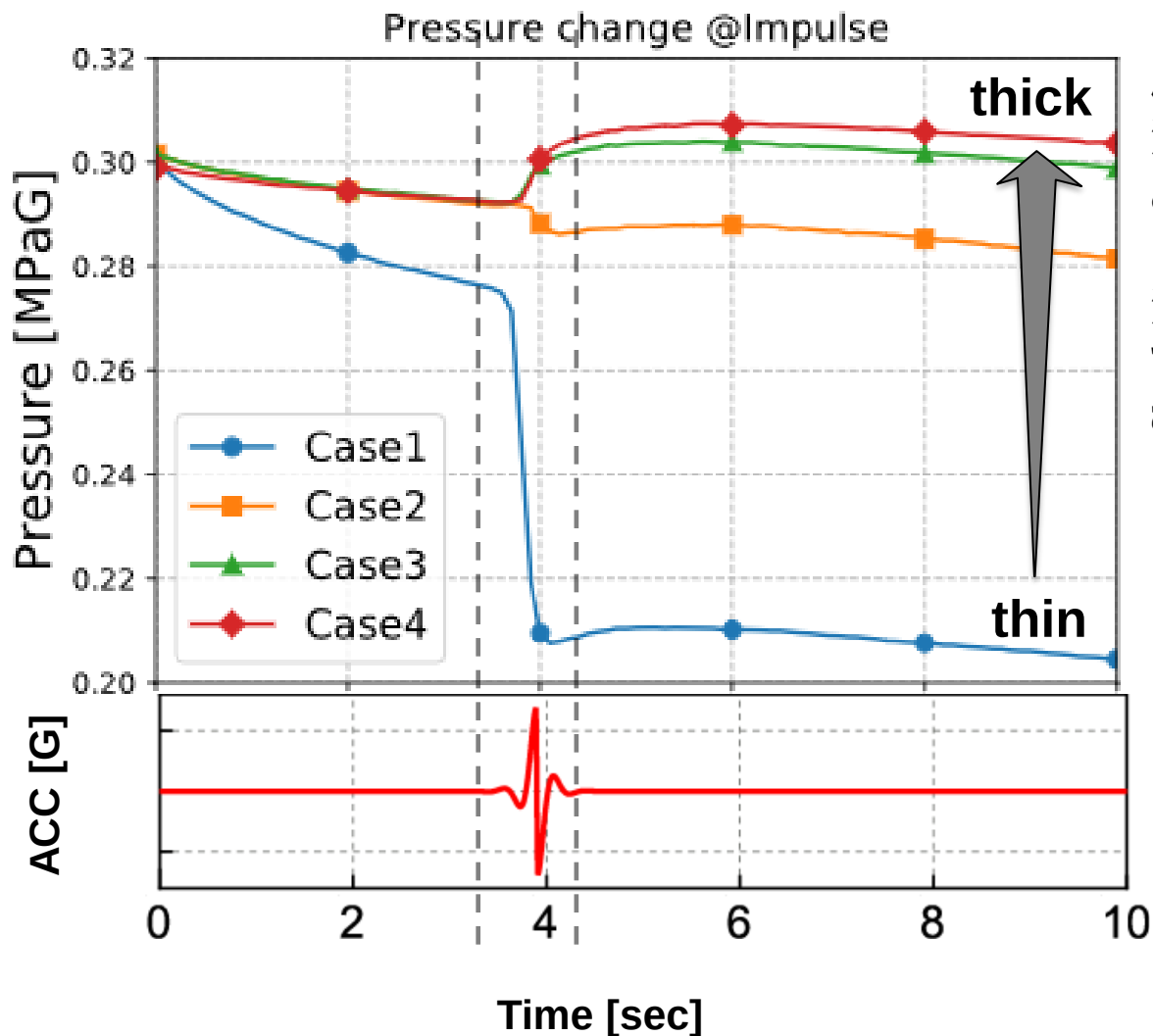
Case 1 でサブクール液に触れて凝縮し、直ぐに消滅するのに対し、
Case 3 および 4 では飽和液に囲まれて滞留するのが見て取れる。

一成分二相系のタンクスロッシング

液体窒素：実験結果：液温成層厚をパラメータ



圧力変化



圧力の急降下が認められた
液温成層の薄い Case 1
と違い、

液温成層が厚い Case 2..4
では圧力降下は小さいか、
むしろ上昇する。

移動式タンクに特有の熱流体管理問題

極低温スロッシングに伴う気液間相変化促進と圧力変化



異種化学種
不均一温度分布
気液二相系

異種加圧 (LN_2/GHe)



見た目は
シリコンオイルの場合
(不揮発性=相変化なし)
と変わらない

同一化学種
不均一温度分布
気液二相系

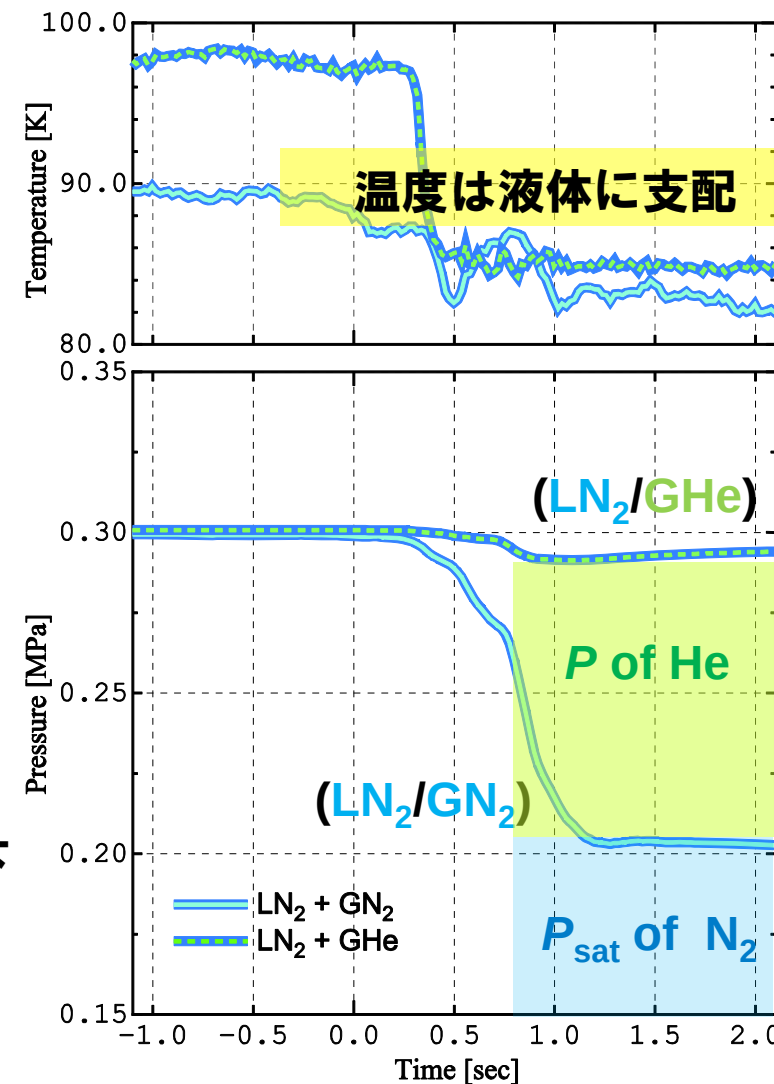
同種加圧 (LN_2/GN_2)



霧の発生 !!

同時に、タンク圧が
0.7 秒間に 0.1 MPa 急降下

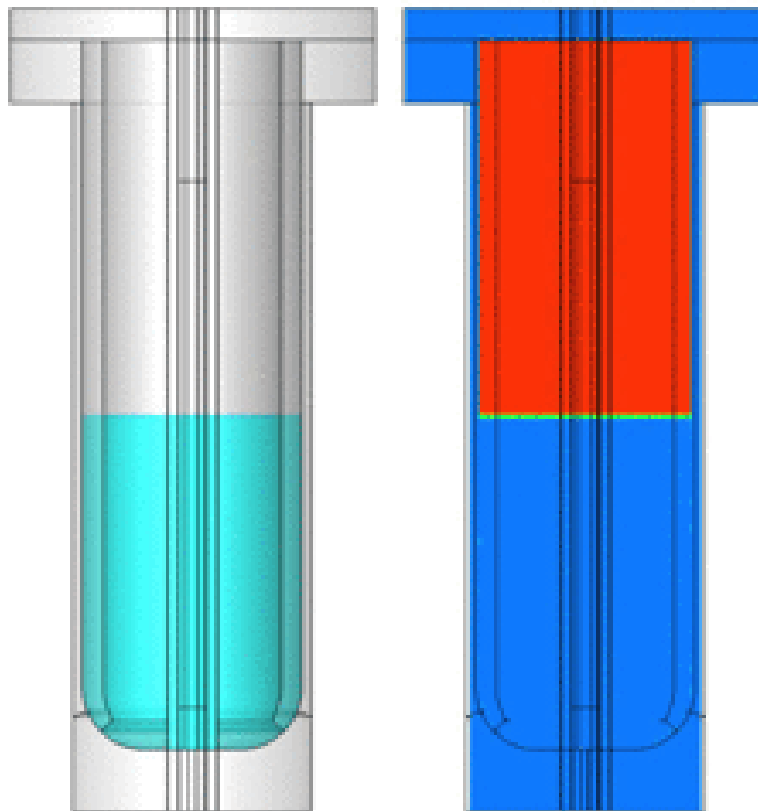
温度は10%低下なのに
圧力は30%以上低下
凝縮が発生した



Experiment



Computation



界面形状の再現 ◎

相変化モデル

気液界面 : 蒸発・凝縮

気泡・液滴 : 蒸発

固体壁面 : 蒸発

固体壁面での凝縮の
モデル化を実装中。

相変化モデルをチューニング中



東京大学
THE UNIVERSITY OF TOKYO

減圧沸騰と突沸

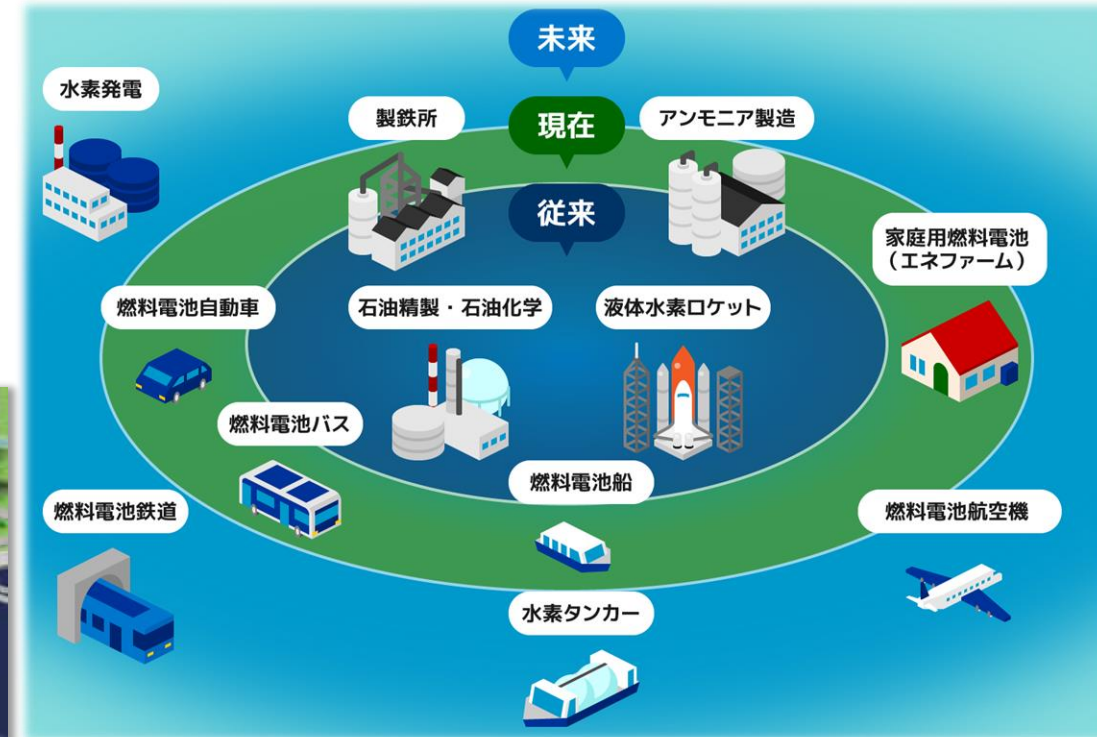


リスクの一例: 急激な沸騰泡の形成(突沸)
(上図は真水の例)

研究背景：水素サプライチェーン … つくる・はこぶ・つかう



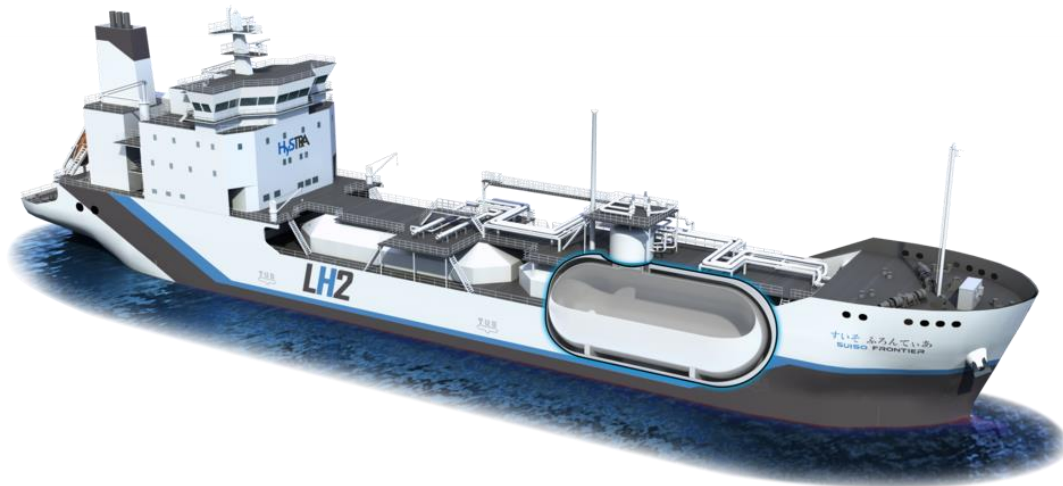
- **褐炭** を高温水蒸気で改質し **水素** を獲得。
- 製造時に発生するCO₂は地下貯留 (CCS) = **ブルー水素**。
- エネルギーを**液化水素**の形で貯蔵・輸送
- 川崎重工業が計画を主導 2021年 にパイロット船輸送開始



研究背景：水素サプライチェーン … つくる・はこぶ・つかう



※液体窒素、模型タンクでの実験



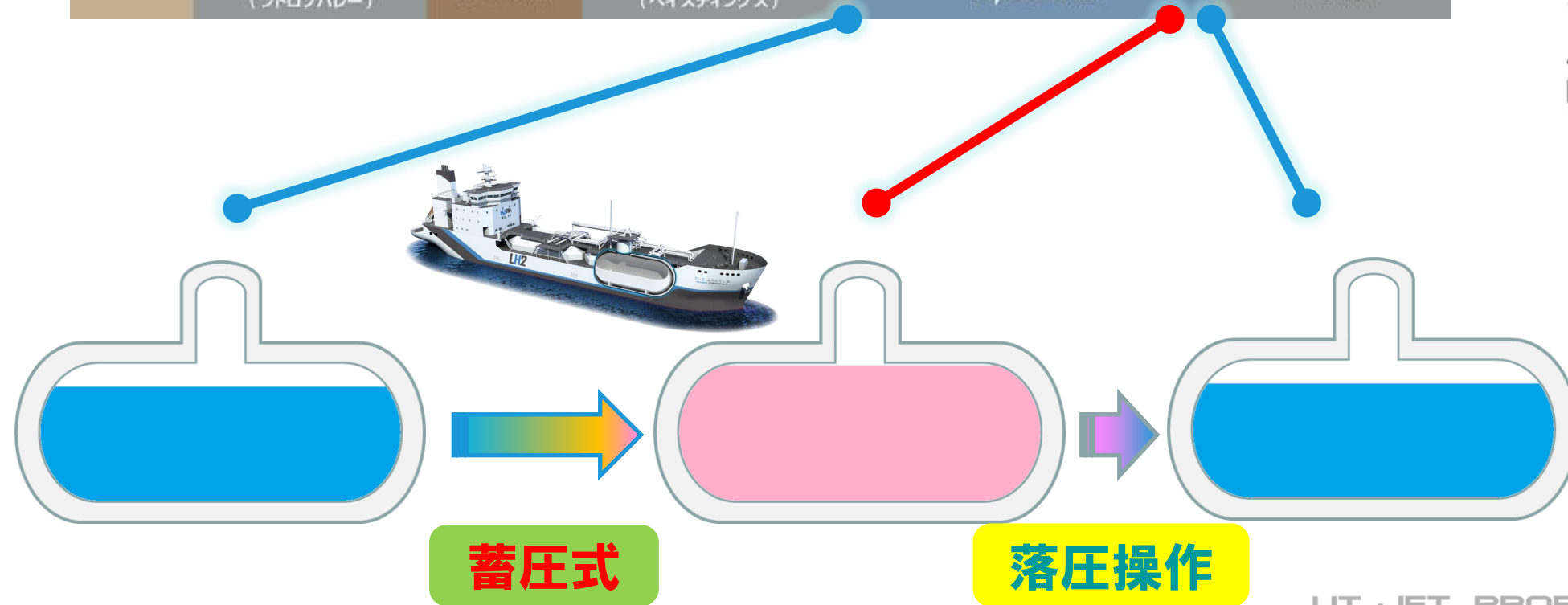
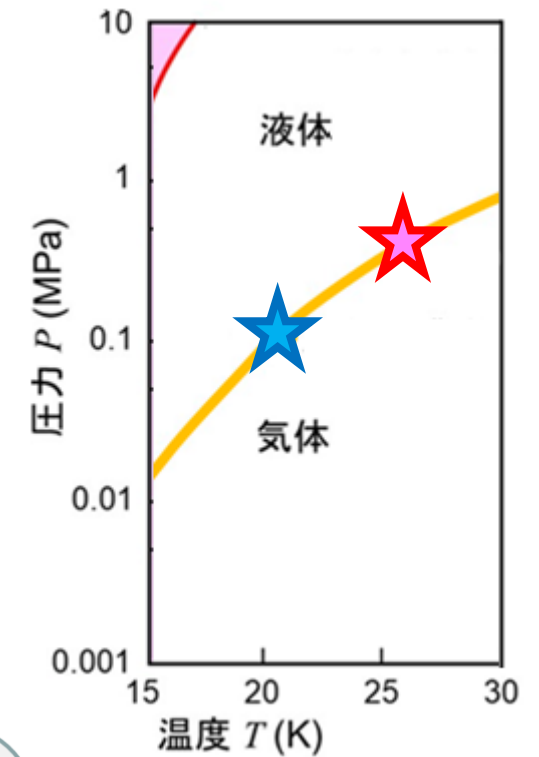
UT-KHI-JAXA Collaboration



※液化水素 荷揚基地 (神戸空港島)

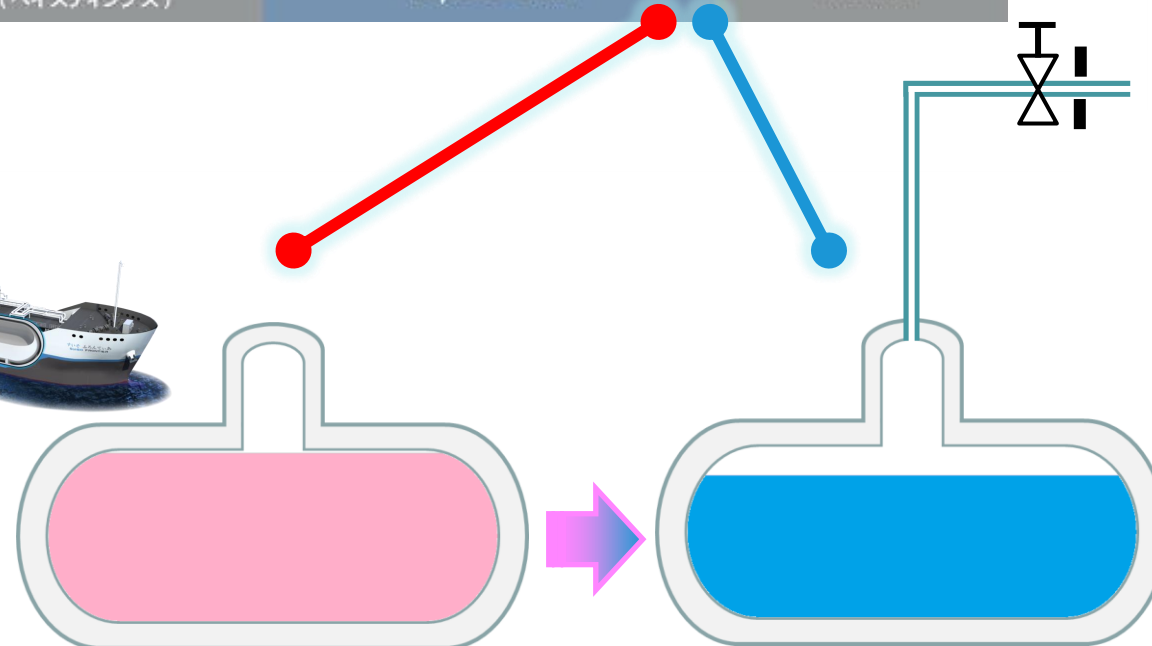
研究課題

(1) 落圧オペレーションのノミナル/ハザード解析

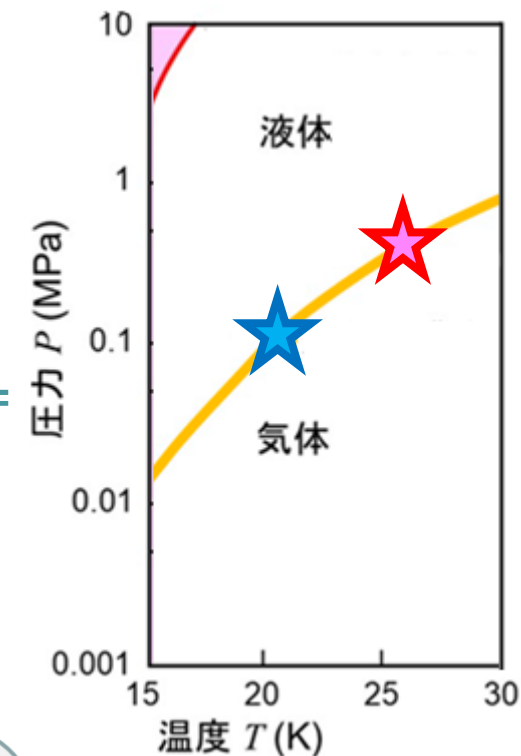


研究課題

(1) 落圧オペレーションのノミナル/ハザード解析

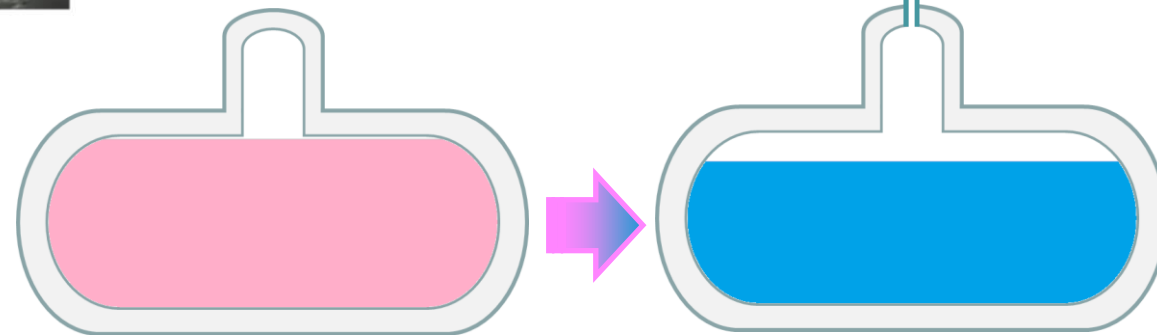


落圧操作

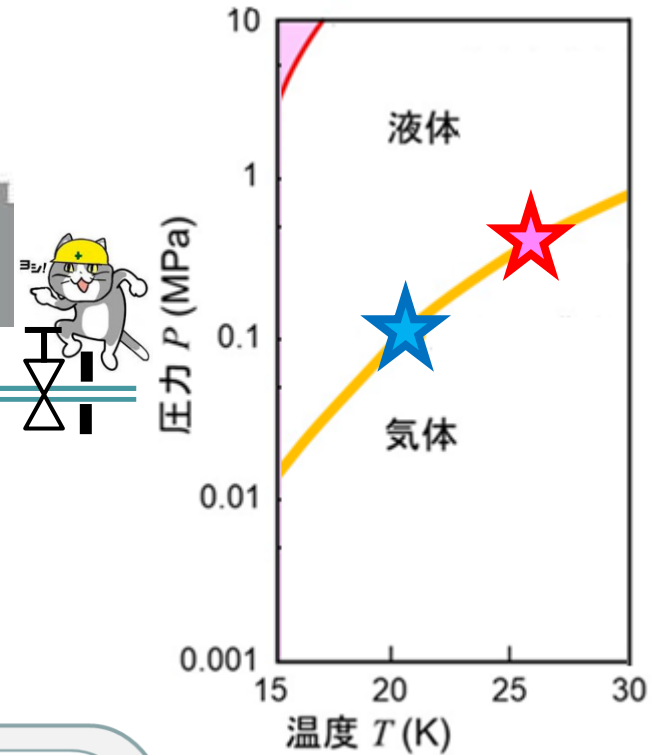


研究課題

(1) 落圧オペレーションのノミナル/ハザード解析



落圧操作

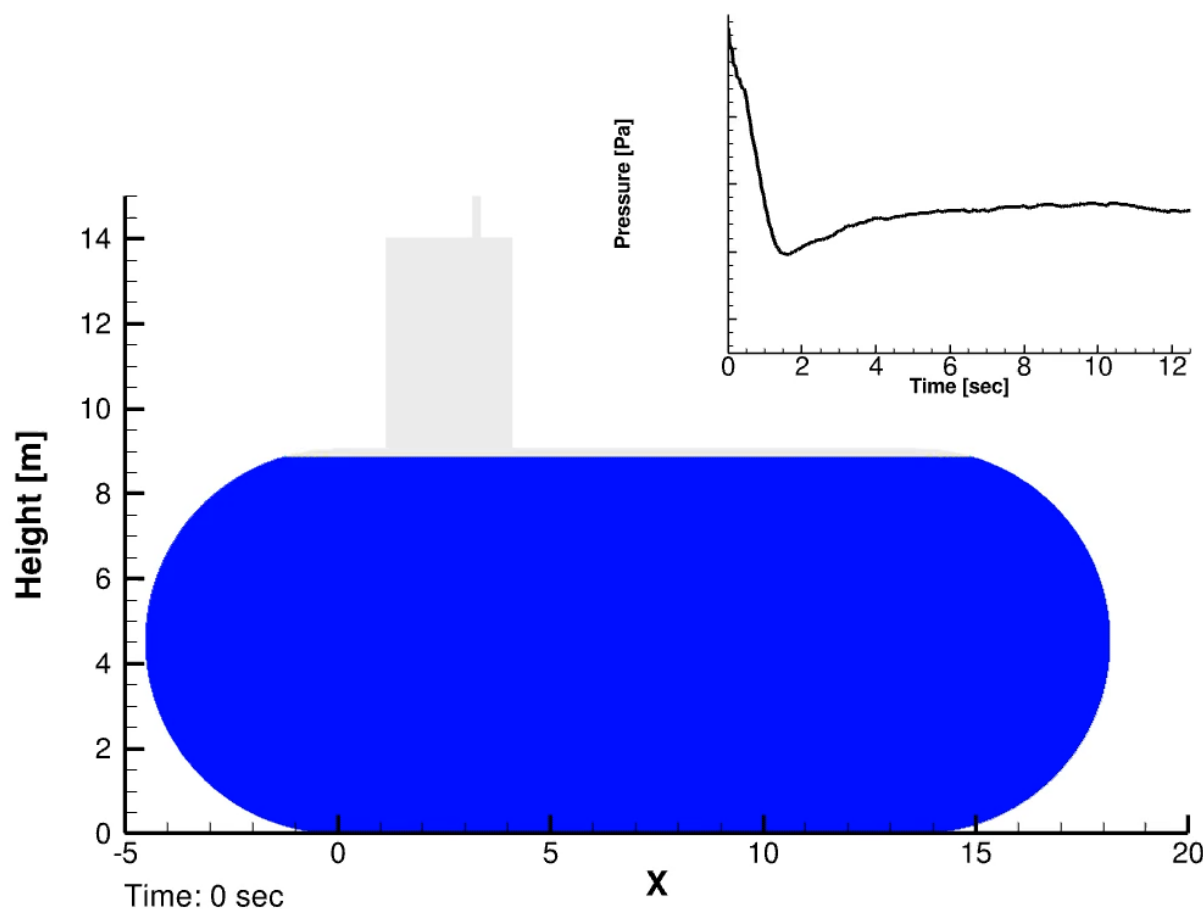


研究背景：水素サプライチェーン ～ 液体水素運搬船 「水素タンクは満タンにできるか？」



UT-KHI-JAXA Collaboration

- ① 保安上の問題・・・できれば実績のあるLNGの規則を流用したい（改訂したくない）。
緊急時に作動する**安全弁**の**チョーク流量 (Cv値)**と**上限液位**を
適切に設定しないと**排気配管に液体が浸入する**。





東京大学
THE UNIVERSITY OF TOKYO



実験：飽和液の減圧沸騰初生機構

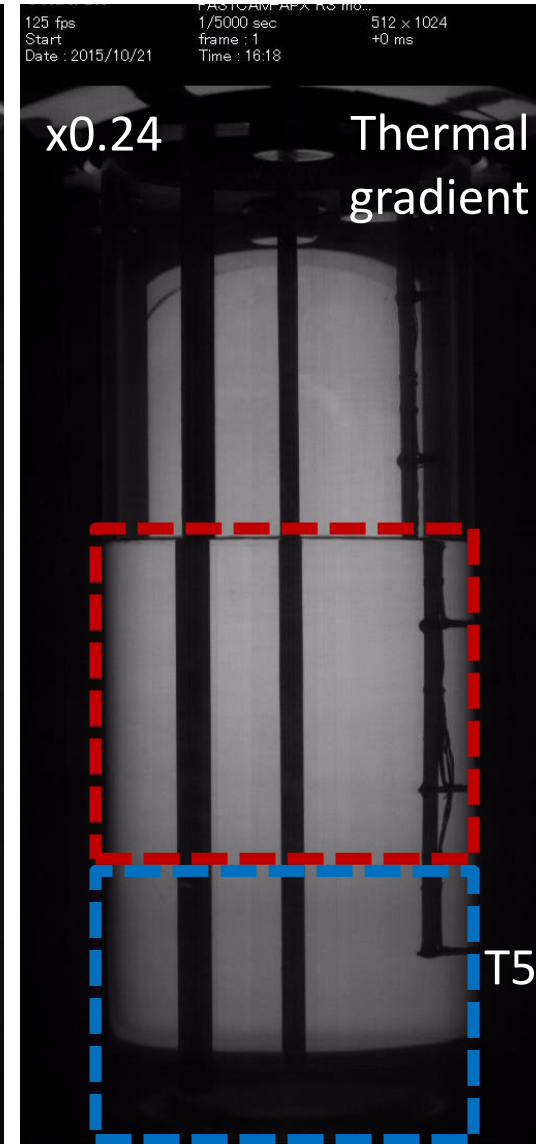
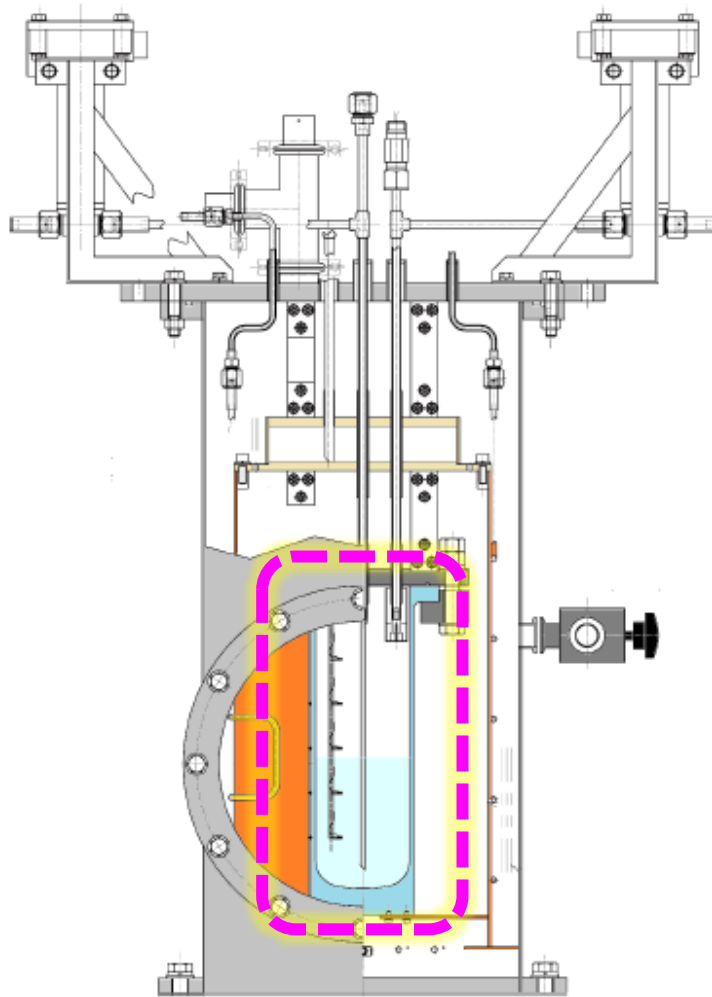
	地上実験	落下実験	ロケット
寸法	模型	模型	実物大
重力	地上	無重量	無重量
液体	常/ 極低温	常/極低温	極低温
時間	短秒時	極短秒時	長秒時
反復	易	易	難
金額	低	中	高

姫野 武洋・亀山 頌互・大橋 昭文

UT JET PROPULSION LABORATORY

沸騰を伴う容器減圧特性取得試験（液体窒素、模型）

液温成層厚が減圧特性に与える影響：可視化



初期 : 0.3MPaG, 91.3K
飽和 : 91.3K
サブクール層 (T5: 81K)
⇒ 平衡 : 0MPaG, 77.4K

凝縮でLN2ミスト発生

Saturation

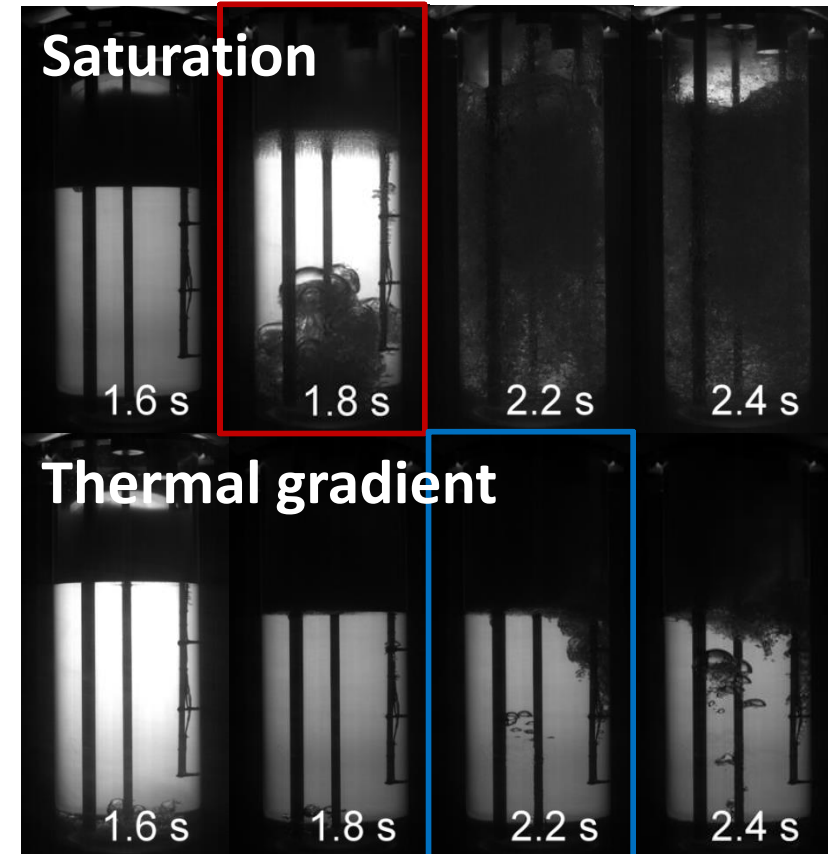
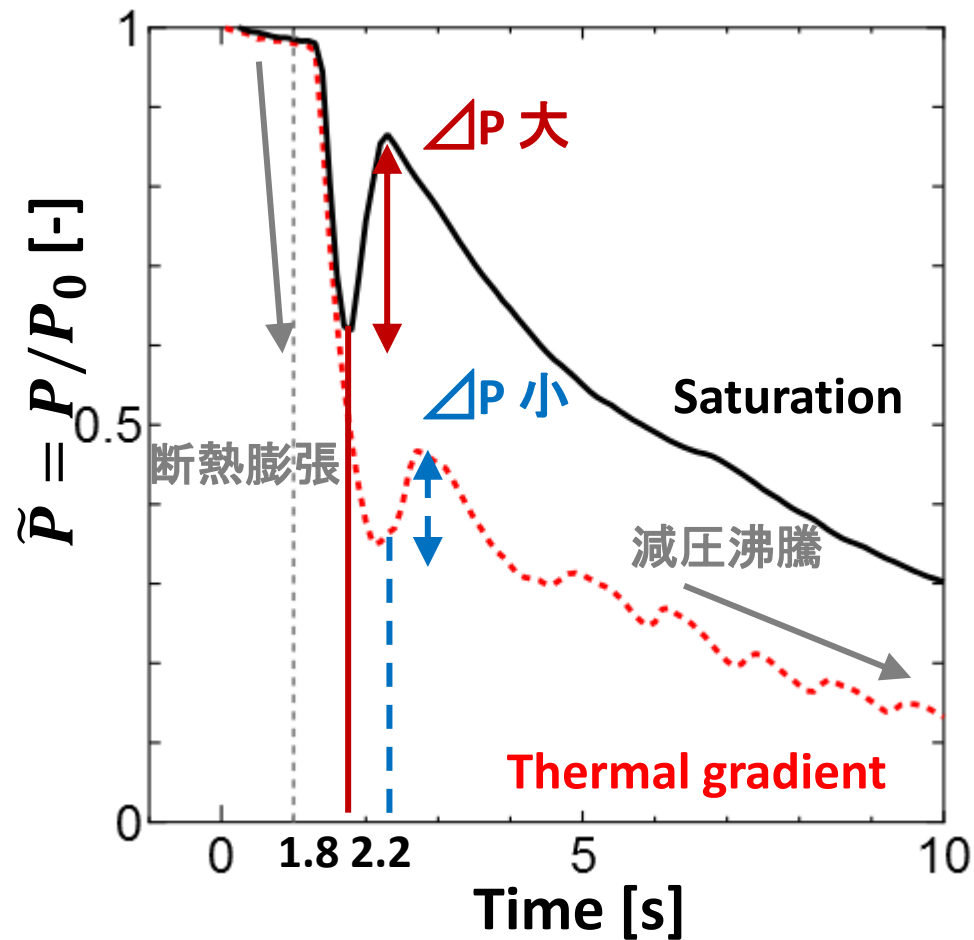
- 底部で気泡が急成長
- 液面上昇⇒壁で発泡

Thermal gradient

- 発生後に気泡が収縮
- 液面上昇ほぼなし

沸騰を伴う容器減圧特性取得試験（液体窒素、模型）

液温成層厚が減圧特性に与える影響：圧力変化



注液管・温度計で沸騰が起こりやすい
小さな気泡核が過熱液中で成長

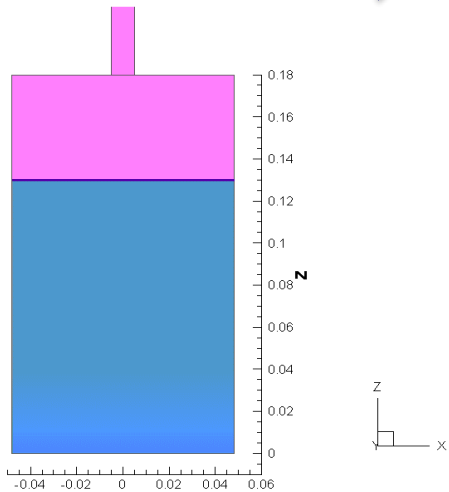
断熱的に膨張 $\Rightarrow$ 一時的に加熱液状態 $\Rightarrow$ 沸騰開始

研究課題

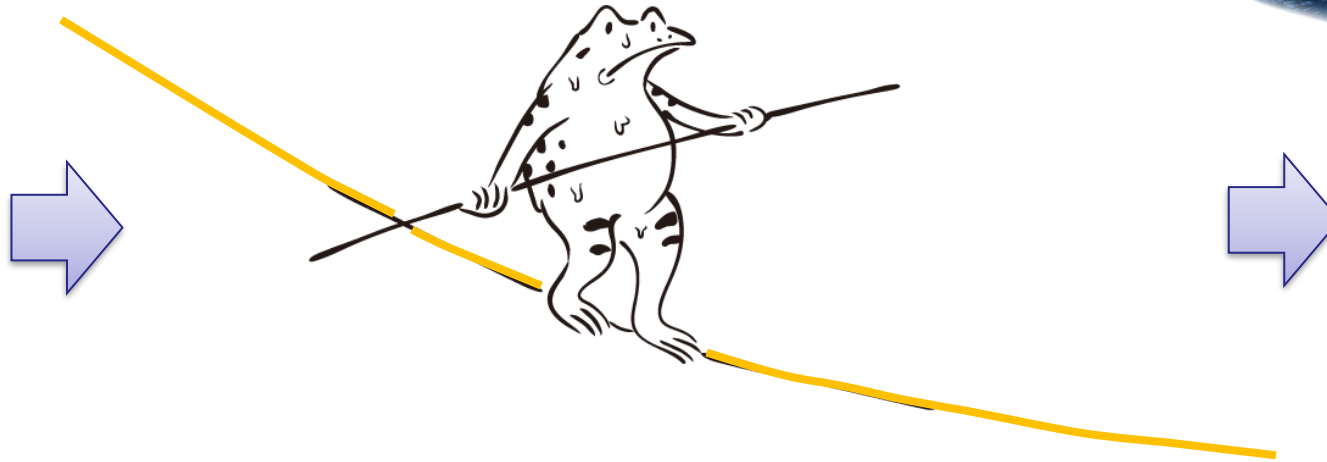
(3) 数値解析の検証と相変化モデルの改良



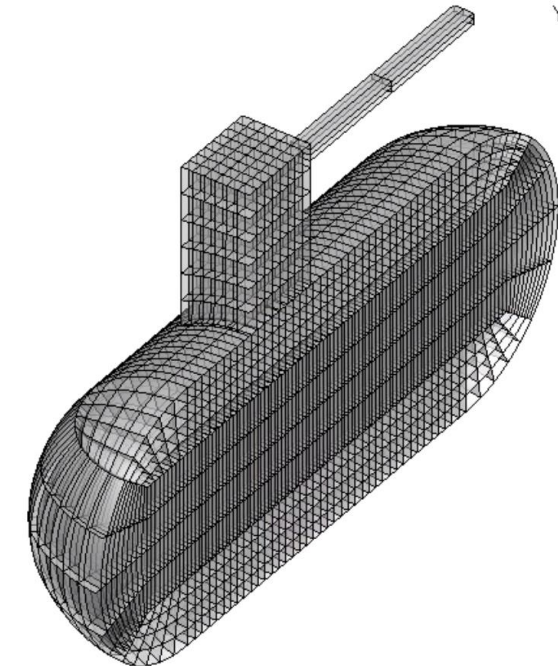
0.001m³
LN2、可視化



STEP=000000 TIME= 0.000000 SEC



1250m³
LH2、~~可視化~~



大型液化水素貯槽を用いた減圧特性試験 (液体水素)



UT-KHI-JAXA Collaboration

JAXA 能代 多目的ロケット実験場

模型じゃなくて大きいタンクでやりたい

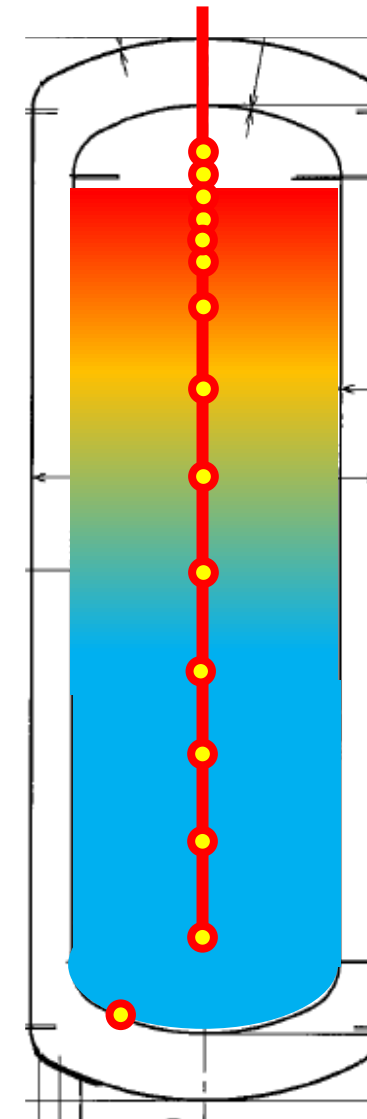


国内でも大型に属する 30 m³ 液水貯槽
温度計・圧力計・流量計
を増設してモニタリングを行う。
(液体水素を使う他の実験の
合間を縫って、加減圧試験を行う)

大型液化水素貯槽を用いた減圧特性試験 (液体水素)



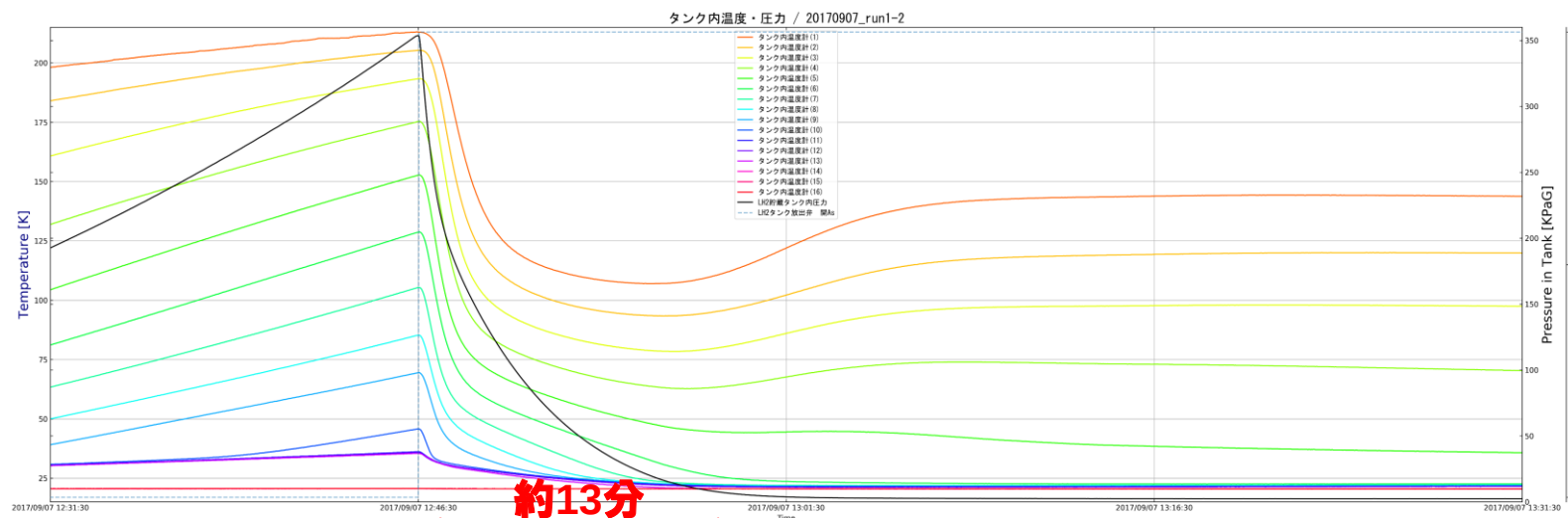
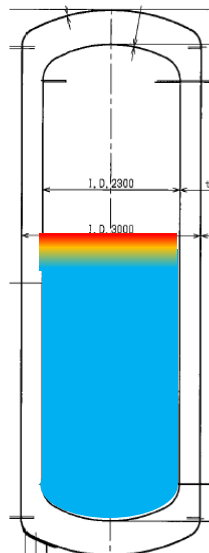
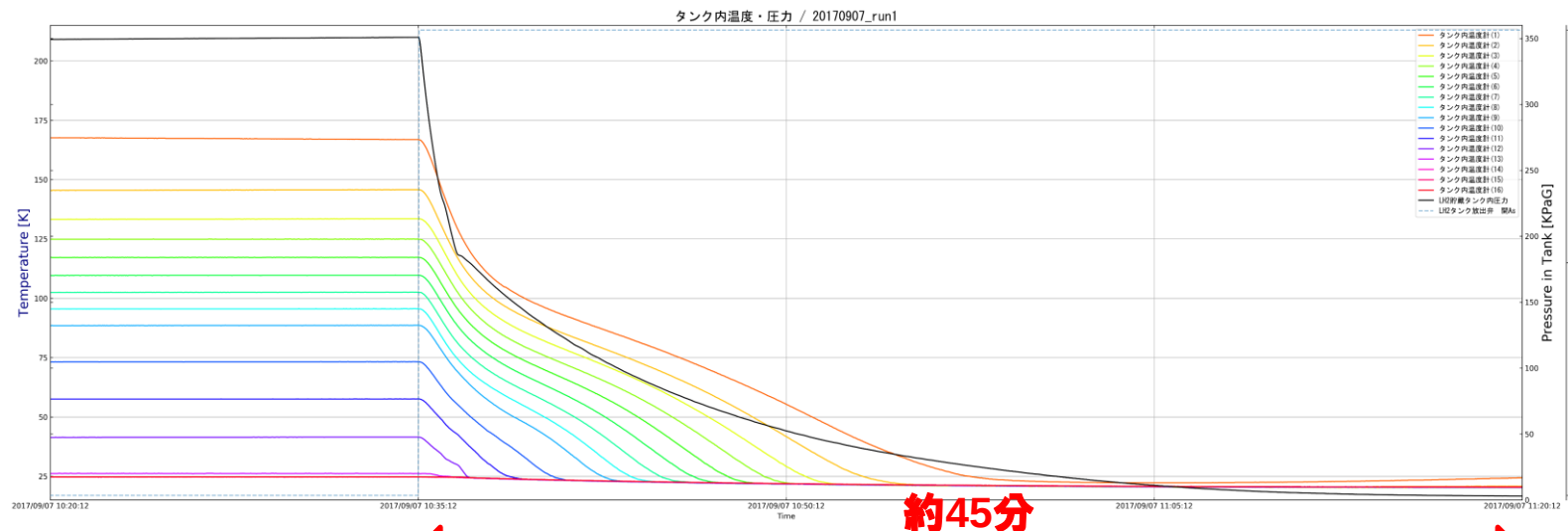
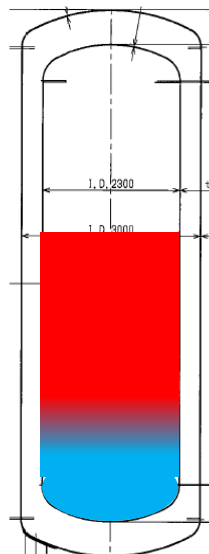
UT-KHI-JAXA Collaboration



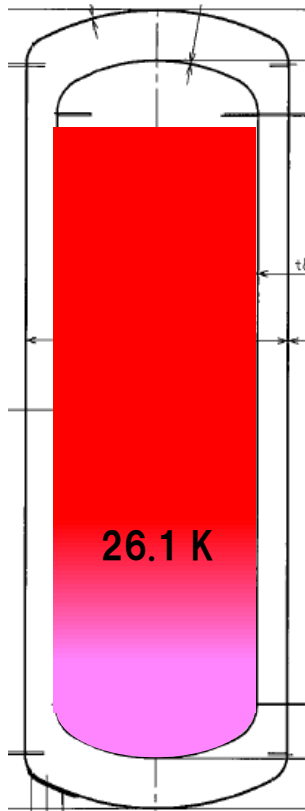
大型液化水素貯槽を用いた減圧特性試験 (液体水素)



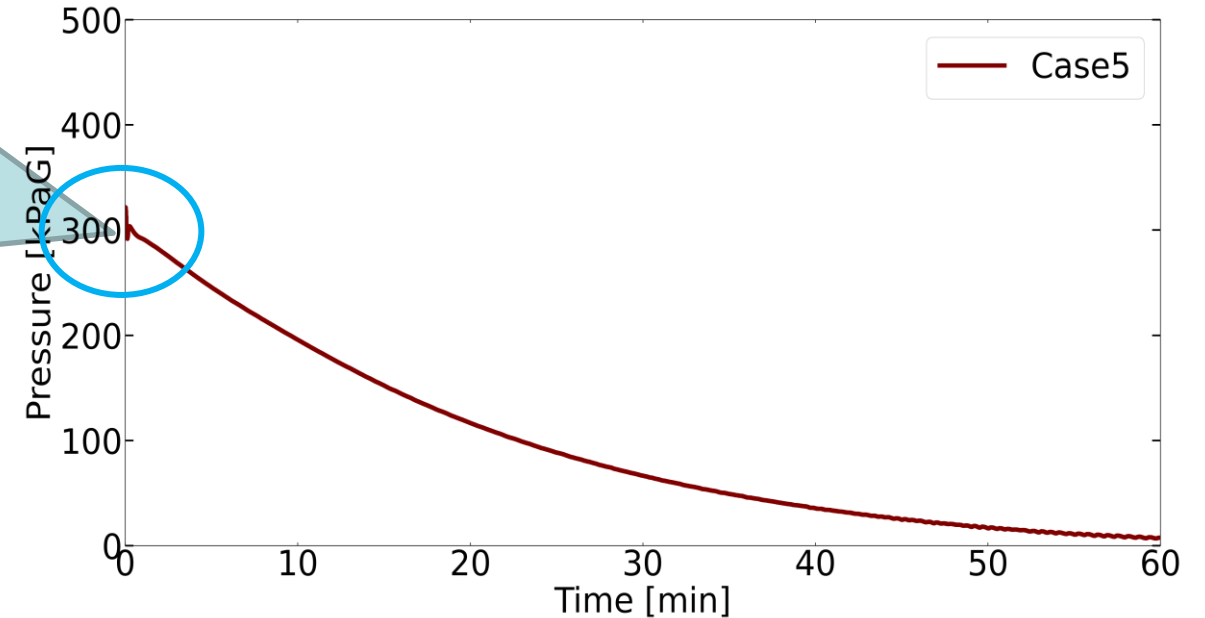
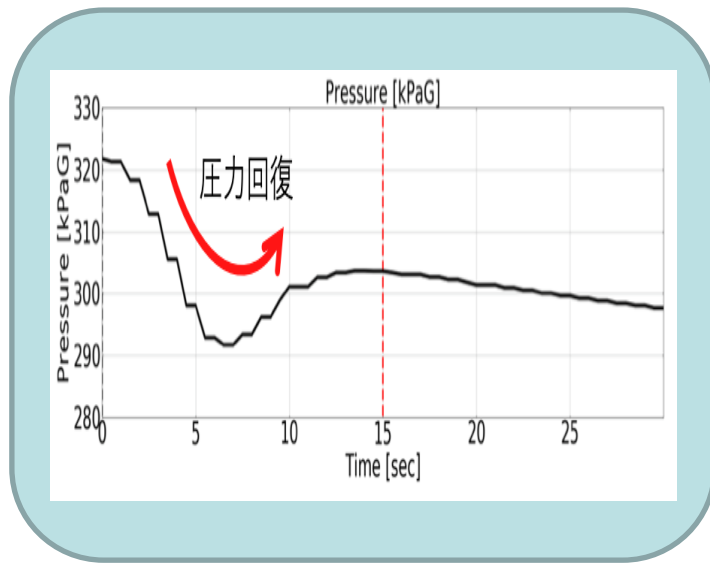
UT-KHI-JAXA Collaboration



大型液化水素貯槽を用いた減圧特性試験 (液体水素)



Case5



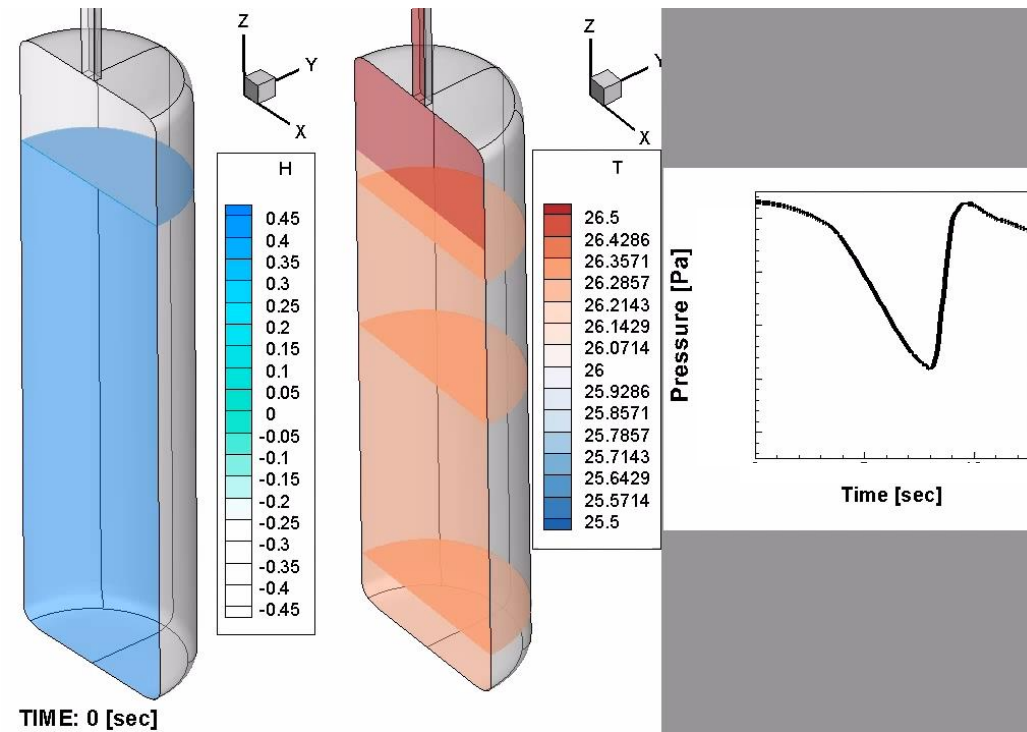
- 圧力回復が発生時、数秒の間に圧力が大きく変動。
- 圧力回復後はゆっくりと時間をかけながら減圧しているため、準静的過程が成立すると考えられる
- 圧力回復に関しては数値流体解析による予測が必要。
- 圧力回復以降の減圧については熱力学に基づく縮退モデルで予測可能。

大型液化水素貯槽を用いた減圧特性試験 (液体水素)



UT-KHI-JAXA Collaboration

液化水素 減圧沸騰CFD
(谷・姫野・小林・神谷 (2018))

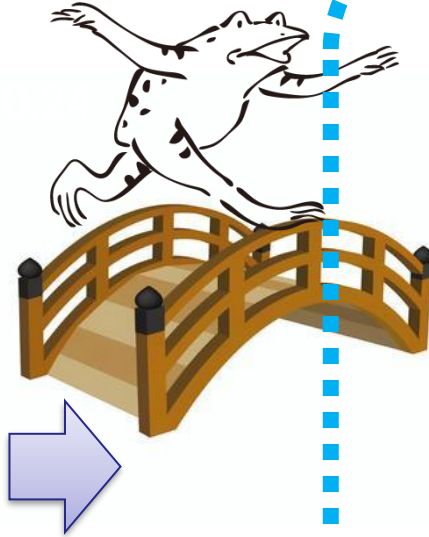


研究課題

(3) 数値解析の検証と相変化モデルの改良



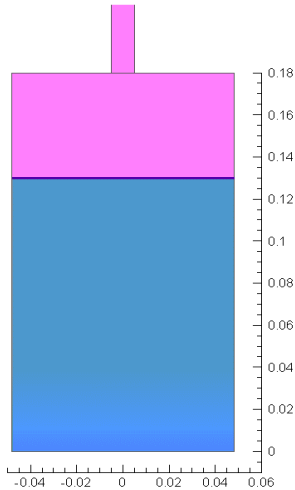
0.001m³
LN2、可視化



30m³
LH2、~~可視化~~



1250m³
LH2、~~可視化~~

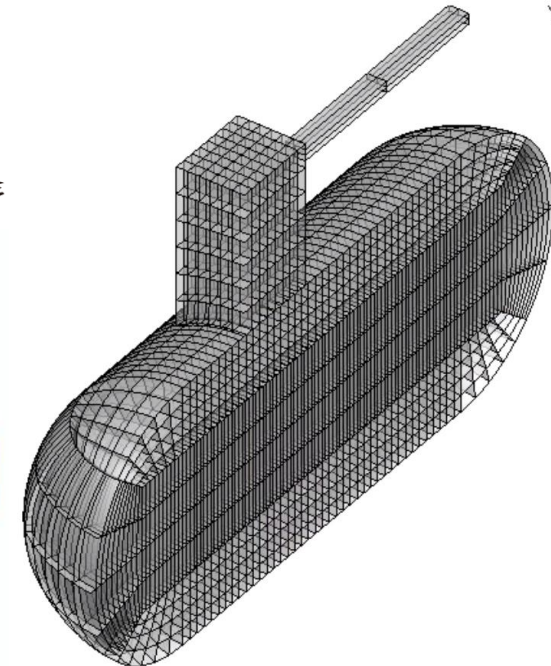
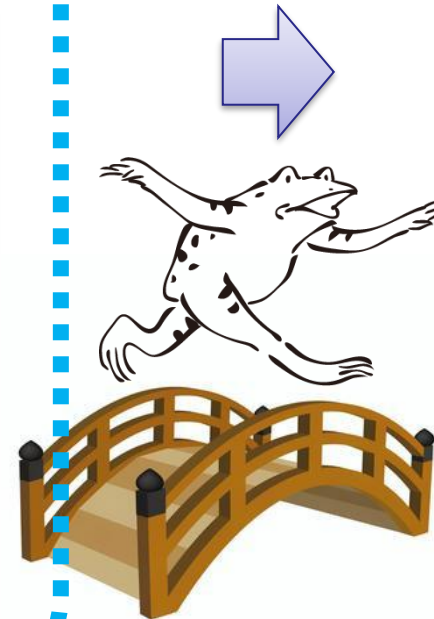
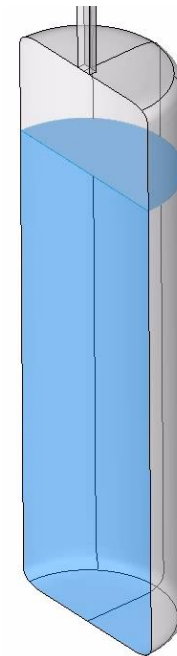


STEP=000000

TIME= 0.000000 SEC



- + 実験による現象理解
- + 数値モデルでの記述、
- + 研究モデル
- + 縮約モデルの提案



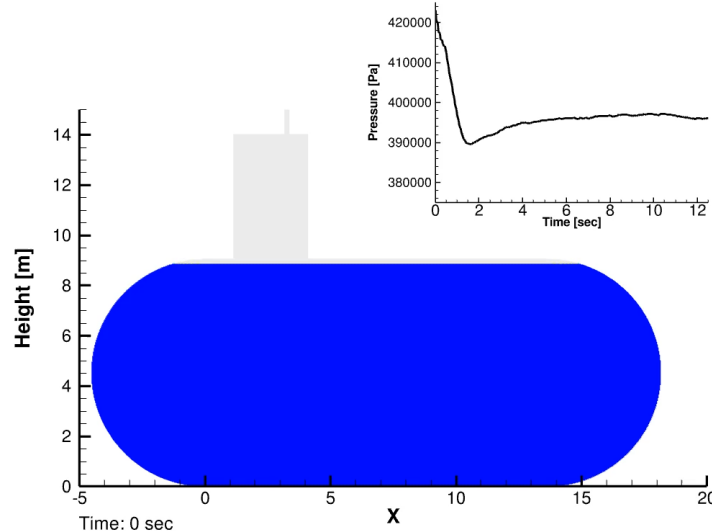
[研究目的]

- + 現象把握を目的とした実験の実施、
- + 物理に基づく現象の数値モデル構築、
- + 数値モデルを組合せた
熱流動解析(研究モデル)と
縮約モデル(工学モデル)の提案

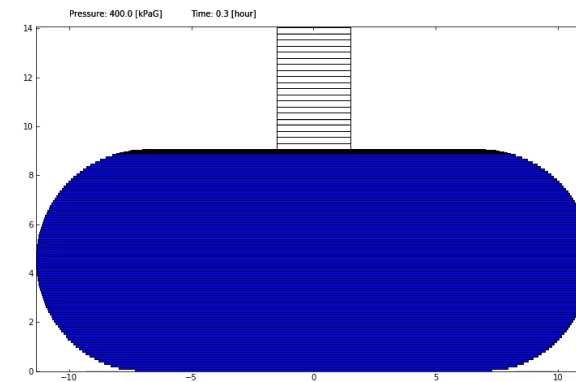
[運用上把握したい事象]

- ① 減圧に伴う気泡発生で液面が押し上げられ、最悪、液体が配管に侵入。
- ② 減圧に伴うミストが生じ、ガス配管内に侵入。
- ③ 減圧によってCCS の内圧が単調に減少しない場合がある。

→ 配管内に圧力変動が生じる可能性があり、
流調弁開度を単調増とすることができない。



熱的・相間非平衡が関わる**短秒時**現象
→ **CFD (2次元/3次元)** と 実機実証



ほぼ平衡で進行する**長秒時**現象
→ **縮約モデル (準1次元)** と 実機実証



東京大学
THE UNIVERSITY OF TOKYO



まとめ

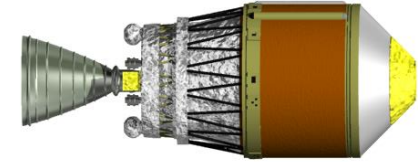


UT JET PROPULSION LABORATORY

まとめ



界面追跡に**MARS**を採用し、形状捕捉に**LSM**を援用した自由表面流解析手法として、界面厚みを排除した**CIP-LSM**を提案した。



界面を挟む熱流束のジャンプ条件に基づきスタッガード位置に集中した**相変化モデル**を考案した。

三次元物体適合格子を用いて、様々な加速度環境に置かれた自由表面流を、相変化と表面張力を考慮して模擬できる可能性を示した。



微粒化など格子スケールと同等の現象を適切に模擬できるか、さらに微小スケールの現象をどのようにモデル化できるかが今後の課題。

自由表面流れは
地球周回上の**微小重力流れ場**から、
毛細管の如き**微小寸法流れ場**まで、未解決課題の宝庫。



まとめ



極低温流体管理技術の構築にあたっては、
流体力学や伝熱学などの**様々な学理**を、
極低温、超高压、微小重力といった**極限的条件下に展開し**、
獲得した知見を**人工物の設計に反映**させなくてはならない。

そのためには、
分析技術(分析科学)と**統合技術**(設計科学)の両方が必要。
数値流体解析をはじめとする
計算力学的手法の援用が強く期待されている。

同時に、
現象の理解とモデリング、および、解析技術を検証するため、
実験が果たす役割は拡がっており、
一層重要度を増していることを強調したい。

補足スライド

設計 = 多分野の工学分野を統合し価値を生み出す

未だ無いものを実現する（「在らしめる」）

分析

統合



理工



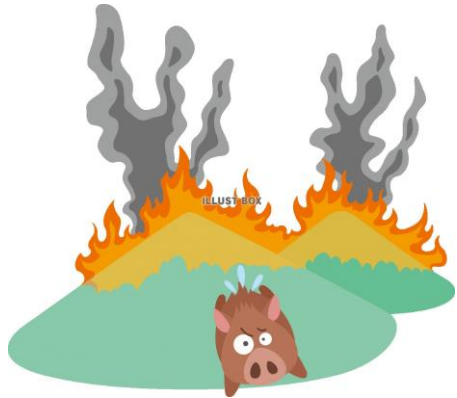
分析科学
認識科学

設計科学
総合工学

現象の発見、現象の理解、（人類の）知識の地平を拡げる

設計 = 多分野の工学分野を統合し価値を生み出す

自然現象を都合の良い場所とタイミングで起こす



統合



設計科学
総合工学

