

低温流体における流量計測技術の開発と課題

竹川 尚希

産総研 計量標準総合センター 工学計測標準研究部門 気体流量標準研究グループ

2025年11月07日(金)

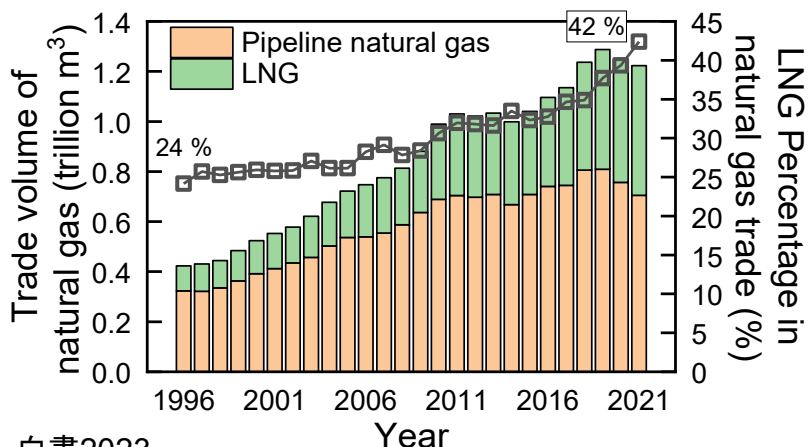
第20 回NMIJ 流量計測クラブ

研究背景

研究背景(液化ガス)

液化天然ガス(LNG)

- 2022年のLNG最大輸入国(1000億 m^3 、9兆円)は日本で、世界シェア18%を占める。
- 世界的にも、天然ガス、特にLNG需要は増加傾向にある。――



エネルギー白書2023

液化水素(LH₂)

- 水素に関して、液化水素や液化アンモニアが効率的なエネルギーキャリアとして注目されている。液化水素の体積は水素ガスの800分の1で、液化水素コンテナ車は圧縮水素トレーラー(気体)の10倍以上の輸送量を有している。
- 2022年には、日本豪州間で液化水素運搬船の実証実験が行われた。

液化ガスに関して慣行の取引方法は存在するものの、国際的に低温流量試験設備は数少なく、一般的に流量計は常温水で校正される。そこで本研究では、液化窒素を対象とした、秤量システムに基づく低温流体用流量試験設備を開発する。

海外NMIでの取り組み

各国の低温流量標準設備

VSL

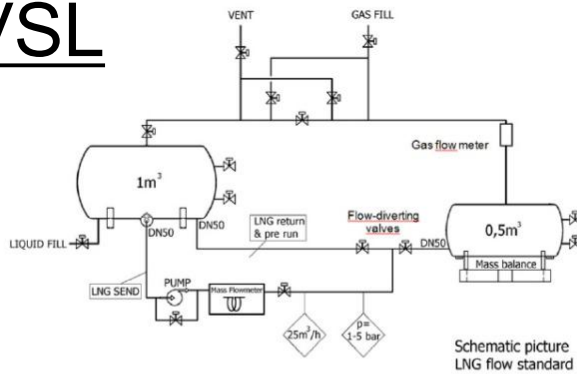


Figure 2. Schematic picture of the primary LNG flow standard.



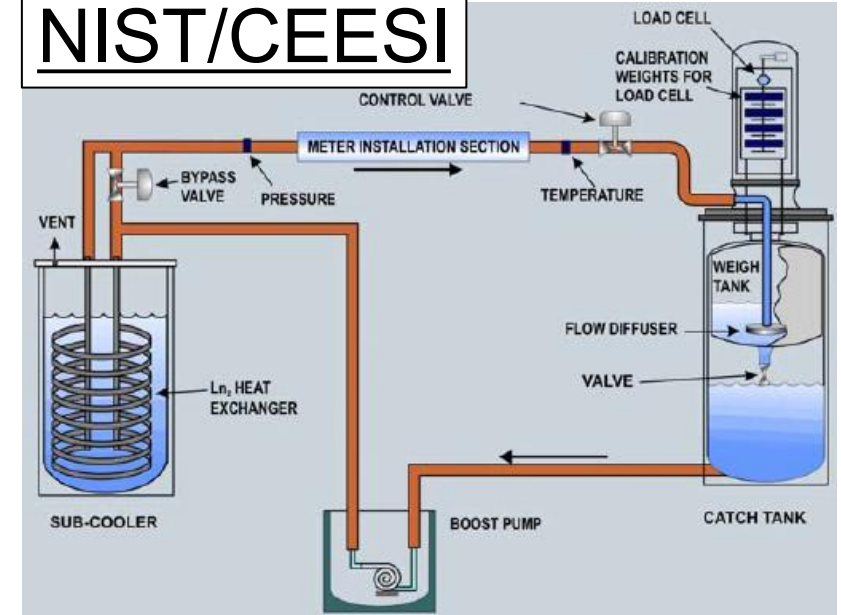
その後200m³/hまで拡張
不確かさ0.3%(k=2)

体積流量: 0.5~25m³/h
質量流量: 6.7~330kg/min
不確かさ(k=2): 0.12~0.15%
流体: LN₂, LNG

LNGと水との比較。

水で校正されたコリオリ流量計は、要求精度に適合しない場合が存在する。

NIST/CEESI



体積流量: 4.5~45m³/h
質量流量: 60~600kg/min
不確かさ(k=2): 0.17%
流体: LN₂

LNG輸入者国際グループ(GIIGNL)の液面計に基づく、
LNG容量計測よりも高精度としている。

液体水素での実験 (VSL、オランダ)

VSL (ドイツ航空宇宙センターでの DLR での実験)

コリオリ流量計 (25A) とタービン流量計 2 台 (40A) の比較

- コリオリ流量計の LH_2 校正は実施されていない。
- 低温補正モデルの不確かさを計算し、タービン流量計の校正に関して拡張不確かさ 1.34 % と推定している。
- タービン流量計とコリオリ流量計の差は 2.0 ~ 2.9 % であった。
- 温度計、圧力計などの詳細な情報は記載されていない。

試験質量流量: 1172 ~ 2771 kg/h、試験圧力: 2~13 気圧

LH_2 タンク: 6 m³ (下流が大気開放で圧力差により LH_2 の流れを生成)

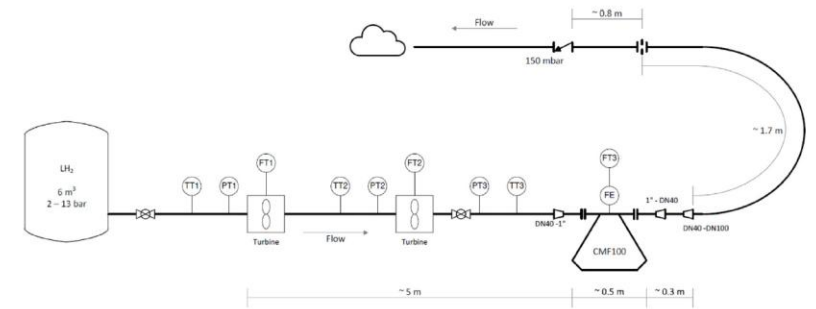
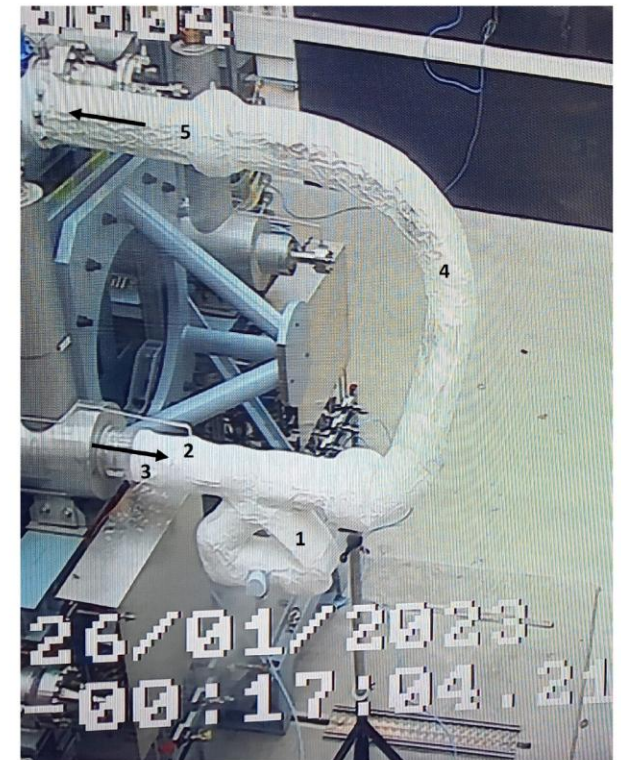


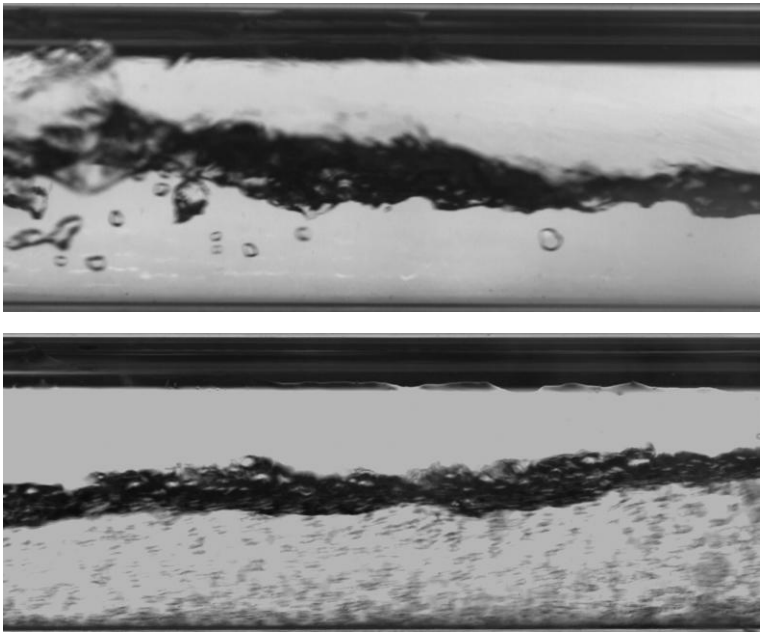
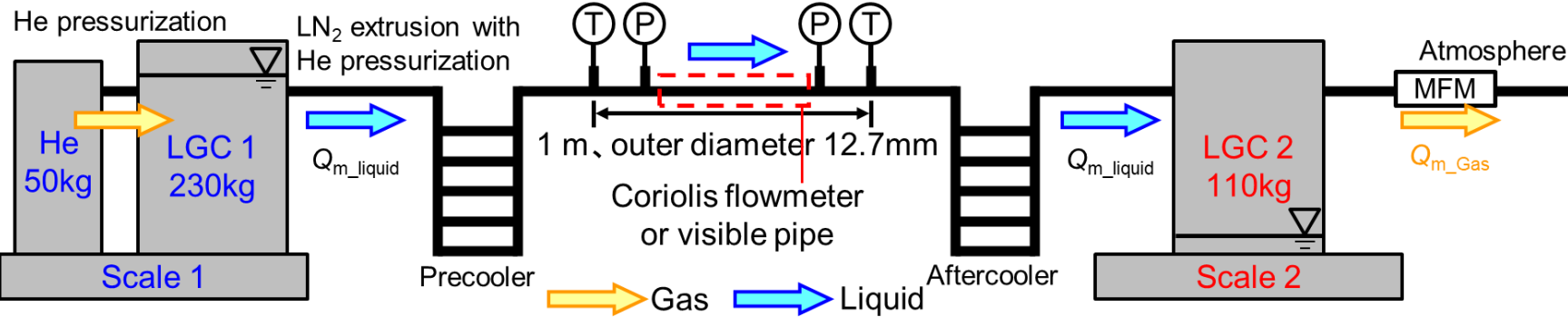
Fig. 2. Schematic of LH_2 experiments at the Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR).



低温時下における流量計の計測精度について...?

産総研での取り組み

産総研における液体窒素の流量計測実験



試験流量(5日間で実施)

1.5, 2.7, 6.0, 10 & 14 kg/minにおいて3回の繰り返し試験(計15回)

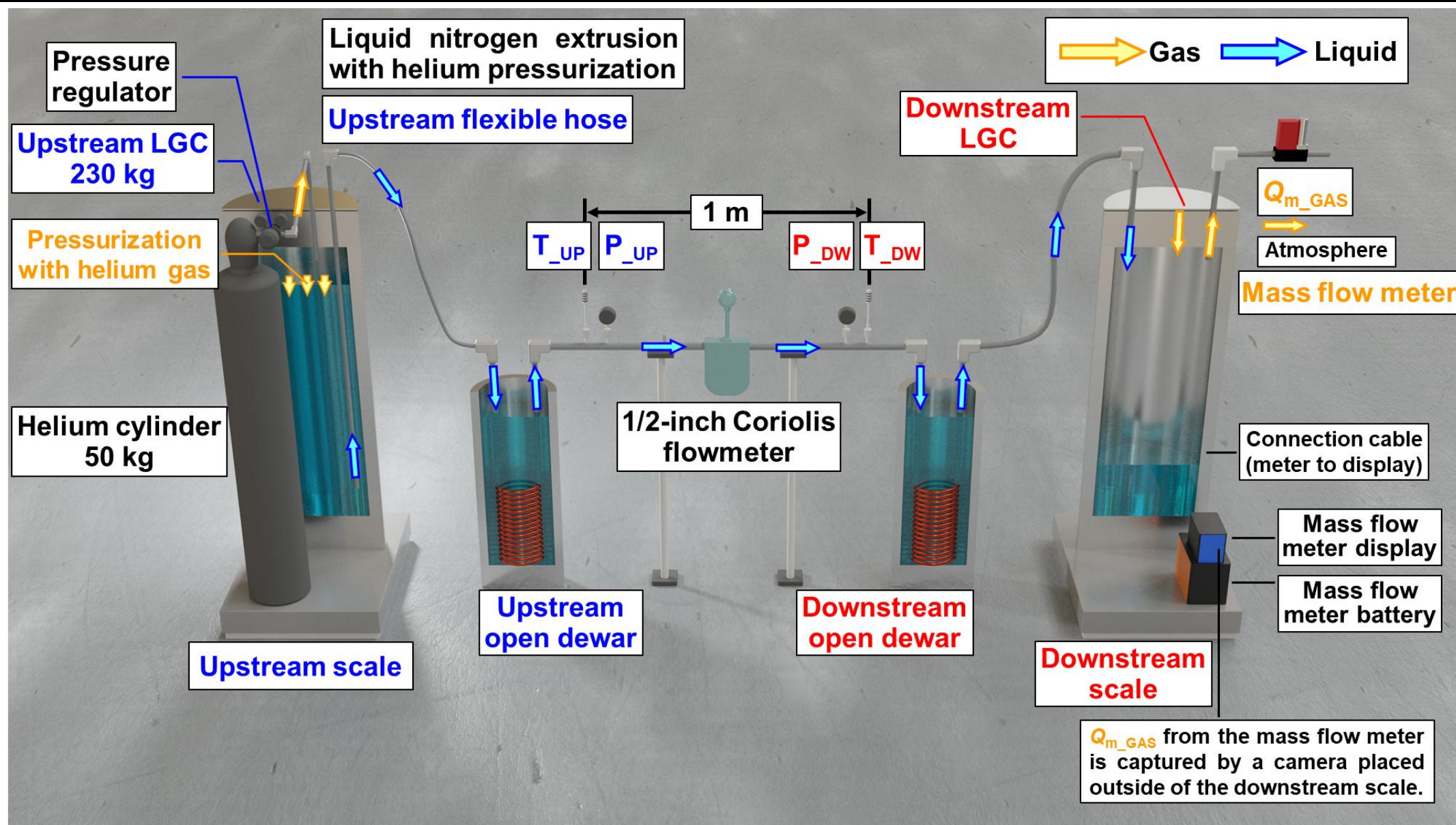
実験および設備の特徴

- 差圧によるLN₂ 流れの発生
- 試験ラインにおける完全液相での実験
- 上下流における質量流量の計算

実験ケース

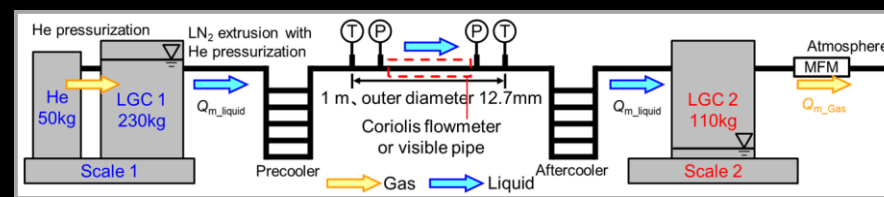
	Group A			Group B			Group C			Group D			Group E		
	1.45 kg/min			2.65 kg/min			5.96 kg/min			10.04 kg/min			14.06 kg/min		
Case	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3	D1	D2	D3	E1	E2	E3
Q_{m_UP} kg/min	1.3	1.5	1.5	2.6	2.7	2.7	5.8	6.0	6.1	9.9	10.0	10.2	13.9	14.0	14.2

装置全体図

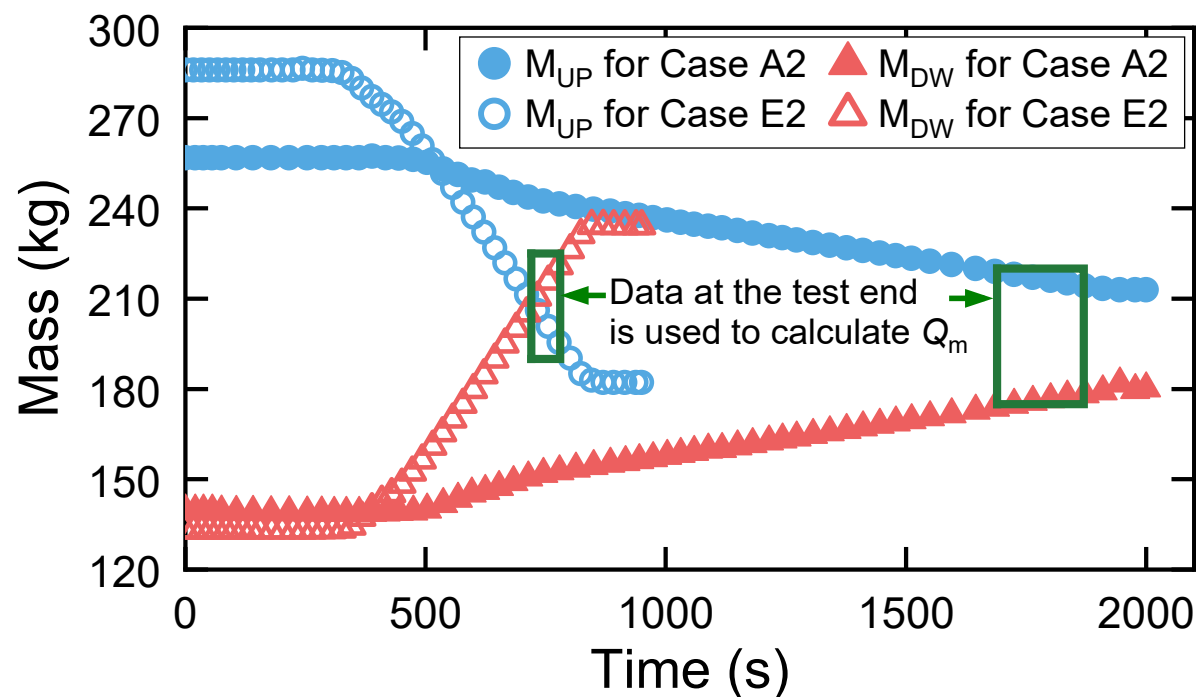


実験結果 (秤量システム)

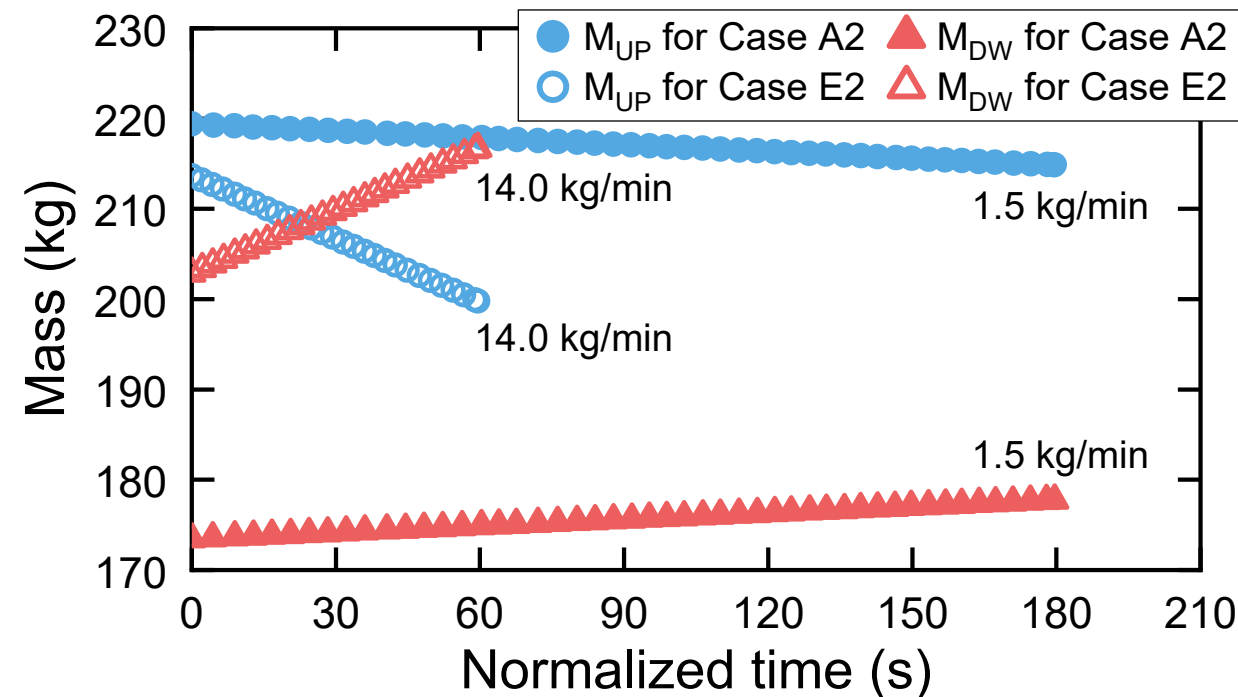
実験結果（時間と質量）



全試験時間 vs 質量
Case A2: 1.5 kg/min
Case E2: 14.0 kg/min



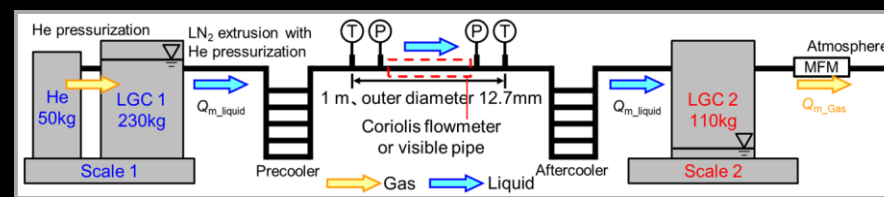
緑枠の時間 vs 質量
質量流量の計算に必要な時間
Case A2: 60 s, Case E2: 180 s



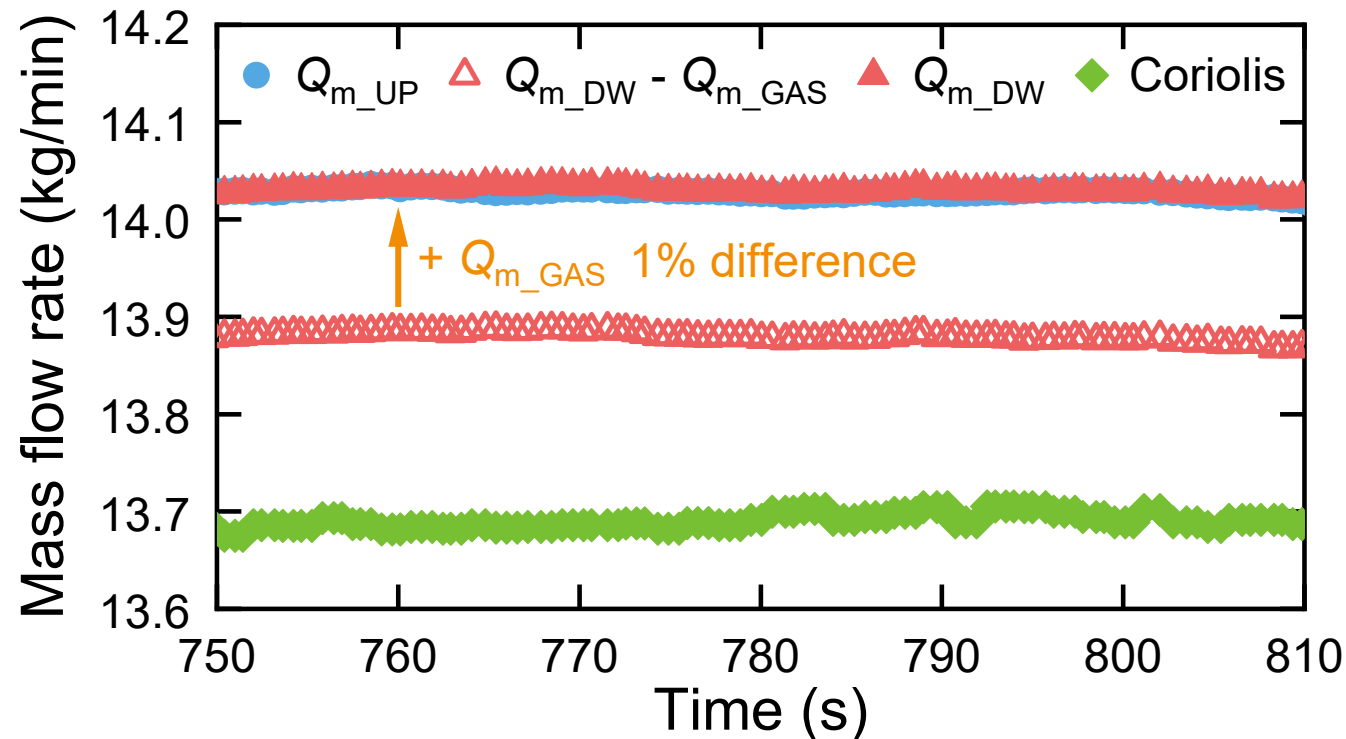
$$\frac{\partial M_{UP}}{\partial t} \quad \frac{\partial M_{DW}}{\partial t}$$

質量変化の時間微分は、データプロットの傾きから算出した。

実験結果(質量流量)



時間 vs 質量流量
(Case E2)

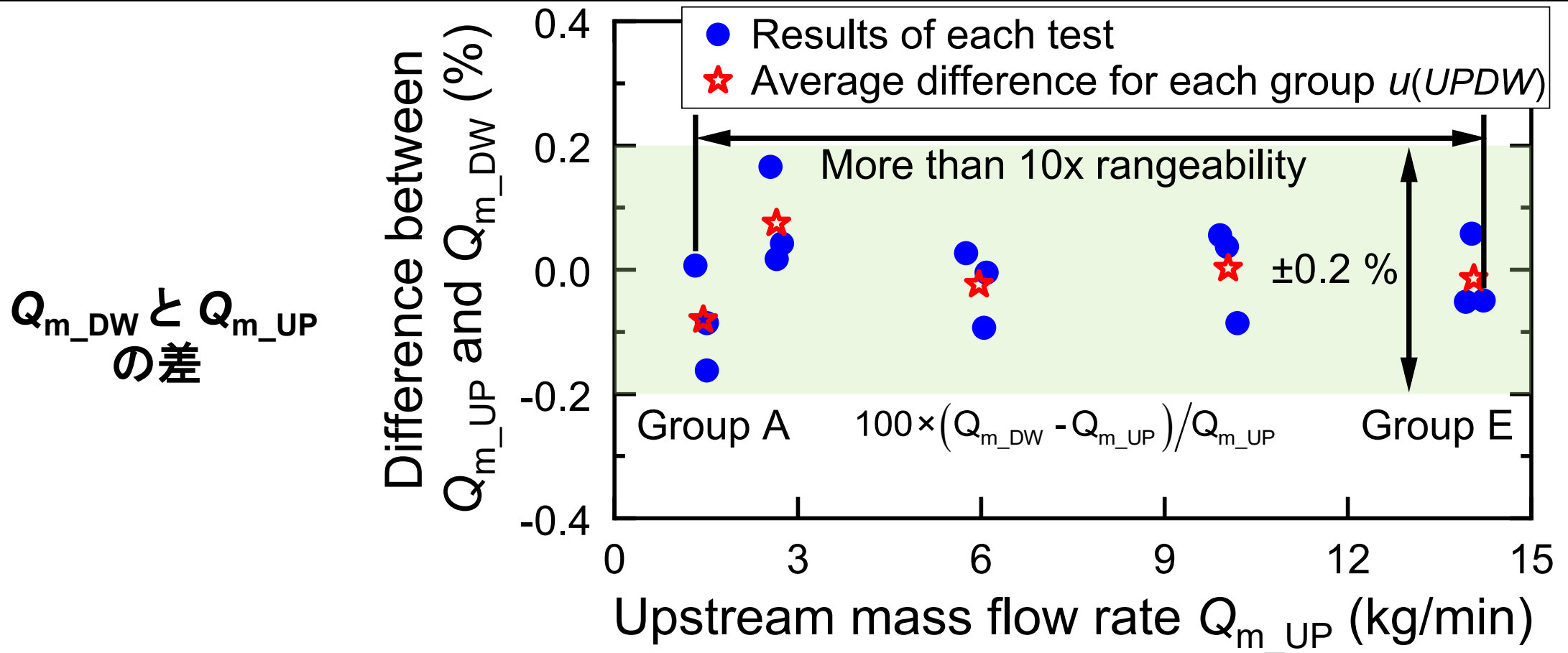


$$Q_m = \underbrace{C_{UP} \frac{\partial M_{UP}}{\partial t}}_{Q_{m_UP}} = \underbrace{C_{DW} \frac{\partial M_{DW}}{\partial t}}_{Q_{m_DW}} + Q_{m_GAS}$$

C_{UP} and C_{DW} は上下流のはかりに固有の定数

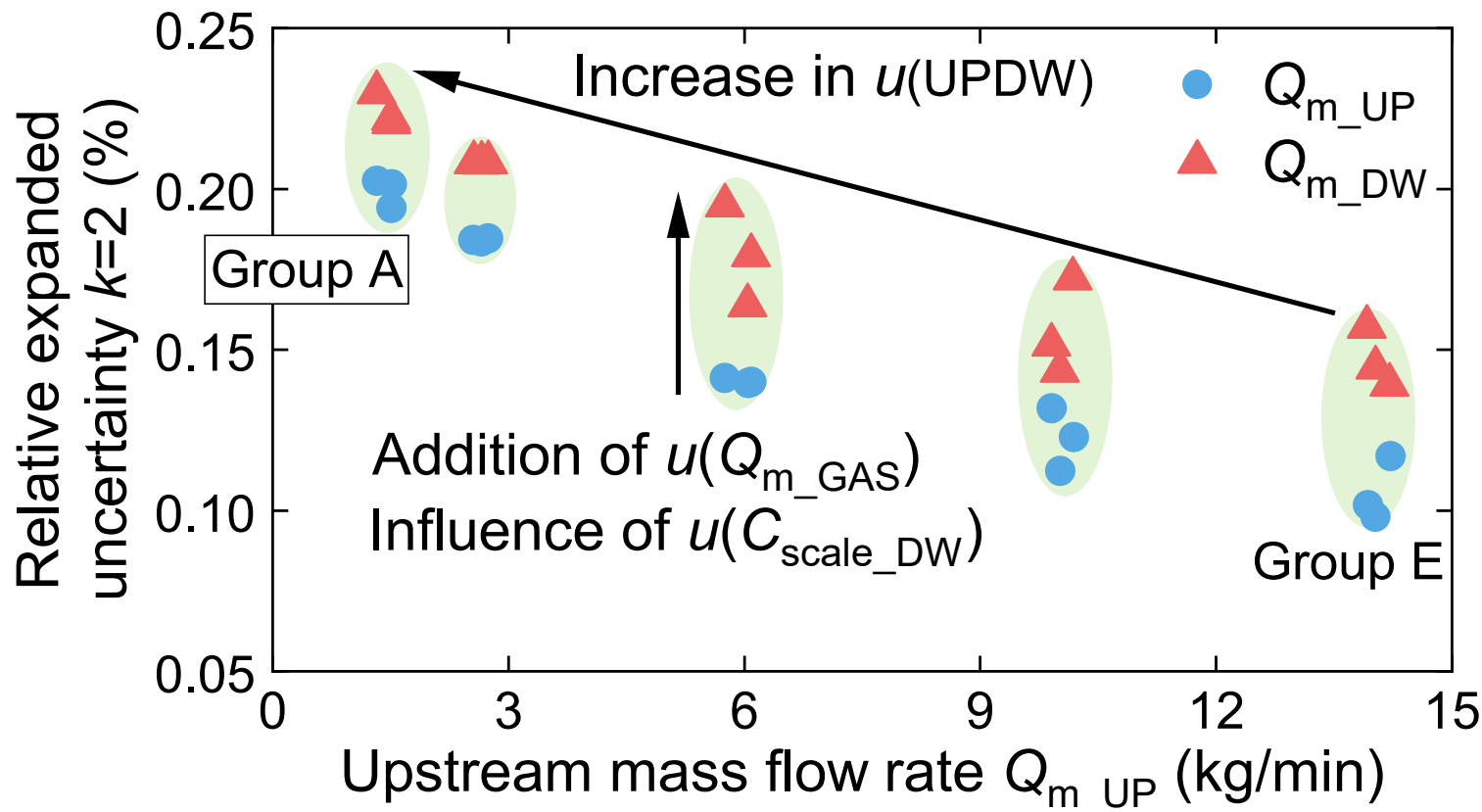
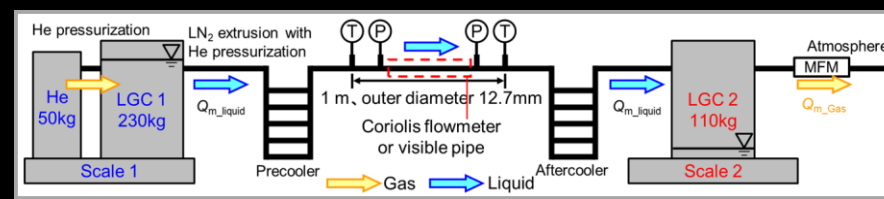
窒素ガス放出量(Q_{m_GAS})考慮することで, Q_{m_UP} and Q_{m_DW} において良好な一致が見られた。

実験結果(上下流の質量流量)



10倍以上の流量範囲で、 Q_{m_UP} と Q_{m_DW} の差は $\pm 0.2\%$ であった。

質量流量 Q_m の不確かさ



フランス LNE

質量流量: 6.7~330kg/min

不確かさ ($k=2$): 0.12~0.15%

流体: LN_2 , LNG

アメリカ NIST/CEESI

質量流量: 60~600kg/min

不確かさ ($k=2$): 0.17%

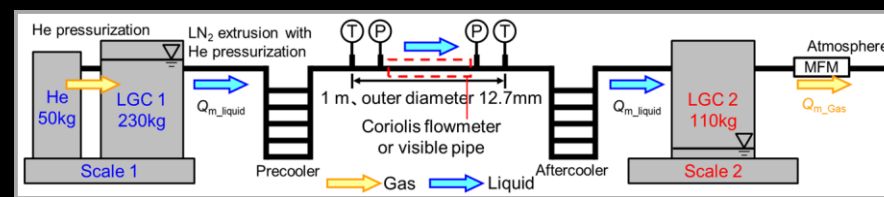
流体: LN_2

相対拡張不確かさ ($k=2$): 上流 0.1% ~ 0.2%、下流: 0.14% ~ 0.23%

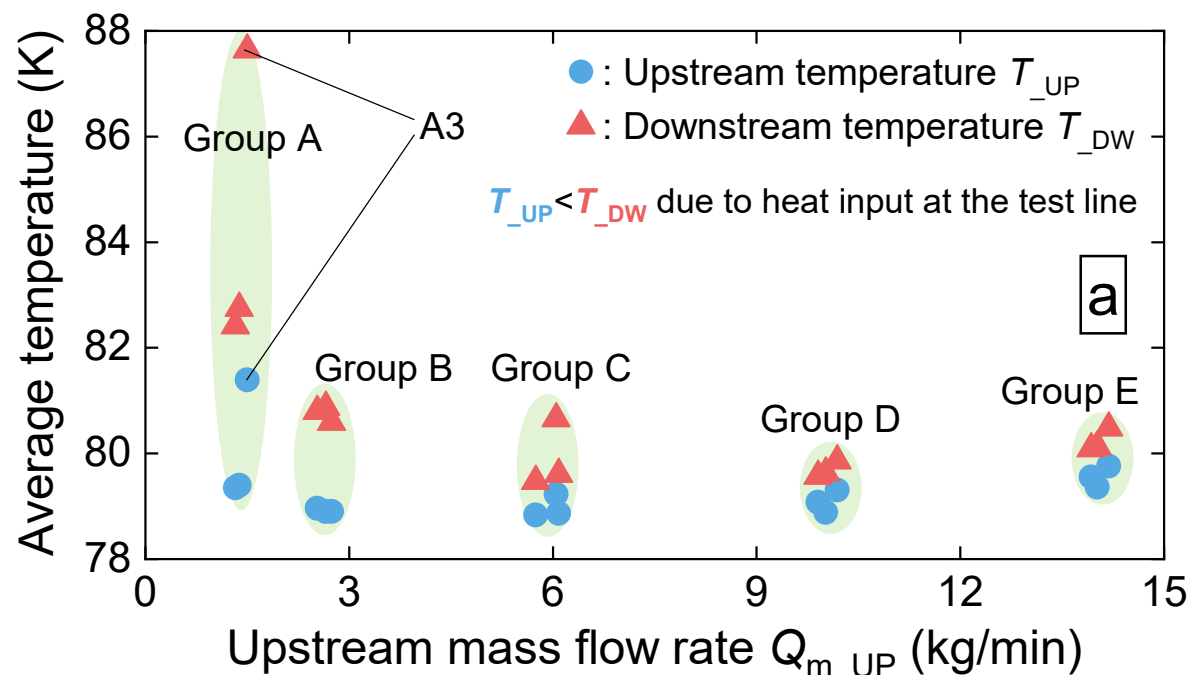
実験結果

(試験ラインでの温度・圧力・流量計の出力)

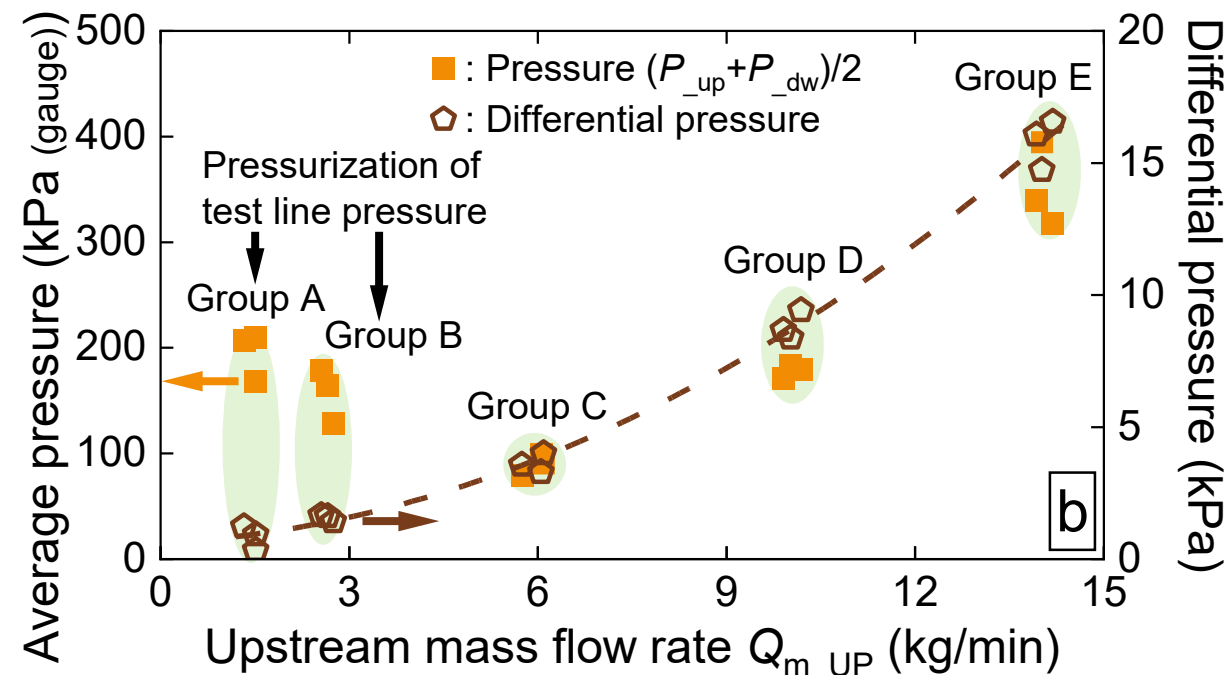
試験ラインでの温度・圧力



試験ラインの上流・下流温度

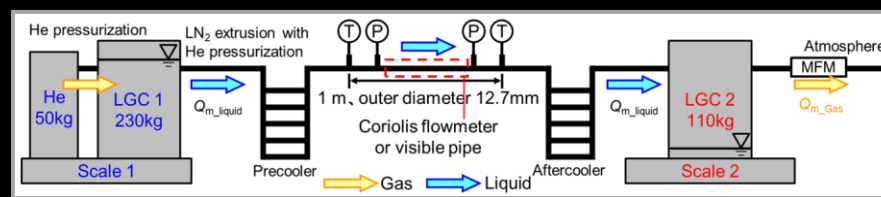


試験ラインの平均圧力と上下流の差圧

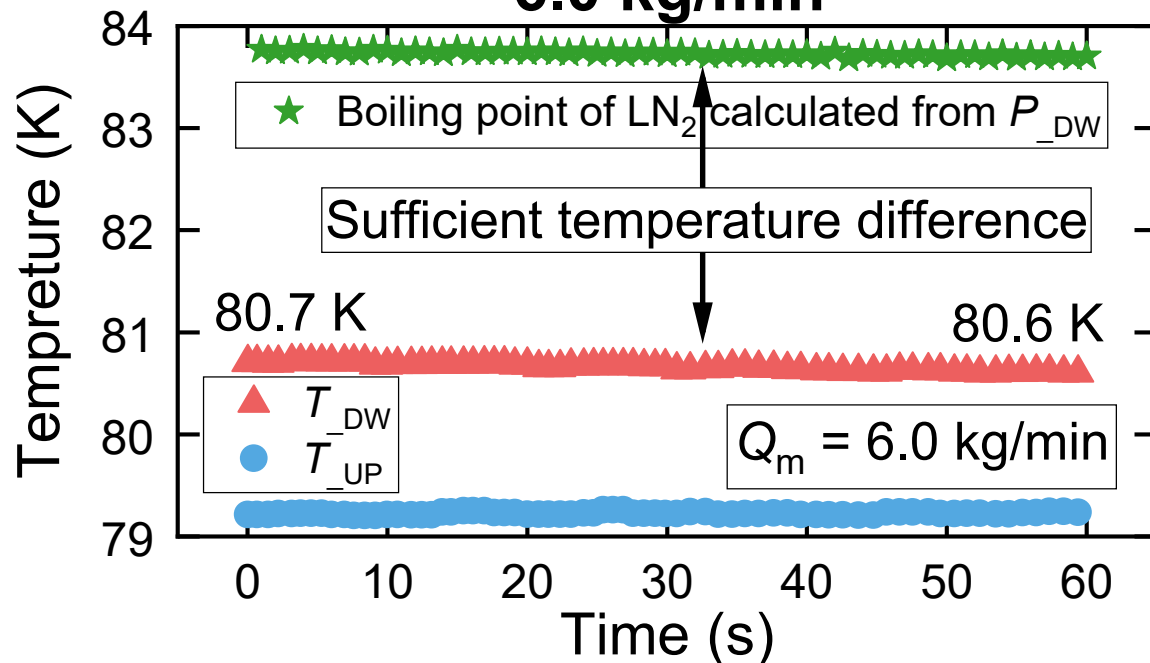


- 上流温度<下流温度。低流量域での温度のばらつきが大きい。
- 低流量域では意図的にライン圧を上昇させ、沸点を高く設定している。
- 流量と差圧は一般的な関係を示している。

試験ラインでの温度

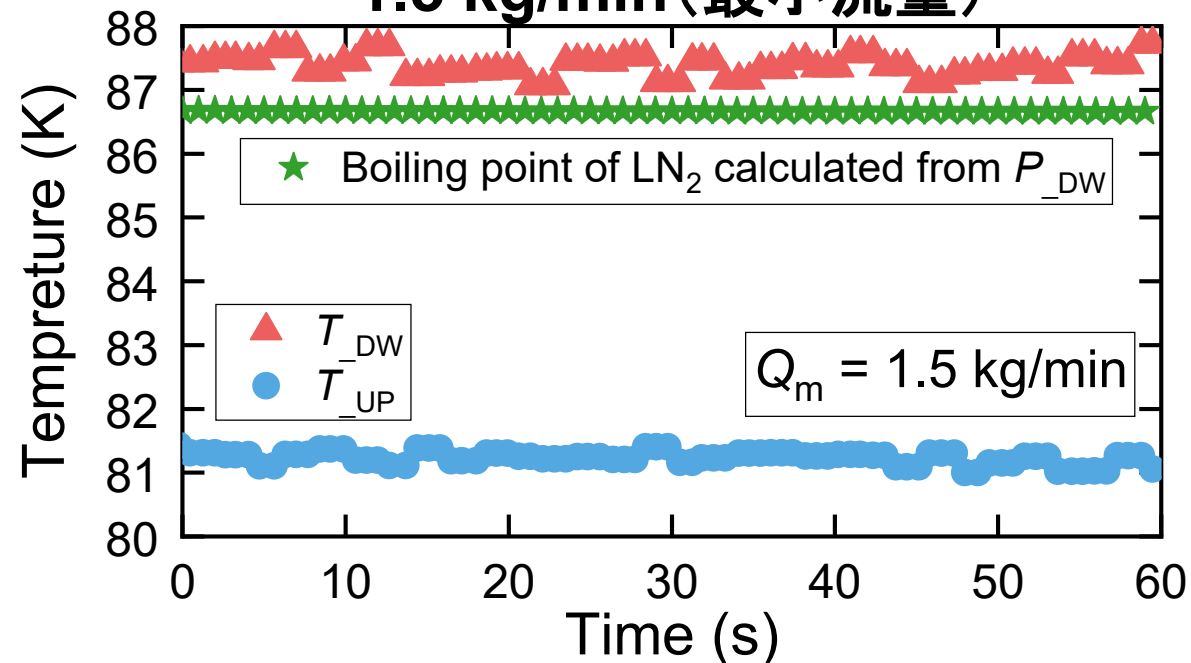


質量流量
6.0 kg/min



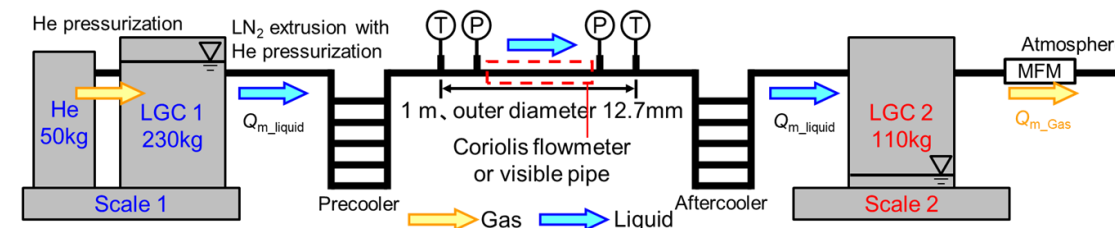
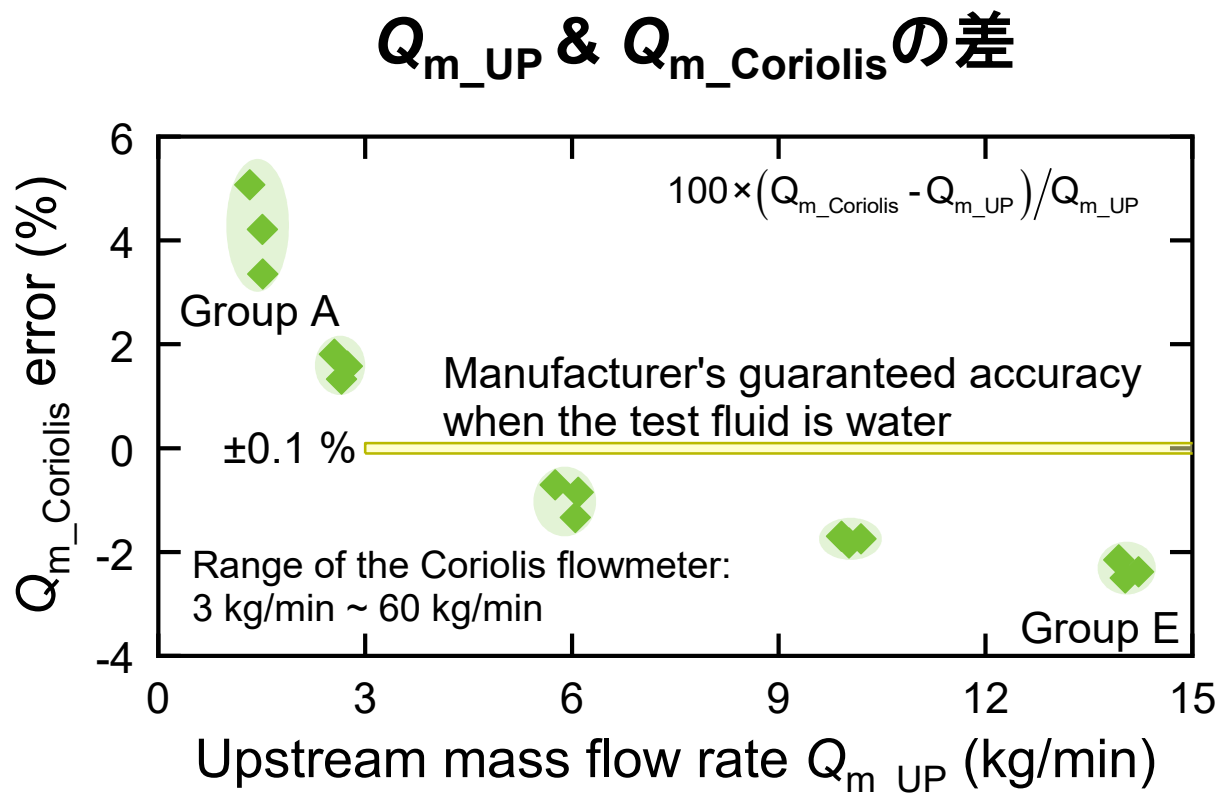
質量流量

1.5 kg/min (最小流量)



- 最小流量より大きな流量点では、温度は安定しており沸点よりも十分に低い温度を示している。
- 最小流量では、下流温度と下流圧から、およその温度・圧力計測の妥当性を確認できる。

コリオリ流量の出力

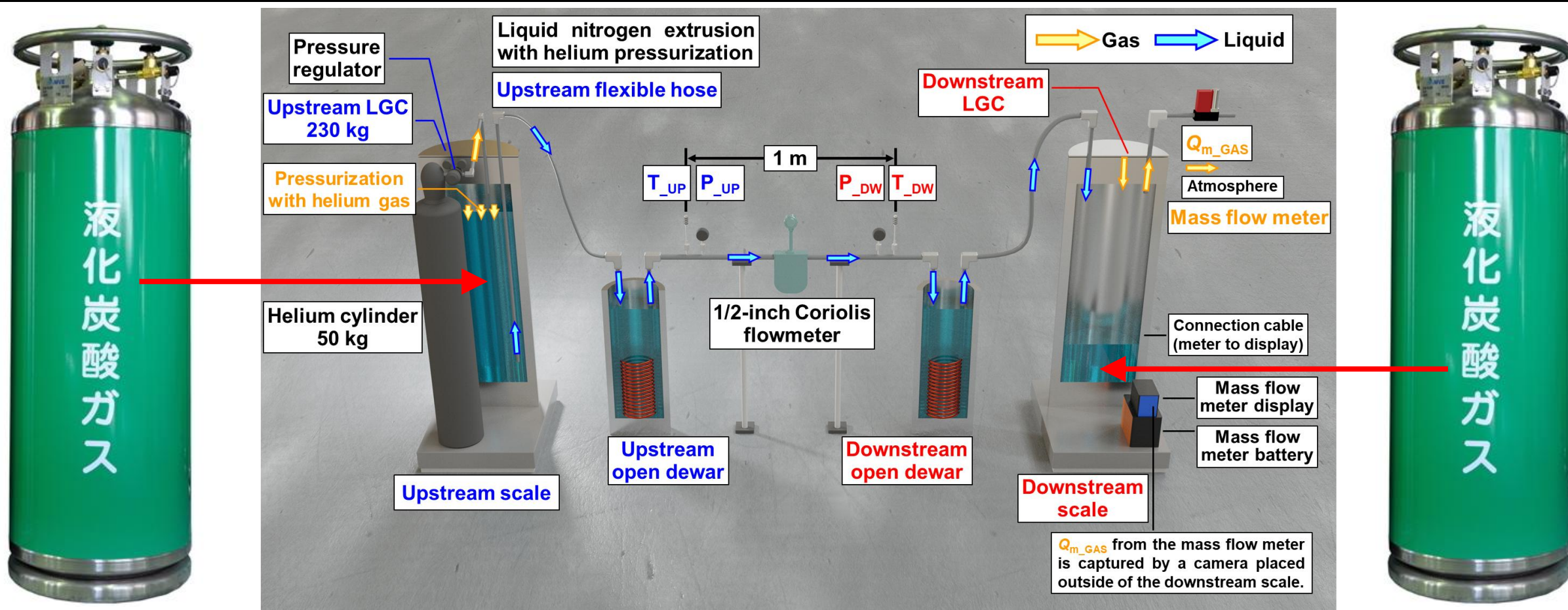


コリオリ流量計の最大流量: 60 kg/min
校正およびゼロ点校正時の流体: 水

LN₂ の流量計測において、水で校正された商用コリオリ流量計の誤差は-2.5%~5%であった。

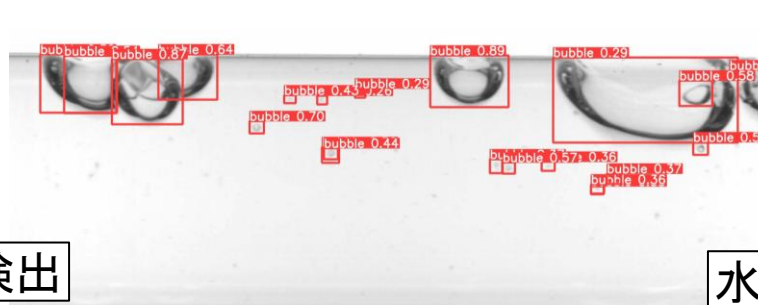
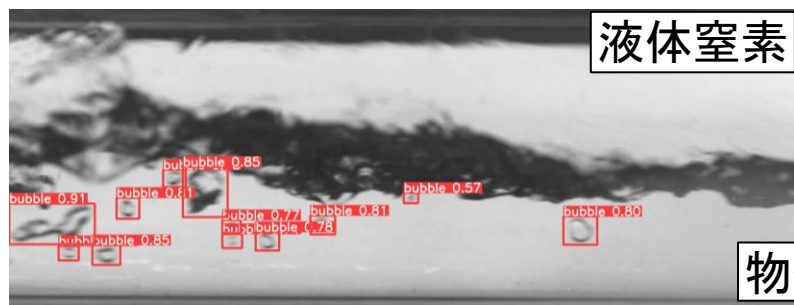
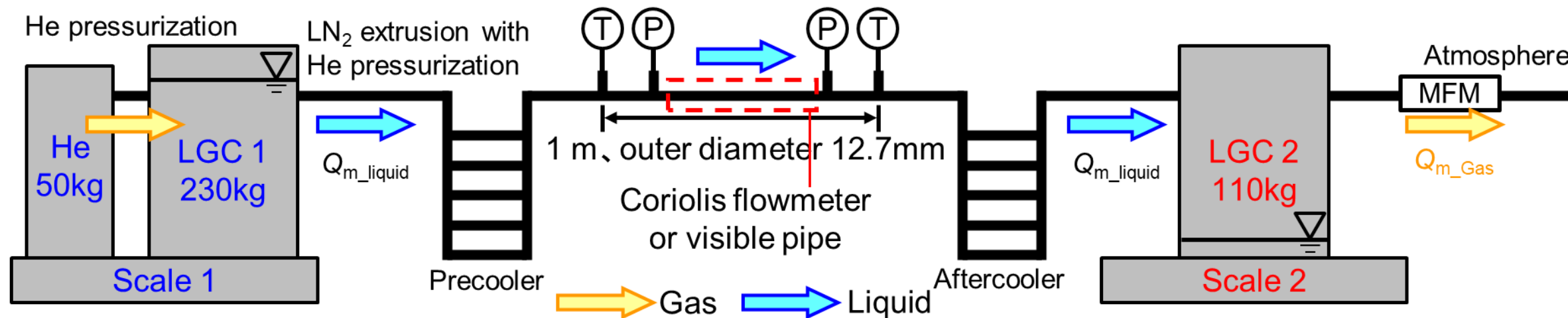
今後の展望

今後の展望(ガス種の拡大、 LCO_2 への対応)



熱交換部における課題は存在するものの、 LCO_2 の流量計測にも応用が可能

今後の展望(二相流への応用、ボイド率計)



物体検出(ボックス)でとどまっているが、セグメンテーションまで進めて、ボイド率計測等に貢献したい。

ご清聴ありがとうございました。

ご意見やご要望をお伺いできれば幸いです。