

# 高レイノルズ数設備と管摩擦係数

古市紀之

産業技術総合研究所  
計量標準総合センター

流量計測クラブ(2016.11.29)  
秋葉原UDX

## はじめに

- 「次世代エネルギーのための流量計測」
- 流体と固体壁面における摩擦損失  
航空機・船舶・自動車・鉄道といった輸送機器におけるエネルギーロス  
パイプライン等のエネルギー輸送におけるエネルギーロス
- 損失低減のための技術開発  
界面活性剤、ポリマー、リブレット、マイクロバブル
- エネルギー輸送として管内流に着目  
損失の高精度推定  
高負荷環境(高温、高レイノルズ数、低温、混相流)

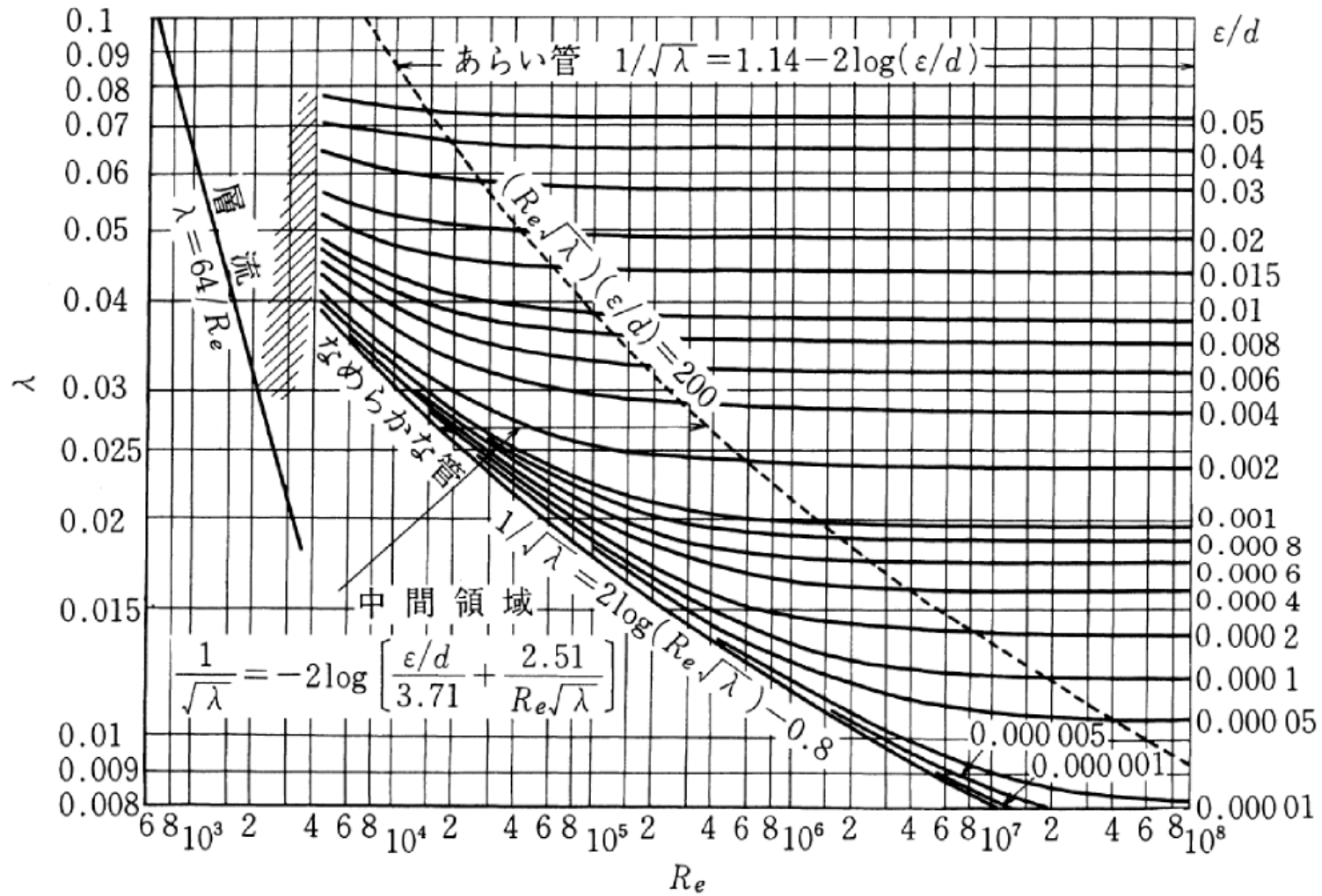
# 目次

- I. 円管における管摩擦係数に関するイントロダクション
- II. 産総研における高レイノルズ数試験設備と他の設備 (Superpipe, CICLoPE) の紹介
- III. 管摩擦係数の計測結果とその不確かさ
- IV. まとめ

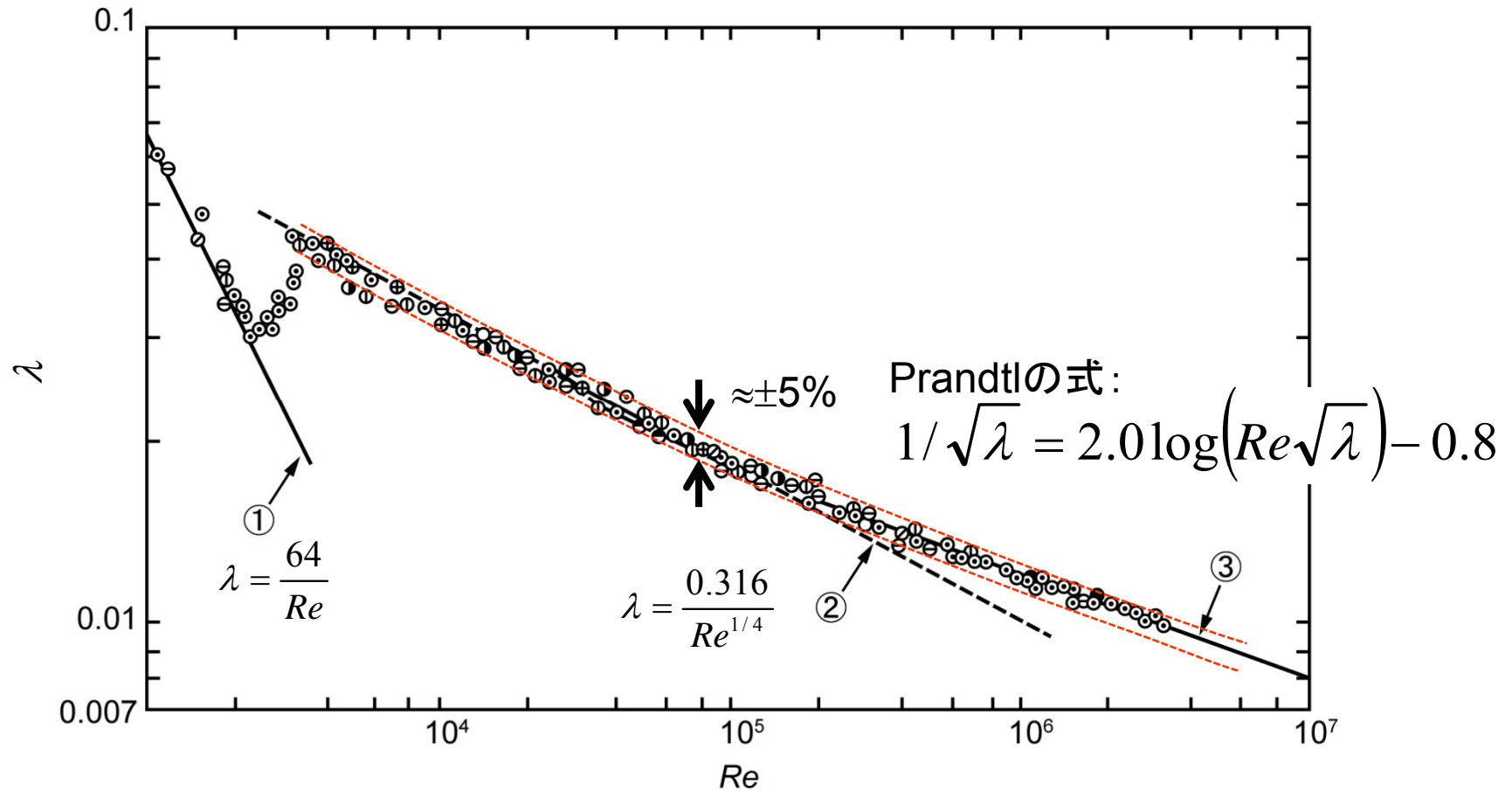
A grayscale photograph of an industrial facility, likely a water treatment plant. The image shows a complex network of pipes, metal structures, and large cylindrical tanks. In the foreground, there are two large pumps labeled '循環ポンプC' (Circulation Pump C) and '循環ポンプD' (Circulation Pump D). The background features a large steel frame structure under a cloudy sky. The overall scene is industrial and technical.

# 1. 円管における管摩擦係数に関する イントロダクション

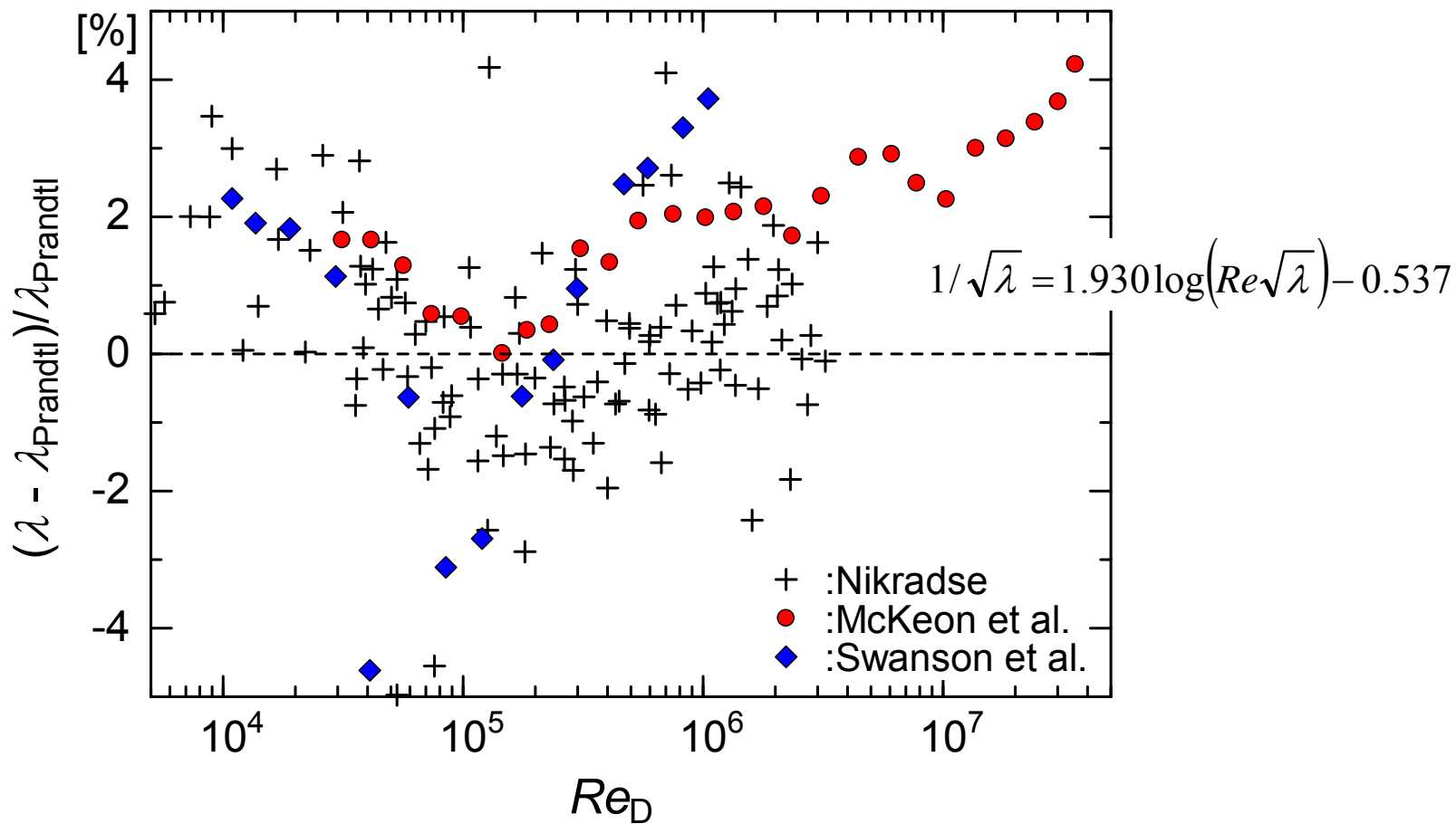
# ムーディー線図



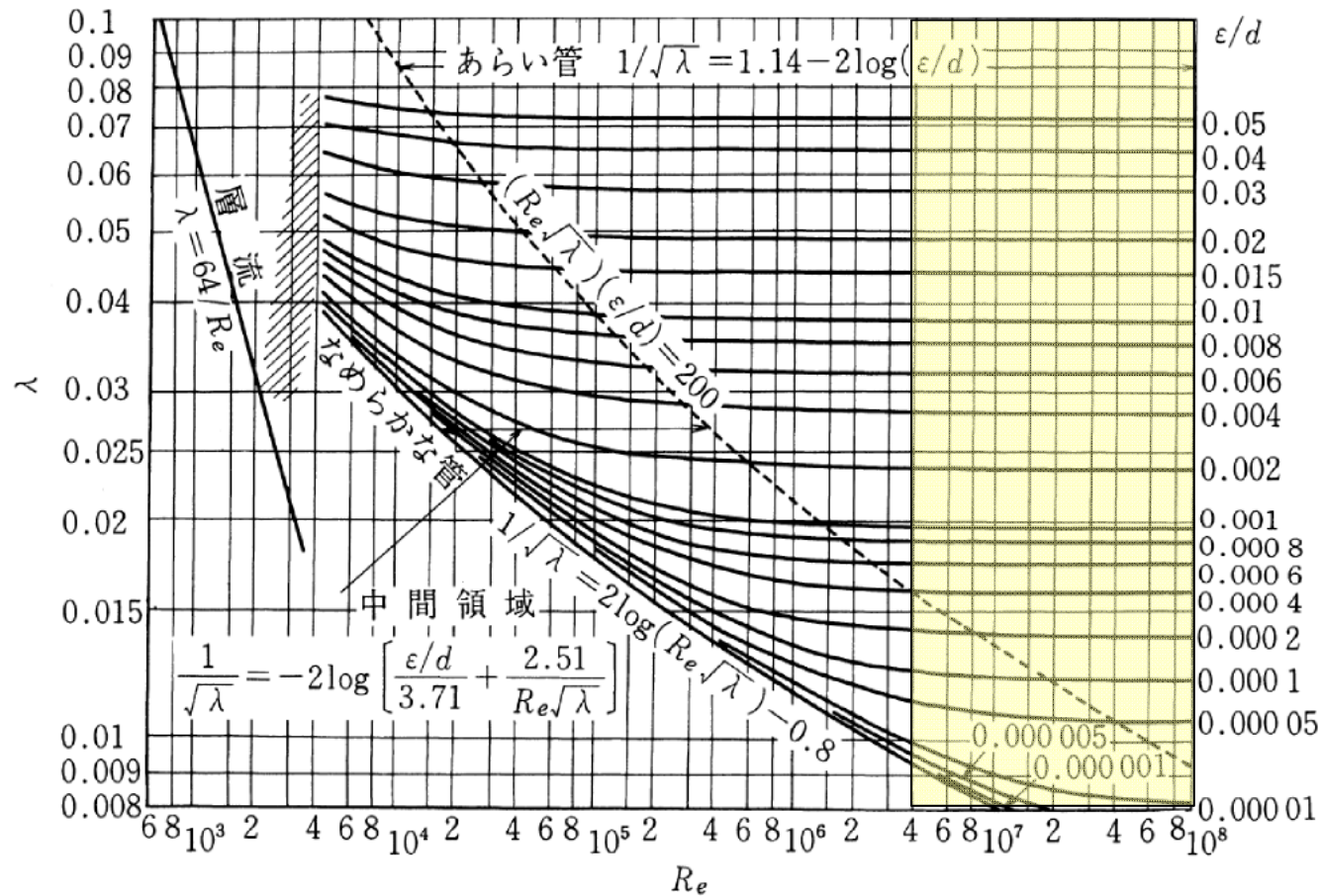
# 滑管における管摩擦係数



# Superpipe による新しいデータ



# ムーディー線図



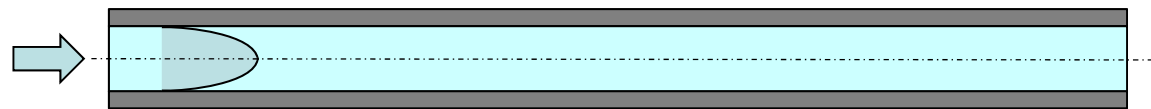
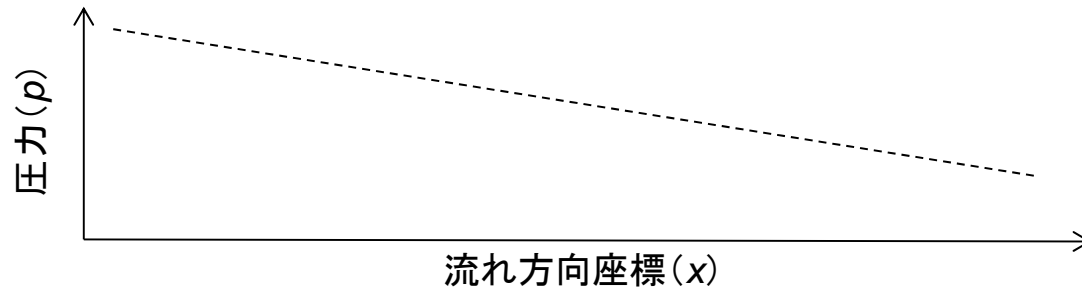
実は外挿



## 管摩擦係数の高精度測定

$$\lambda = \frac{2D}{\rho U_b^2} \frac{dp}{dx}$$

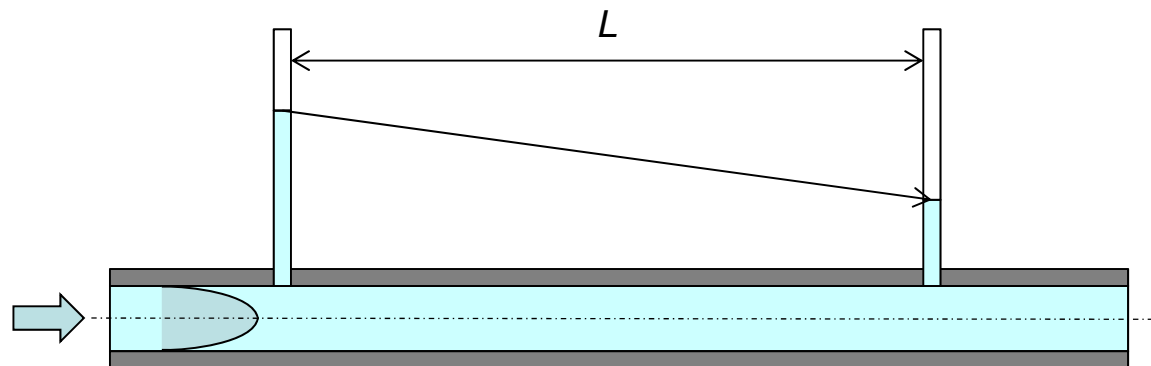
$D$ : 管直径 (m)  
 $\rho$ : 密度 (kg/m<sup>3</sup>)  
 $U_b$ : 管断面平均流速 (m/s)



$$\lambda = \frac{2D\Delta p}{L\rho U_b^2}$$

$$= \frac{\pi^2 D^5 \Delta p}{8L\rho Q^2}$$

$\Delta p$ : 差圧 (Pa)  
 $L$ : 圧カタップ間距離 (m)  
 $Q$ : 流量 (m<sup>3</sup>/s)

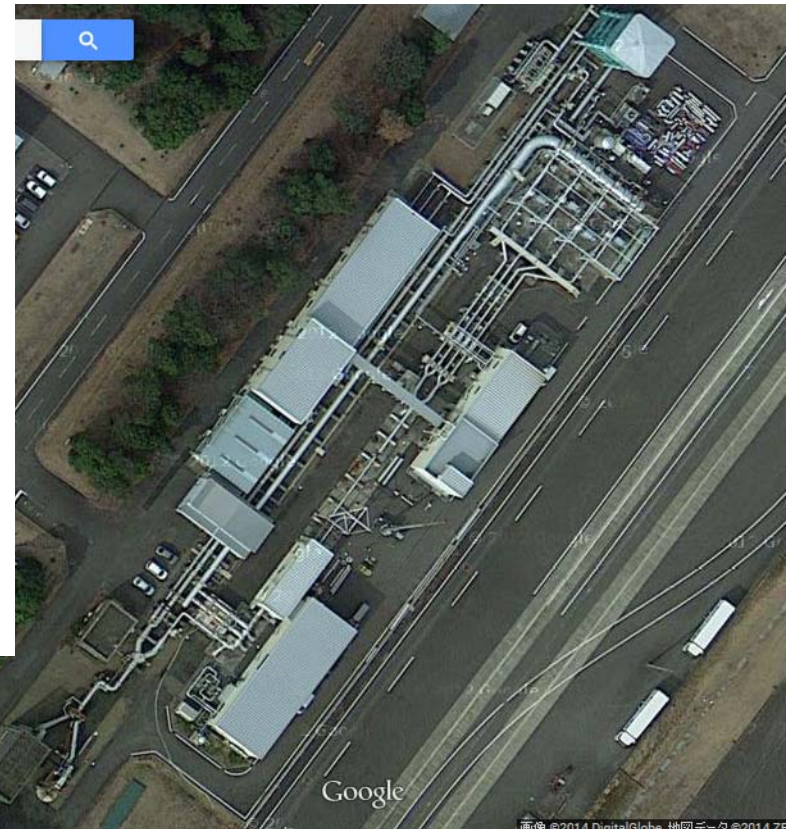
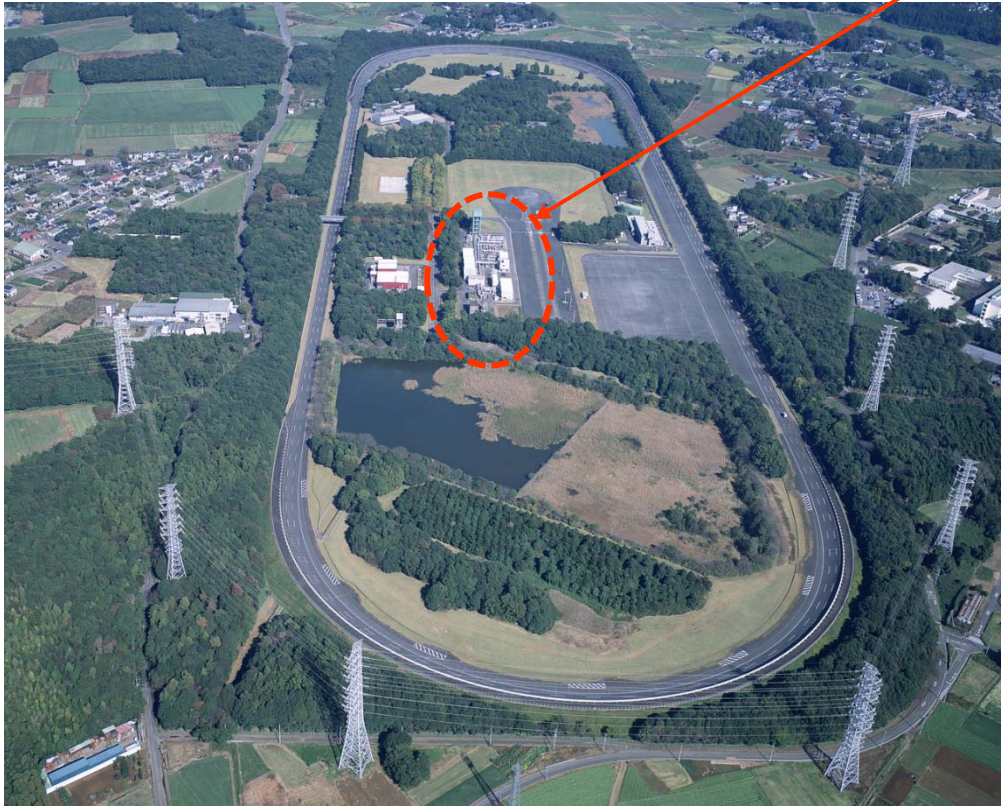




## II. 産総研における高レイノルズ数 試験設備

# 産業技術総合研究所つくば北サイト

流量(水)試験設備



# 流量(水)に関する国家標準設備一覧



試験ライン



Hi-Reff

**Hi-Reff**  
不確かさ 0.081%  
750~12000 m<sup>3</sup>/h

**50t Weighing System**  
不確かさ 0.060%  
30~3000 m<sup>3</sup>/h

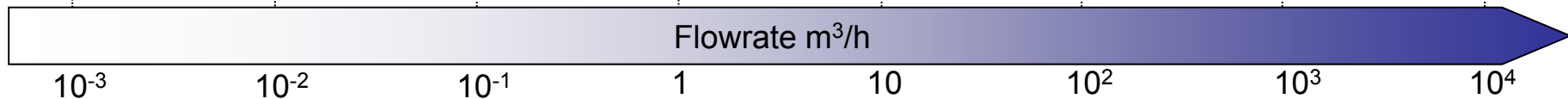
**5t Weighing System**  
不確かさ 0.040%  
5~300 m<sup>3</sup>/h

**500kg Weighing System**  
不確かさ 0.042%  
0.3~30 m<sup>3</sup>/h

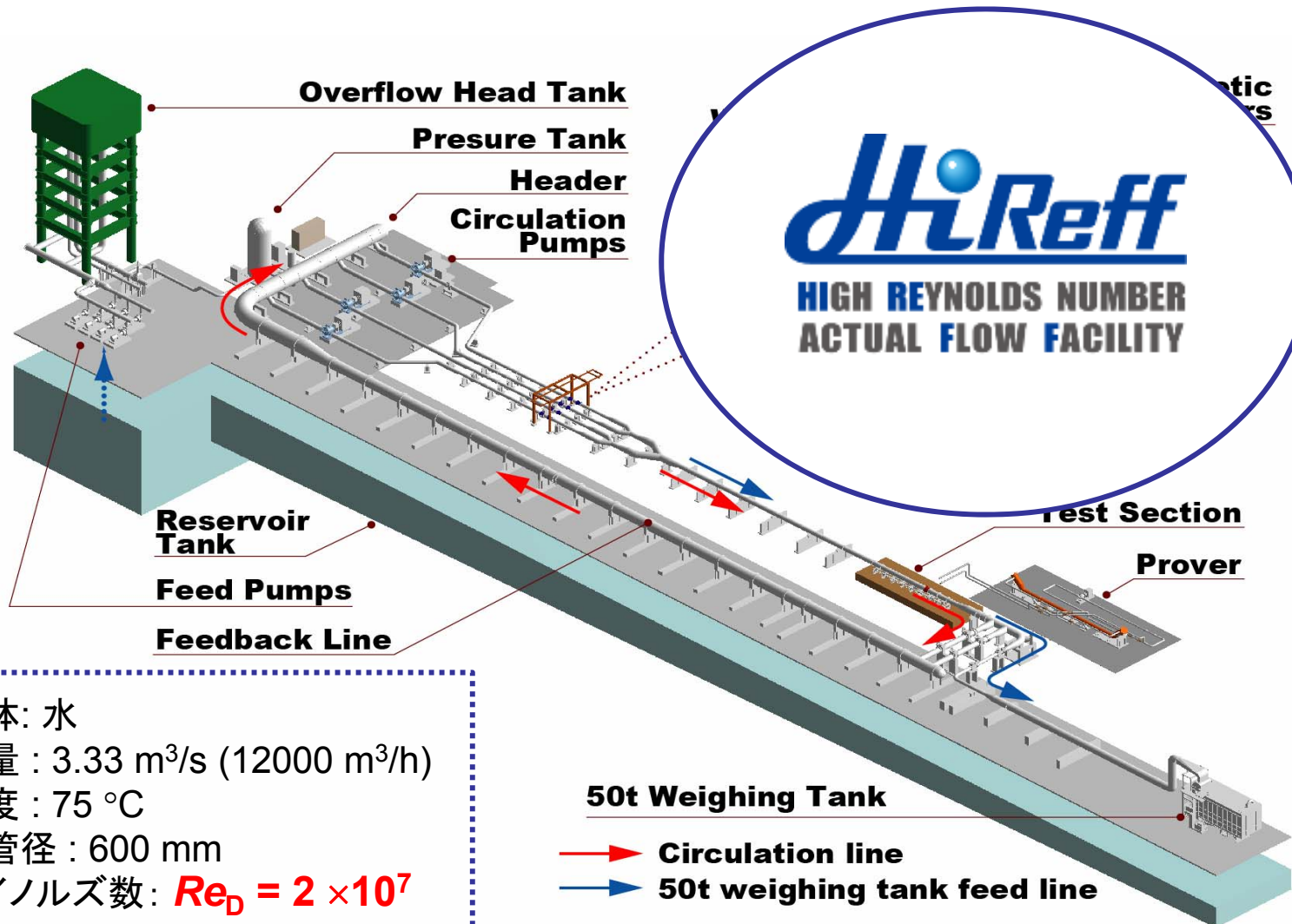
**10kg Weighing System**  
不確かさ 0.039%  
0.002~1.2 m<sup>3</sup>/h



オーバーフローヘッドタンク

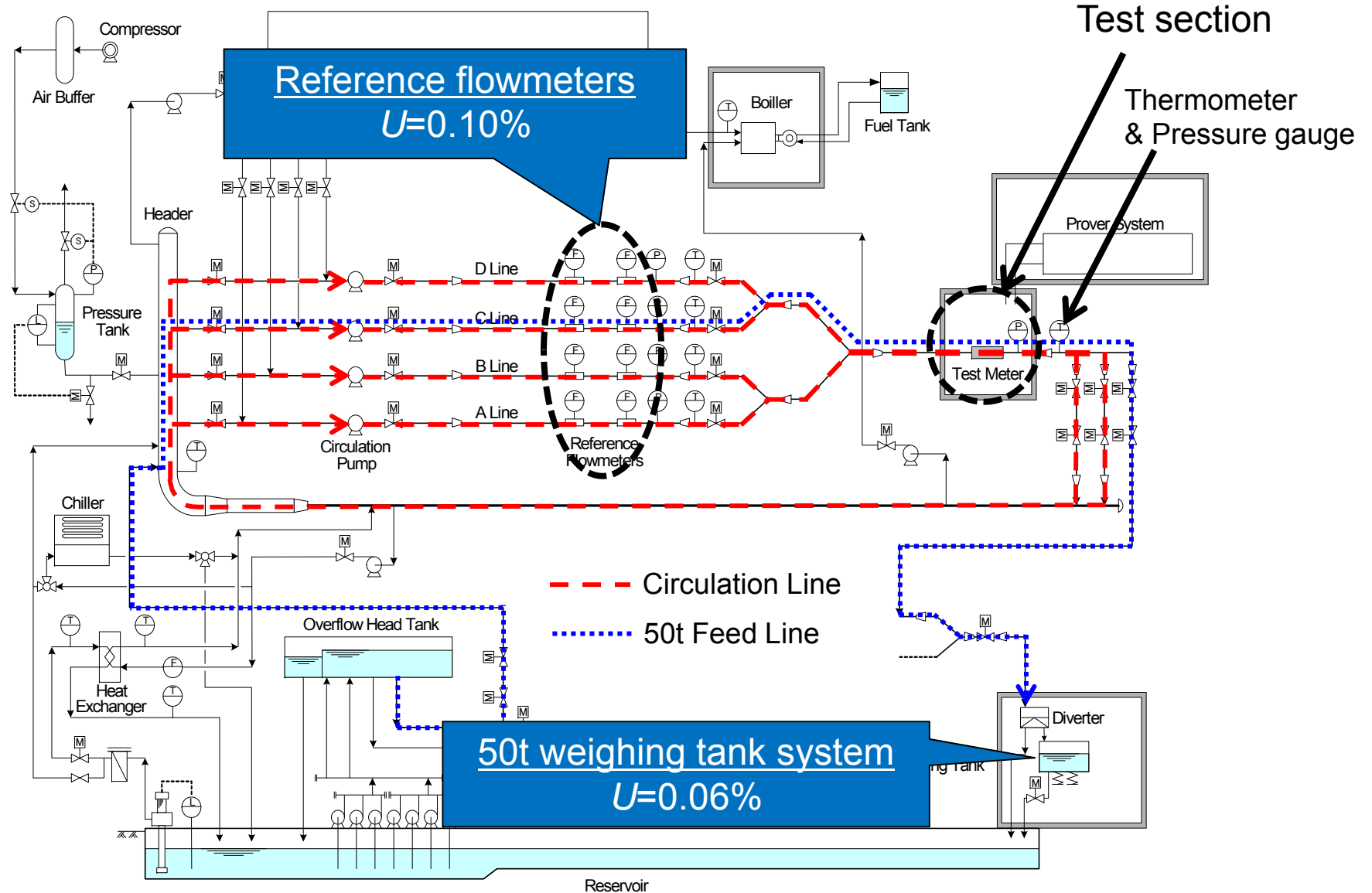


# 高レイノルズ数実流試験設備 High Reynolds Number Actual Flow Facility



作動流体: 水  
 最大流量: 3.33 m<sup>3</sup>/s (12000 m<sup>3</sup>/h)  
 最高温度: 75 °C  
 最大配管径: 600 mm  
 最大レイノルズ数:  $Re_D = 2 \times 10^7$

# Hi-Reff フローシート



## 円管流れにおける高レイノルズ数設備

### SuperPipe (Princeton Univ.)

- 作動流体: 空気
- 圧力: 24 Mpa
- 配管径: 0.13 m
- 直管長さ: 200D
- 最大レイノルズ数:  $3.8 \times 10^7$

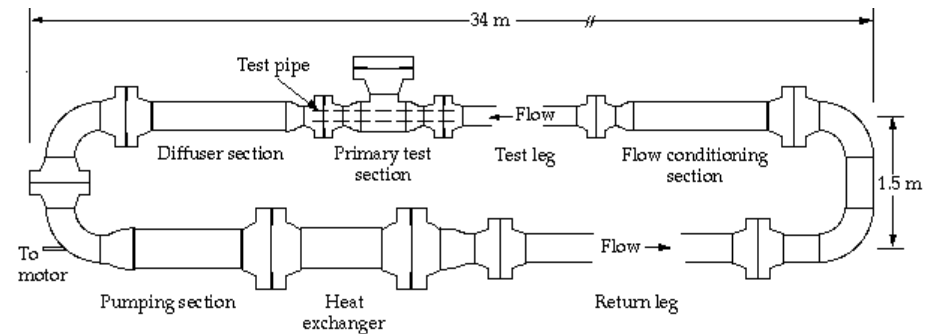
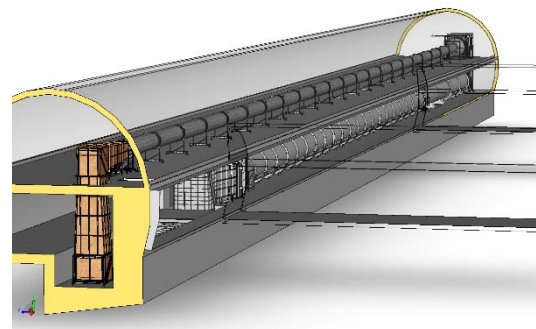


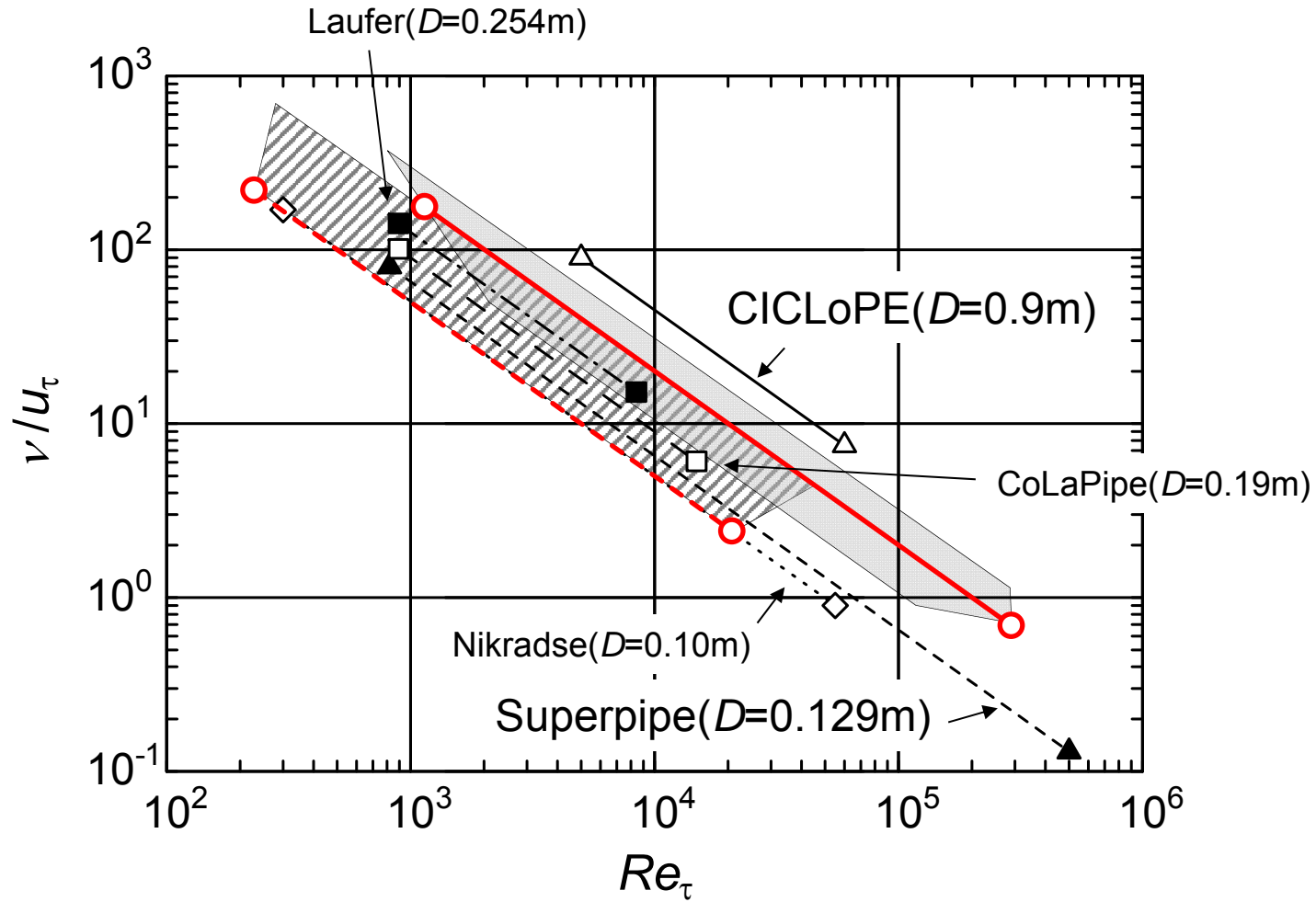
Figure 1: Diagram of the experimental facility.

### CICLoPe (Bologna Univ.)

- 作動流体: 空気
- 配管径: 0.9 m
- 直管長さ: 124D
- 最大レイノルズ数:  $10^6$ オーダー



## Hi-Reffと他設備(実験)との比較





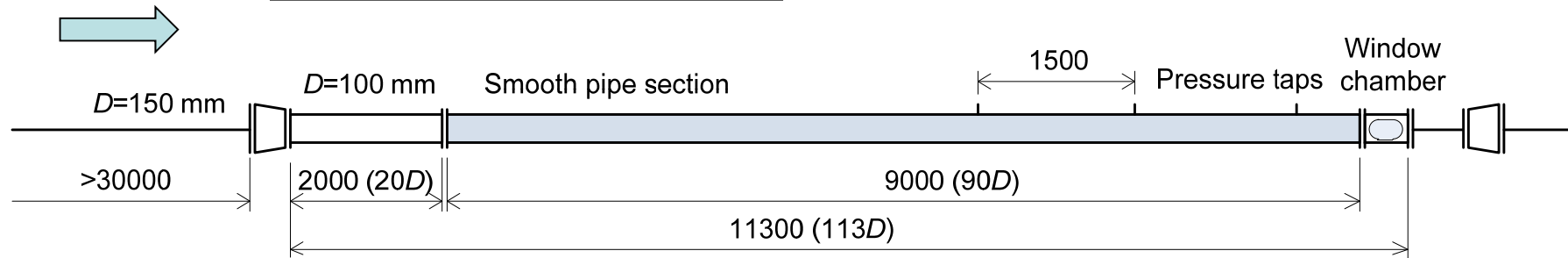
A grayscale photograph of an industrial facility, likely a water treatment plant, featuring a complex network of pipes, metal structures, and large cylindrical tanks. The scene is viewed from a low angle, looking up at the steel framework. In the foreground, two large pumps are visible, labeled '循環ポンプC' (Circulation Pump C) and '循環ポンプD' (Circulation Pump D).

### III. 管摩擦係数の計測結果と式の導出について

# 配管レイアウト

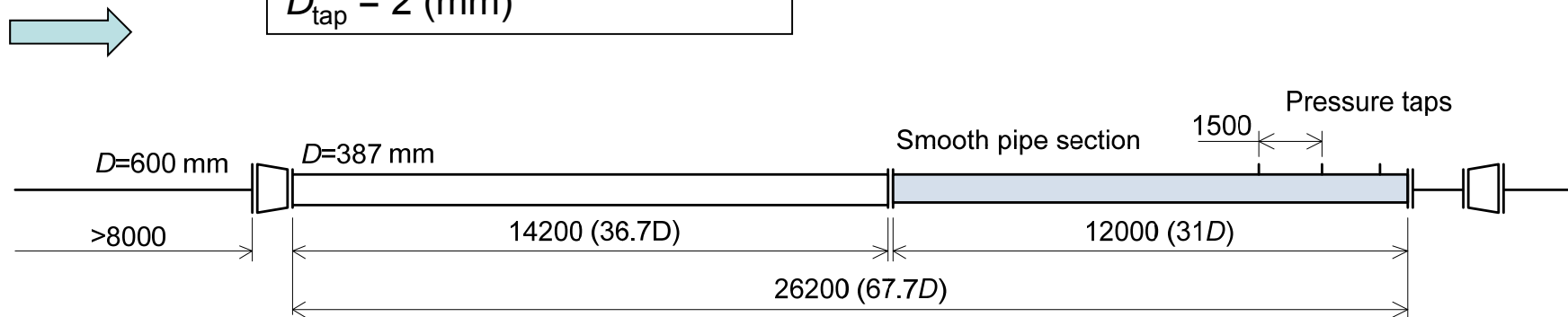
## Pipe 1(P1)

$D = 100.60 \text{ (mm)}$   
 $L = 1500 \text{ (mm)} \sim 6000 \text{ (mm)}$   
 $Ra = 0.10 \text{ (}\mu\text{m)}$   
 $D_{\text{tap}} = 1 \text{ (mm) and } 2 \text{ (mm)}$



## Pipe 2(P2)

$D = 387.04 \text{ (mm)}$   
 $L = 1500 \text{ (mm)} \sim 9000 \text{ (mm)}$   
 $Ra = 0.25 \text{ (}\mu\text{m)}$   
 $D_{\text{tap}} = 2 \text{ (mm)}$



## 配管レイアウト



### Pipe 1 ( $D=100$ mm)

長さ9 mに渡り、 $\pm 10$   $\mu\text{m}$ 以下の真円度

### Pipe 2 ( $D=387$ mm)

長さ15mに渡り、 $\pm 25$   $\mu\text{m}$ 以下の真円度

## 管摩擦係数の計測の不確かさ

$$\lambda = \frac{2D\Delta p}{L\rho U_b^2} = \frac{\pi^2 D^5 \Delta p}{8L\rho Q^2}$$

$D$ : 配管直径 (m)  
 $\Delta p$ : 差圧 (Pa)  
 $L$ : 圧力タップ間距離 (m)  
 $\rho$ : 水の密度 (kg/m<sup>3</sup>)  
 $Q$ : 流量 (m<sup>3</sup>/s)

$$u(\lambda) = \sqrt{u(\Delta p)^2 + 5u(D)^2 + u(\rho)^2 + 2u(Q)^2 + u(L)^2 + \lambda_{\text{rep}}^2}$$

### 補正項

$$D = C_T C_P D_m$$

$$L = C_T L_m$$

$$\rho = \rho_p - \rho_c$$

$D_m$ : 配管直径の計測値 (m)  
 $L_m$ : 圧力タップ間距離の計測値 (m)  
 $C_T$ : 温度に関する補正項 (-)  
 $C_P$ : 圧力に関する補正項 (-)

$\rho_p$ : 純水の密度 (kg/m<sup>3</sup>)  
 $\rho_c$ : 密度の補正項 (kg/m<sup>3</sup>)

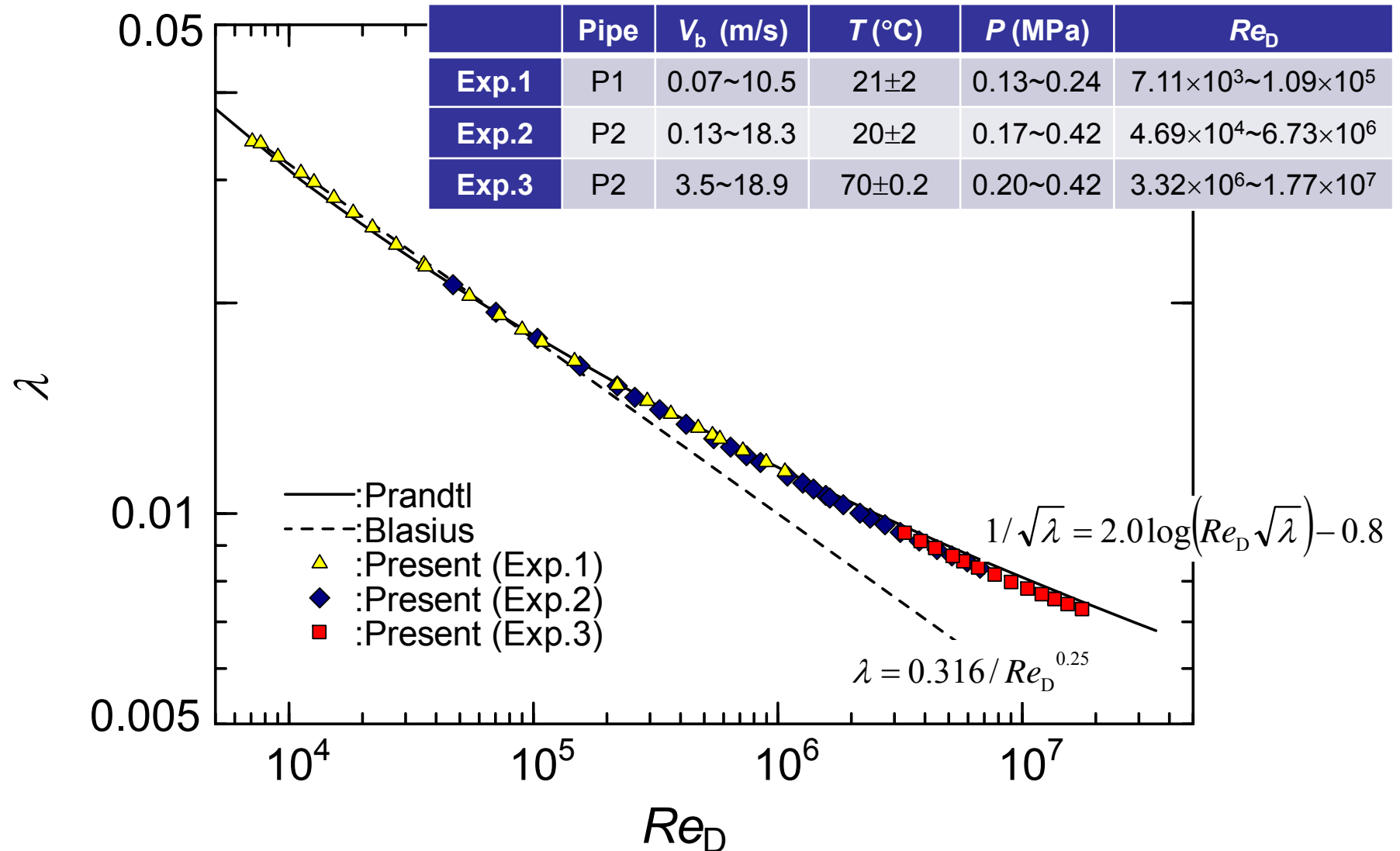
$$u(\text{corrections}) = \text{negligible small}$$

## 管摩擦係数計測の不確かさバジェットシート

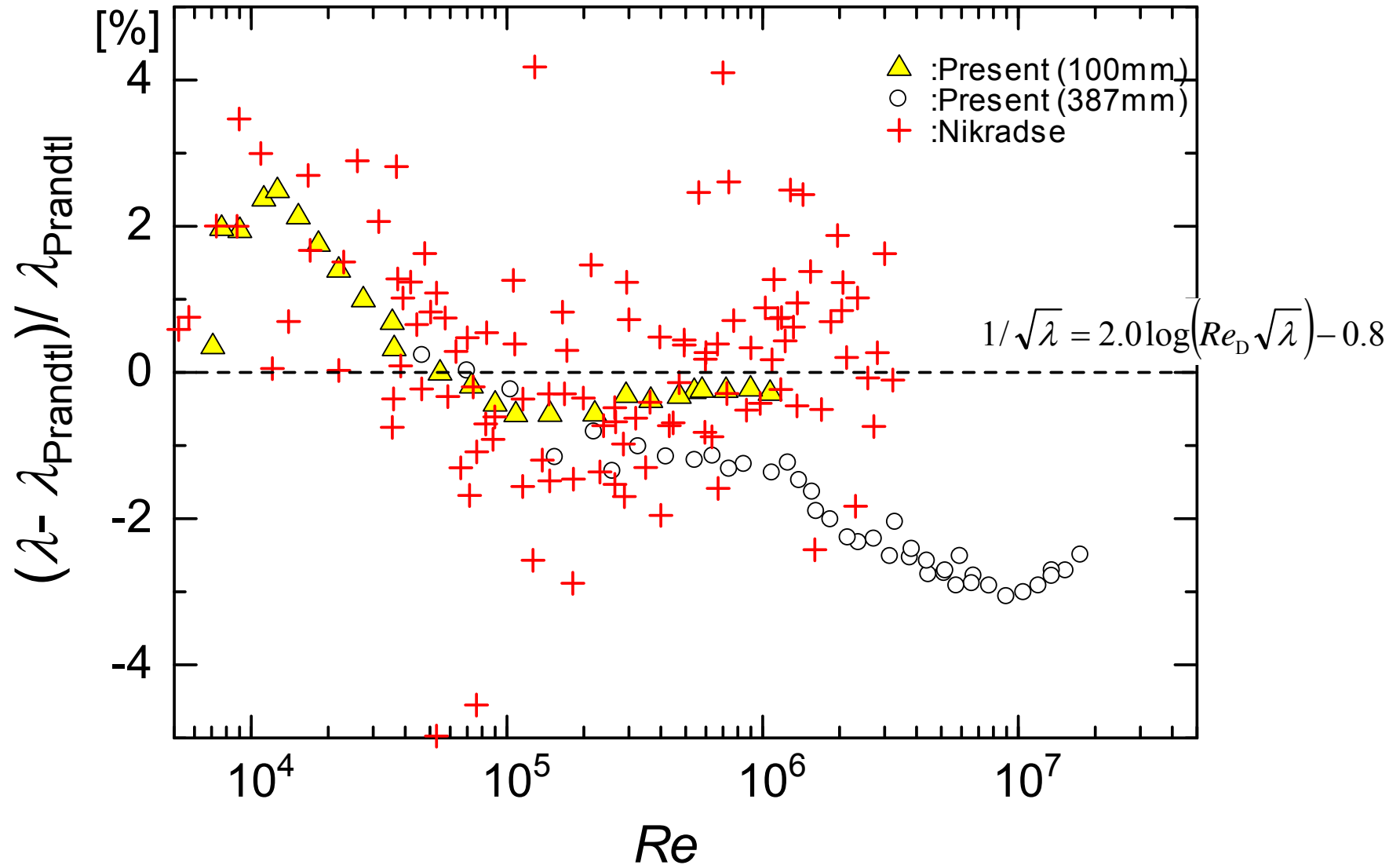
不確かさ要因	標準不確かさ (P1, D=100mm)	標準不確かさ (P2, D=387mm)
配管直径	0.025%	0.032%
タップ間距離	0.008%	0.008%
密度	0.005%	0.005%
差圧	0.401%	0.401%
流量	0.110%	0.200%
計測の繰り返し性	0.015%	0.021%
拡張不確かさ (k=2)	<b>0.83%</b>	<b>0.90%</b>

管断面平均速度の標準不確かさ : **0.115%**      **0.202%**

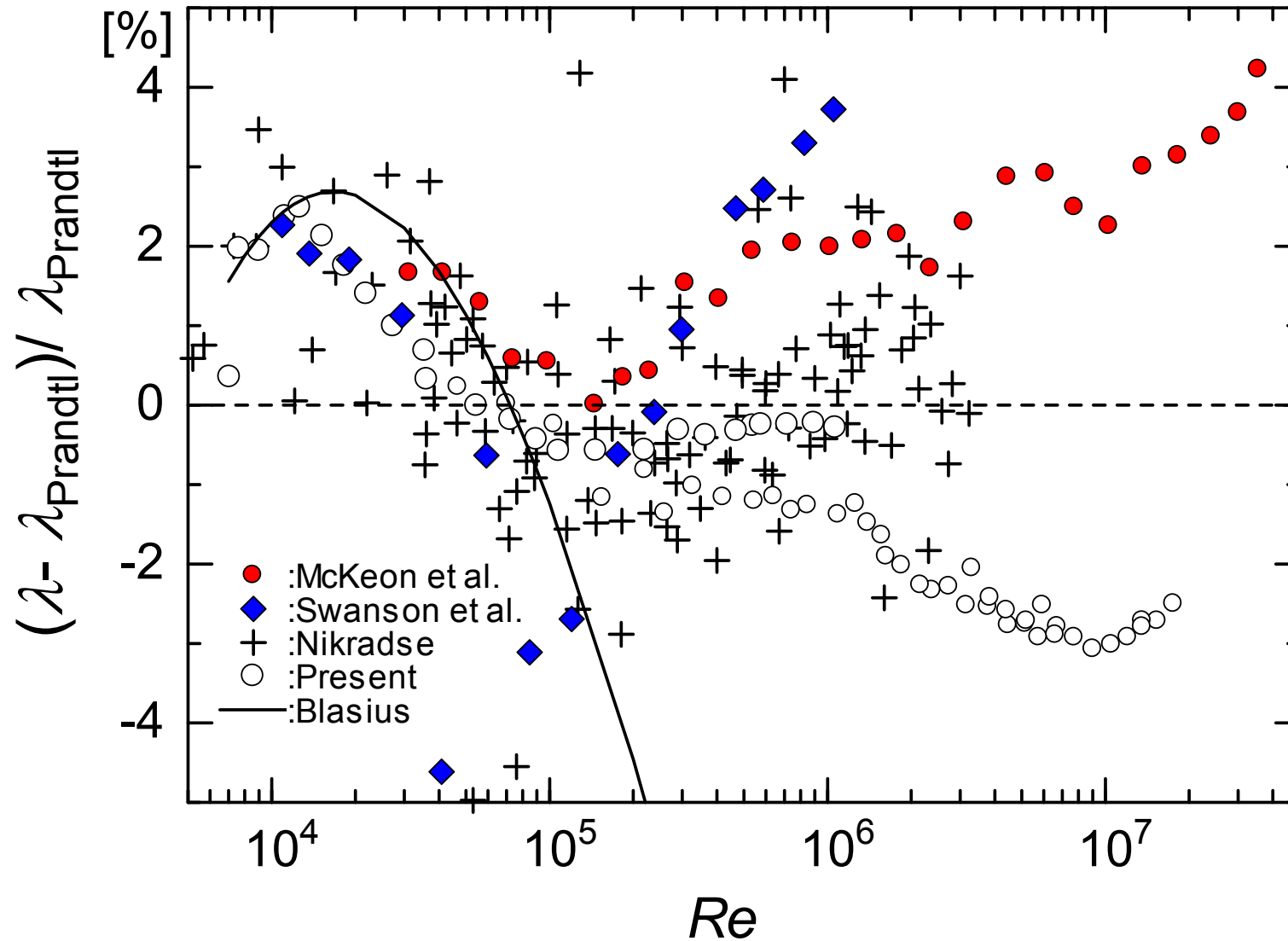
# 管摩擦系数实验结果



# 管摩擦系数実験結果

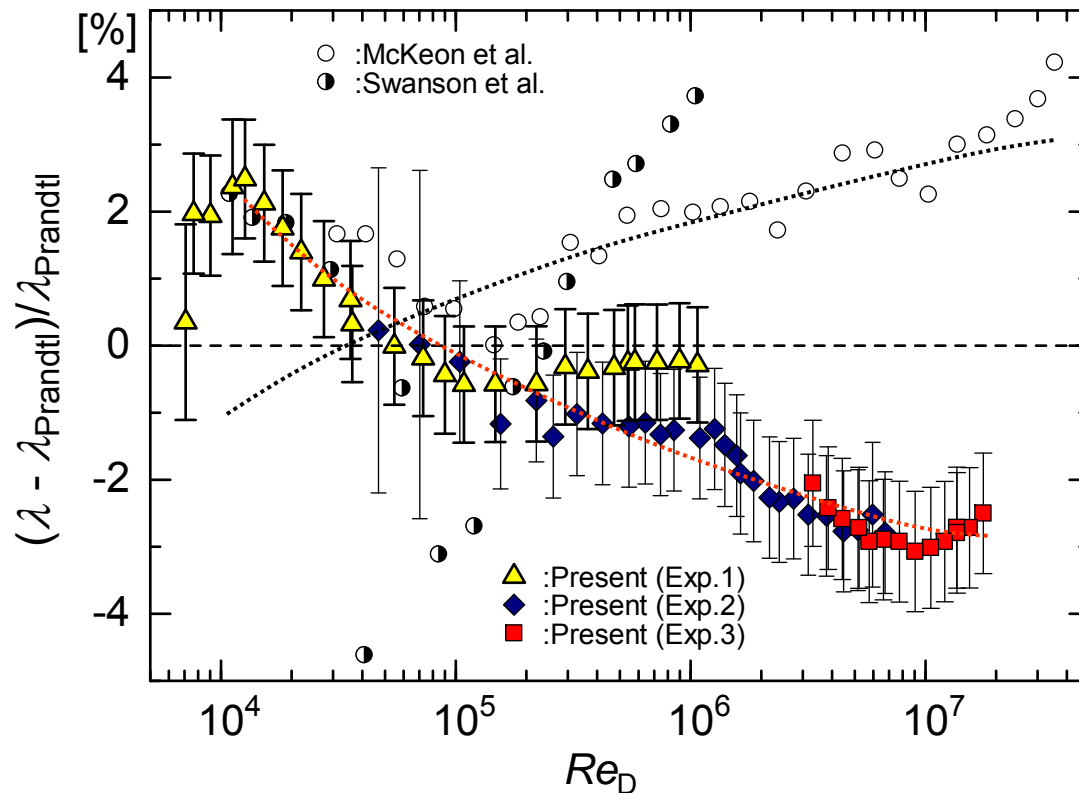


# 管摩擦系数实验结果





# 管摩擦係数実験結果

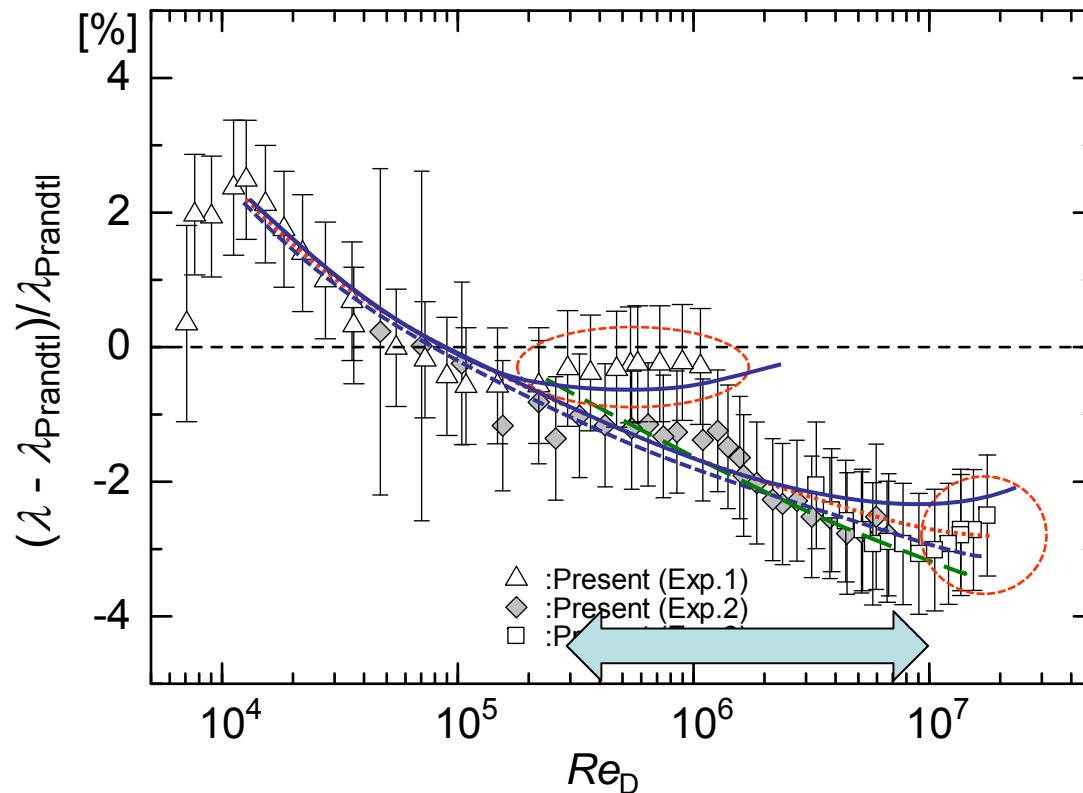


$$1/\sqrt{\lambda} = 1.930 \log(Re_D \sqrt{\lambda}) - 0.537$$

$$1/\sqrt{\lambda} = 2.0 \log(Re_D \sqrt{\lambda}) - 0.8$$

$$1/\sqrt{\lambda} = 2.090 \log(Re_D \sqrt{\lambda}) - 1.172$$

# 管摩擦系数实验结果



$$1/\sqrt{\lambda} = 2.090 \log(Re_D \sqrt{\lambda}) - 1.172$$

$$1/\sqrt{\lambda} = 2.092 \log(Re_D \sqrt{\lambda}) - 1.176$$

$$1/\sqrt{\lambda} = 2.116 \log(Re_D \sqrt{\lambda}) - 1.305$$

## Summary

✓ 高レイノルズ数実験設備 (Hi-Reff) を用いて、高レイノルズ数円管乱流に対する、管摩擦係数と平均流速分布の計測を行った。

✓ 管摩擦係数を  $Re_D = 1.8 \times 10^7$  まで計測し、下記の新しい相関式を得た。

$$1/\sqrt{\lambda} = 2.090 \log(Re_D \sqrt{\lambda}) - 1.172$$

$Re_D = 10^7$  において Superpipe の結果に対し約 6%、Prandtl の式に対し約 3% 小さい値となる。