

温度標準における改定動向と その影響

国立研究開発法人 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
山田善郎

2016年2月17日
TKP東京駅大手町コンファレンスセンター
国際計量標準シンポジウム
「新時代を迎える計量基本単位 一新SI最新動向」
～計測標準フォーラム第13回講演会～



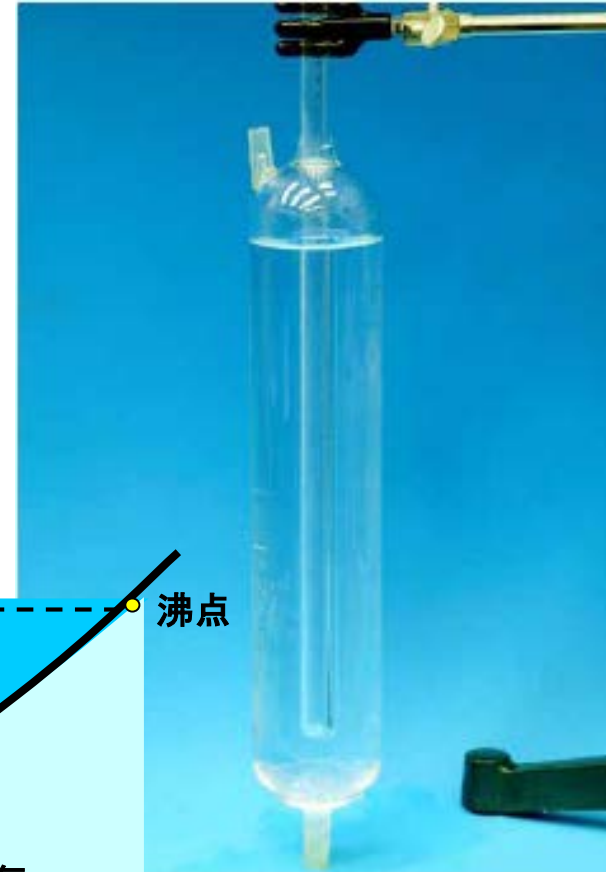
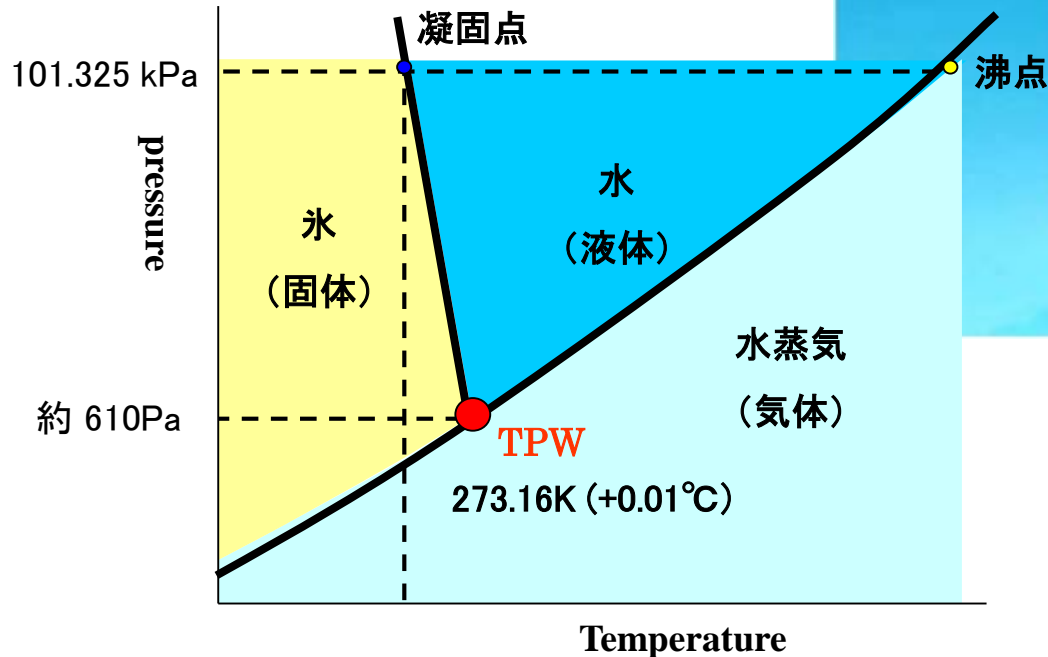
Outline

1. ケルビンの定義と再定義の背景
2. 熱力学温度と温度目盛
3. ケルビン再定義の条件
4. ケルビン再定義の影響

熱力学温度の単位: ケルビン (K)

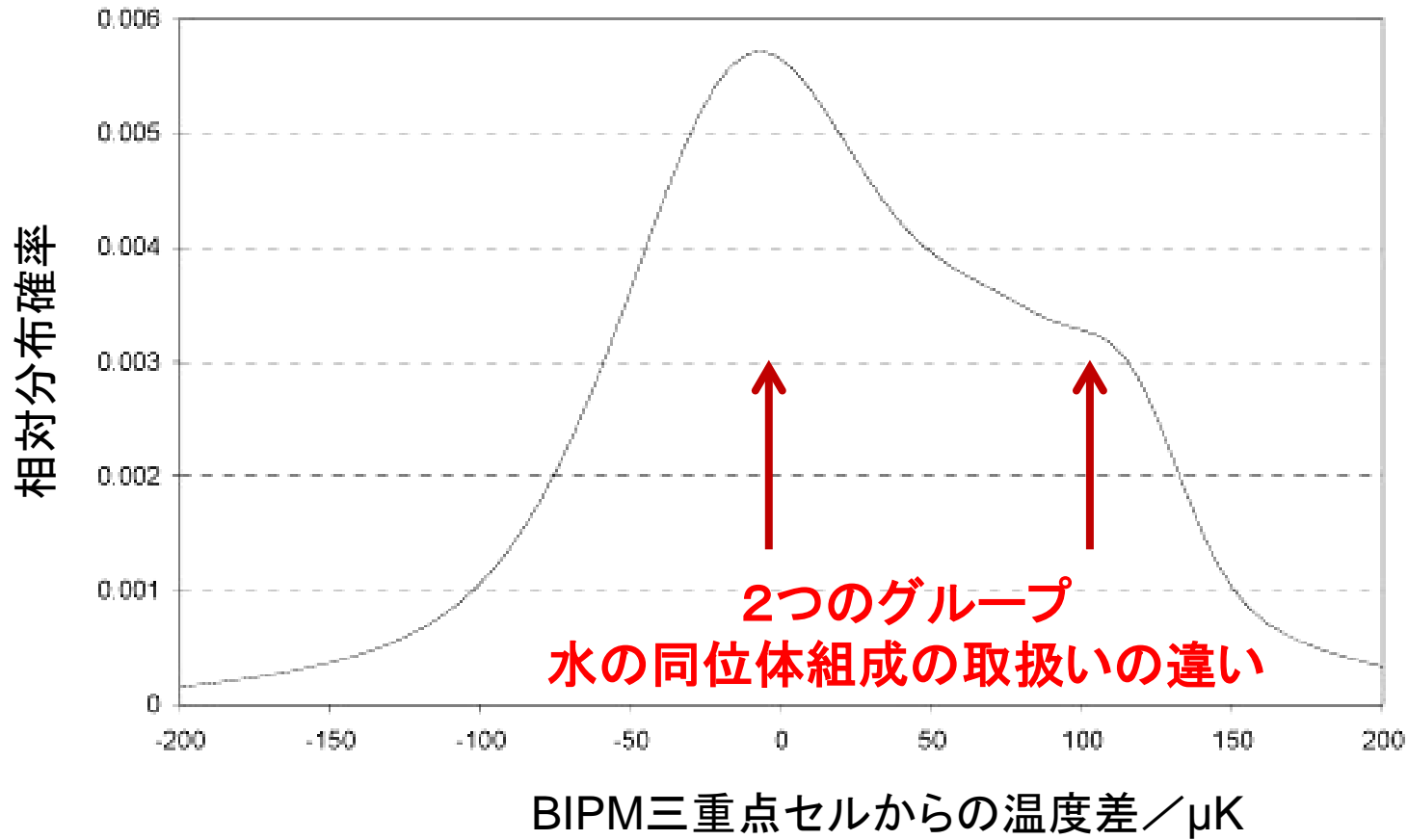
「熱力学温度の単位、ケルビンは、
水の三重点の熱力学温度の1/273.16である」
 (1967/68 CGPM決議)

t : 単位°Cで表した熱力学温度
 T : 単位ケルビンで表した熱力学温度
 $t / ^\circ\text{C} = T / \text{K} - 273.15$



ケルビンの再定義は何故必要か

水の三重点セルの国際比較 (CCT-K7) 結果



*CCT document, BIPM (2006)

● 熱力学温度:

「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」



“水”の定義に曖昧さ

→ “標準平均海洋水

Vienna Standard Mean Ocean Water (VSMOW)の同位体組成を持つ水”

CIPM RECOMMENDATION 2 (CI-2005)

This definition refers to water having the isotopic composition defined exactly by the following amount of substance ratios: 0.000 155 76 mole of ^2H per mole of ^1H , 0.000 379 9 mole of ^{17}O per mole of ^{16}O , and 0.002 005 2 mole of ^{18}O per mole of ^{16}O .

しかし、VSMOWの同位体組成を持つ水が入手可能であるわけではない。



物質に基づく
定義の限界
が明らかに

ボルツマン定数に基づく将来のケルビンの定義

2011年CGPM決議: 再定義案の表明

The kelvin, K, is the unit of thermodynamic temperature; its magnitude is set by fixing **the numerical value of the Boltzmann constant** to be equal to exactly $1.380\ 6X \times 10^{-23}$ when it is expressed in the unit $\text{s}^{-2} \text{m}^2 \text{kg K}^{-1}$, which is equal to J K^{-1} .

「ケルビン、K、は熱力学温度の単位である；その大きさは、単位 $\text{s}^{-2} \text{m}^2 \text{kg K}^{-1}$ （それは J K^{-1} に等しい）で表したときの**ボルツマン定数 k の数値**が正確に $1.380\ 6X \times 10^{-23}$ に等しくなるように設定される。」（ X に入る数値はその時の知見で決定される）

	<u>ボルツマン定数</u> k	<u>水の三重点温度</u> T_{TPW}
<現状>	$1.380\ 648\ 52(79) \times 10^{-23} \text{ J/K}$	273.16 K
相対不確かさ	5.7×10^{-7}	0
	(CODATA 2014)	
<再定義時>	$1.380\ 6X \times 10^{-23} \text{ J/K}$	273.16 K
相対不確かさ	0	5.7×10^{-7} (0.16 mK)

その後は測定により決定

Outline

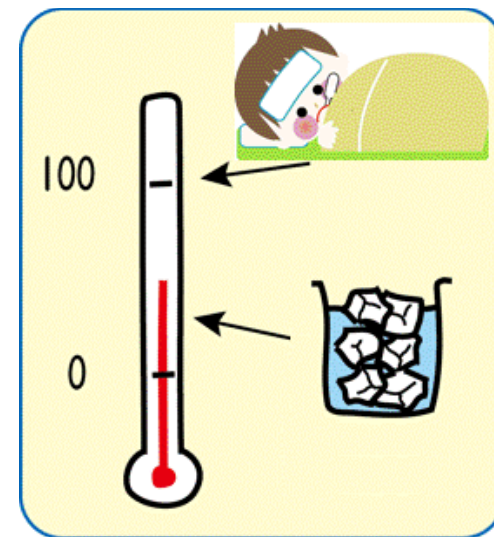
1. ケルビンの定義と再定義の背景
2. 熱力学温度と温度目盛
3. ケルビン再定義の条件
4. ケルビン再定義の影響

温度目盛

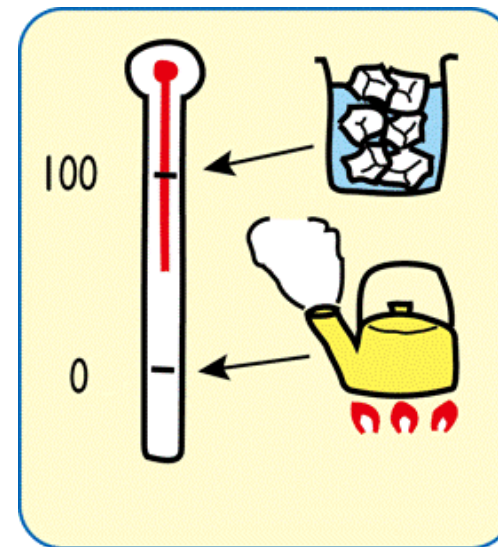


17世紀のガラス製温度計
(レプリカ、産総研所有)

ファーレンハイト



セルシウス



温度の「ゼロ」をどこに置くか？

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

2種類の温度計

一次温度計

- 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 定積気体温度計、音響気体温度計、雑音温度計、
絶対放射温度計

- 熱力学温度を測定できる。実用的でない。

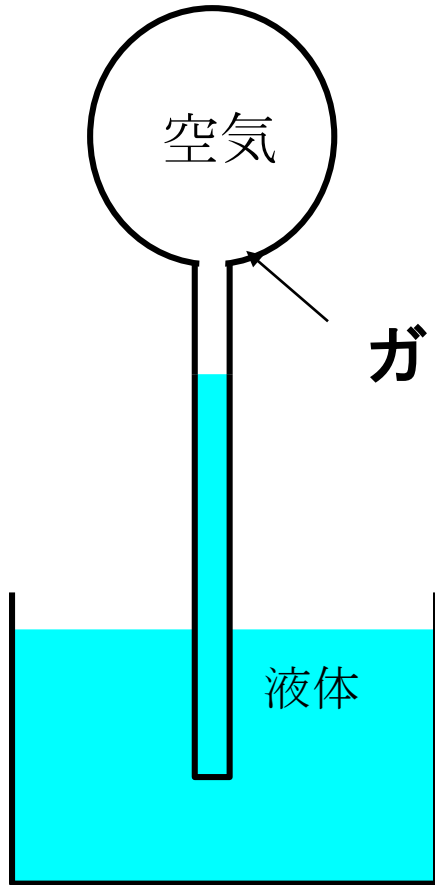
二次温度計

- 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。熱力学温度を測定できない。

気体温度計



ガリレオの温度計
空気の熱膨張

ガラス

仕事

定圧気体温度計

$$pV = nRT = NkT \quad (\text{理想気体})$$

p : 圧力、 V : 体積

n : 気体の物質質量

N : 気体の分子数

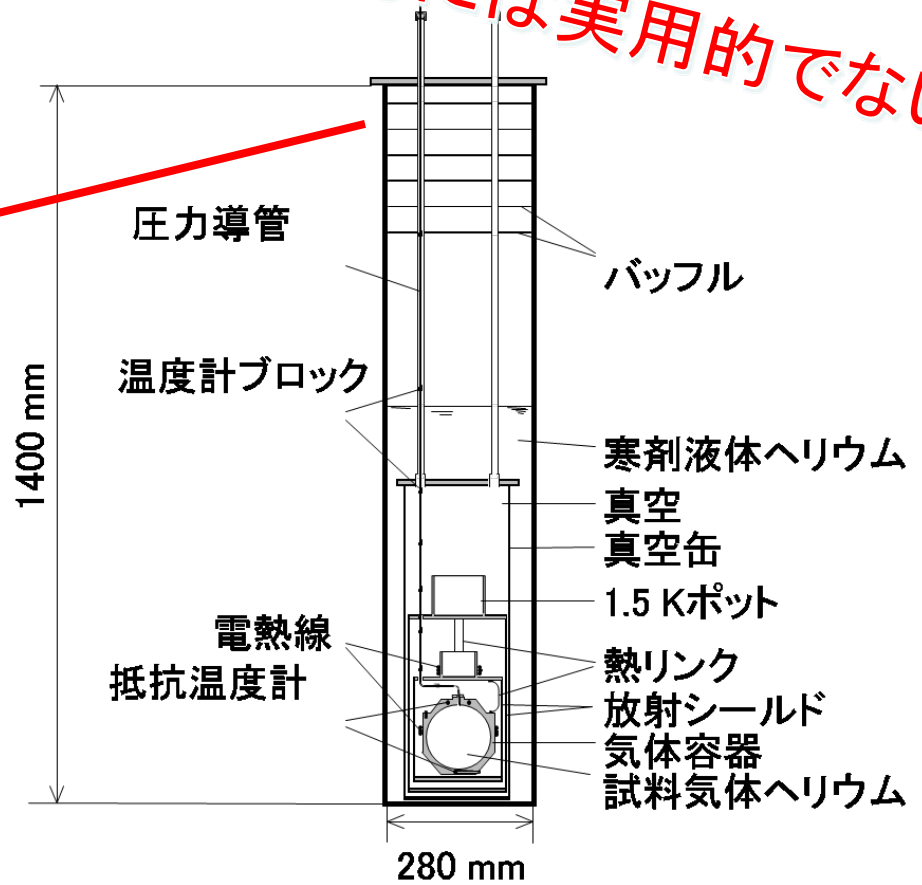
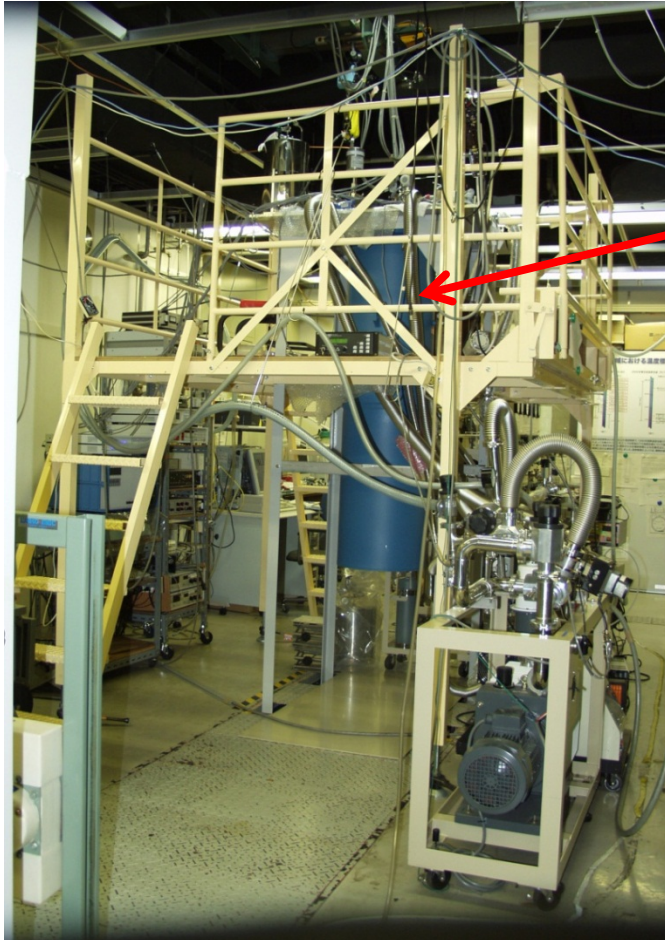
R : 気体定数、 k : ボルツマン定数

T : 熱力学温度

k : T と単位分子あたりのエネルギーの変換係数

定積気体温度計 (Constant Volume Gas Thermometer (CVGT))

日常使用するには実用的でない



NMIJ, AIST

* O. Tamura *et al.*: Int. J. Thermophys. **29** (2008) 31.

熱力学温度 T は熱エネルギー E_{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。

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

様々な気体温度計と状態方程式

理想気体中の気体分子

- 体積 V と圧力 p : $pV = NkT$
 N : 分子数

← 定積気体温度計
 Constant Volume Gas
 Thermometry: **CVGT**

- 音速 u_0 : $u_0^2 = \gamma kT / m$
 γ : 比熱比 c_p / c_v ,
 m : 分子質量

← 音響気体温度計
 Acoustic Gas
 Thermometry: **AGT**

- 比誘電率 ϵ_r : $p = kT \epsilon_0 (\epsilon_r - 1) / \alpha_0$
 p : 圧力, ϵ_0 : 真空の誘電率,
 α_0 : 分子分極率

← 誘電率気体温度計
 Dielectric Constant Gas
 Thermometry: **DCGT**

電子

- 熱雑音 $\langle U^2 \rangle$: $\langle U^2 \rangle = 4kTR\Delta f$
 R : 電気抵抗、 Δf : 帯域幅

← ジョンソン雑音温度計
 Johnson Noise
 Thermometry: **JNT**

光子

- 黒体放射輝度 L_λ : $L_\lambda = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \cdot \left(\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1 \right)^{-1}$
 h : プランク定数、 λ : 波長
 c : 真空中の光速

← 絶対放射温度計
 Absolute Radiation
 Thermometry: **ART**

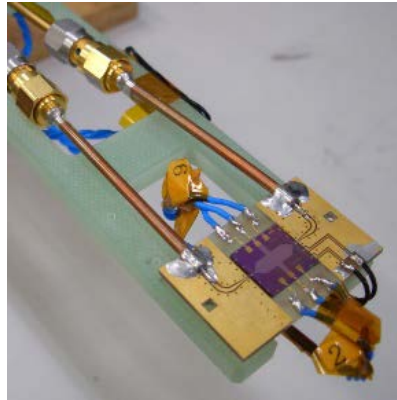
一次温度計とボルツマン定数の測定

定積気体温度計
CVGT



<https://www.ptb.de>

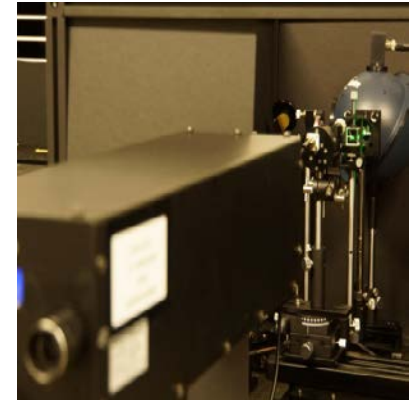
雑音温度計
JNT



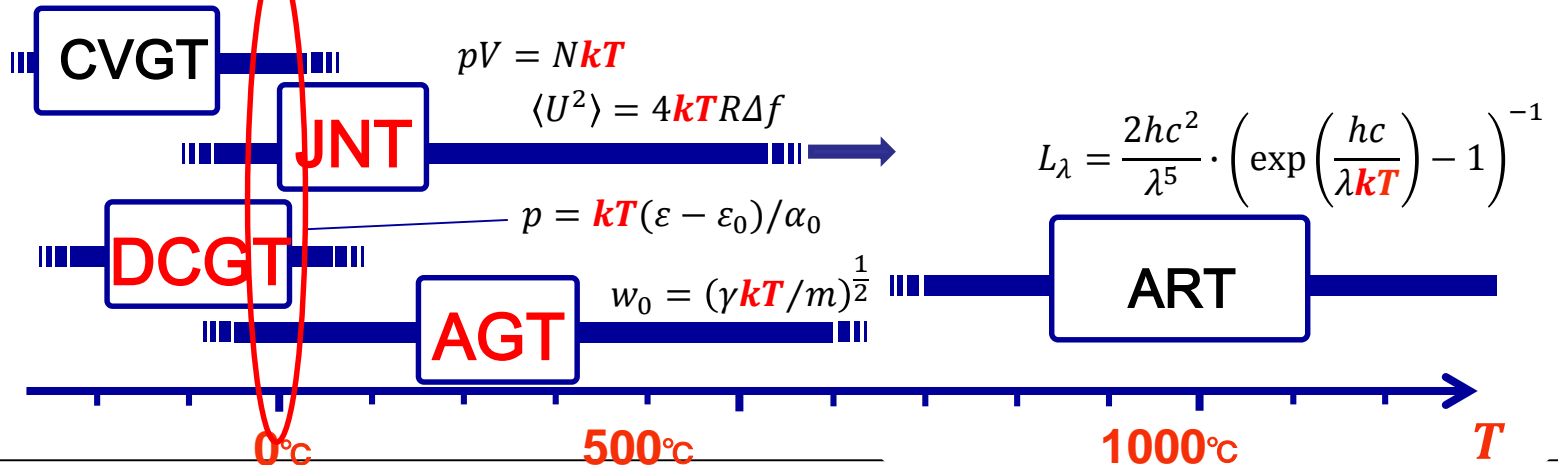
音響気体温度計
AGT



絶対放射温度計
ART



一次温度計

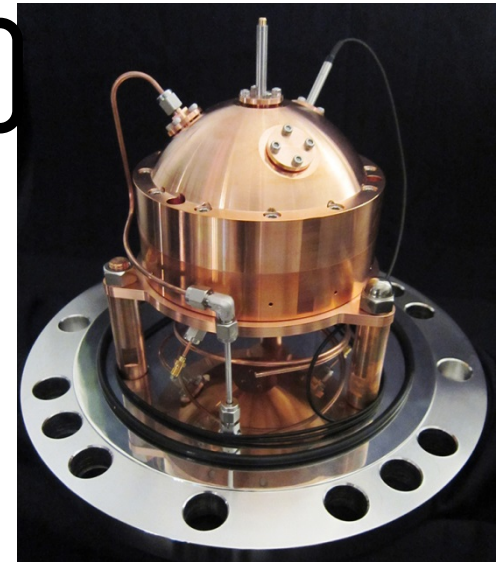
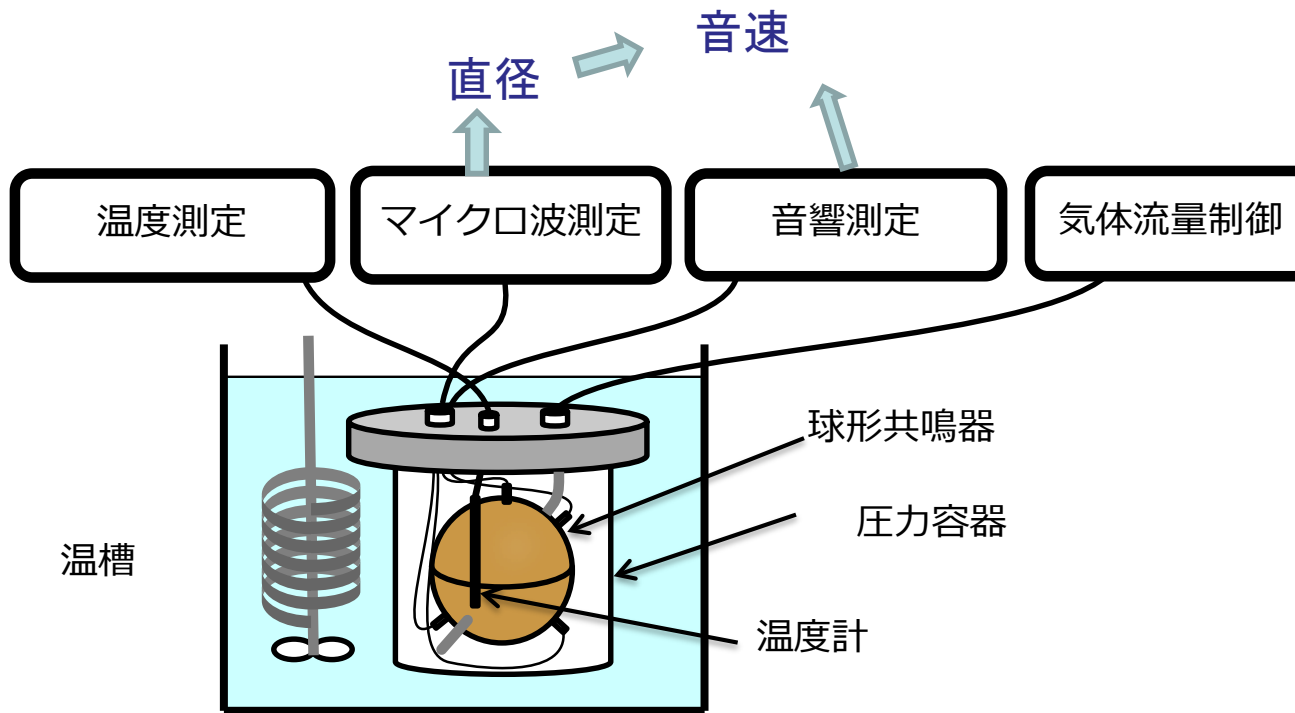
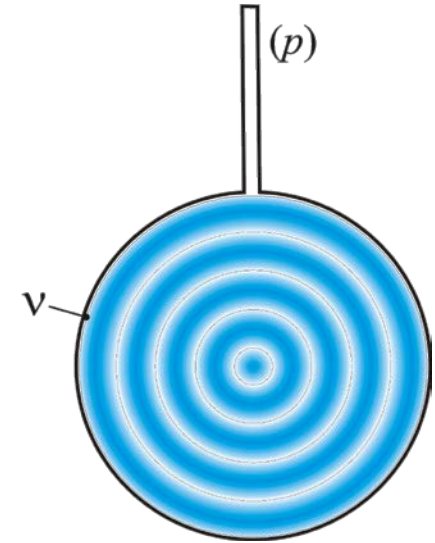


音響気体温度計 (Acoustic Gas Thermometer, AGT)

希薄な気体中の音速 w_0 と気体の熱力学温度 T の間の簡単な関係に基づく

$$w_0 = (\gamma kT / m)^{\frac{1}{2}}$$

γ : 比熱比 c_p/c_v ,
 m : 分子質量

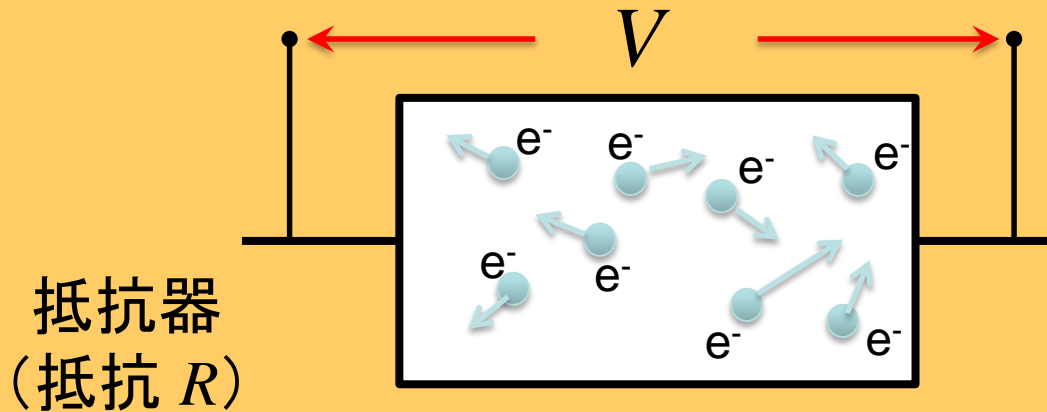


雑音温度計 (Johnson Noise Thermometer, JNT)

Johnson-Nyquist equation

$$\langle V^2 (T) \rangle = 4kTR\Delta f$$

温槽 (熱力学温度 T)



誘電率気体温度計

(Dielectric Constant Gas Thermometry, DCGT)

$$p = kT \varepsilon_0 (\varepsilon_r - 1) / \alpha_0$$

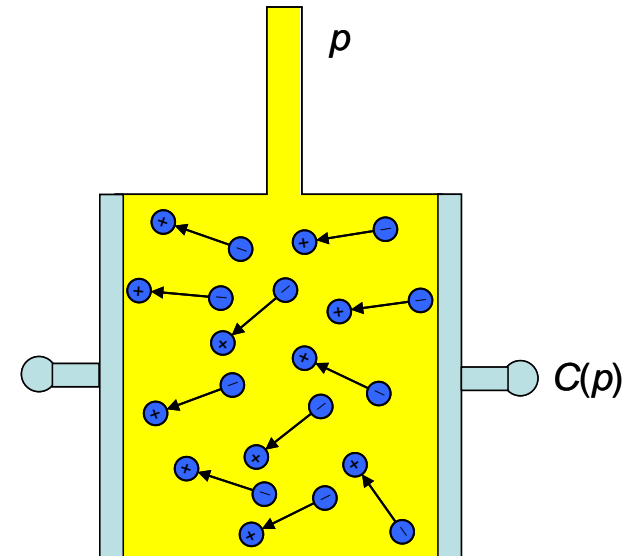
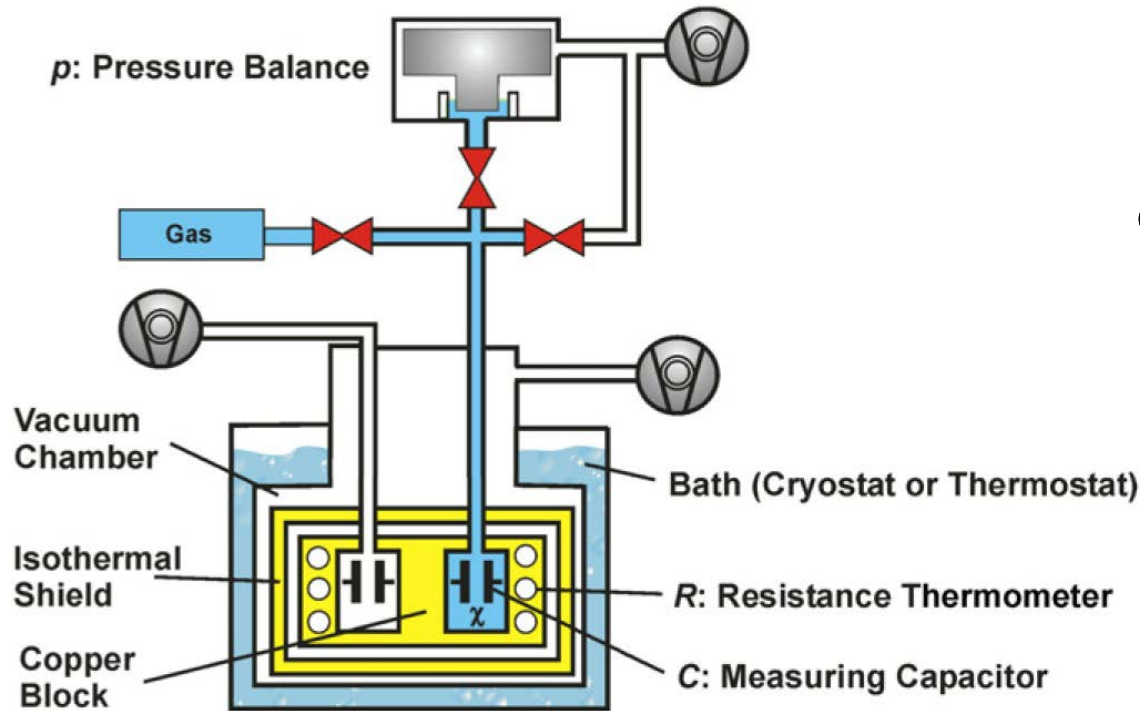
$$\varepsilon_r \approx C(p)/C(0)$$

p : 圧力

ε_r : 比誘電率

ε_0 : 真空の誘電率

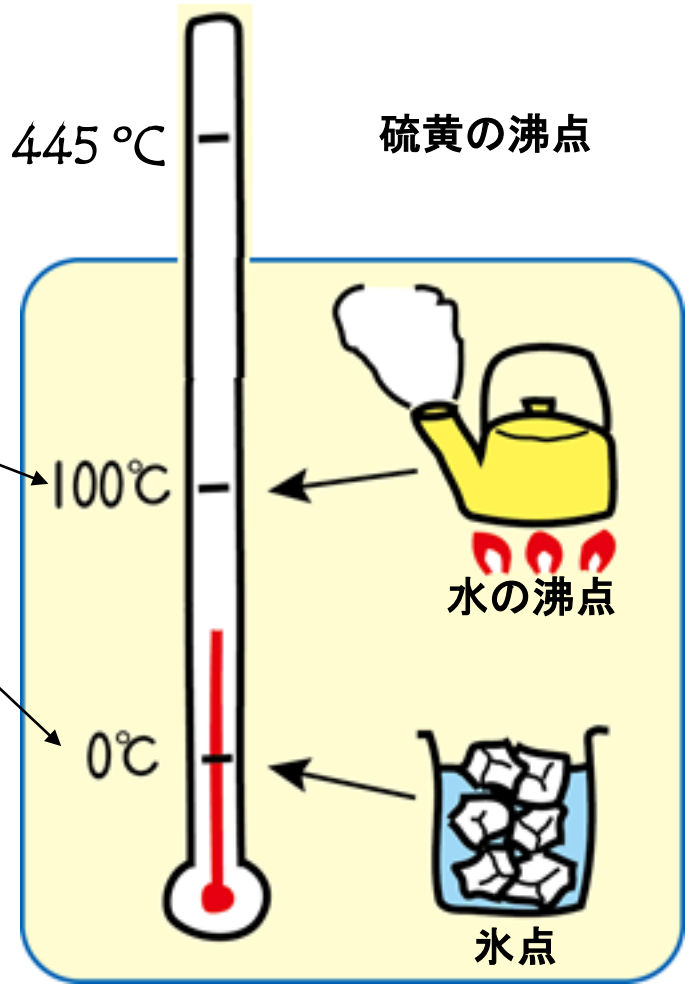
α_0 : 分子分極率



Fellmuth et al., Metrologia 48 (2011)

实用温度目盛

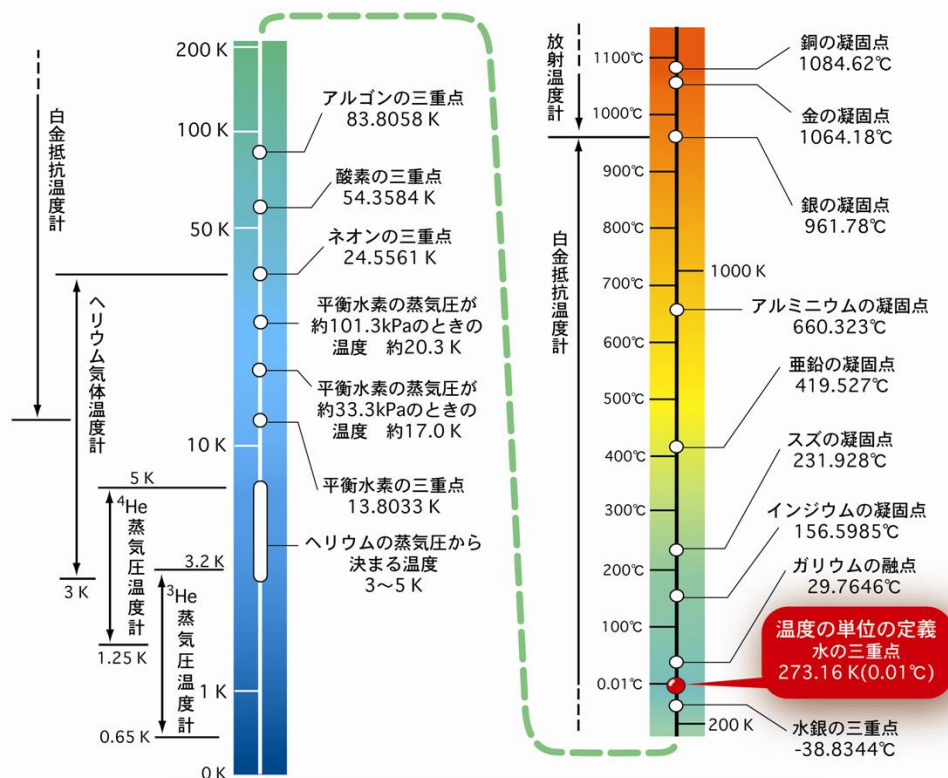
温度定点
+
補間計器
標準白金抵抗温度計



➡ 国際温度目盛 (International Temperature Scale)

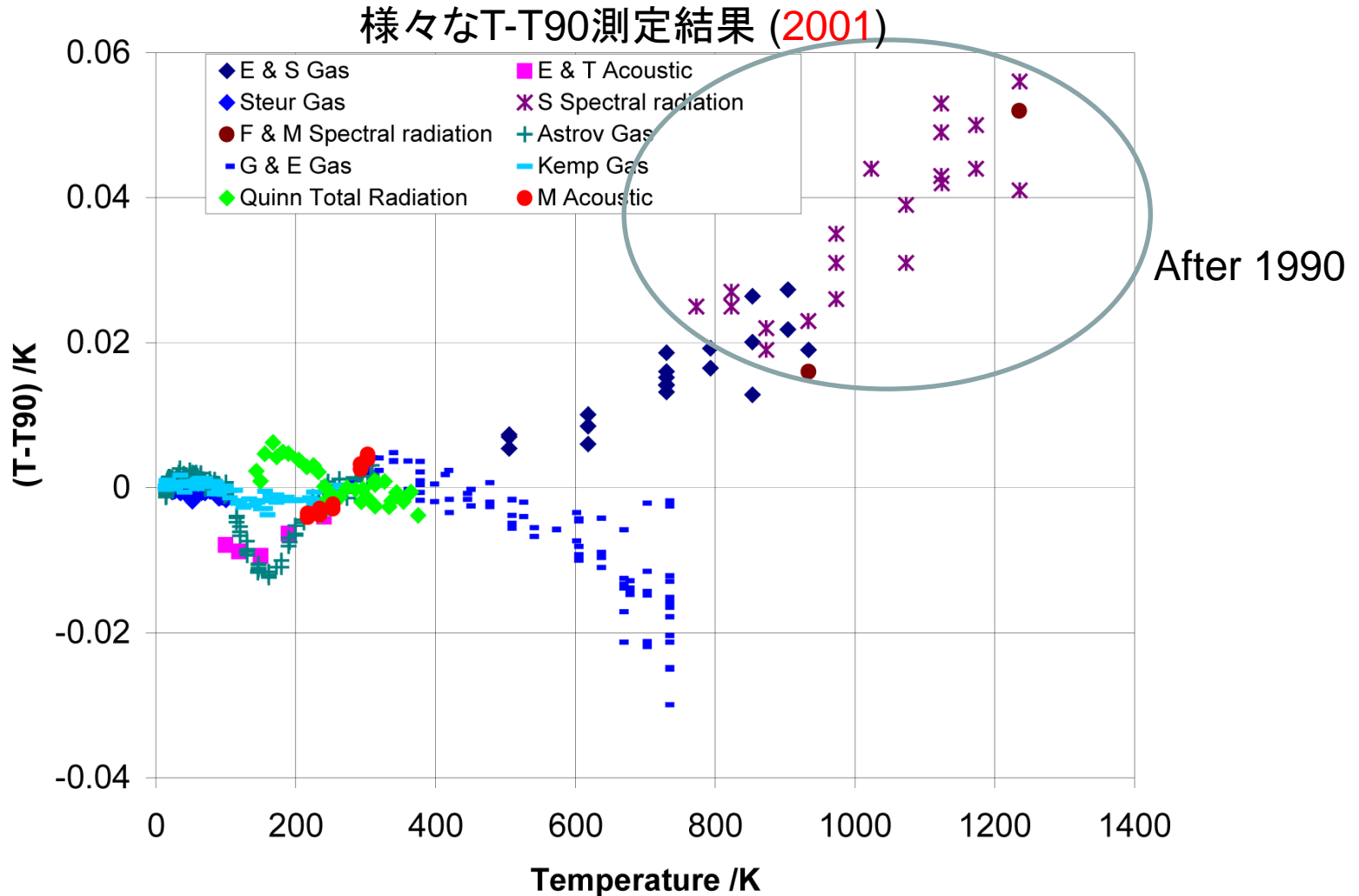
国際温度目盛 (International Temperature Scale: ITS)

- 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
- 約20年ごとに定義見直し、
- 現行は“International Temperature Scale of 1990 (**ITS-90**)”

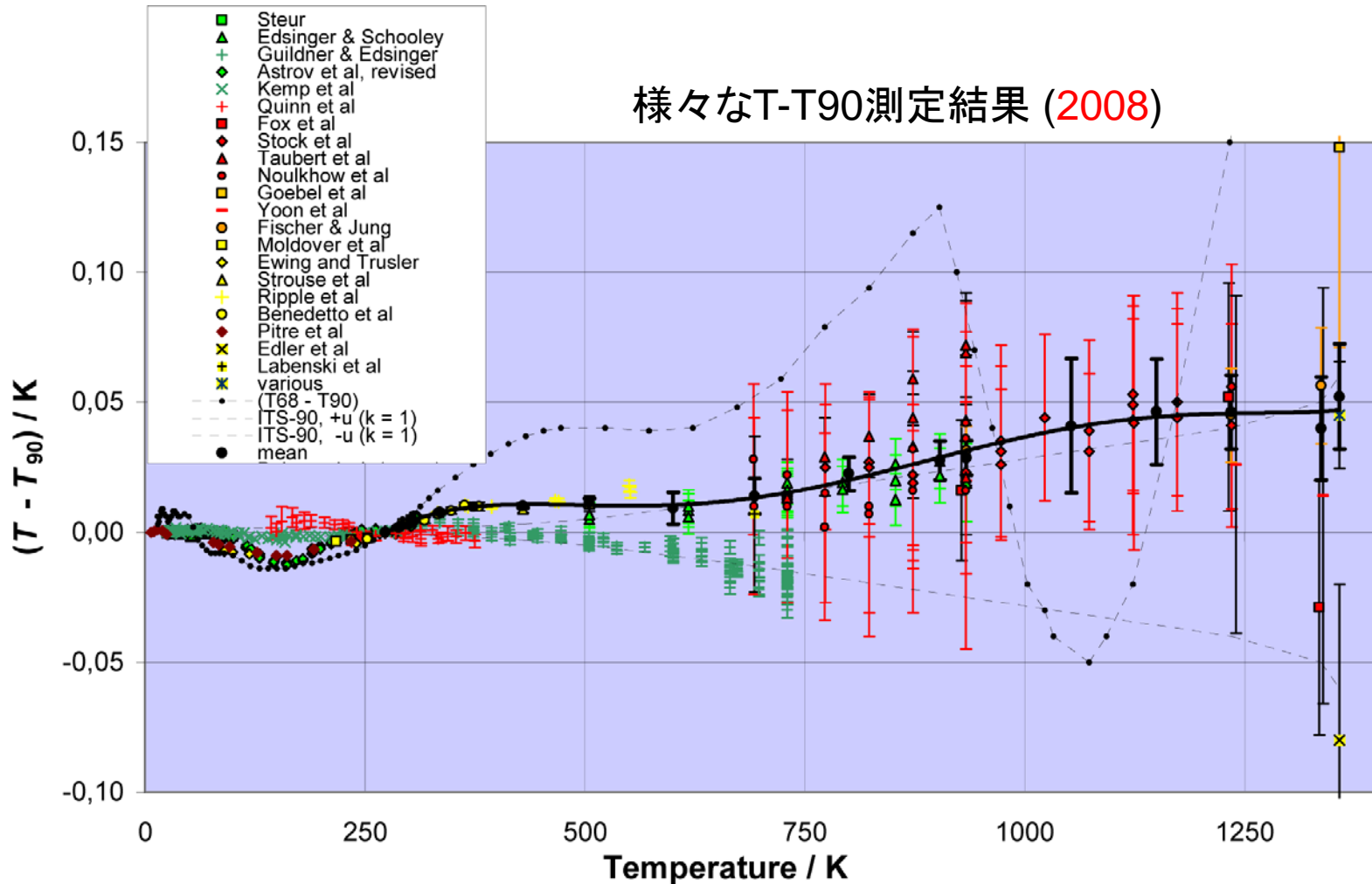


1990年国際温度目盛(ITS-90)の定義定点と補間温度計

1990年国際温度目盛 T_{90} は熱力学温度 T をどれだけ精度よく近似しているか？



1990年国際温度目盛 T_{90} は熱力学温度 T をどれだけ精度よく近似しているか？



Outline

1. ケルビンの定義と再定義の背景
2. 熱力学温度と温度目盛
3. **ケルビン再定義の条件**
4. ケルビン再定義の影響

ケルビン再定義に向けた行程

最初の提起

- I. M. Mills, P. J. Mohr, T. J. Quinn, B. N. Taylor and E. R. Williams: Redefinition of the kilogram: a decision whose time has come, *Metrologia*, **42**, 71 (2005)
- I. M. Mills, P. J. Mohr, T. J. Quinn, B. N. Taylor and E. R. Williams: Redefinition of the kilogram, ampere, kelvin and mole: a proposed approach to implementing CIPM recommendation 1 (CI-2005), *Metrologia*, **43**, 227 (2006)
- CIPM Recommendation 1 (CI-2005): Preparative steps towards new definitions of the kilogram, the ampere, the kelvin and the mole in terms of fundamental constants
- CGPM Resolution 1 (2011): On the possible future revision of the International System of Units, the SI

新定義の提案
- CGPM Resolution 1 (2014): On the future revision of the International System of Units, the SI

2014は尚早
2018は?

ケルビン再定義の条件

測温諮問委員会(CCT) 勧告 T 2 (2010):

Considerations for a new definition of the kelvin

《ポイント》

1. 異なる手法の一次温度計を適用した測定に基づく **k の値の相対標準不確かさが 1 ppm**
2. 理想的には**根本的に異なる少なくとも2つの方法**、例えばAGTとDCGTを含む
3. **CODATA**の推奨値をボルツマン定数に採用

CODATA

International Council for Science : Committee on Data for Science and Technology

ケルビン再定義の条件

測温諮問委員会(CCT) 勧告 T 1 (2014)

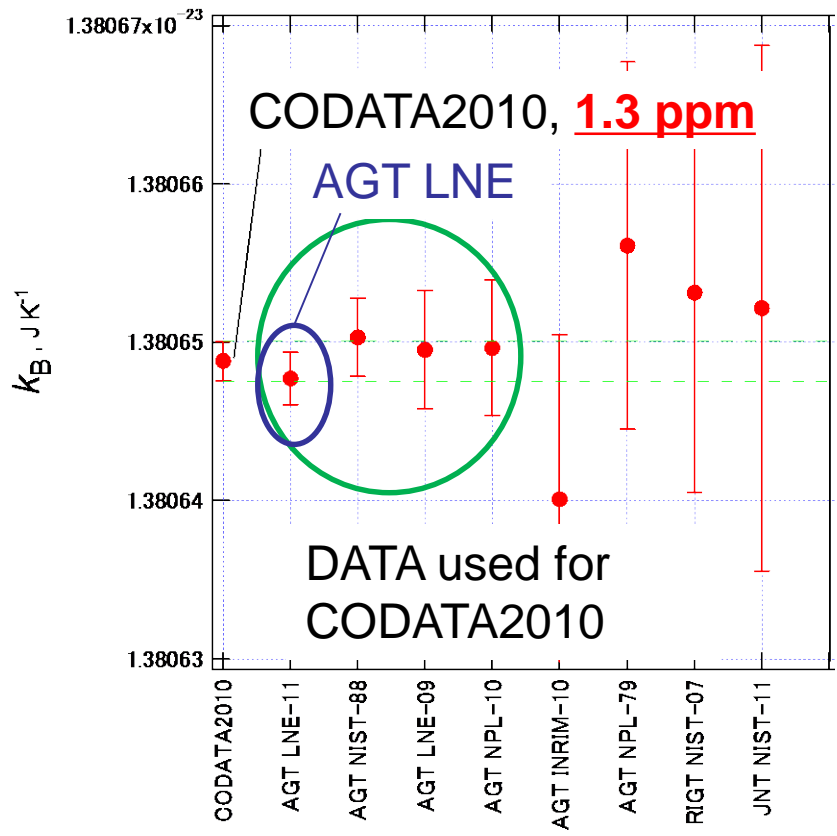
On a new definition of the kelvin

《ポイント》

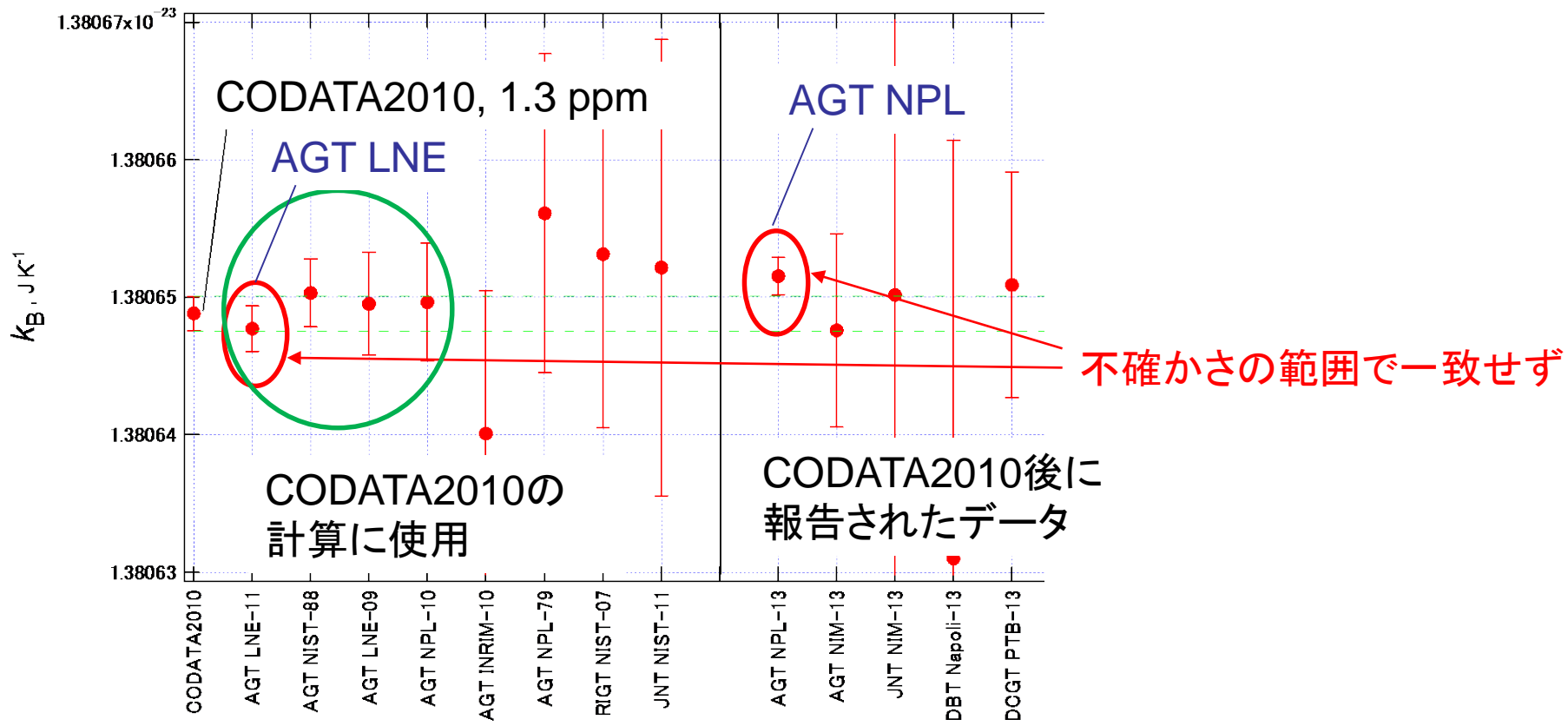
1. k の調整値の相対標準不確かさが 1 ppm
2. 根本的に異なる少なくとも2つの方法に基づき、それぞれ少なくとも1つの結果の相対標準不確かさが 3 ppm



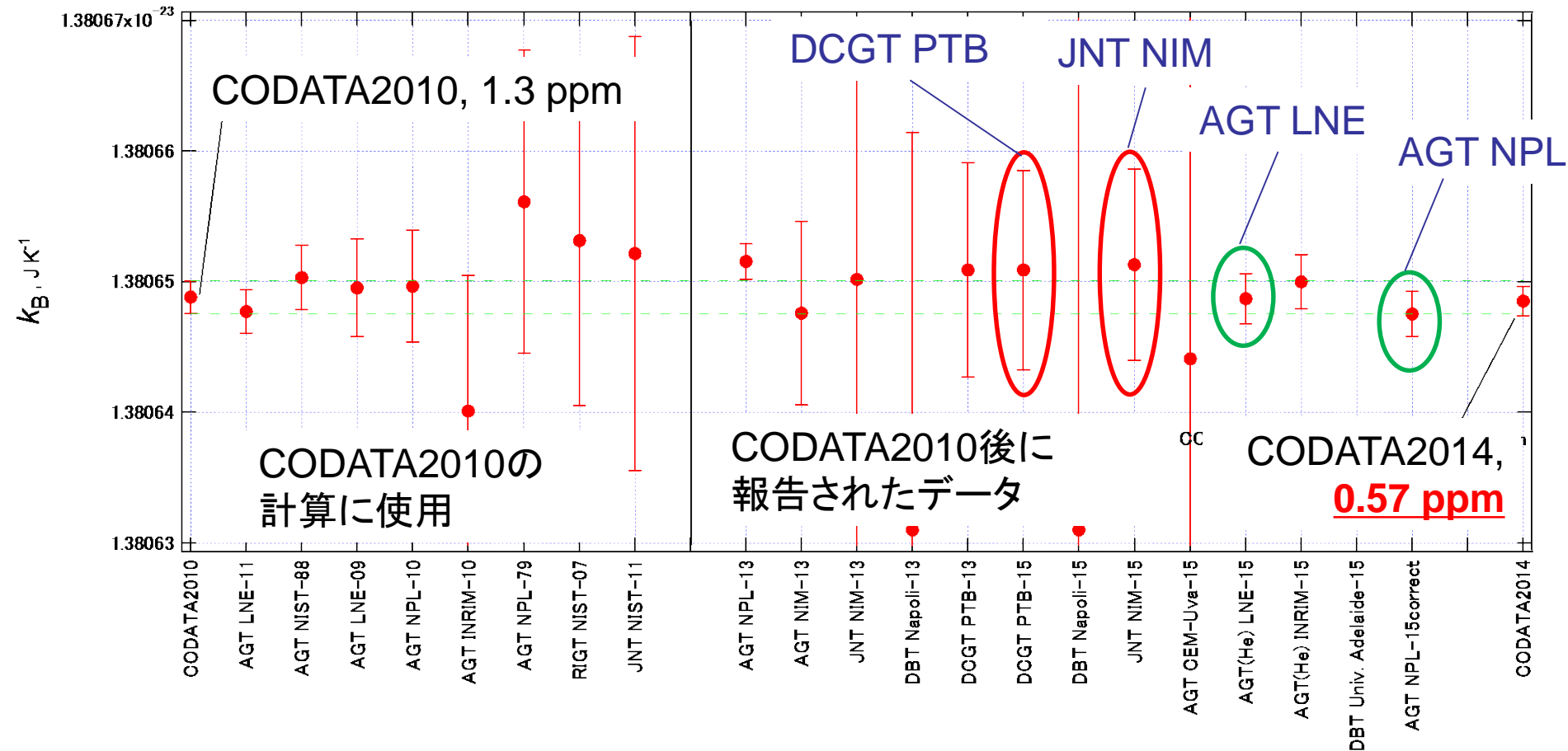
特に2つ目の方法にとって、明確な条件設定



CODATA
International Council for Science :
Committee on Data for Science and
Technology



CODATA
International Council for Science :
Committee on Data for Science and
Technology



CODATA
International Council for Science :
Committee on Data for Science and
Technology

- Metrologia Focus Issue (2015)
 - AGT NPL 修正値: AGT LNEと一致
 - DCGT PTB: 相対不確かさ4 ppm
 - JNT NIM: 相対不確かさ3.9 ppm

ケルビン再定義の条件

測温諮問委員会(CCT) 勧告 T 1 (2014)

On a new definition of the kelvin

《ポイント》

1. k の値の**相対標準不確かさが 1 ppm** ← 達成済み(0.57 ppm, CODATA 2014)
2. **根本的に異なる少なくとも2つの方法に基づき、それぞれ少なくとも1つの結果の相対標準不確かさが 3 ppm**

← AGTは達成済み。
他のもう一つの手法も近々達成見込み?

Outline

1. ケルビンの定義と再定義の背景
2. 熱力学温度と温度目盛
3. ケルビン再定義の条件
4. ケルビン再定義の影響

ケルビン再定義のメリットと影響

水の三重点に依存しない定義

メリット

- ◆ 物質に依存しない単位の普遍性が得られる
- ◆ 特定の温度域・温度計を優遇しない
- ◆ 熱力学温度測定活用の促進
- ◆ 水の三重点の実現不確かさに制約されない熱力学温度測定精度向上
- ◆ 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

デメリット

- ◆ 定義が理解しづらい

ガイダンス文書

← “*Mise en pratique for the definition of the kelvin (MeP-K)*” の整備

産業界等への影響

- ◆ 産業界等で用いている ITS-90にはケルビン再定義の影響はない

ガイダンス文書

Mise en pratique for the definition of the kelvin (MeP-K)

- 現行Version
 - Section 1. ITS-90の文書
 - Section 2. ITS-90の補足情報
 - Section 3. PLTS-2000 (0.9 mK~1 K暫定低温度目盛)の文書
 - Section 4. T-T90 (熱力学温度とITS-90差)の推定値
- 将来は下記を含めることで準備
 - 音響気体温度計 (AGT) による熱力学温度測定
 - 絶対放射温度計による熱力学温度測定
(銀点 (961.78 °C) 以上の高温域、
金属-炭素共晶定点の活用含む)