

計測標準フォーラム  
2020年2月21日

# ケルビンの定義改定と これからの熱力学温度測定

産業技術総合研究所 計量標準総合センター  
物理計測標準研究部門 首席研究員

山田 善郎

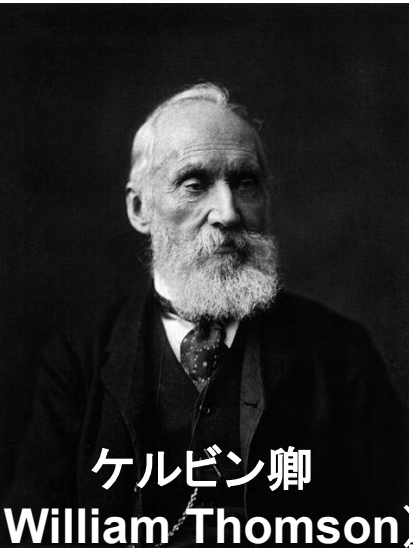
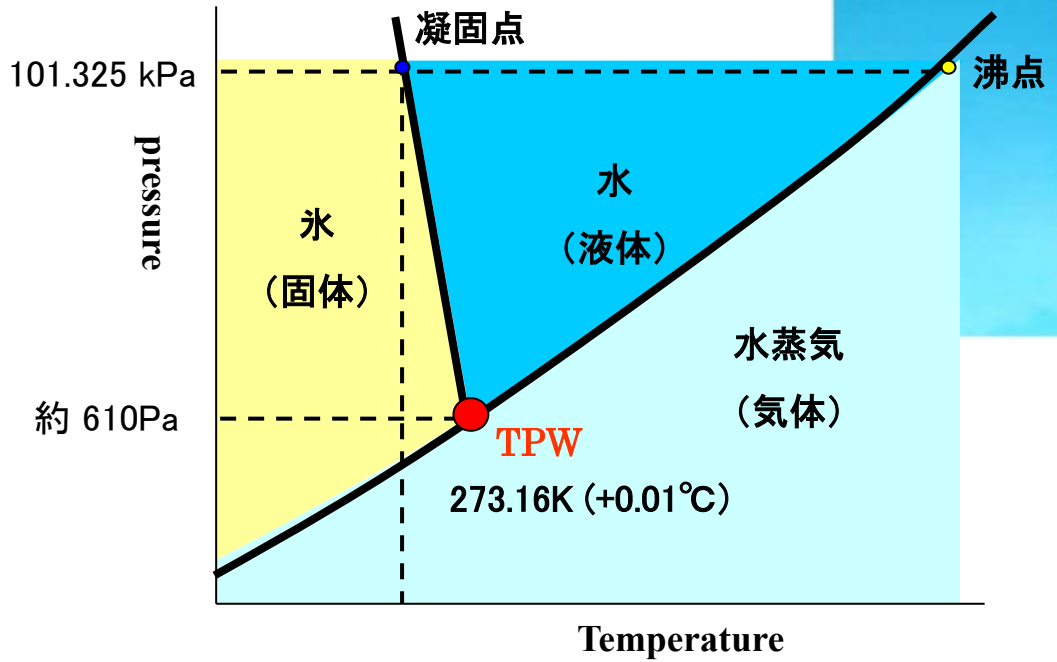


Research Institute for  
Physical Measurement

# 熱力学温度の単位: ケルビン (K)

従来の定義:

「熱力学温度の単位、ケルビンは、  
水の三重点の熱力学温度の1/273.16である」  
(1967/68 CGPM決議)



# 熱力学温度の単位ケルビンの定義改定

従来の定義:

熱力学温度の単位, ケルビンは, 水の三重点の熱力学温度の $1/273.16$  である. (1968年)

$T$ (TPW:水の三重点)には  
Kを単位とする正確な数  
値がある.

新しい定義:

2019年5月20日

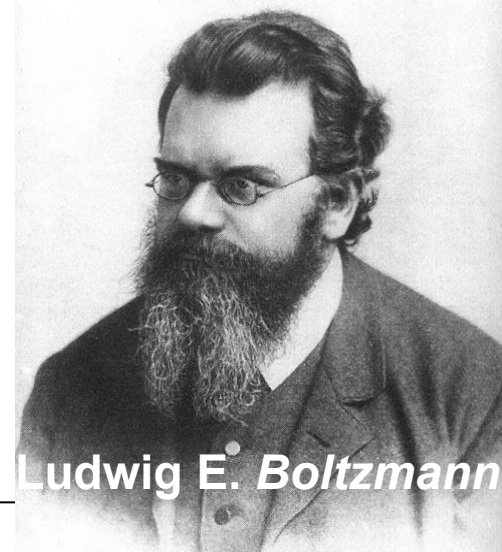
ケルビンは熱力学温度の単位であり、その大きさは、SI単位  $\text{m}^2 \text{kg s}^{-2} \text{K}^{-1}$  で表したときのボルツマン定数の値を正確に  $1.380\,649 \times 10^{-23}$  と定めることにより設定される。

$k$ には $\text{m}^2 \text{kg s}^{-2} \text{K}^{-1}$ を単位とする正確な数値がある。

熱力学温度  $T$  は熱エネルギー  $E_{\text{thermal}}$  に関連する物理量である。

その変換係数がボルツマン定数  $k$  である。

$$E_{\text{thermal}} = kT$$



Ludwig E. Boltzmann

## 定義改定の影響

- 国際温度目盛 (ITS-90) への影響はない。
- 熱力学温度測定が普及する。
  - 定義改定の前後で  
熱力学温度の単位ケルビンの大きさに不連続は生じない。
  - 物質に依存しない定義の普遍性が得られる。
  - 特定の温度域・温度計を優遇しない。
  - 水の三重点の実現不確かさに制約されない  
将来的な熱力学温度測定精度の向上が可能になる。
  - 水の三重点から離れた温度域での熱力学温度測定精度向上  
→ 国際温度  $T_{90}$  ではなく熱力学温度  $T$  測定

## 2種類の温度計

### 一次温度計

熱力学温度を測定できる。

- 定義: 良く理解された物理系に基づく温度計で、熱力学温度と他の独立した量の関係を表す状態方程式が未知定数や温度に顕著に依存する定数を用いずに明示的に記述できるもの。

例 気体温度計

雑音温度計

絶対放射温度計

- 低い実用性。

### 二次温度計

熱力学温度を測定できない。

- 定義: 一次温度計でないすべての温度計

例 白金抵抗温度計

サーミスタ

熱電対

ガラス製温度計

放射温度計

- 高い再現性、高い実用性。

## 2つの温度

### 熱力学温度( $T$ )

古典熱力学・統計力学の概念に対応する温度

- 単位で定義:  
ケルビン(K) 「水の三重点温度の1/273.16」

2019.5.20



改定

「ボルツマン定数の値を  
 $1.380\ 649 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$ 」

### 国際温度( $T_{xx}$ )

熱力学温度を近似した温度

変更なし

- 目盛で定義:
  - 温度定点の温度値
  - 補間用の温度計、補間方法
- 約20年に1回大きな改訂  
現在用いられているのは  
「1990年国際温度目盛」  
(ITS-90:  $T_{90}$ )

セルシウス度( $^{\circ}\text{C}$ )による表記  $t$  も用いられる。

$$t / ^{\circ}\text{C} = T / \text{K} - T_0 / \text{K}$$

$$T_0 = 273.15 \text{ K}$$

## 「温度」とはそもそも何か？

容器の「**圧力**を半分にする」とは言う。



容器の「**温度**を半分にする」とは言わない。

「-1 m」の**長さ**の部屋はない。



「-1 °C」の**温度**の部屋はある。

温度と他の物理量の違いは？  
温度はどうすれば測れるのか？



# 初期の温度目盛

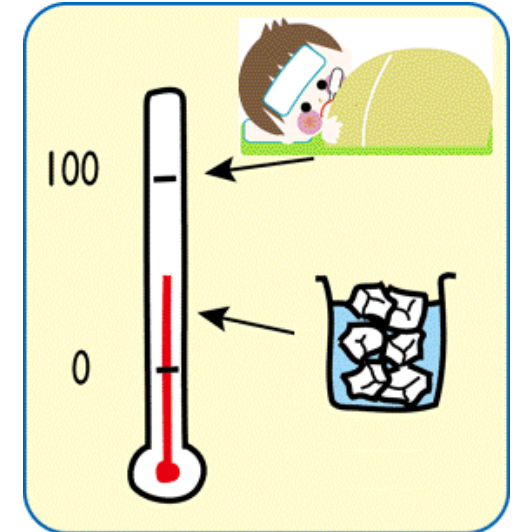


17世紀のガラス製温度計  
(産総研蔵、レプリカ)



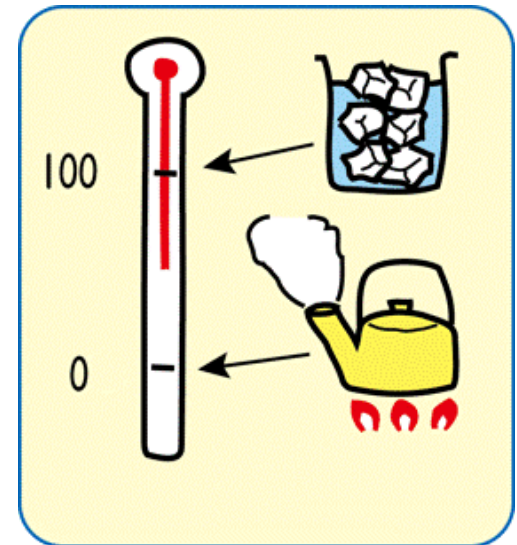
Fahrenheit

<http://en.wikipedia.org/wiki/Fahrenheit>



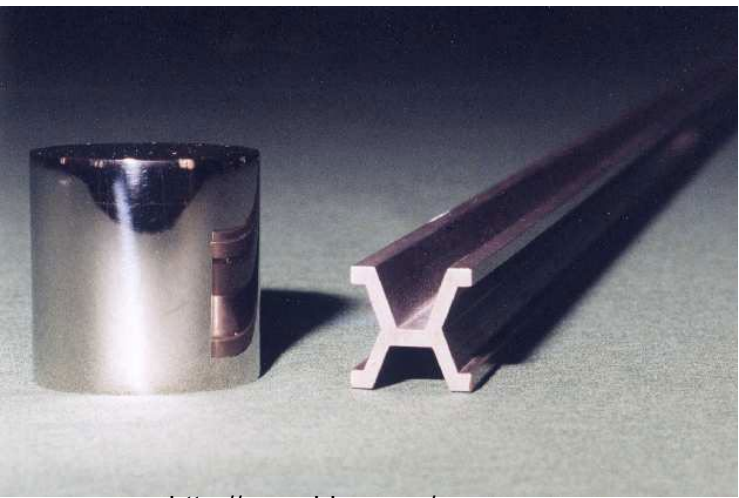
Celsius

[http://en.wikipedia.org/wiki/Anders\\_Celsius](http://en.wikipedia.org/wiki/Anders_Celsius)





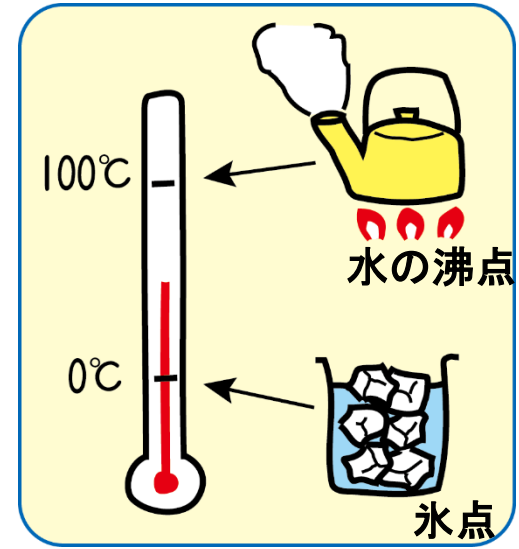
# メートル条約(1875)




<http://www.bipm.org/>

各国メートル原器にはトネローが製作した2本の水銀入りガラス製温度計が添えられた。

これらを校正するための均一な目盛が急遽必要になった。



(from the BIPM website) 

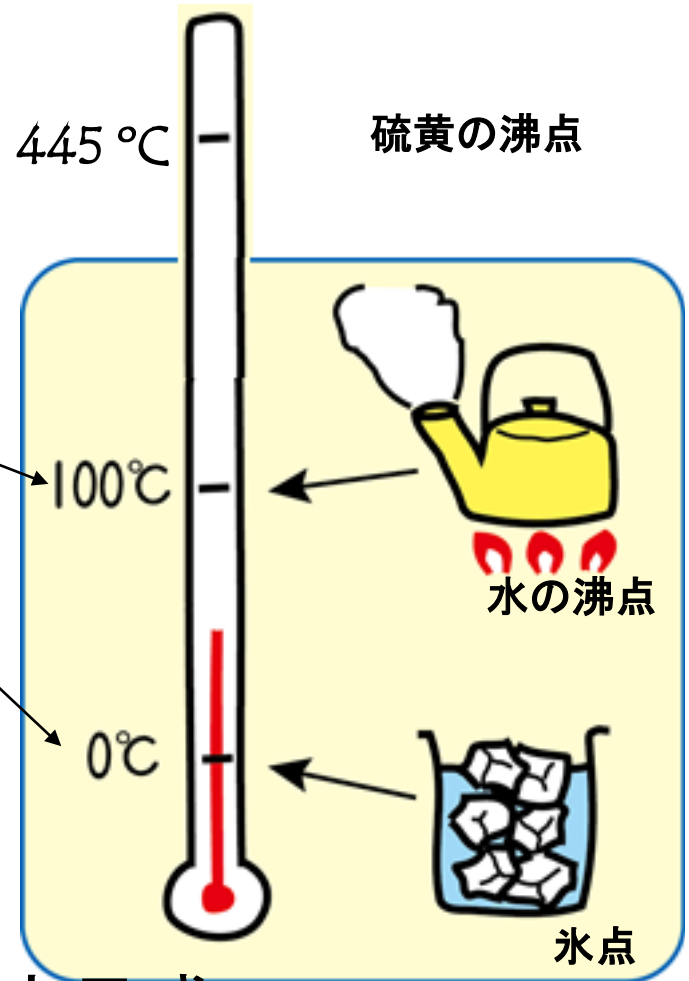
気体温度計  
“Constant Volume Gas Thermometer”  
(CVGT)



国際度量衡局  
Bureau International des Poids et Mesures (BIPM)

# 实用温度目盛 $T_{XX}$ の提案

温度定点  
+  
補間計器  
標準白金抵抗温度計  
(SPRT)



1927年国際温度目盛

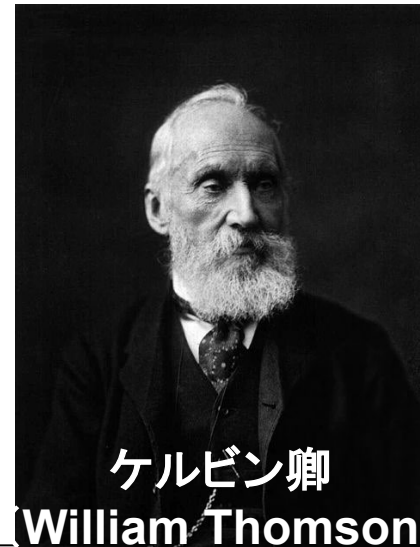
International Temperature Scale of 1927 (ITS-27)



# 熱力学温度

- 熱力学の理論の整備
  - **絶対零度**の存在
- ケルビン卿:
  - **絶対零度**の温度値の正確な測定
  - 絶対温度目盛の提案(1848)

||  
**熱力学温度:  $T$**

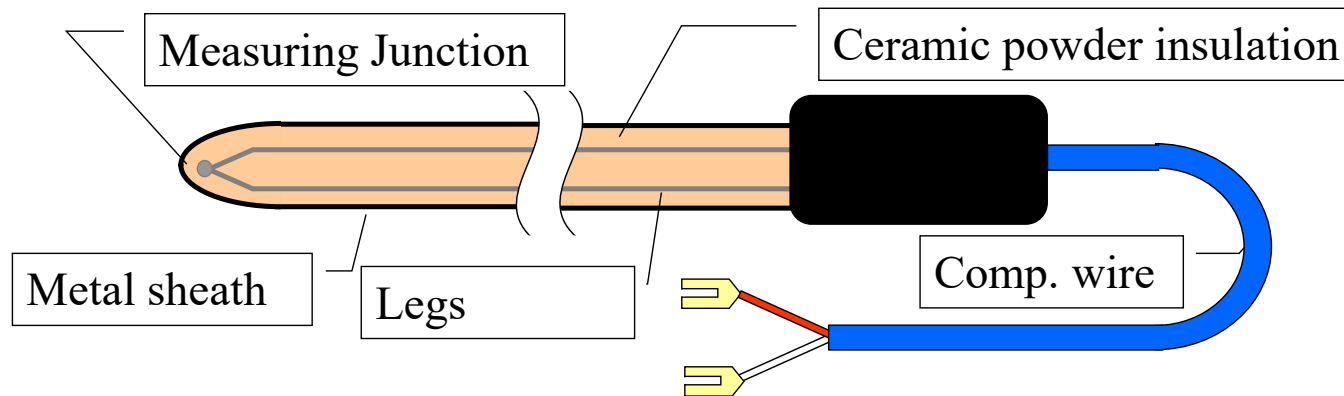
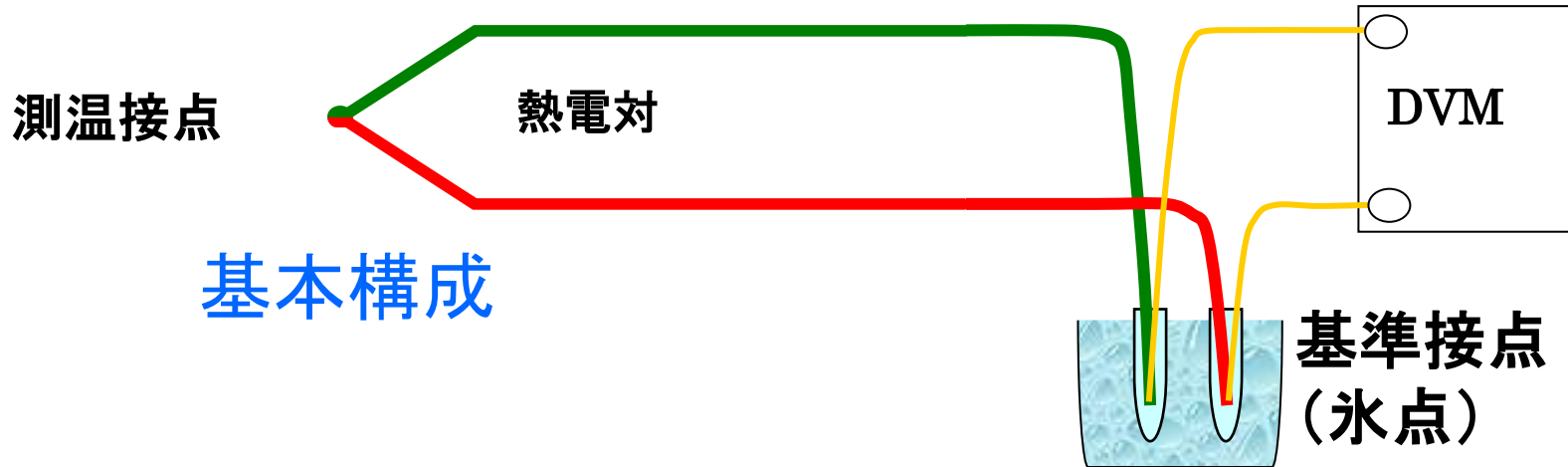


ケルビン卿

William Thomson

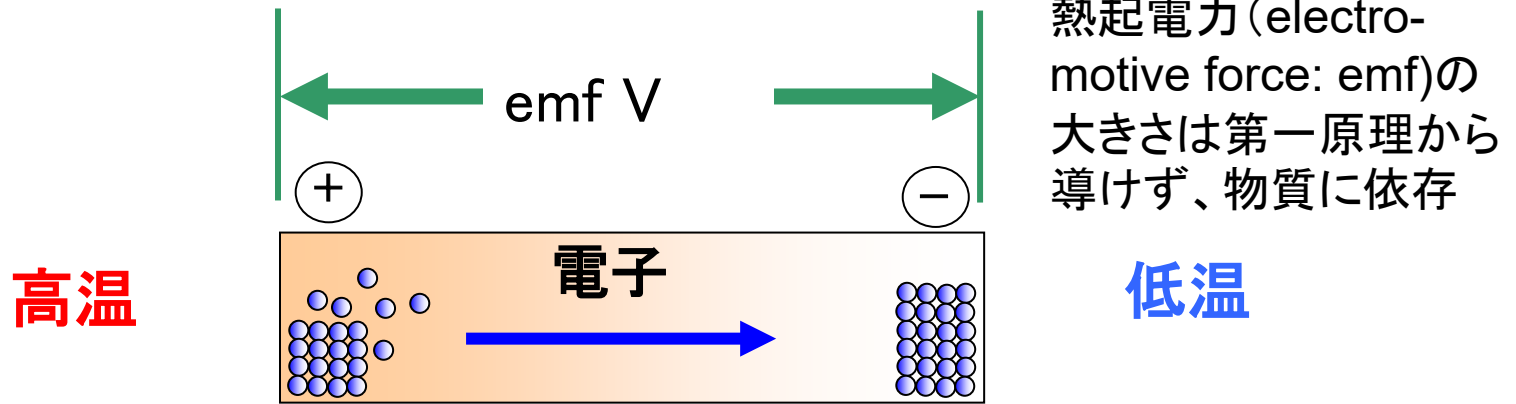
# 二次温度計の例: 熱電対

- ゼーベック効果による熱起電力の測定から温度を計測する



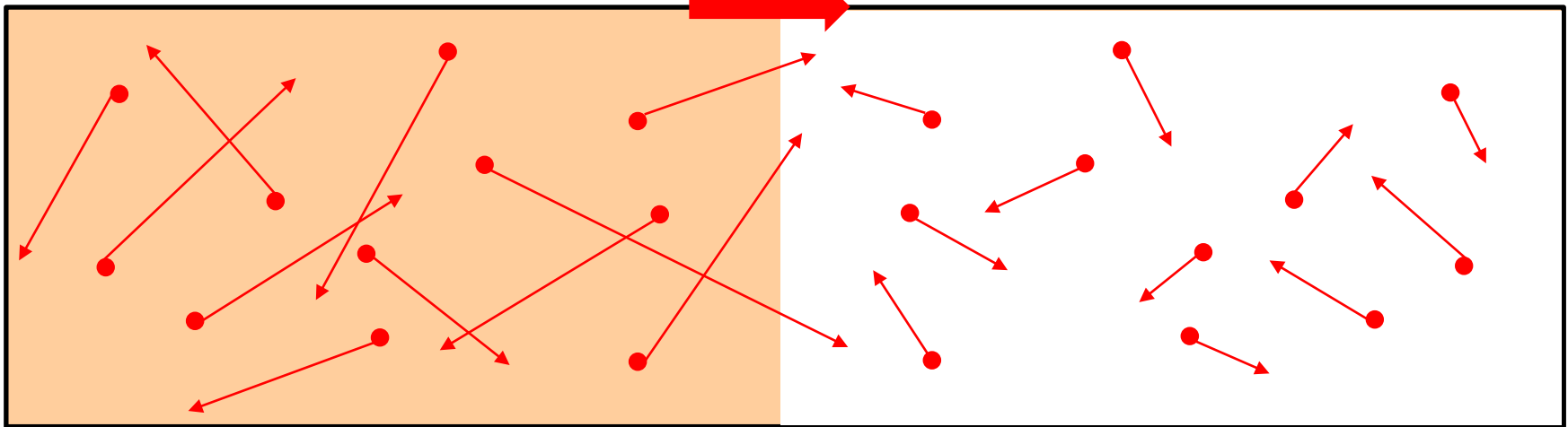
## シース熱電対

# 熱電対の原理: ゼーベック効果



熱起電力 (electromotive force: emf) の大きさは第一原理から導けず、物質に依存

境界を越えて高温側から低温側へより多くの電子が移動

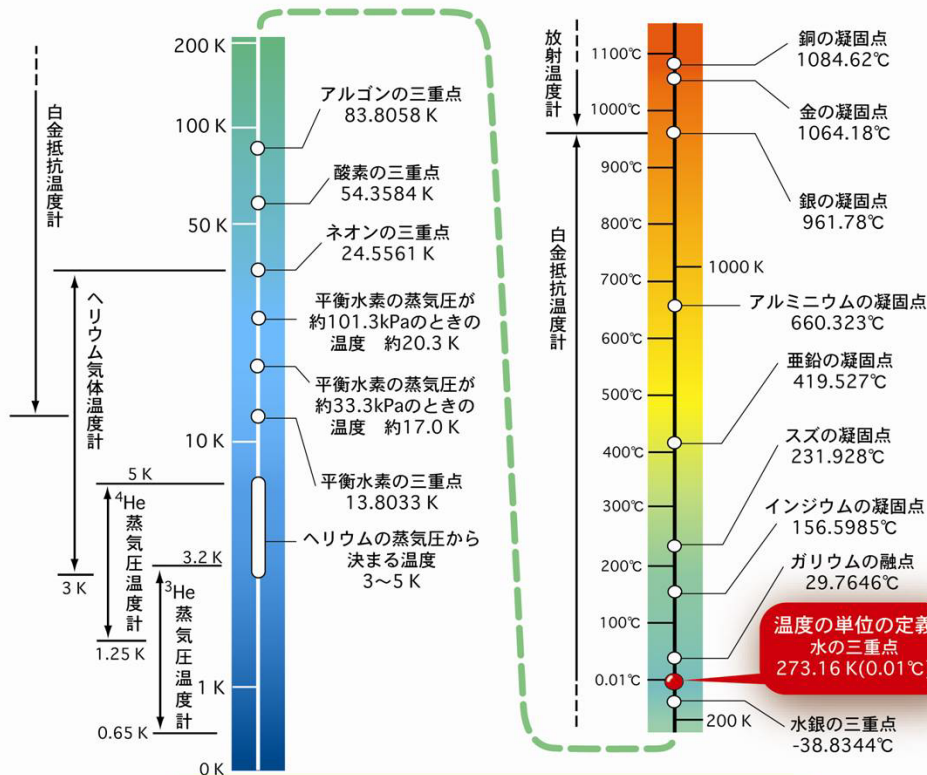


**高温**  
自由電子の動き 大

**低温**  
自由電子の動き 小

# 国際温度目盛

- 熱力学温度の実用性高い**近似**目盛
- 複数の温度参照点の温度値(**定義定点**) + 補間方法を定義  
国際温度目盛上は**水の三重点は定義定点の一つに過ぎない**
- 約20年ごとに定義見直し、
- 現行は“International Temperature Scale of 1990 (ITS-90)”:  $T_{90}$



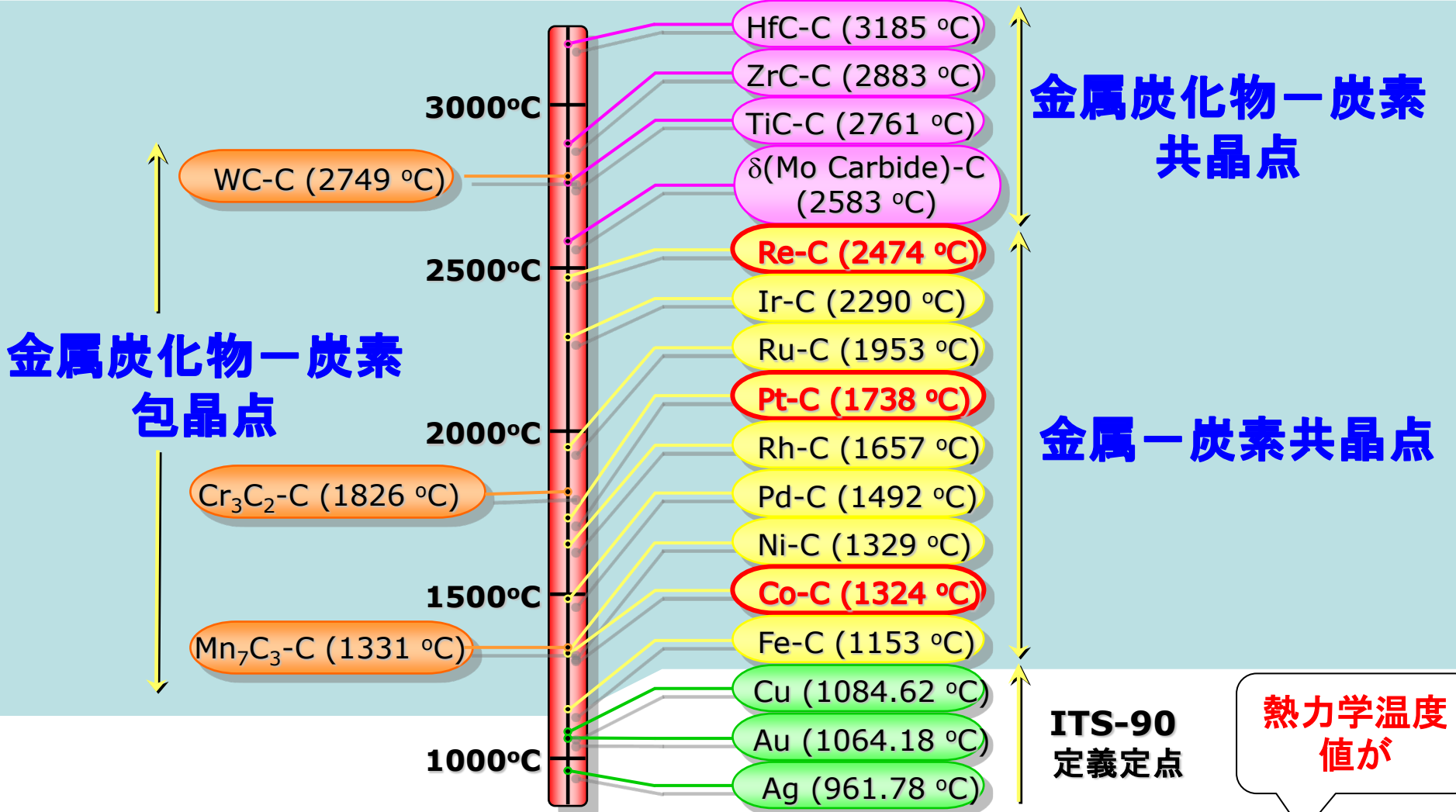
1990年国際温度目盛(ITS-90)の定義定点と補間温度計

**定義 (= 不確かさをゼロ)**  
**「(こういう温度計)を用い  
 (こういう定点)を用い  
 (こういう補間式)を用いて  
 補間する」**

**ケルビンの定義が  
 改定されても  
 ITS-90に変更はない**

# 金属-炭素系高温定点

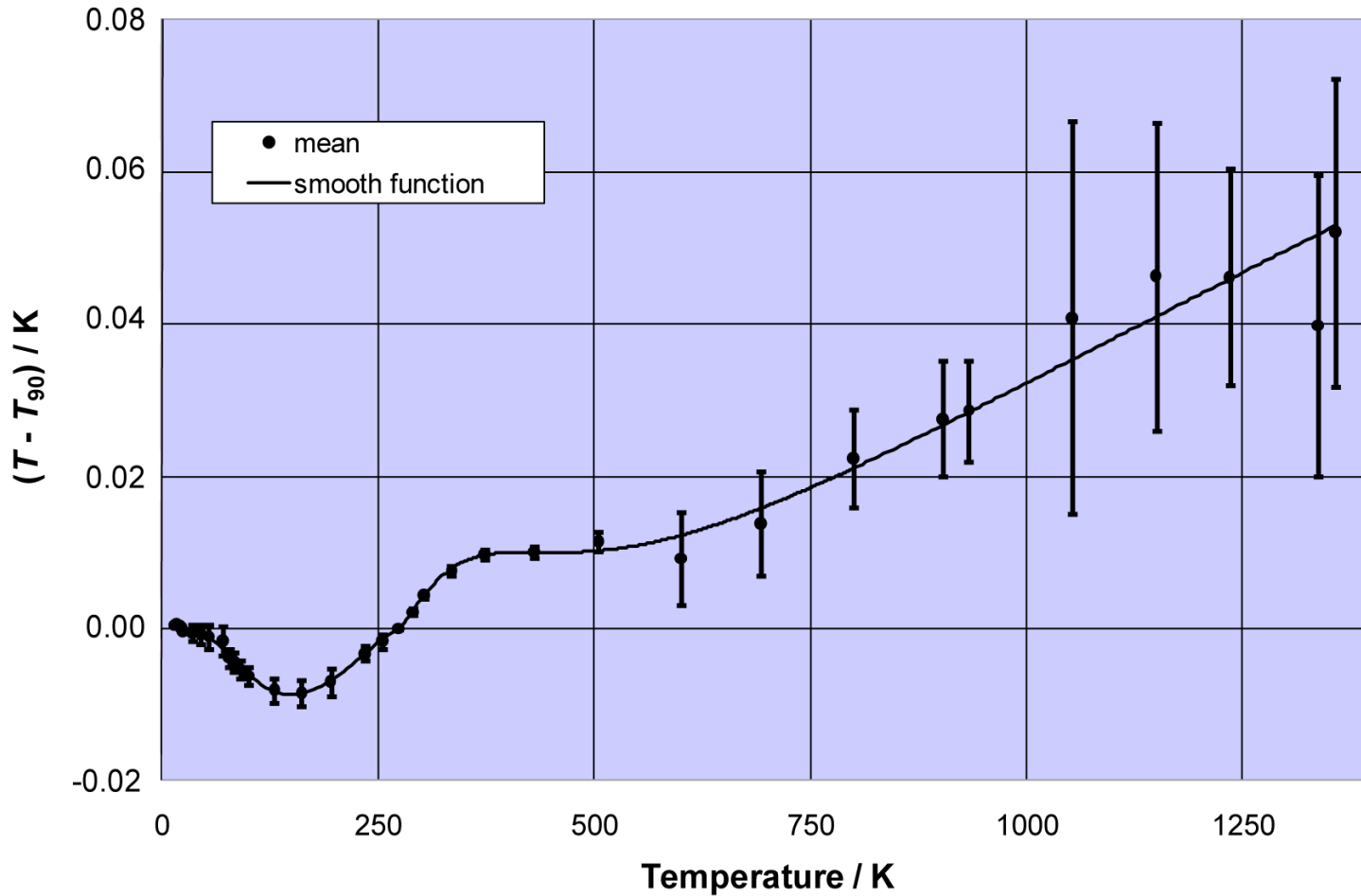
## High-temperature Fixed Points: HTFP



熱力学温度  
値が

赤字: 国際文書 (Mis en Pratique for the definition of the kelvin in the SI) に登録済み





## 熱力学温度 ( $T$ ) と ITS-90 ( $T_{90}$ ) の差の推定値

([https://www.bipm.org/utils/common/pdf/ITS-90/Estimates\\_Differences\\_T-T90\\_2010.pdf](https://www.bipm.org/utils/common/pdf/ITS-90/Estimates_Differences_T-T90_2010.pdf))

黒線は黒点で表した各温度の平均値をスムージングしたもの。

エラーバーは標準不確かさ。

# 定義改定がもたらす将来の温度測定

## 一次温度計技術の向上に伴い

### ➤ 熱力学温度 $T$ と国際温度 $T_{90}$ の差 の測定精度向上

1) 将来的な国際温度目盛  $T_{90}$  の改訂(?)

2)  $T \leftrightarrow T_{90}$  の相互変換

➔ 二次温度計で  $T$  が測定可能に

### ➤ 将来的な熱力学温度の標準供給

改定後のケルビンの新しい定義に直接基づいた  
熱力学温度  $T$  の測定

➔ 960 °C 以上の高温域の放射温度計  
JCSS校正では2018年より金属-炭素系  
高温定点を特定標準器とするトレーサビ  
リティに移行