

計量標準フォーラム
2018年9月27日

より高精度な熱力学温度測定に向けて

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

2つの温度

熱力学温度

古典熱力学あるいは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

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

- セルシウス度($^{\circ}\text{C}$)による表記 t も用いられる。
$$t / ^{\circ}\text{C} = T / \text{K} - T_0 / \text{K}$$
$$T_0 = 273.15 \text{ K}$$

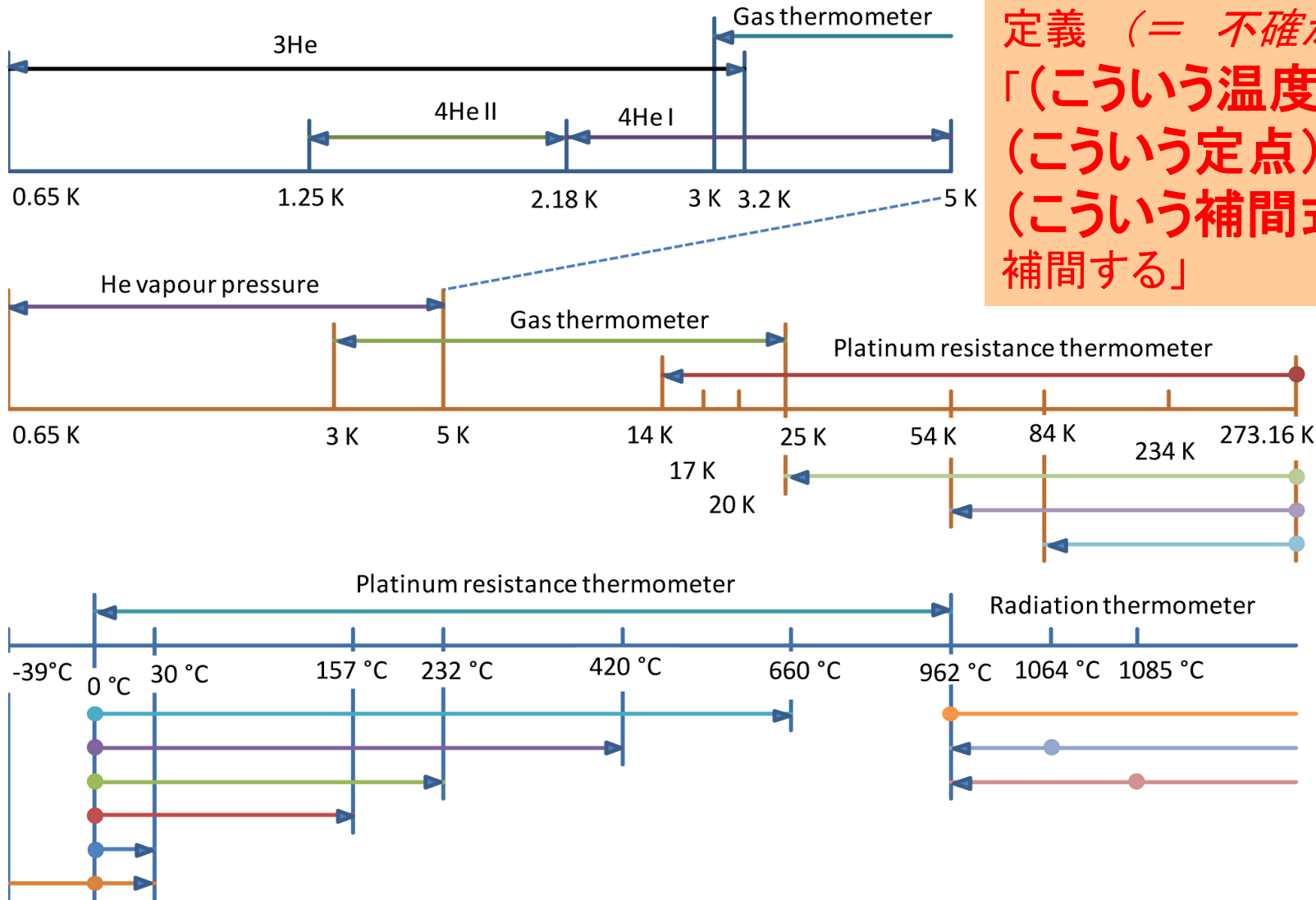
国際温度

熱力学温度を近似した温度

- 目盛で定義:
 - 温度定点の温度値
(水・水銀・Ar...の三重点温度、銅・銀・金...の凝固点、等)
 - 補間用の温度計、補間方法
(放射温度計、白金抵抗温度計、ヘリウム気体温度計、...)
- 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)」

現在のITS: 1990年国際温度目盛の定義

定義 (= 不確かゼロ)
 「(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」



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

- 実用的でない。

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。

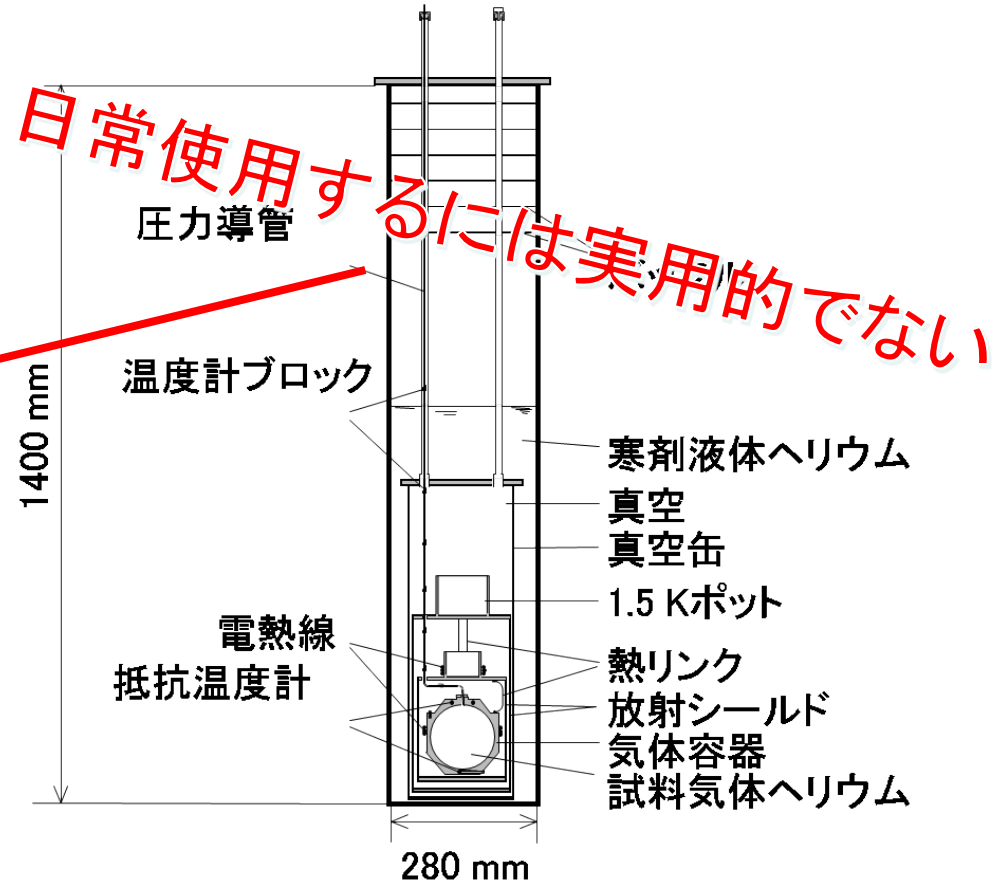
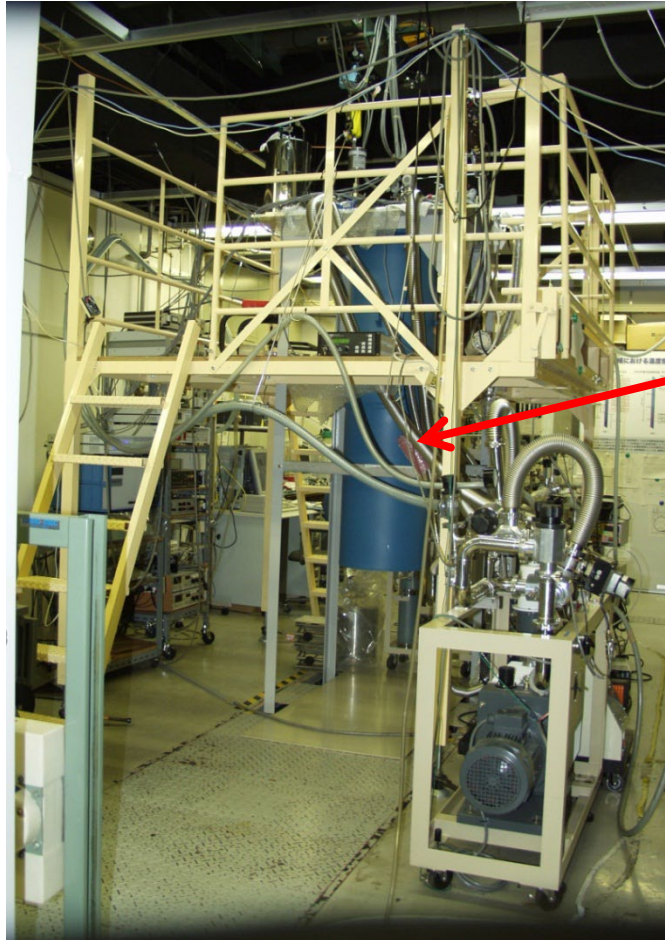
定積気体温度計 (Constant Volume Gas Thermometer (CVGT))

理想気体中の気体分子

- 体積 V と圧力 p : $pV = NkT = nRT$

状態方程式

N : 分子数, k : ボルツマン定数, n : 物質質量, R : 気体定数



NMIJ, AIST

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

一次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

- 音速 w_0 : $w_0^2 = \gamma kT / m$

γ : 比熱比 c_p/c_v ,

m : 分子質量

- 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

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

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

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

電子

- 熱雑音 $\langle V^2 \rangle$: $\langle V^2 \rangle = 4kTR \Delta f$

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

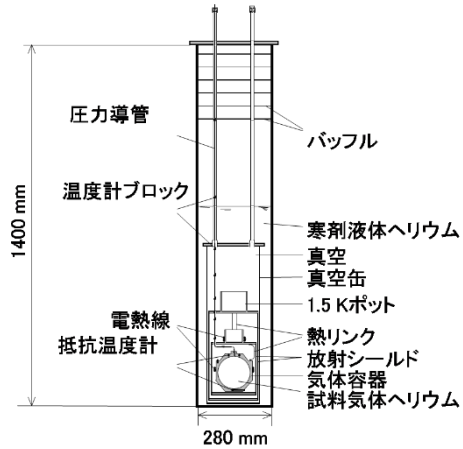
← 絶対放射温度計
Absolute Radiation
Thermometry: **ART**

一次温度計による温度測定の目的

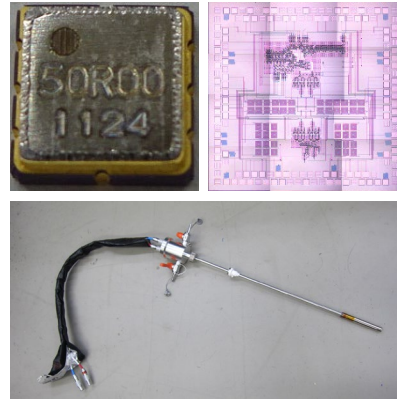
- ▶ 熱力学温度と国際温度の差 ($T - T_{90}$) の測定
将来的な国際温度目盛の改訂
 $T \leftrightarrow T_{90}$ の相互変換
- ▶ ボルツマン定数 k の高精度決定
水の三重点温度 T_0 において一次温度計により
内部エネルギー kT_0 を高精度測定し k を求める
→ ケルビンの定義改定への貢献
- ▶ 将来的な熱力学温度の標準供給
改定後の新しいケルビンの定義に直接基づく温度測定

NMIJが取り組んでいる一次温度計

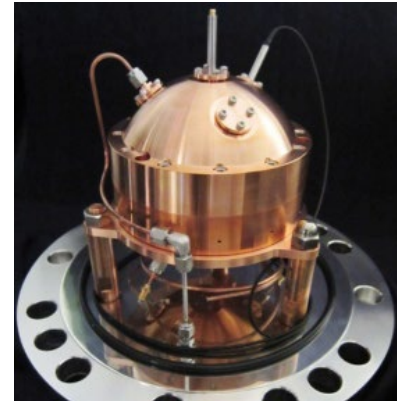
定積気体温度計
CVGT



雑音温度計
JNT



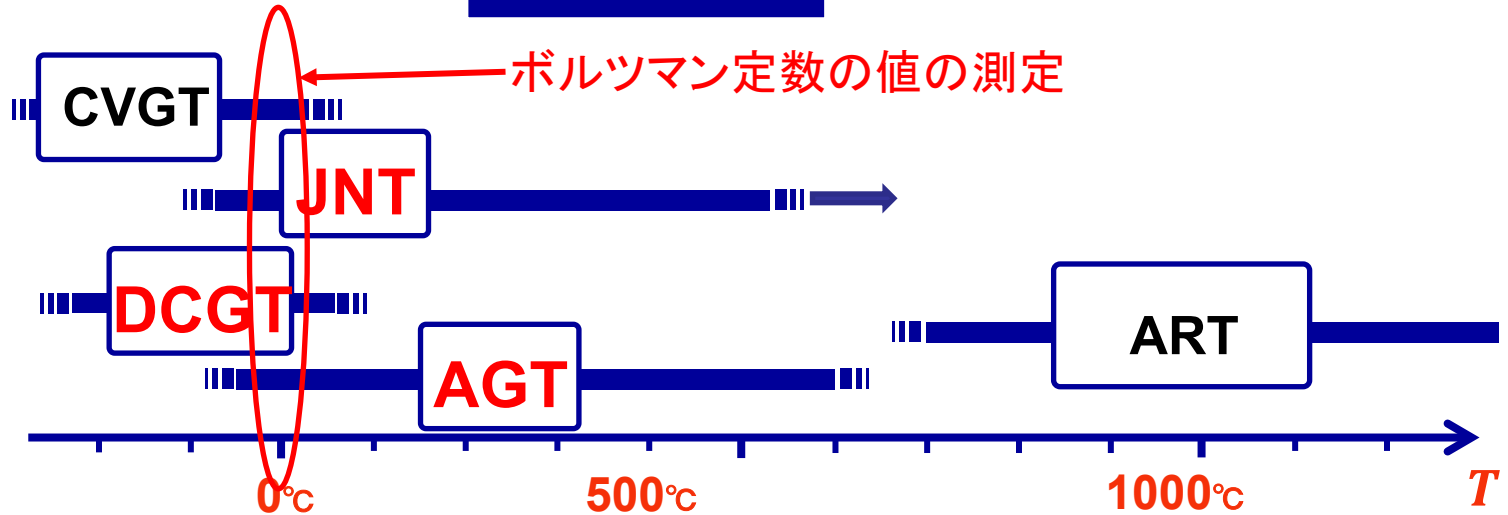
音響気体温度計
AGT



絶対放射温度計
ART



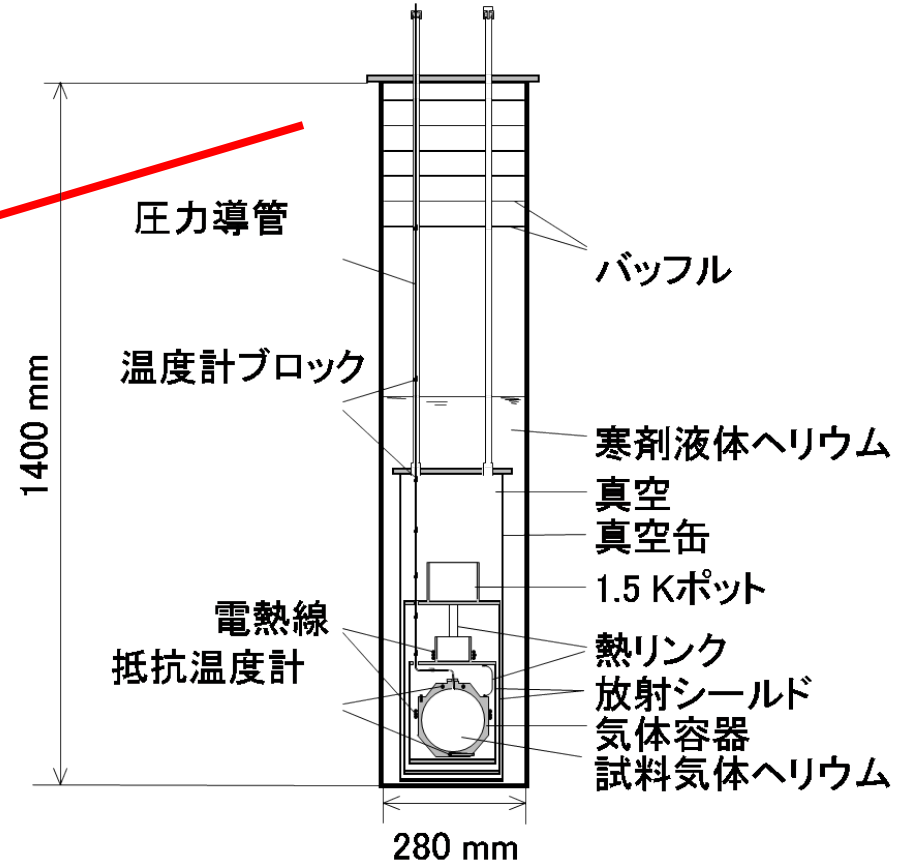
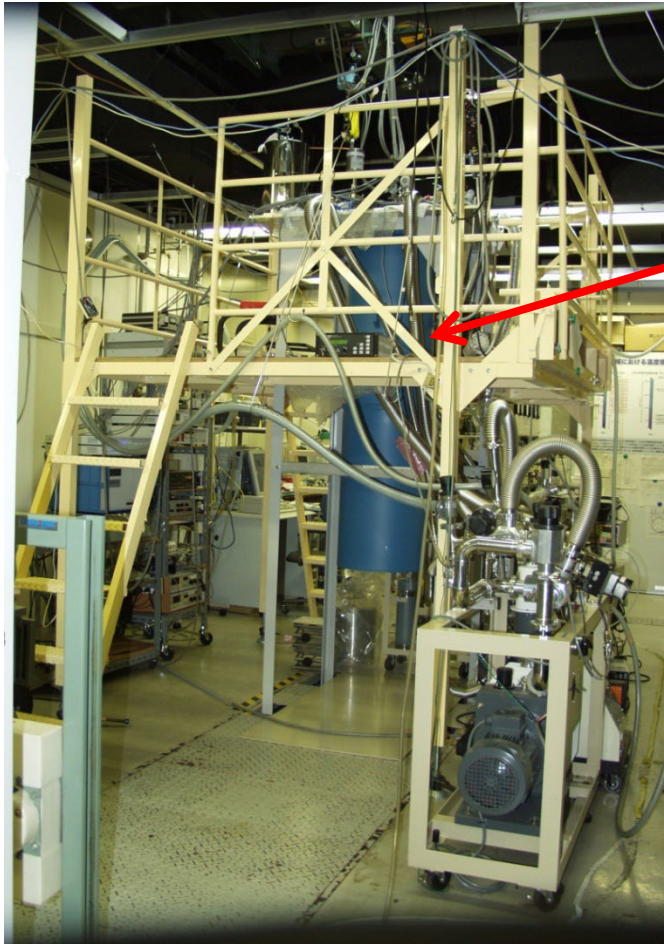
一次温度計



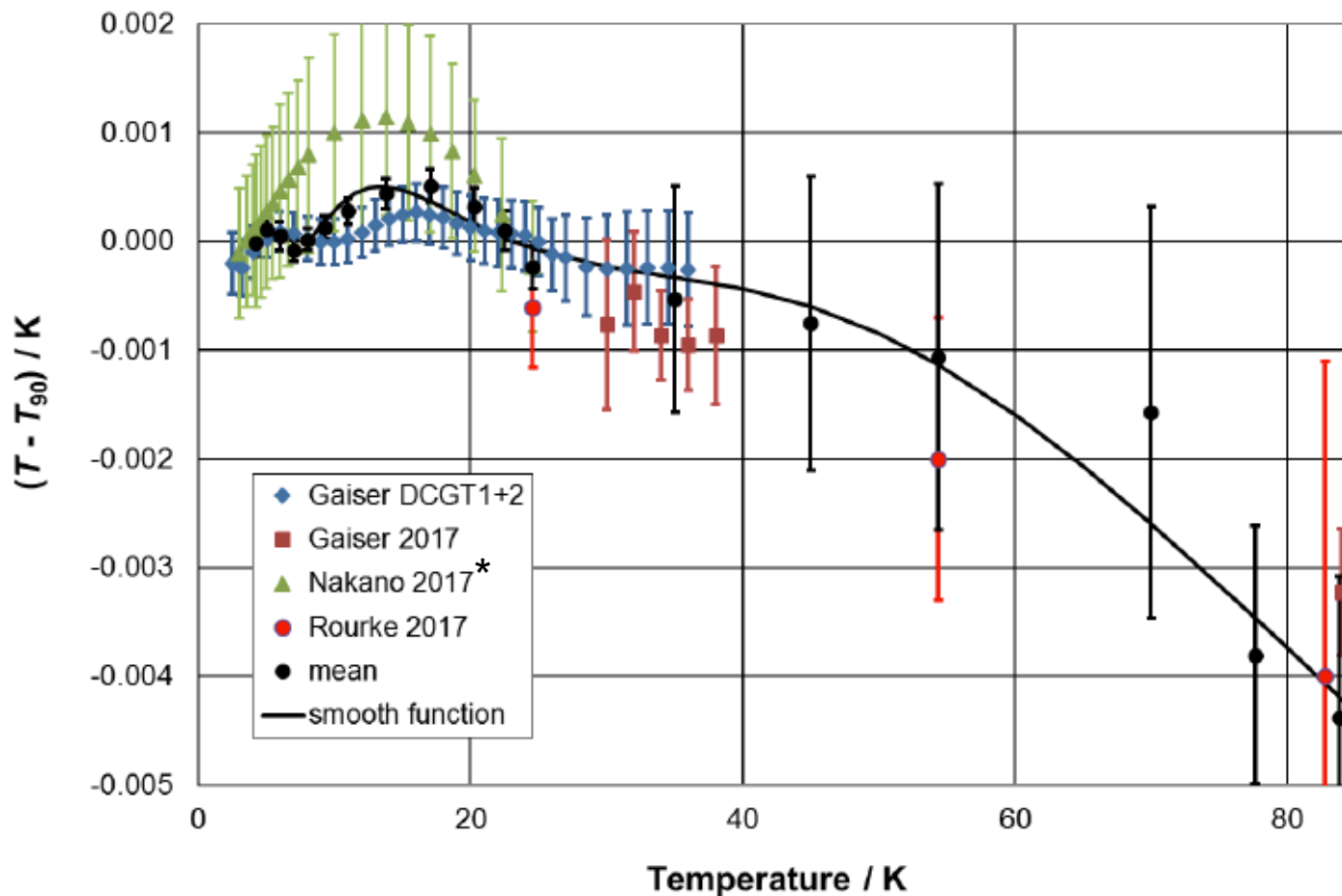
^3He 定積気体温度計(CVGT) (産業技術総合研究所)*

$$p = R T \left(\frac{N}{V} \right) \left\{ 1 + B(T) \frac{N}{V} + C(T) \left(\frac{N}{V} \right)^2 + \dots \right\}$$

T : 熱力学温度, R : 気体定数, p : 圧力,
 N : 気体の物質質量, V : 気体の体積,
 $B(T), C(T), \dots$: ビリアル係数



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



・25 K以下は不確かさの範囲内である程度一致

+CCT/17-44, <https://www.bipm.org/cc/AllowedDocuments.jsp>

* T. Nakano *et al.*: *Int. J. Thermophys.* **38** (2017) 105.

雑音温度計 (Johnson Noise Thermometer、JNT)

Johnson-Nyquist の式 (抵抗体で普遍的に成立)

電圧の分散 ボルツマン定数 (新SI単位では定義値)

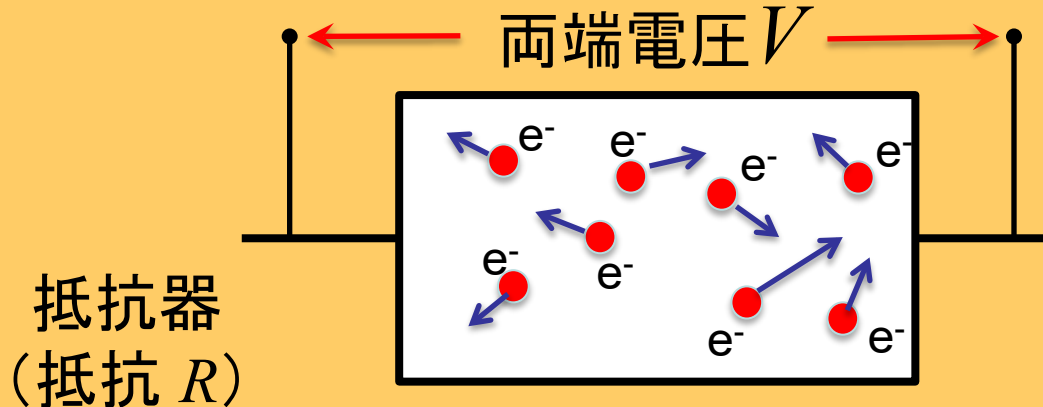
$$\langle V^2 \rangle = 4kTR\Delta f$$

観測周波数帯域幅

量子化ホール抵抗を基準に
精密測定可

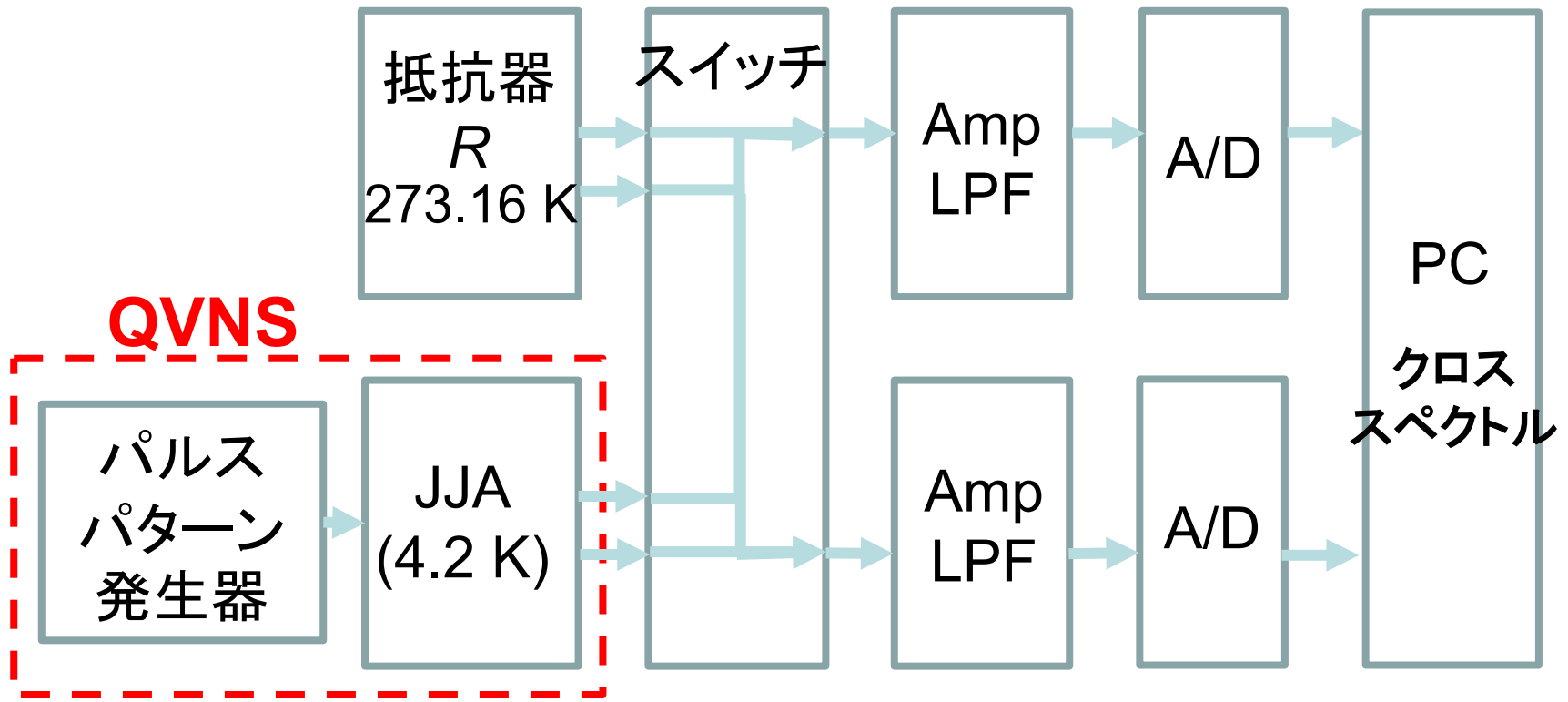
温度 T について解く

熱浴 (熱力学温度 T)



JNTの精度向上

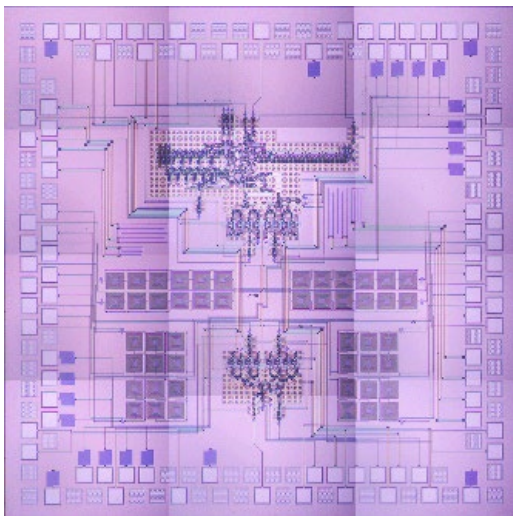
量子電圧雑音源: Quantum Voltage Noise Source (QVNS)



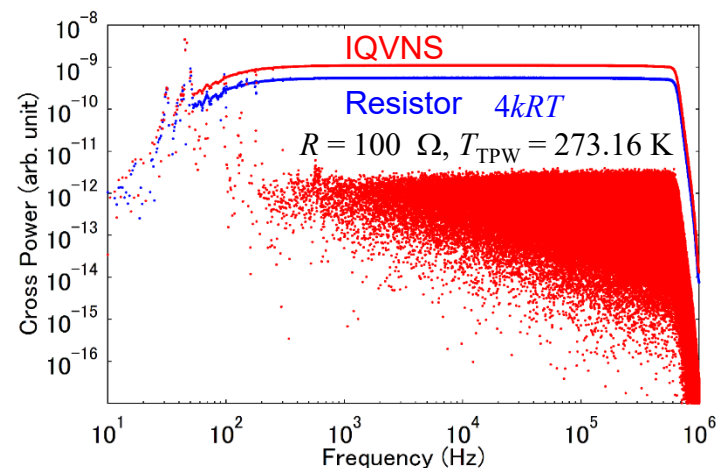
JJA: Josephson Junction Array

NMIJのJNT: 集積型 QVNS

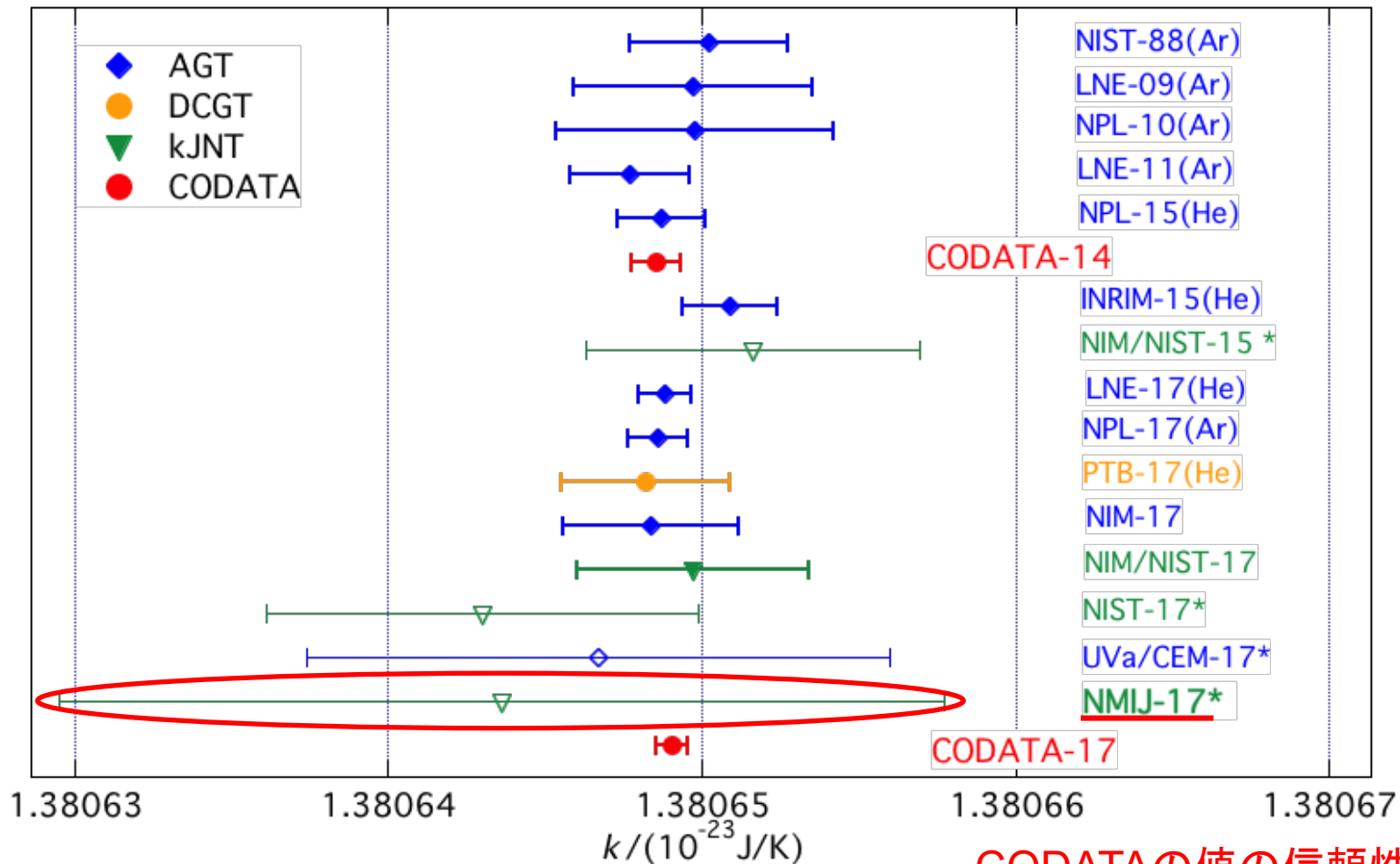
- 疑似雑音発生器全てを超電導ロジックで形成、クロック高速化 (10GHz)
- 5mm角のチップ上に形成することでコンパクト化、外部機器との接続が不要



パワースペクトル密度の比から
ボルツマン定数 k を求める



各国一次温度計による ボルツマン定数の測定



CODATAの値の信頼性に貢献

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

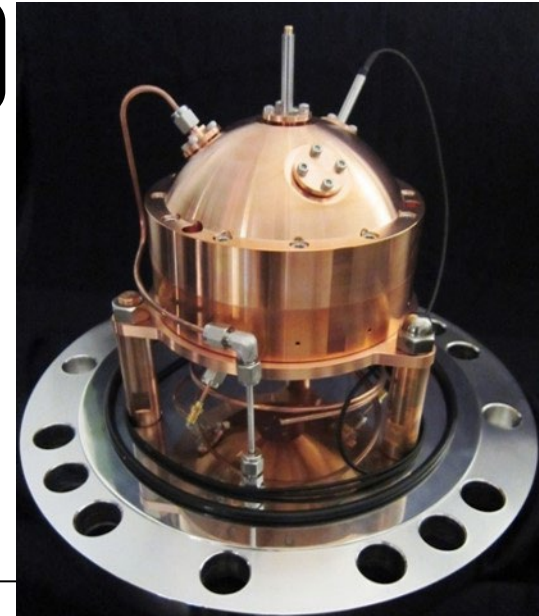
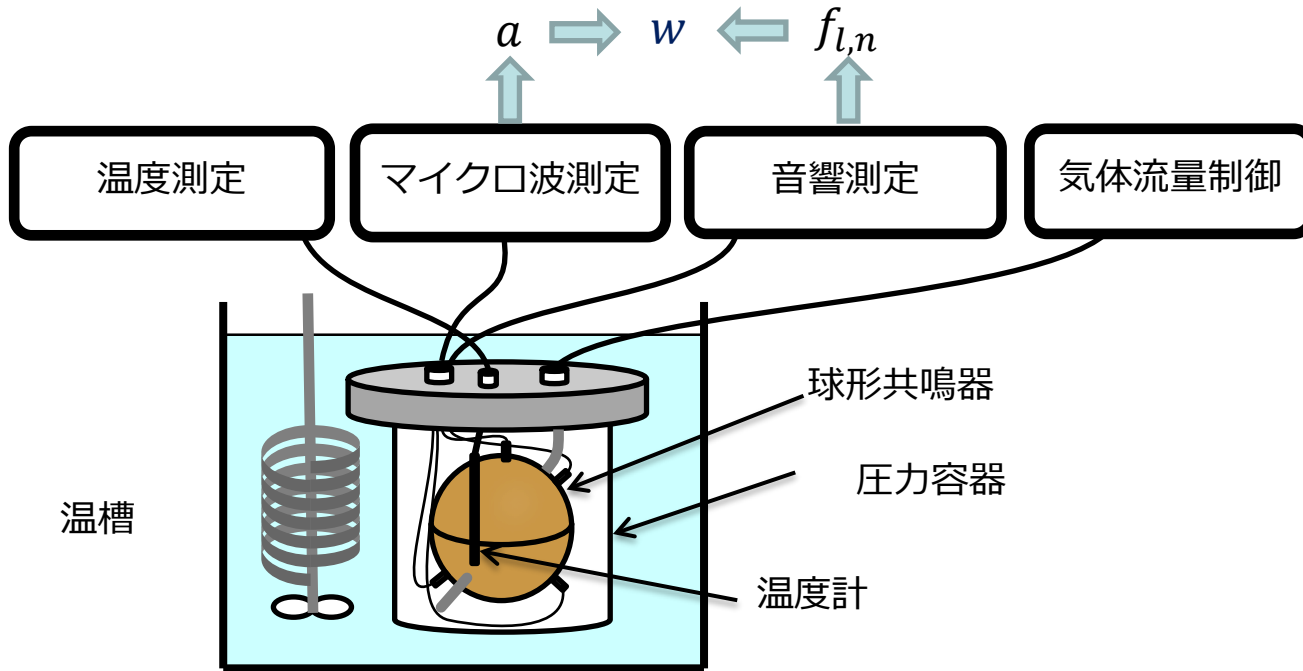
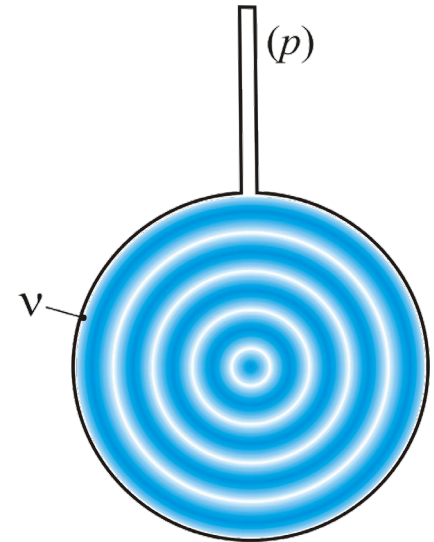
$$w_0 = (\gamma kT/m)^{\frac{1}{2}}$$

$$w(P, T) = \frac{2\pi a(P, T)}{Z_{l,n}} f_{l,n}(P, T)$$

γ : 比熱比 c_p/c_v , m : 分子質量

a : 共鳴器の有効半径

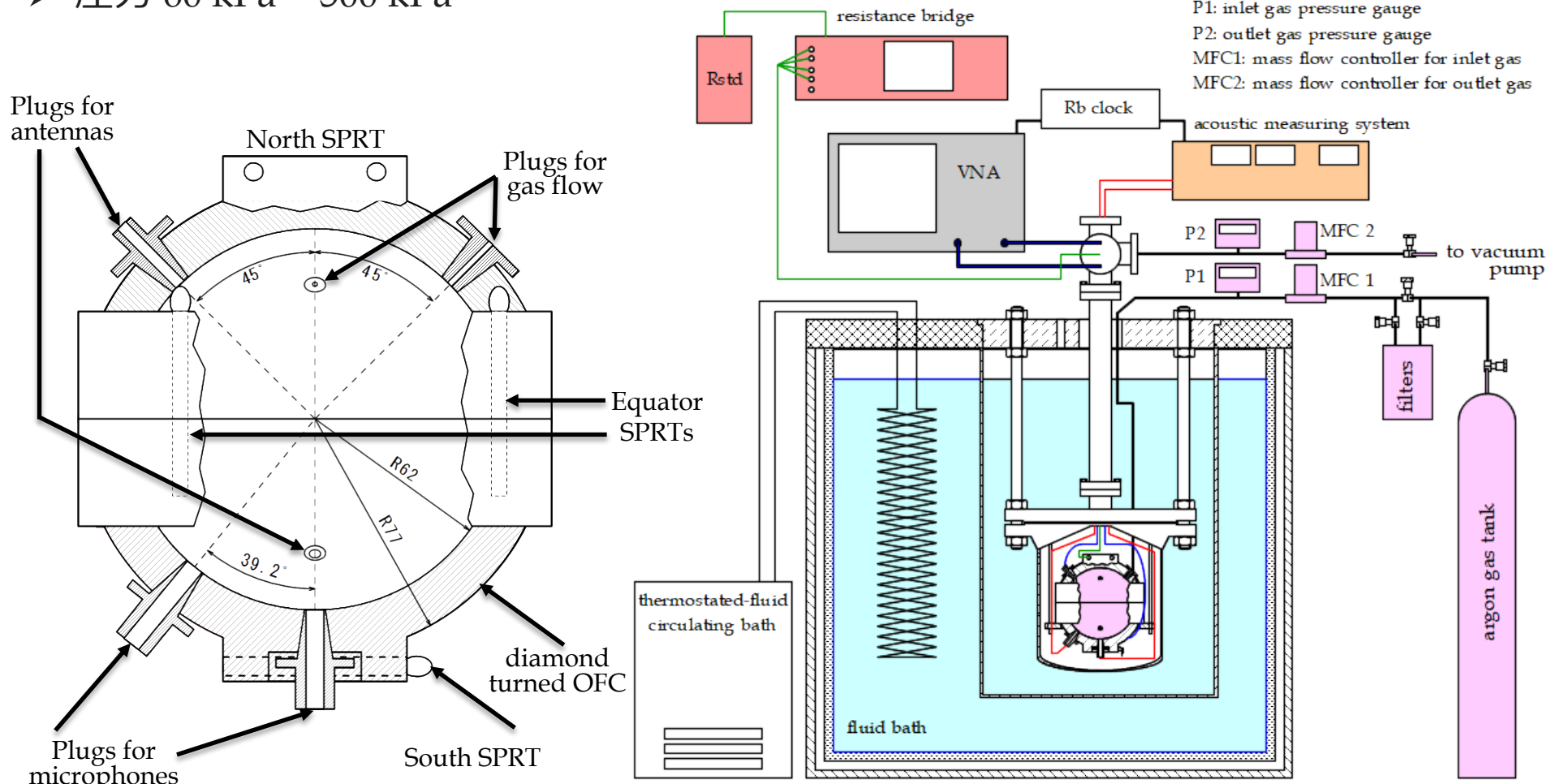
$f_{l,n}$: 共鳴周波数, $Z_{l,n}$: 固有値



NMIJのAGT測定システム

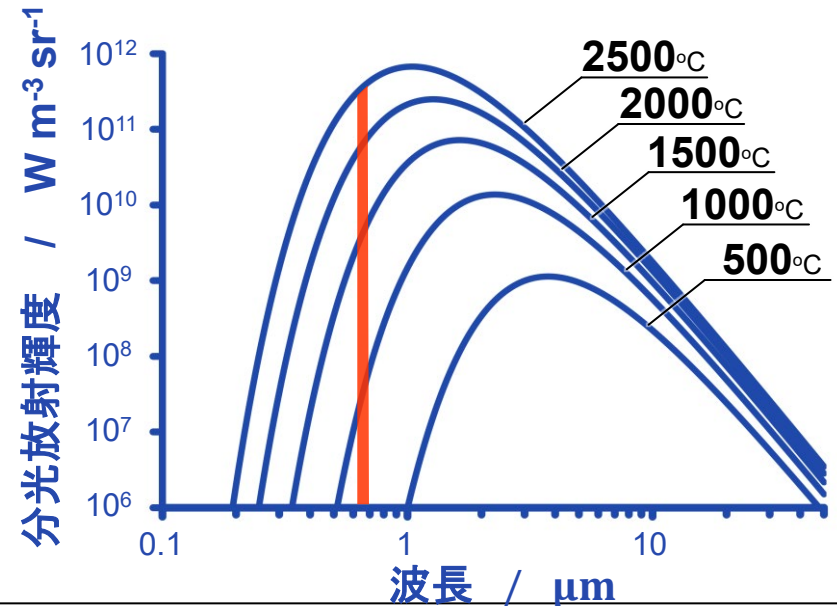
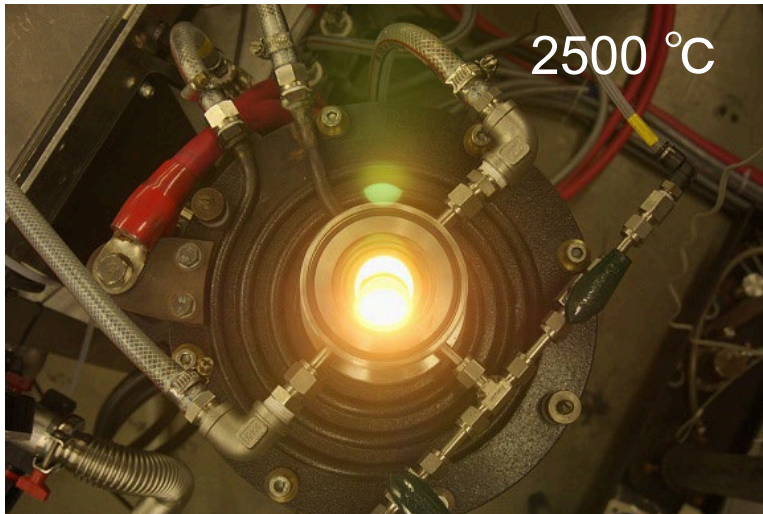
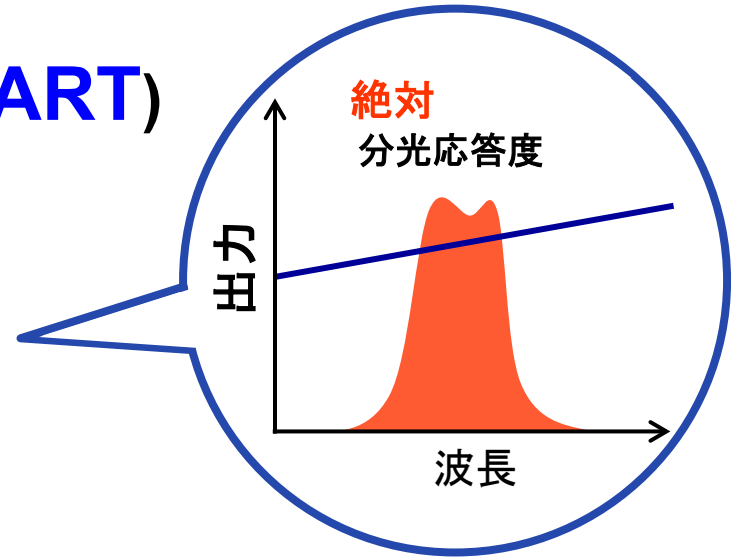
- 銅製疑似球体共鳴器 (Quasi-Spherical Resonator: QSR)
- アルゴンガスの同位体組成比を測定
- 圧力 60 kPa ~ 500 kPa

$$\frac{x^2}{a^2(1 + \epsilon_1)^2} + \frac{y^2}{a^2} + \frac{z^2}{a^2(1 + \epsilon_2)^2} = 1$$



絶対放射温度計

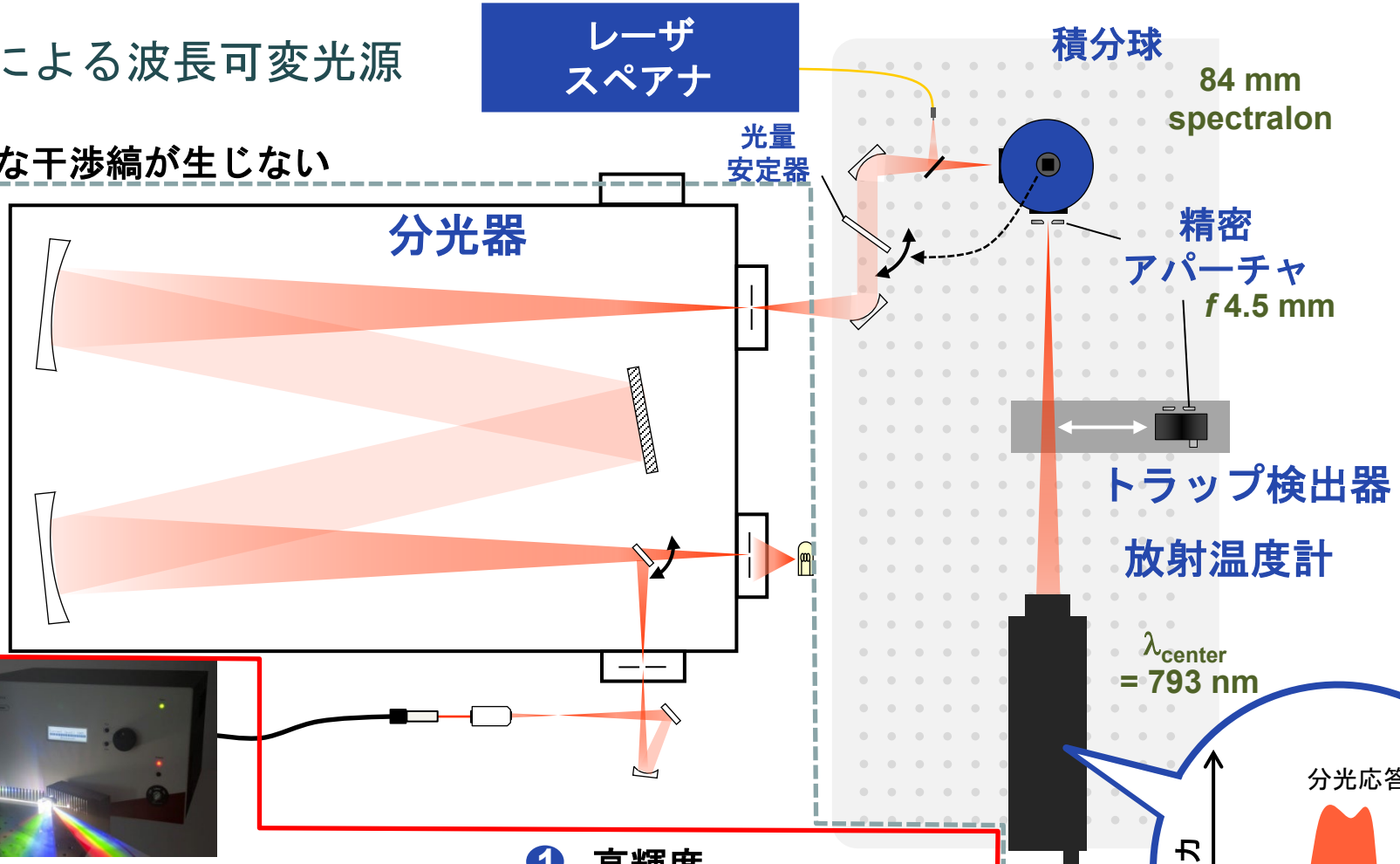
Absolute Radiation Thermometer (ART)



NMIJにおけるARTの校正

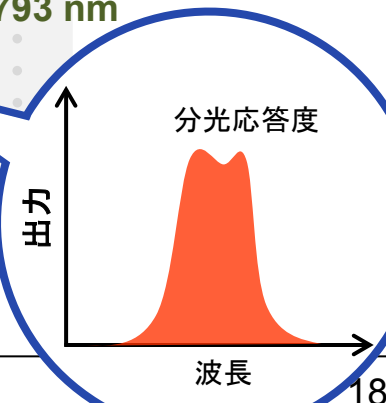
分光器による波長可変光源

● 邪魔な干渉縞が生じない



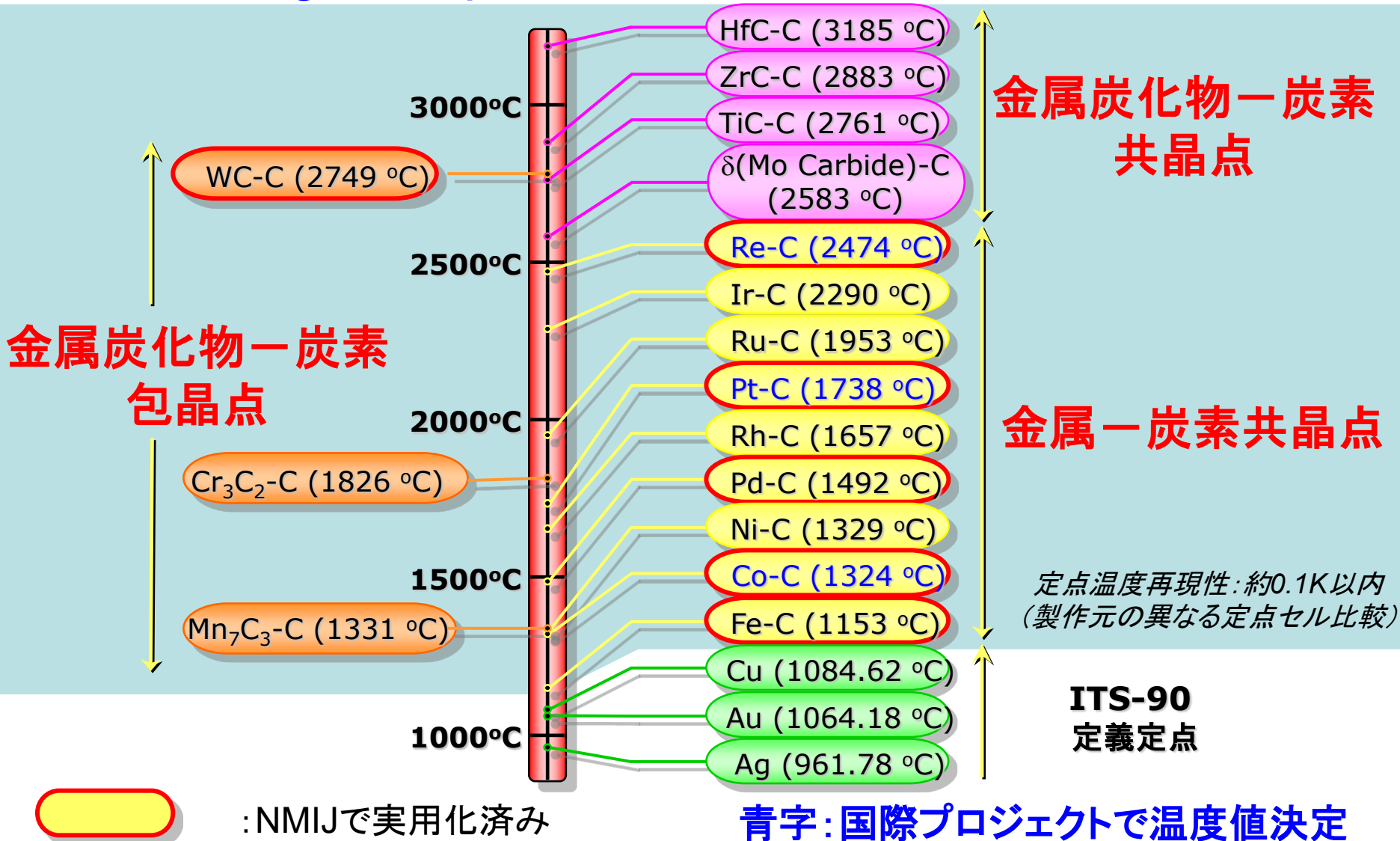
Supercontinuum (SC) 光源
480-2400 nm, 6 W, 78 MHz

- ① 高輝度
- ② 広波長域
- ③ 部分的コヒーレンス



金属-炭素系高温定点

High-temperature Fixed Points: HTFP



ARTによるHTFPの熱力学温度値決定 の国際プロジェクト

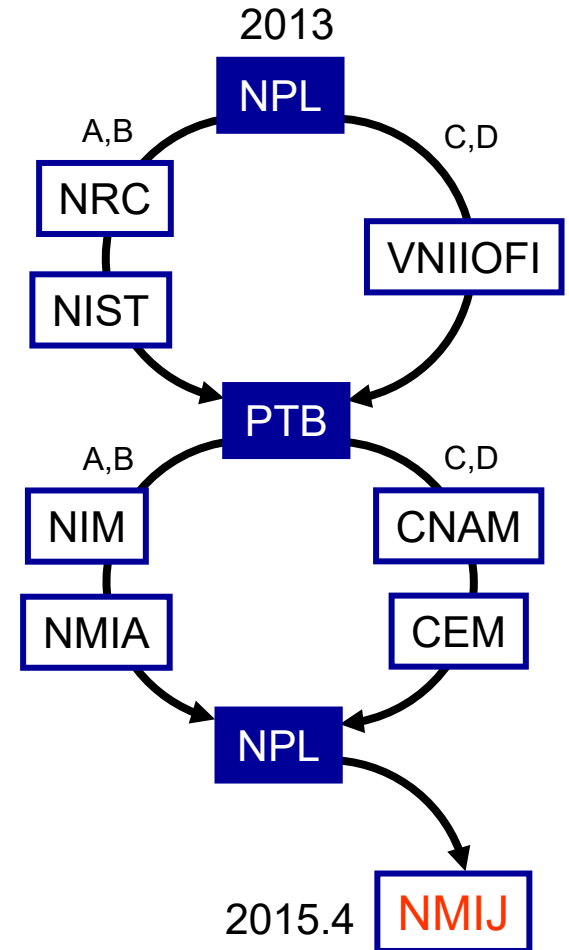
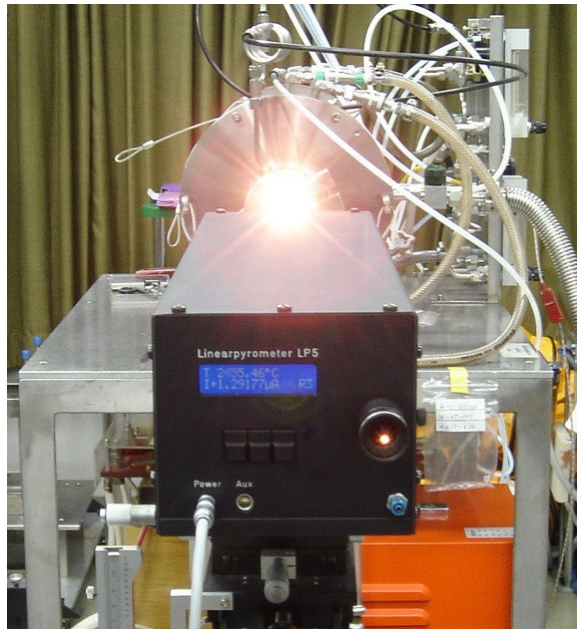
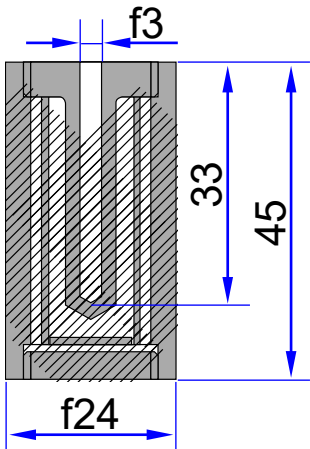
国際度量衡委員会測温諮問委員会

HTFP プログラム

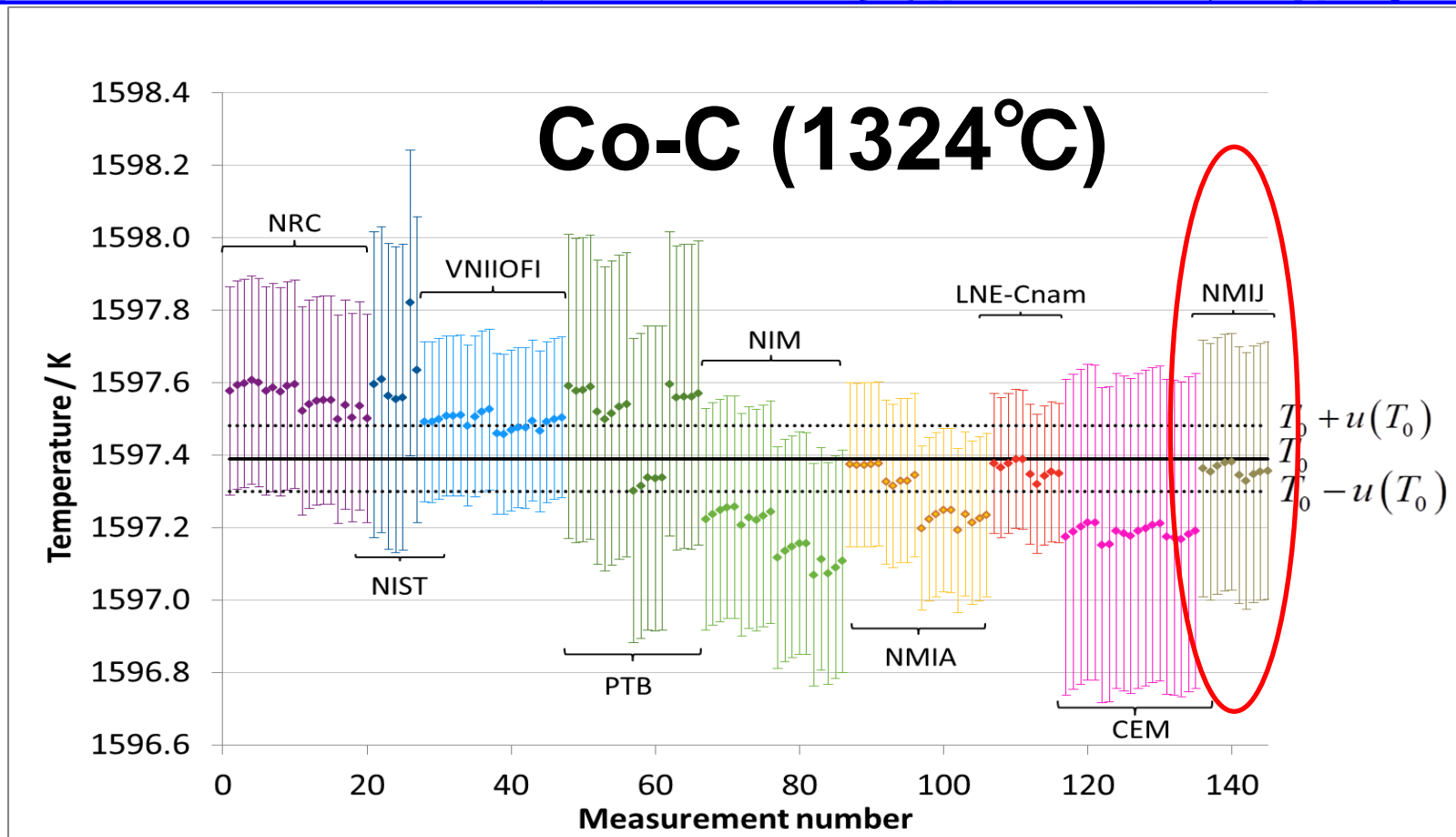
■ Re-C, Pt-C, Co-C および Cu

■ 10 機関 / 2 測定ループ

- Re-C (2474 °C) x4
- Pt-C (1738 °C) x4
- Co-C (1324 °C) x4
- Cu (1085 °C) x4



各国ARTのHTFP 熱力学温度値 T の測定結果の例



決定された T の温度値とその不確かさ →

SI単位ケルビンの新しい定義による実現方法に関するガイダンス文書
 (*Mise-en-pratique for the definition of the kelvin*) の付録書に記載

HTFPで放射温度計を校正 → 高温域で T_{90} に代わって T の測定が普及する見込み