

黒体放射による熱力学温度測定に関する調査研究

山口 祐*

(平成 23 年 11 月 30 日受理)

A survey on the thermodynamic temperature measurement
with blackbody radiation

Yu YAMAGUCHI

Abstract

While the International Temperature Scale of 1990 (ITS-90) was established as a good approximation of the thermodynamic temperature, in recent years techniques to measure thermodynamic temperature have been improved especially in high-temperature range. In 2006, the Consultative Committee for Thermometry (CCT) adopted the “*mise en pratique* for the definition of the kelvin” (*MeP-K*) including direct realization of thermodynamic temperature, and many national metrology institutes including the National Metrology Institute of Japan (NMIJ) are actively becoming involved in the development of this technique. In this paper the survey results of thermodynamic-temperature measurement approaches based on the black-body radiation in high-temperature range are reported.

1. はじめに

温度の概念は、もともとは人間の冷温感覚を基準に形成されてきたが、より普遍的な指標として、空気や液体、金属などが人間の感覚に対応して膨張収縮をするという物理的事実に基づいた温度計が用いられるようになった。その後、可逆的にサイクル動作をする熱機関（カルノーサイクル）の効率の限界が認められると、熱力学の諸法則にまとめられ、熱というエネルギーをもつ物体の指標としての熱力学温度が提案された¹⁾。すなわち、熱力学温度とは、個々の感覚や物性ではなく、物理法則に基づいて直接的に定義される温度である。

熱接触している 2 つの閉じた系が熱平衡の状態にあるとき、これらの系の温度は等しい。統計力学においては、系が定められたエネルギーでとりうる状態の数を W 、エネルギーを U 、粒子数を N 、ボルツマン定数を k_B とすると

$$\frac{1}{T} = k_B \left(\frac{\partial \ln W}{\partial U} \right)_N \quad (1)$$

というように熱力学温度 T が定義される²⁾。

熱力学温度の単位ケルビンは、273.16 K と協約された水の三重点によって定義されている。もっとも、熱力学温度を上記の定義に直結して精度よく求めることは多くの温度域において難しく、日常的な温度計測やその基準としては適さなかった。そこで、より実際的な温度の測定基準が考案され、「国際温度目盛 (ITS: International Temperature Scale)」として国際的な協約にまとめられた。そしてこの目盛で規定される温度が熱力学温度のよい近似となり、しかも容易かつ再現的に測定が行うことができるよう、温度標準技術の発展に伴い改訂が加えられてきた。

しかし近年では、国際温度目盛が高度化される一方で、熱力学温度を直接測定するさまざまな技術が発展し、より小さな不確かさが実現されてきている。また測定技術以外にも、高温域では NMIJ (National Metrology Institute of Japan: 計量標準総合センター) を中心として新たに 1000 °C 以上の高温定点群が開発されており、これらの補間による熱力学温度目盛を実現するため、各国の標準研究機関による共同プロジェクトが進められている。このように、温度標準がこれまでの国際温度目盛から、熱力学温度そのものに基づくものへ移行する可能性がより現実的なものとなる中で、NMIJ において自ら熱力学温度を決定する技術を保有することは喫緊の課題であるとい

* 計測標準研究部門 温度湿度科 放射温度標準研究室

える。

こうした現状を踏まえ、本調査研究では黒体放射に基づいた高温域での熱力学温度測定に関する技術・動向を報告する。まず放射温度測定を中心に温度標準の現状を概説した上で、狭帯域放射温度計を中心に熱力学温度測定に関する技術について述べる。さらに高温域の熱力学温度測定技術を確立する上での技術的課題を検討し、その解決のための技術的提案を行う。最後に国内トレーサビリティ制度への展開を考察すると同時に他の熱力学温度測定も含めた温度測定の今後の展開について議論する。

2. ITS-90 と NMIJ の放射温度標準の現状

本報告では「熱力学温度」と「国際温度目盛」という2つの異なる温度の尺度を取り扱う。熱力学温度はSI基本単位の一つケルビン (K) で表される物理量であり、1954年の第10回国際度量衡総会において水の三重点を基礎的な定点として選び、それに厳密に273.16 Kという温度を付与することによって熱力学温度を定義することを決定した³⁾。また水の三重点以外の温度については、例えば理想気体の法則などの熱力学的な諸法則に直結して決定される。すなわち、理想気体へ帰着されるように適切に実験条件を整え、気体の物質質量・圧力・体積など既知のパラメータを用いて、熱力学温度を求めることができる。

しかし、このような温度測定は概して装置が大がかりで、多くの測定時間を必要とし、不確かさも大きいなどの問題があった。そこでより実用的な温度の測定基準が考案され、「国際温度目盛」としてSI単位系における国際的な協約としてまとめられた。この章では現行の国際温度目盛の定義およびこれを用いた国内の放射温度標準とトレーサビリティ体系について述べる。

2.1 1990年国際温度目盛 (ITS-90)

国際温度目盛は1927年の策定以降、標準技術の進歩に伴って改正が進められており、現行の1990年国際温度目盛 (ITS-90)⁴⁾へ至っている。ITS-90はこの目盛で規定される温度が熱力学温度のよい近似となり、しかも容易かつ再現的に測定が行えるように規定されている。ITS-90ではいくつかの純物質の相平衡における温度の再現性を利用し、これを厳密な温度値 (定義定点) として協約した上で、その間の温度を定義する補間方法によって構成されている。

ITS-90における定義定点は高温側から金属の凝固点ま

たは融点、水、水銀、平衡水素等の三重点、および平衡水素、ヘリウムの蒸気圧測定によるものまで17種類の定点が規定されている⁵⁾。これらの定点の補間方法は、銀の凝固点 (1234.93 K) から平衡水素の三重点 (13.8033 K) までの温度域においては白金抵抗測温体を用い、測定温度範囲に応じて各定点における抵抗比から温度係数を決定することで定義される。また低温域ではネオンの三重点 (24.5561 K) から3.0 Kまでを定積気体温度計、5.0 Kから0.65 Kではヘリウムの蒸気圧と温度の関係式をそれぞれ利用して定義されている。さらに極低温域ではITS-90とは別に、2000年暫定低温目盛 (PLTS-2000) に基づいてヘリウム3融解圧温度計による1 Kから0.9 mKまでの温度が規定・運用されている⁶⁾。

一方で銀の凝固点以上の高温域では、黒体からの分光放射輝度に基づいて定義されている。これは黒体の分光放射輝度がプランクの放射則によって波長と温度のみによって厳密に決定することができるという原理に基づいている。ここで黒体とは外部から入射する電磁波をあらゆる波長に渡って完全に吸収する理想的な物体のことであり、分光放射輝度とは単位立体角、単位面積、単位波長あたりの光の放射強度である。具体的には、国際温度目盛の温度 T_{90} は黒体の波長 λ の分光放射輝度 $L_{\lambda}(T_{90})$ を用いて次のように定義される。

$$\frac{L_{\lambda}(T_{90})}{L_{\lambda}[T_{90}(X)]} = \frac{\exp(c_2[\lambda T_{90}(X)]^{-1}) - 1}{\exp(c_2[\lambda T_{90}]^{-1}) - 1} \quad (2)$$

ここで $T_{90}(X)$ は銀の凝固点 ($T_{90}(\text{Ag})=1234.93$ K)、金の凝固点 ($T_{90}(\text{Au})=1337.33$ K)、銅の凝固点 ($T_{90}(\text{Cu})=1357.77$ K) のいずれかの定義定点を、 c_2 は放射の第二定数 (ITS-90では $c_2=0.014388$ m·Kと定義) を表している。他の温度域における補間方法が2定点以上の温度値を参照する補間もしくは係数の与えられた関係式であるのに対し、銀点以上の高温域では1定点を用いた補外であることに注意が必要である。

2.2 NMIJにおける放射温度標準

NMIJにおける温度標準のうち、黒体放射に基づく放射温度標準は-30℃-2800℃の温度域で整備されており、黒体炉と狭帯域放射温度計 (以下、単に放射温度計と呼ぶ) によって構成されている。放射温度計は図1に示すように干渉フィルターなどを用いて特定の狭波長帯の光のみを検出する放射輝度計であり、レンズ、視野絞り、立体角絞りなどの光学系と、特定の波長のみを透過するバンドパスフィルター、検出器、信号処理部などによって構成されている。測定対象となる定点黒体炉は、放射

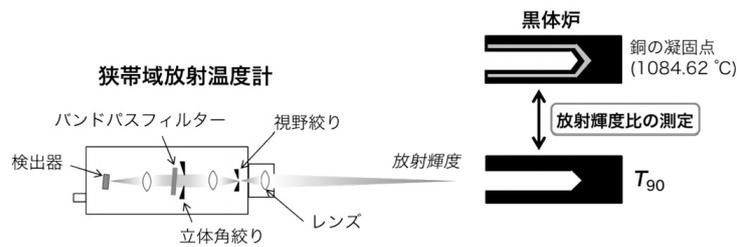


図1 放射温度計と定点黒体炉による ITS-90 の実現

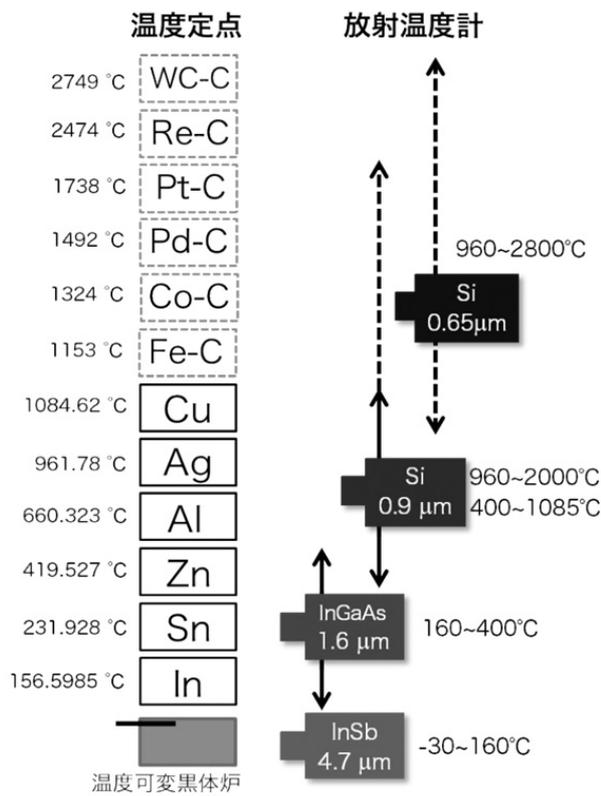


図2 NMIJにおける温度定点と放射温度計

率を1に近づけた空洞（黒体空洞）を持つ黒鉛のるつぼの中に金属を封入することで凝固点の黒体放射を実現する。

ITS-90 で定義されている銀の凝固点以上の温度域（960-2800 °C）では銅の凝固点を参照標準として、測定波長 0.65 μm および 0.9 μm の放射温度計（Si 検出器）によって温度目盛の標準が確立されている。また銀の凝固点以下においても、定義定点の補間による ITS-90 の近似方法⁷⁾に基づいて 0.9 μm の放射温度計（Si 検出器）を用いた 4 定点（銅、銀、アルミニウム、亜鉛）補間法により 400-1085 °C を、1.6 μm の放射温度計（InGaAs 検出器）による 3 定点（亜鉛、スズ、インジウム）補間法により 160-400 °C の温度標準の供給を行なっている。さらに -30-160 °C の範囲でも 4.7 μm の放射温度計（InSb 検出器）と温度可変黒体炉による低温域の放射温度標準の供給を行なっている（図2）。

また ITS-90 の定義定点以外にも、金属 - 炭素共晶点および金属炭化物 - 炭素包晶点による標準供給を行なっている。これは NMIJ を中心に新たに開発された 1100 °C 以上の高温定点である^{8),9),10)}（図3）。ITS-90 の作成時において、最も高温の定点は銅の凝固点（1084.62 °C）であっ

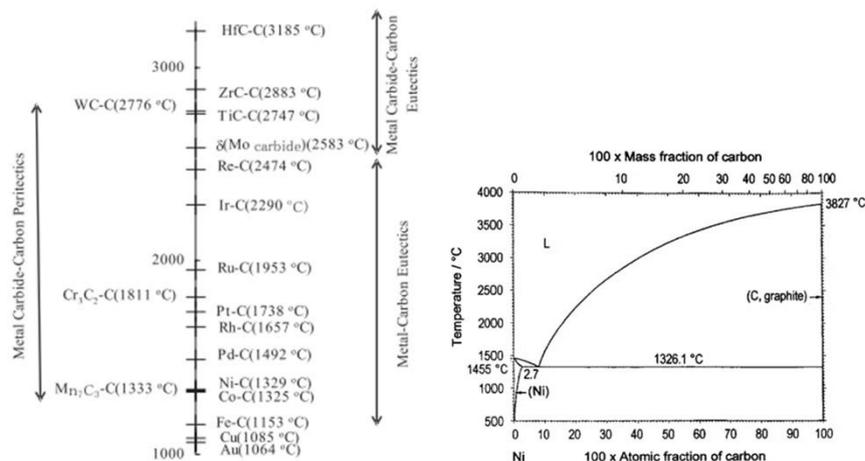


図3 金属 - 炭素共晶点・包晶点による高温定点¹⁰⁾と Ni-C 系の相図⁸⁾

たが、金属と炭素の共晶系における共晶点または包晶点における温度プラトーを利用することにより、温度定点の数、温度域が飛躍的に拡大した。その再現性は2500℃以上においても数十mK程度と非常に高い¹⁰⁾。

放射温度のトレーサビリティの一例として、960℃以上の温度域におけるJCSSトレーサビリティの校正体系を図4に示す。銅の定点黒体炉を特定標準器とし、これを用いて指定校正機関（JEMIC：日本電気計器検定所）の保有する特定副標準器である0.65μmおよび0.9μmの放射温度計を2000℃まで校正を行なっている。さらに指定校正機関が比較黒体炉を比較器として用いて認定事業者の放射温度計を、同様に校正事業者がユーザーの放射温度計を校正する体制となっている。不確かさに関しては放射温度計や定点黒体炉ごとに規定されており、例えば0.65μmの放射温度計の2000℃での不確かさは、NMIJにおいて1.0Kである。

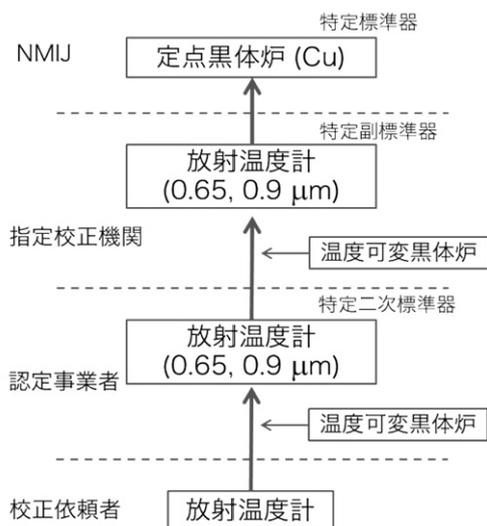


図4 960℃以上の放射温度のJCSSトレーサビリティ体系

3. 熱力学温度と高温域放射温度測定の実現

ITS-90が作成された際には、定積気体温度計により測定されたアルミニウムの凝固点¹¹⁾の温度値などに基づいて、放射温度計による輝度比の測定によって銀、金、銅の凝固点の温度は求められた^{12),13),14)}。しかし、これらの定点のITS-90における温度値は必ずしも最新の技術により測定された熱力学温度と一致せず、その差は水の三重点から離れるにつれて大きくなる傾向にあると考えられている¹⁵⁾。

その後、放射温度計による絶対測定技術の発展や1000℃以上の定点の開発により、高温域においては、より熱力学温度との差が小さい次期ITSを実現することが技術

的に可能になりつつある。しかし、産業界はITS-90に特化した装置を多く保有するため、ITS改正に伴い、これらの装置を修正・代替するデメリットが、温度標準の高度化といったメリットよりも大きくなる可能性がある。そのため、国際度量衡委員会のもとにある測温諮問委員会(CCT: Consultative Committee for Thermometry)は、当面は新たな国際温度目盛を作成しないことを決定した¹⁶⁾。その一方でCCTにより、国際温度目盛とは別に、ケルビンの定義に基づいた熱力学温度標準の実現方法(MeP-K: *Mise en Pratique for the definition of the Kelvin*)が取りまとめられ、今後さらに改定されていくことが確認された¹⁷⁾。本章ではこの新しい熱力学温度標準に関する文書と、それに伴う高温域の放射温度測定の国際的な展開について述べる。

3.1 MeP-K

MeP-Kは前述のように、近年の熱力学温度測定技術の発展を踏まえ、ケルビンの定義に基づいた熱力学温度標準を実現するための文書である。CCTの策定した2006年版のMeP-Kにはその具体的な手法については記述されていないが¹⁷⁾、2005年に行われたCCTの勧告では、MeP-Kには熱力学温度の直接的な決定方法が記述されると同時に、現行のITS-90およびPLTS-2000とその実現に必要な付加文書を含み、それぞれの熱力学温度との差と不確かさの評価を将来的に盛り込むということが示されている¹⁸⁾。

MeP-Kには今後、他の温度計による校正なしに直接熱力学温度を測定できる温度計（一次温度計）が記述されることが期待される。すなわち、気体温度計（定積気体温度計、音速気体温度計、誘電率気体温度計）および熱雑音温度計、放射温度計などが熱力学温度標準の実現方法として見込まれている。これらの一次温度計については次節において詳説する。ただし全放射温度計については測定時間が長く、測定自体も難しいことからMeP-Kには含まれない見込みである¹⁶⁾。一方で狭帯域放射温度計に関しては、第4章で述べる極低温放射計による絶対測定に加えて、次節で述べる高温定点の補間によって熱力学温度標準を実現する手法も検討されている。

3.2 熱力学温度測定法

前述のように熱力学温度は、熱力学に関係する物理法則に対して、適切な実験条件と温度以外の既知で温度依存性のないパラメータによって測定することができる。本章ではMeP-Kに記述される見込みのものを含め、熱力学温度を直接測定することができる温度計の内、絶対

放射測定以外の代表的なものについて、その原理と適応範囲、不確かさについて述べる。

3.2.1 定積気体温度計 (Constant Gas Thermometer)

気体温度計は理想気体の性質についての関係を利用した温度計であり、定積気体温度計、音速気体温度計、誘電率気体温度計の3種類について現在研究が進められている。いずれの温度計においても、他のパラメータを密度（圧力）の関数として測定し、適切にビリアル級数展開された関係式を用いて密度（圧力）が0の状態に外挿することで、理想気体の状態を推定することができる¹⁹⁾。定積気体温度計は理想気体の状態方程式

$$pV = nRT \quad (3)$$

に基づいている。ここで p は圧力、 V は体積、 n は物質質量、 R は気体定数をそれぞれ意味する。有限の圧力と密度においては、実在気体の振る舞いはビリアル係数を用いて記述される。

$$pV = nRT \left(1 + \frac{B(T)}{V_m} + \frac{C(T)}{V_m^2} + \dots \right) \quad (4)$$

ここで $B(T)$ 、 $C(T)$ はそれぞれ密度の第二、第三ビリアル係数であり、また V_m は気体のモル体積を表す。理想気体への外挿を行うためには圧力、温度、体積のいずれかを一定にする必要があるが、このうち体積を一定にする定積気体温度計が最も不確かさが小さい。

熱力学温度を測定するための定積気体温度計には絶対測定を行うもの²⁰⁾と相対測定を行うもの²⁰⁾²³⁾がある。前者では、未知の温度 T に置かれた定積バルブ中の気体の量を増やし、その圧力を変化させる。そして pV/nR を $1/V_m$ の関数としてプロットすることで、その切片から温度 T を求めることができる。このとき、ビリアル定数が既知である必要はなく、実験値に対してフィッティングすることによって0気圧における外挿値が得られる。

一方で相対測定を行う定積気体温度計は、ある既知の熱力学温度 T_1 に対して同じ物質質量の気体の圧力を比較する温度計である。定積気体温度計の測定範囲は1 K 以下から933 K まで報告されており、その不確かさは2.6 K では0.2 mK であるが、室温では数 mK、660 °C では約10 mK 程度と推定されている ($k = 1$)¹¹⁾²⁰⁾²²⁾。ITS-90 の作成においては2.6-273 K での熱力学温度の推定と0-660 °C での目盛の評価に貢献した。さらに3.0-24.5561 K では補間法によりITS-90 の補間方法として用いられている。

3.2.2 音速気体温度計 (Acoustic Gas Thermometer)

音速気体温度計は、気体容器に対して共鳴する周波数を用いて、温度の関数である気体の音速を求める温度計であり、水の三重点における測定としては現在最も小さな不確かさが報告されている²⁴⁾。理想気体における音速 c_0 と熱力学温度 T の関係は比熱比 $\gamma (=C_p/C_v)$ およびモル質量 M を用いて次のように表される。

$$c_0 = \left(\frac{\gamma RT}{M} \right)^{1/2} \quad (5)$$

これを圧力に対してビリアル級数展開を行うことで実在気体における音速 c' の関係が求まる。

$$c'^2 = c_0^2 (1 + \alpha p + \beta p^2 + \dots) \quad (6)$$

ここで α および β はそれぞれ音速の第二、第三ビリアル係数である。ここで式5にみられる R 、 M は熱力学温度の不確かさに直接影響してくるが、水の三重点における測定によってこれらの影響をキャンセルすることができる。つまり、水の三重点における温度 T_{TPW} と測定する温度 T において圧力が0の場合を外挿により求めることで式6から熱力学温度が計算できる。

音速気体温度計の形状には2つあり、一つはシリンダー状の共鳴器で、周波数が固定で距離を変化させる方式²⁵⁾²⁶⁾と周波数を変化させる方式²⁷⁾がある。もう一つは擬球状の共鳴器のタイプで、距離を固定して周波数を変化させるものである²⁴⁾²⁸⁾³¹⁾(図5)。後者の方式によって現在LNE-CNAM (Laboratoire National d'Essais -

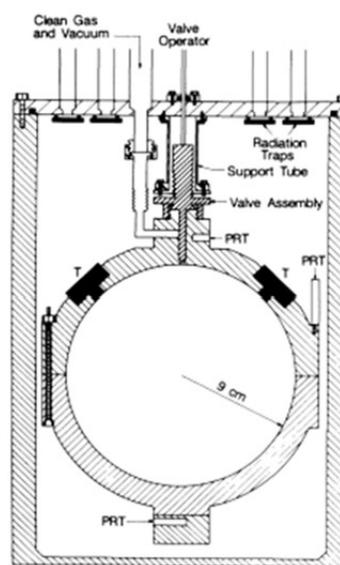


図5 音速気体温度計²⁸⁾

Conservatoire national des arts et métiers: フランス国立試験所で最も小さな不確かさが報告されている。定積気体温度計と比べ、音速気体温度計はより高い温度域で小さな不確かさが実現できるという特徴を持つため、水の三重点における音速の測定によりボルツマン定数を厳密に求める研究も進められている^{24),28)}。測定範囲は90-300 K²⁹⁾、さらに273-800 K³²⁾にまで広げられており、ガリウム、インジウム、スズなどのITS-90における定義定点と熱力学温度との差($T-T_0$)が調べられている³⁰⁾。熱力学温度測定の不確かさは各定点でそれぞれ0.6 mK, 1.5 mK, 3.0 mK ($k=1$)と報告されている。

3.2.3 誘電率気体温度計 (Dielectric Constant Gas Thermometer)

誘電率気体温度計は圧力を変化させながら気体の誘電率を測定し、熱力学温度を求める温度計である³³⁾。理想気体の誘電率 ϵ は真空の誘電率 ϵ_0 、分極率 α_0 を用いて

$$\epsilon = \epsilon_0 + \alpha_0 n/V \quad (7)$$

と表される。ここで理想気体の状態方程式(式3)から式7を書き換えると次のように記述できる。

$$p = k_B T (\epsilon - \epsilon_0) / \alpha_0 \quad (8)$$

誘電率気体温度計の利点は、定積気体温度計と異なり、気体の密度を求める必要がないことである。すなわち、圧力を正確に測定しておけば、吸着等の影響を考慮せずに自由に気体の出し入れを行うことができる。誘電率気体温度計によって熱力学温度を測定するには予め第一原理計算で気体の分極率を求めておく必要がある。例えばヘリウムの分極率は特に小さな不確かさ(10^{-6})で求められている³⁴⁾。

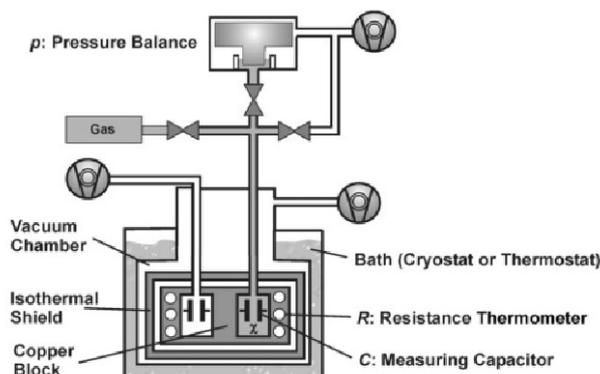


図6 誘電率気体温度計³⁶⁾

実在気体の場合は Clausius-Mossotti の式とビリアル係数($B(T)$: 第二ビリアル係数, $C(T)$: 第三ビリアル係数)を用いて次のように表される。

$$p \approx \frac{\chi}{(3A_\epsilon/RT) + \kappa_{\text{eff}}} \left[1 + \frac{B(T)}{3A_\epsilon} \chi + \frac{C(T)}{(3A_\epsilon)^2} \chi^2 + \dots \right] \quad (9)$$

ここで $\chi (= \epsilon / \epsilon_0 - 1)$ は誘電感受率, $A_\epsilon (= R\alpha_0/3\epsilon_0 k)$ は分子の分極率, κ_{eff} はコンデンサの有効圧縮率を表す。温度を保ったまま圧力を変化させていき、電気容量の相対変化をプロットすることで0 Paにおける外挿値が求まり、 $3A_\epsilon/RT$ が得られる。誘電率気体温度計は主にPTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt: ドイツ物理工学研究所)で研究が進められており、 ^3He , ^4He , Neを用いて2.5-36 Kの温度範囲において熱力学温度値が報告されている³⁵⁾。この温度範囲における不確かさは0.3-0.5 mK程度($k=1$)である。また誘電率気体温度計についても、水の三重点からボルツマン定数を求める試みが行われているが、 9.2×10^{-6} ($k=1$)の不確かさは音速気体温度計(1.24×10^{-6} ($k=1$)³⁶⁾)と比べると大きな値となっている。

3.2.4 熱雑音温度計 (Noise Thermometer)

雑音温度計は抵抗内の電子の不規則な熱振動によって生じる雑音(熱雑音)を利用している。熱雑音の電圧は温度の関数になるという関係がある(ナイキストの定理³⁷⁾)。

$$\langle U^2 \rangle = 4k_B TR \Delta f \quad (10)$$

ここで $\langle U^2 \rangle$ は熱雑音の電圧の不偏分散, R は抵抗, Δf は帯域幅を表している。熱雑音温度計は非常に小さな電圧の変化を測定する必要があり、帯域幅の変動や増幅器のゲインなどの影響を回避するために、スイッチ式デジタル入力相關方式が開発されている³⁸⁾。さらに、近年ではNIST (National Institute of Standards and Technology: 米国立標準技術研究所)を中心に、これに参照電圧としてジョセフソン電圧標準を導入した方式が開発されている^{39),40)}。この方式を用いて水およびガリウムの三重点の温度の熱雑音電圧の測定がなされており、 4×10^{-4} 程度の相対不確かさ($k=1$)が報告されている⁴⁰⁾。またPTBでは1300 °C以上の高温域での適応が試みられており⁴¹⁾、1300 °Cで0.31 K, 1450 °Cで0.17 Kの不確かさ($k=1$)が報告されている。

その他の雑音を利用した方式として、微小な電氣的信

号を検出するために SQUID (Superconducting QUantum Interference Device) による方式があり, 1 K 以下の極低温域への応用が進められている^{42),43)}. またジョセフソン接合による方式によっても極低温測定が試みられている^{44),45)}. 前者では 300 μ K, 後者では 1 mK までの測定が報告されており, その不確かさはともに 1 mK において 1% 程度の相対不確かさ ($k=1$) である.

3.2.5 全放射温度計 (Total Radiation Thermometer)

放射温度計は黒体の熱放射を測定することにより温度を測定する温度計である. これは黒体放射の分光放射輝度 L が波長 λ と温度 T のみによって決まることを利用している (プランクの放射則⁴⁶⁾). プランクの放射則は次のように記述される.

$$L_{\lambda}(T) = \frac{2c^2h}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{ch}{k_B\lambda T}\right) - 1} \quad (11)$$

ここで c は真空中の光速, h はプランク定数, k_B はボル

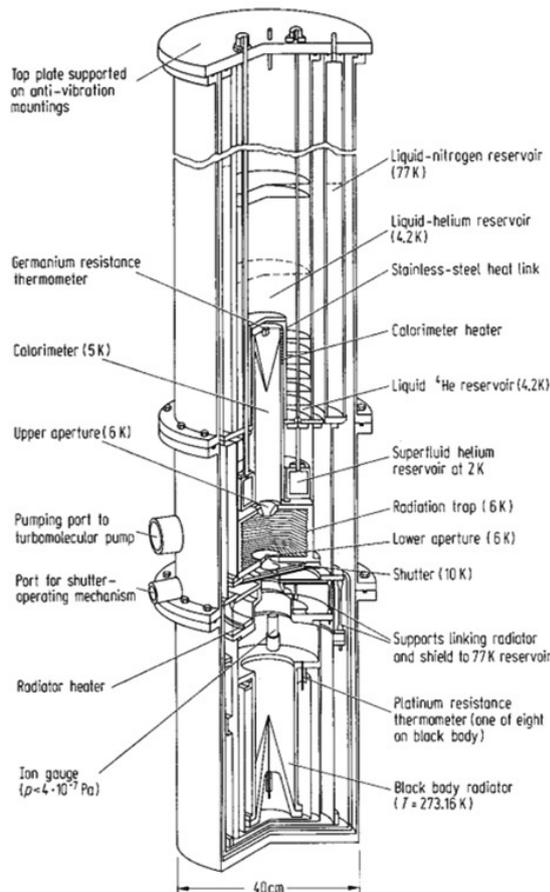


図7 全放射温度計⁴⁸⁾

ツマン定数をそれぞれ表している. 式 (11) の分光放射輝度を, 平面放射源からの放射発散度を波長について積分すると, 黒体の全放射発散度 $M(T)$ が次のように求まる.

$$M(T) = \frac{2\pi^5 k_B^4}{15h^3 c^2} T^4 = \sigma T^4 \quad (12)$$

ここで σ はステファン-ボルツマン定数である. 実際にはアパーチャーを用いて, ある立体角あたりの放射発散度 $M'(T)$ を水の三重点 (T_{TPW}) とあわせて測定することで, 熱力学温度を求めることができる.

$$\frac{M(T)}{M(T_{TPW})} = \frac{M'(T)}{M'(T_{TPW})} = \left(\frac{T}{T_{TPW}}\right)^4 \quad (13)$$

放射発散度の絶対値を測定するには電力置換型の極低温放射計が用いられる. 極低温放射計は光を液体ヘリウム温度の測定キャビティに吸収させ, 発生するジュール熱をヒーターにより電力相当量に変換することで高精度に光のエネルギーを測定する装置である. 極低温放射計は NPL (National Physical Laboratory: 英国立物理研究所) によって開発が進められ⁴⁷⁾, これを利用して 143 K から 373 K までの熱力学温度測定が行われている^{48),49)}. この温度範囲においては 1.3-2.5 mK の不確かさ ($k=1$) が報告されている.

3.2.6 高温定点の補間による熱力学温度測定

2.2 で述べた通り, 金属-炭素系高温定点の再現性は極めて高く, これらの定点の温度値が求まれば, 現在銅の凝固点以下の温度域で行われているように, 定点補間による放射温度測定が可能となる. これはプランクの法則 (式 11) と放射温度計の特性から導かれる佐久間-服部方程式を用いて説明される^{50),51)}.

$$V = \frac{C}{\exp\left(\frac{c_2}{AT+B}\right) - 1} \quad (14)$$

ここで V は放射温度計の信号, A, B, C はそれぞれ放射温度計固有のパラメータである.

予め高温定点の熱力学温度値が求まっていれば, それらを測定することにより放射温度計のパラメータを決定し, 熱力学温度標準を実現することができる.

この放射温度計の定点補間による方法を実現し, MeP-K に記述するために, 高温定点の熱力学温度値を決定する国際共同プロジェクトが CCT の WG5 (Working Group 5: 放射温度作業部会) により進められている⁵²⁾. このプロジェクトには NMIJ をはじめ 11 カ国の標準研究

機関が参加しており、4つの定点セル (Cu, Co-C, Pt-C, Re-C) の熱力学温度値の測定が行われている。その作業内容は高温定点セルの長期安定性、選定、熱力学温度の測定および値の付与などに分かれ、それぞれ参加機関が分担して国際共同実験やその取りまとめを行なっている。

4. 絶対放射測定による熱力学温度測定

4.1 絶対放射測定の原理と方式

分光放射輝度による熱力学温度測定は、前述の ITS-90 における放射温度測定と同様、プランクの黒体放射則に基づいて狭帯域の放射輝度を測定するものである。ITS-90 が定義定点 (銅, 金, 銀の凝固点) との比較による相対的な輝度測定であったのに対し、熱力学温度測定では放射輝度の絶対値を直接測定する。温度 T の黒体放射源を測定したときの信号 V は次のように表される。

$$V = R_{\text{ampli}} \cdot G \cdot R_{\text{opt}} \cdot \epsilon_{\text{BB}} \int \frac{2c^2 h}{n^2 \lambda^5 (\exp(\frac{ch}{k_B n \lambda T}) - 1)} \cdot S(\lambda) d\lambda \quad (15)$$

ここで R_{ampli} は増幅器のゲイン、 G はアパーチャー等から求まる幾何学パラメータ、 R_{opt} は温度計の光学特性、 ϵ_{BB} は放射率、 n は空気の屈折率、 $S(\lambda)$ は温度計の絶対分光応答度である。熱力学温度を求めるためには、予めこれらのパラメータを厳密に決定する必要がある。

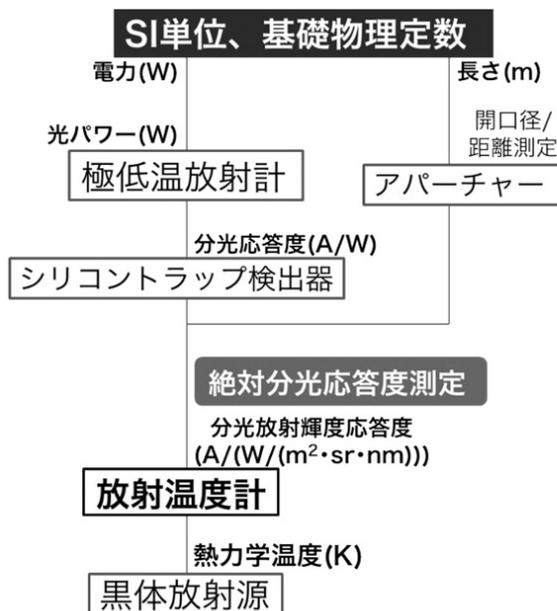


図8 絶対放射測定による熱力学温度測定のSIトレーサビリティ

このうち、最も重要となる温度計の絶対分光応答度は、極低温放射計にトレーサブルな形で絶対校正が行われる (図8)。極低温放射計は入射した光のパワーを電氣的に置換することで求めることができ、レーザーを用いることで単一波長における光パワーを測定することが可能となる。極低温放射計により校正されたトラップ検出器 (複数のシリコン検出器の間を反射させることで外部量子効率を1に近づけた検出器) を比較器とし、アパーチャーの開口径、距離とあわせて放射計の分光放射輝度に対する絶対応答度を求めることができる。

狭帯域放射温度計による熱力学温度測定には幾つかの方式がある (図9)。最も基本的な方式は、トラップ検出器と狭帯域放射計との照度の比較によって得られる (放射照度方式)。狭帯域放射計は精密に開口径が求められたアパーチャーと干渉フィルター、検出器からなる測定器であり、放射照度を測定することができる。レンズなどの集光用の光学系を持たないため、小さな黒体空洞の開口を直接測定することはできない。

これに対して放射輝度方式では放射輝度を直接測定することができるが、その絶対分光応答度を求めるにあたり、集光系をもたないトラップ検出器と直接的に比較することができない。そこで、2枚のアパーチャーを用い、その間の距離と開口径を予め求めておくことで、立体角あたりの単位である放射輝度に変換する手法をとる。このような変換を行うためには、放射輝度が一様に分布した理想的な放射面が必要となる。

この他に狭帯域放射計とレンズ、アパーチャーを組み合わせたハイブリッド方式がある。放射照度方式と同様に狭帯域放射計を絶対校正し、小さな口径の黒体空洞を測定する場合には予め光学特性を求めてあるレンズを用いるものである。

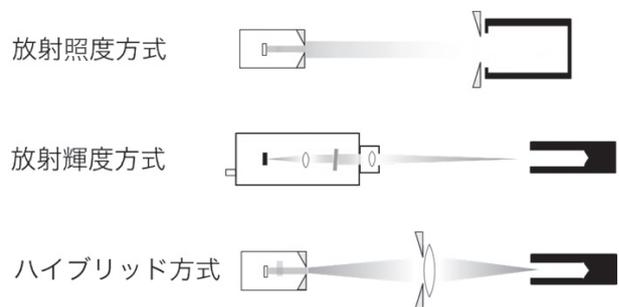


図9 絶対放射測定による熱力学温度測定の方式

4.2 各国の標準研究機関における取り組み

本節では狭帯域放射温度計を用いて熱力学温度測定技術の研究を進めている研究機関の絶対分光応答度測定と

温度定点を測定する方式について述べる。すでに熱力学温度測定技術を確立し、高温定点セルの熱力学温度値を報告している NIST (米), PTB (独), NPL (英) に加えて、中国, フランス, カナダ, オーストラリアなどの標準研究機関の取り組みを紹介する。

4.2.1 NIST

NIST は放射輝度方式を採用し、一次温度計として放射温度計 (Absolute Pyrometer 1, 測定波長 650 μm) を、その分光放射輝度応答度の校正には SIRCUS システム (Spectral Irradiance and Radiance responsivity Calibrations using Uniform Sources facility) とよばれる波長可変レーザーシステムを用いている^{53),54)} (図 10)。SIRCUS は Ti:Sapphire レーザー (680-1050 nm) とその 2-4 倍波および OPO (Optical Parametric Oscillator: 光パラメトリック発振器), さらに 415-700 nm の範囲では 5 種類の色素レーザーを組み合わせて 210 nm から約 5 μm までの波長域を連続掃引可能なレーザーシステムである⁵⁵⁾。これを積分球に導入し、シリコントラップ検出器と放射温度計の分光放射輝度応答度の比較を行なっている。シリコントラップ検出器は NIST の極低温放射計 (Primary Optical Watt Radiometer: POWR)⁵⁶⁾ より 400 nm から 920 nm までの範囲で分光応答度の校正がなされている。

NIST は現在全ての標準研究機関の中で最も小さな不

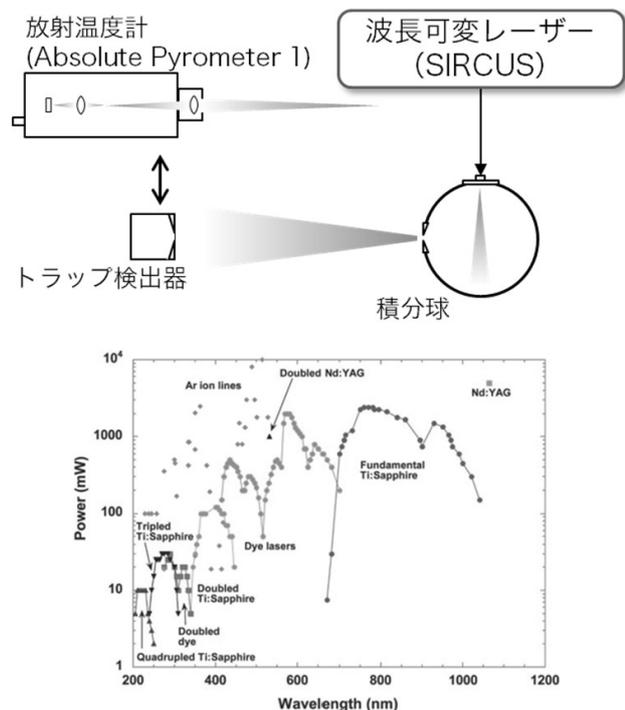


図 10 NIST の絶対分光応答度校正と SIRCUS の波長展開⁵⁵⁾

確かさを実現している。金の凝固点 (1064 °C), Co-C 共晶点 (1324 °C), Pd-C 共晶点 (1492 °C), Pt-C 共晶点 (1739 °C), Ru-C 共晶点 (1954 °C) における熱力学温度測定の不確かさはそれぞれ 0.058 K, 0.09 K, 0.11 K, 0.14 K, 0.17 K ($k=1$) であり^{54),57)}、この値は ITS-90 の実現における不確かさとほぼ同等の水準である。

4.2.2 PTB

PTB の絶対分光放射測定による熱力学温度測定の取り組みは 1990 年代から報告されており^{58),59)}、様々な方式による熱力学温度測定を試みている。その組み合わせとしては狭帯域放射計と分光器 (放射照度方式)、および放射温度計と分光器およびレーザーによる絶対校正 (放射輝度方式) を行なっている。

狭帯域放射計はレンズ等の集光部を持たないために、定点セルのような小さな黒体空洞の開口径の放射輝度を測定することは困難である。そこでまず口径の大きな比較黒体炉を用いて放射温度計 (Linear Pyrometer 3: LP3) の比較測定を行うことで熱力学温度による校正を行なっている^{60),57)} (図 11)。その不確かさは Co-C 共晶点 (1324 °C), Pd-C 共晶点 (1492 °C), Pt-C 共晶点 (1739 °C), Ru-C 共晶点 (1954 °C) でそれぞれ 0.12 K, 0.14 K, 0.17 K, 0.21 K ($k=1$) となっている。この手法による高温定点の温度測定における不確かさは NIST と同水準のものであり、また研究所間の熱力学温度値はそれぞれ不確かさの範囲内に収まっていることが報告されている^{61),62)}。しかしこの定点測定に用いた放射温度計は狭帯域放射計による校正を行なっているため、厳密には一次温度測定とは言えない。また狭帯域放射計により低温側への展開

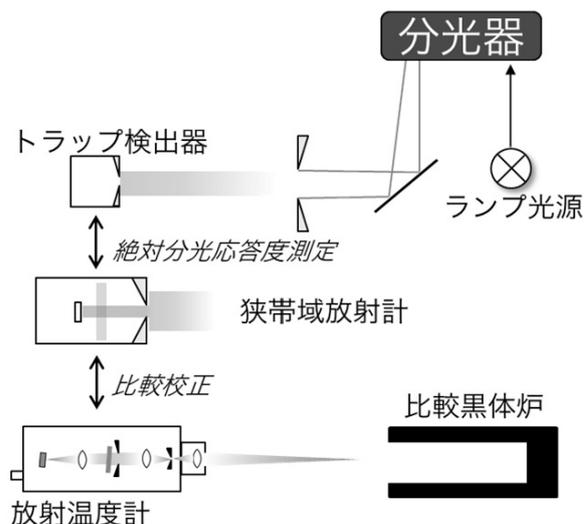


図 11 PTB における放射照度方式と放射温度計との比較

も行っており、アルミニウム（660℃）と亜鉛（419℃）の凝固点に相当する温度の熱力学温度測定を行なっている⁶³。この場合は大口径の黒体炉の温度を白金抵抗温度計によって測定し、測定する定点の温度となるように比較黒体炉を制御し、この炉の温度を分光器とトラップ検出器を用いて絶対校正された狭帯域放射計（InGaAs 検出器：測定波長 1.3 μm, 1.55 μm）で測定している。

一方、放射輝度方式においては、分光器、半導体レーザー、波長可変レーザーを積分球に導入してトラップ検出器との比較を行なっている^{64),65),66)}。しかし、いずれの場合でも積分球の空間均一性が最大の不確かさ要因となり、前述の狭帯域放射計からの比較校正の場合に比べて3倍以上大きな不確かさとなっている（5.2 参照）。

4.2.3 NPL

NPL で開発されてきた絶対放射測定的方式は狭帯域放射計によるものであり⁶⁷、PTB の場合と同様、そのままでは温度定点の黒体空洞の小さな開口径を測定することができない。そこで NPL はハイブリッド方式で定点セルの熱力学温度測定を行なっている。測定に用いるのは狭帯域放射計（測定波長 800 nm）であり、測定波長周辺を Ti:Sapphire レーザー、その外側の波長域を分光器によって絶対分光応答度の測定を行っている。そして定点セルの温度を測定する際にはその間にレンズとアパーチャーを置くことで、小さな面積の放射輝度を測定することを可能としている^{68),69)}（図 12）。この方式では、これらのレンズの透過率および面積効果（Size-of-Source Effect）の評価を別途精密に行う必要がある。NPL ではまず 2 枚

のレンズを透過した光を測定し、次に 1 枚のレンズのみで測定した差分からレンズの透過率を求めている。また面積効果については、積分球の開口径を変化させて狭帯域放射計の出力の変化を調べ、補正係数を求めている。しかしレンズの透過率測定は光源のアライメントが難しく、また面積効果については小口径のセルに対しては補正係数の不確かさが大きくなるという問題がある（それぞれ $k=1$ で 0.04%、0.063% の相対不確かさ）。また、狭帯域放射計の分光応答度の測定も、分光器によるバンド外の波長域の不確かさが大きいために、全体としても大きな不確かさ（0.062%）となっている。そのため、定点測定における不確かさは Co-C 共晶点（1324℃）、Pt-C 共晶点（1739℃）、Re-C 共晶点（1954℃）でそれぞれ 0.168 K、0.292 K、0.540 K（ $k=1$ ）と NIST や PTB の水準よりも大きくなっている⁶⁸⁾。

4.2.4 その他の標準研究機関

NIM（National Institute of Metrology: 中国計量科学研究院）では測定波長 633 nm の狭帯域放射計を作成し、絶対分光応答度の測定を行なっている⁷⁰⁾。PTB の狭帯域放射計の方式と同様に、分光されたスペクトルランプを光源とし、トラップ検出器との応答度の比較測定を行なっている。その狭帯域放射計の分光応答度の不確かさは 0.063%（ $k=1$ ）である。

LNE-CNAM（フランス）では Ti:Sapphire レーザーを用いた放射輝度方式を採用し、実際の温度値の報告はないものの、銅の凝固点で 0.11 K（ $k=1$ ）の不確かさを見込めると報告している⁷¹⁾。

また NRC（National Research Council of Canada: カナダ国立研究機構）でも同様にしてランプ光源を用いて狭帯域放射計を絶対校正し、その値を放射温度計（LP3、測定波長 650 nm）に口径の大きい高温黒体炉における比較測定で移すこと熱力学温度に基づいた校正を行なっている。その不確かさは 1597 K で 0.18℃（ $k=1$ ）と報告されている⁷²⁾。また TiC-C 共晶点（2760℃）では実際に定点セルの測定を行っており、その不確かさは狭帯域放射計で 2.1 K、LP3 で 0.78 K（ $k=1$ ）であるとしている⁷³⁾。

一方 NMIA（National Measurement Institute of Australia: オーストラリア国立計測研究所）では他の標準研究機関とは異なり、分光視感効率に基づいた光度計を用い、黒体の放射輝度ではなく輝度（luminance）を測定することで熱力学温度を測定する試みを行なっている⁷⁴⁾。狭帯域放射温度計ではないが、温度測定の原理は同様のものなのでここで紹介する。まず光度計を水銀ランプの輝線（546 nm）でトラップ検出器との絶対値の比較を行い、

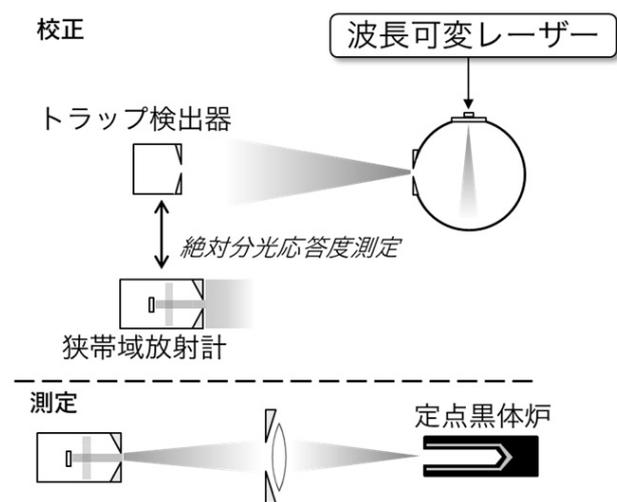


図 12 PL における狭帯域放射計の絶対校正と定点セルの測定方法

さらにランプを用いて相対的な分光応答度を測定することで絶対分光応答度をもとめる。この光度計により測定される絶対照度の値を標準電球へと移し、アパーチャーと光度計を組み合わせた輝度計を校正する光源とする。このように絶対校正された輝度計によって最終的に黒体炉の熱力学温度を測定することができる。その不確かさは0.11% ($k=1$)と見積もられており、これは1700℃において0.15 Kに相当する。

5. NMIJにおける熱力学温度測定の課題と展望

2.2で述べたように、NMIJは1100℃以上の高温定点群の標準供給を行っており、これらの熱力学温度値を小さな不確かさで決定することは高温域の温度標準の高度化に直接寄与する。そのため、熱力学温度測定技術の開発には、高温定点セルの黒体空洞の小さな開口径における放射輝度を小さな不確かさで測定する方式が求められることが望ましい。4.2でみたように、最終的にこのような黒体空洞の熱力学温度を測定する手法は以下の3つが考えられる。

- ① 絶対校正を行った放射温度計 (NIST, PTB, LNE-CNAM)
- ② 狭帯域放射計により比較校正された放射温度計 (PTB, NRC)
- ③ レンズを組み合わせた狭帯域放射計 (NPL)

狭帯域放射計(②および③)は放射照度を測定するため、トラップ検出器と直接比較ができ、絶対校正が比較的容易である。その反面、4.2で述べたように、放射輝度を測定するには比較校正やレンズの透過率、面積効果などが大きな不確かさ要因となりうることを考慮すべきである。このような測定時における放射照度-放射輝度変換の不確かさを低減する手段がない中では、絶対校正された放射温度計で直接定点セルの測定が可能な①の方法が黒体放射源の熱力学温度を決定する上では最も妥当な方法であると考えられる。

そこで本章では、①の放射温度計の絶対校正について、光源に波長可変レーザーと分光器を用いる2つの方式について検討し、それぞれの不確かさの目標と課題について議論する。さらにこれらの方式によって測定技術を確立した後のトレーサビリティへの適用や熱力学温度測定の研究の展望を述べる。

5.1 波長可変レーザー方式

波長可変レーザーを用いた放射温度計の絶対分光応答度測定はNIST(4.2.1参照)と同様の手法となる。NMIJ

の光放射標準研究室では極低温放射計を用いたシリコントラップ検出器の分光応答度の校正を行っており、レーザー波長点における高精度の分光応答度測定の不確かさは0.020% ($k=1$)である。そしてTi:Sapphireレーザーを光源として用いることによって、その発振波長帯域(約700-950 nm)でシリコントラップ検出器と放射温度計(LP5: Linear Pyrometer 5, 測定波長800 nm)の絶対分光応答度の比較を行う予定である。

ここで表1に金の凝固点の熱力学温度測定におけるNISTの不確かさとNMIJにおける不確かさの目標値を合わせて示す。トラップ検出器の応答度、アパーチャーの開口径、距離はすでにNMIJの光放射標準研究室において実現されている不確かさである。また、分光応答度の短期安定性や非線形性、面積効果、プラトーの決定はITS-90において現在実現されている温度測定の不確かさを参照している。NIST、NMIJともに最大の不確かさ要因である分光応答度の短期安定性は、光路やフィルターの透過率、検出器の応答度、迷光や温度計の伸縮などによるものと考えられ、微妙な温度変化によって引き起こされる放射温度計の不確かさの累計である。積分球の輝度の均一性の不確かさを十分に小さくすることができれば、NISTと同水準の不確かさが得られると考えられる。ただし、同じ相対標準不確かさであっても温度における不確かさは測定波長に比例するため、測定波長650 nmの放射温度計を用いるNISTよりそれだけ大きな値となる。

波長可変レーザー方式における課題としては、この表の項目以外にも単色性の高いレーザー光が放射温度計の干渉フィルターやレンズの表面、検出器のカバーガラスなどで干渉を起こし、レーザーの波長掃引時に僅かな波長の違いで透過率が変化する現象が挙げられる(図13)。NISTやPTBの測定においても報告はなされているが^{53),65)}、その変動を正確に求めるために非常に細かい波長ステップでの測定を行えば補正できるとして、いずれも不確かさ要因には含まれていない。しかし、その変動幅は放射温度計の出力に対して1%以上の波長域もあるため、熱力学温度測定への影響は慎重に調べる必要があると考えられる。また、不確かさとして影響がない場合でも、絶対分光応答度測定において細かい波長ステップの測定が毎回要求される(NISTの場合0.02 nmごとに測定)など、頻繁に校正を行う場合には問題となりうる。

その解決策として第一に考えられるのが、放射温度計における干渉要因を取り除くことである。放射温度計によっては主要な波長帯域でフリッジがほとんど見られないものもあり、干渉フィルターの特性や配置、放射温度

表 1 波長可変レーザー方式による NIST⁵³⁾と NMIJ (目標値) の不確かさ表

不確かさ要素	[%]	
	NIST	NMIJ (目標値)
トラップ検出器の応答度	0.029	0.030
アパーチャーの面積	0.004	0.015
距離	0.010	0.010
積分球の空間均一性	0.025	0.025
放射温度計の短期安定性	0.056	0.051
プラトーの決定	0.005	0.010
放射率	0.010	0.010
面積効果	0.010	0.010
合成標準不確かさ (k=1)	0.072	0.069
拡張標準不確かさ (k=2)	0.144	0.138
温度の不確かさ (k=2) 金の凝固点 (1064 °C)	116 mK (0.65 μm)	137 mK (0.8 μm)

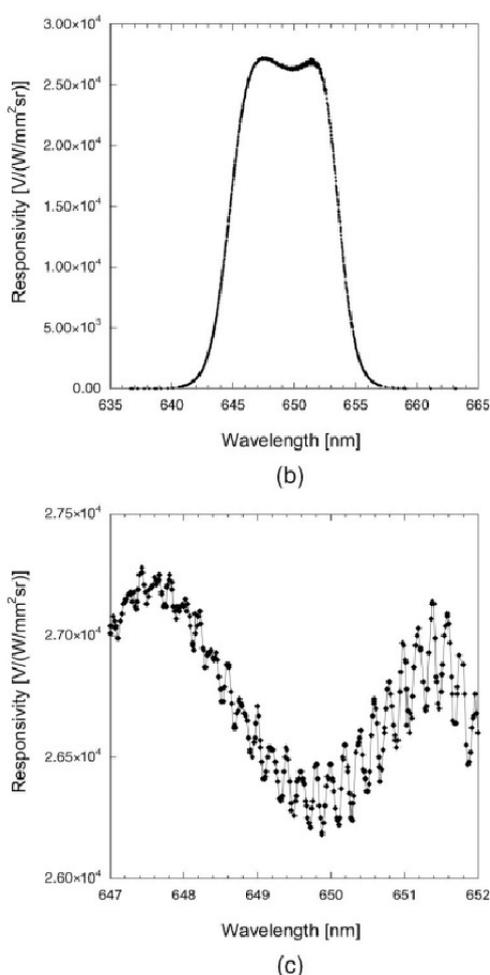
計の構造によってこれらの影響を回避できると考えられる。少なくとも放射温度計の測定波長域の周辺においてフリッジがなければ、信号出力全体に対する影響は低減することができる。フリッジの原因となる部分は、フリッジのパターンから計算される干渉箇所距離から推定することができる。例えば干渉フィルターが原因である場合には、フィルターを楔状にする⁷⁵⁾、あるいは拡散光路上に配置するなどの対策が考えられる。

また、観測されたフリッジのパターンを計算によりフリッジのない状態へと変換する手法も試みられている⁷⁶⁾。これはフリッジのある測定データに対してフーリエ変換を行い、フリッジの周期やノイズをデジタル処理によって取り除くことでスムーズな状態へと変換する。これにより、放射温度計がコヒーレンスを持たない黒体放射を測定する際の分光応答度を再現することができると考えられる。

5.2 分光器方式

ハロゲンランプなどの白色光源を分光し、相対分光応答度を測定することは、放射温度計の校正法として一般的に用いられる手法である。しかし、トラップ検出器(放射照度を測定)と放射温度計(放射輝度を測定)の比較を行うには、放射照度から放射輝度へと変換する必要があるため、一様な放射輝度面を実現する積分球が必要となる。積分球の開口における放射輝度の均一性は直径が大きくなるにつれて向上する傾向にあるが、逆にスルーポットは小さくなるという問題がある。ランプを分光して得られる光のパワーはレーザーより大幅に小さく、大きな積分球では十分な光量が得られないという問題がある。実際に PTB ではハロゲンランプに直径 50 mm の積分球を用いているため、輝度の不均一性が最大の不確かさ要因となっている^{64),65),66)}(図 14)。また、波長も水銀ランプ等の輝線によって校正されたものであり、高精度の波長標準にトレーサブルな波長計で精密に測定できる波長可変レーザー方式とは異なり、不確かさの大きな要因となっている。

分光器による方式の問題はいずれもランプ光源に起因するものであり、逆に言えばその代わりとなる高輝度光源を用いることで解決することが見込まれる。ここではそのための光源としてスーパーコンティニューム光を提案する。スーパーコンティニューム光とは、シードとなるパルスレーザーをフォトニック結晶ファイバー等に通し、非線形光学効果により連続的かつ広帯域に波長が展開された光のことである⁷⁷⁾(図 15)。NIST の測光標準グループは分光器用光源としての利用について報告してい

図 13 放射温度計の分光放射輝度応答度測定における干渉の影響⁵⁵⁾

るが⁷⁸⁾、熱力学温度測定への応用例はまだない。そこでNMIJでは分光器とスーパーコンティニューム光によって放射温度計の絶対分光応答度測定を行うことを予定している。

その利点は光がシングルモードファイバーから射出されるため、ランプと異なり100%の効率で分光器に入射

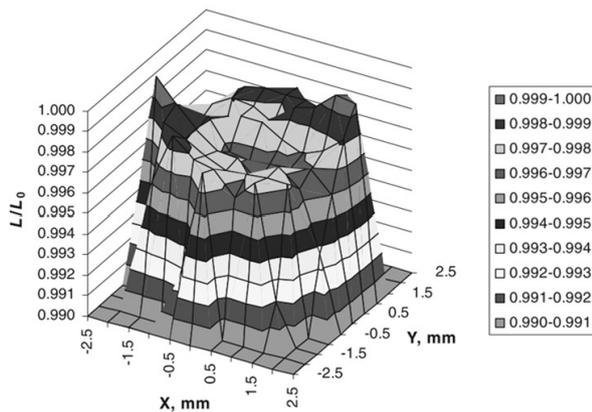


図14 積分球の開口面における放射輝度の分布⁶⁵⁾

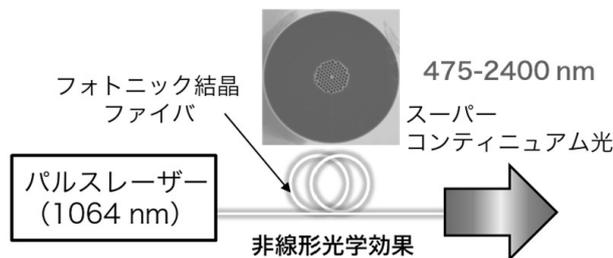


図15 スーパーコンティニューム光の発生原理

表2 分光器方式によるPTB^{65),66)}とNMIJ(目標値)の不確かさ表

不確かさ要素	[%]	
	PTB	NMIJ (目標値)
トラップ検出器の応答度	0.025	0.030
アパーチャーの面積	0.053	0.015
距離	0.050	0.010
積分球の空間均一性	0.115	0.025
実効波長	0.046	0.010
放射温度計の短期安定性	0.053	0.051
プラトーの決定	0.040	0.010
放射率	0.030	0.010
面積効果	0.030	0.010
合成標準不確かさ(k=1)	0.20	0.070
拡張標準不確かさ(k=2)	0.40	0.140
温度の不確かさ(k=2) 金の凝固点(1064℃)	308 mK (0.65 μm)	139 mK (0.8 μm)

する事ができることである。すなわち、ランプよりも3桁以上高いパワーでの光が得られるため、積分球の大型化による輝度分布の均一性の向上が期待される(0.025%, $k=1$)。また、固体レーザーをシードとして用いていることから、非線形光学効果により白色化した後でもある程度のコヒーレンスを残していることが期待される。そのため、従来分光器に用いてきた輝線による波長校正ではなく、波長計によって直接その波長を精密に測定することができると考えられる。これにより絶対分光応答度測定における波長の不確かさを大きく低減することができる(0.010%, $k=1$)。表2にPTBとNMIJ(目標値)の分光器方式における不確かさ表を示す。スーパーコンティニューム光源による低減も含め、不確かさはPTBの半分以下にできるものと考えられる。

スーパーコンティニューム光を熱力学温度測定の光源とするための課題としては、まず光源としての安定性が考えられる。広帯域の波長への展開は非線形光学効果による結果であり、仮に出力される光が不安定であれば、絶対分光応答度測定において大きな不確かさとなりうる。そのため、その強度やスペクトルの安定性については詳細に測定を行い、分光応答度への影響を評価する必要がある。また、パルスレーザーをシードとしているために、放射温度計やトラップ検出器における出力が連続光と異なるものになることが予想される。例えばパルス光による瞬間的に大きな電流に対する線形性が問題になる。このようなパルスによる問題の解決策としては、検出器からの電流を交流電流の実効値として平均するのではなく、積算電流計に電荷として測定する方法⁷⁹⁾や、スーパーコンティニューム光を様々な長さの光ファイバーに通して擬似的に連続光化する方法⁸⁰⁾などが考えられる。

5.3 将来のトレーサビリティおよび研究展開

NMIJにおいて高温域における熱力学温度測定技術が確立された後、その展開として考えられるのはまずトレーサビリティへの適用である。ITS-90の高温域は銅の凝固点からの補外で定義されており、高温になるにつれて不確かさが累積する(例えば、NMIJにおける0.65 μmの放射温度計によるITS-90の実現の不確かさは、1000℃で0.25℃であるのに対し、2000℃では1.0℃となっている)。そのため、熱力学温度測定の技術が確立されれば、特に2000℃以上の温度域において、熱力学温度測定の不確かさがITS-90のものよりも下回ると見込まれる。

現在の960℃以上におけるJCSSトレーサビリティ体系は銅の定義定点に基づいているが(2.2参照)、熱力学

温度に転換する場合、図 16 に示すように二通りの方式が考えられる。一つ目は絶対校正された放射温度計に基づき、絶対校正された標準放射温度計（特定標準器）と認定事業者の放射温度計（特定二次標準器）を比較黒体炉により校正を行うものである。二つ目の可能性は複数の温度定点（銅点、金属-炭素共晶点）に基づくものである。複数の定点黒体炉（特定標準器）の温度を予め絶

対校正された放射温度計により熱力学温度値を決定し、これにより認定事業者の放射温度計（特定副標準器）を校正する。一定点の補外による現行の方式と異なり、例えば WC-C 包晶点（2749 °C）をはじめとする高温定点との補間によって放射温度計が校正される。

NMIJ のみで熱力学温度測定を行う場合、標準放射温度計に基づく前者の方法は、校正依頼者までの最短経路であり、基本的には定点を介するものより不確かさが小さくなることが予想される。しかし、温度計間の特性（ターゲットサイズ、測定波長、測定距離）が異なる場合には、比較黒体炉の性能によって比較校正の不確かさが増大する可能性がある。特に一般的に国内で用いられている大半の高温用の放射温度計は 0.9 μm の測定波長を持ち、絶対放射測定用の放射温度計の波長（0.8 μm）と異なることに注意が必要である。また、国際共同実験で NMIJ 以外の標準研究機関も含めて熱力学温度測定が行われ、NMIJ が単独で行うより高温定点の不確かさが小さくなる可能性も考えられる。いずれにせよ、これらの不確かさを総合的に比較・検証し、ユーザーレベルにおいて最も不確かさが小さくなる方式を選択することが必要となる。

また、NMIJ では -30-960 °C においても放射温度の標準供給を行なっているが（2.2 参照）、標準の連続性を保つためにも、これらの温度域においても将来的には熱力学温度に基づいたものを実現していくことが検討される。これらの領域の熱力学温度測定は放射温度測定による必要はなく、他の一次温度計との比較によるものも考えられるが、例えば音速気体温度計の報告されている温度は 527 °C までである。そのため、高温域での熱力学温度測定技術の確立した後の研究展開としては、このような低温側への測定温度域の拡大が挙げられる（図 17）。例えば、検出器にシリコンではなくインジウムガリウム砒素（InGaAs）を用いた放射温度計による絶対放射測定によってアルミニウムの凝固点（660 °C）、さらには亜鉛の凝固点（420 °C）までを測定することが次の目標となる。これが実現すれば、1 K 以下の極低温から 3000 K 以下の高温までの全ての範囲での熱力学温度測定が可能となるだけでなく、これまでは絶対放射測定のみによって決められてきた熱力学温度の値を初めて他の一次温度計と比較することができるようになり、熱力学温度測定全体の整合性や信頼性が向上すると考えられる。

6. まとめ

本報告では、絶対放射測定を中心に熱力学温度測定と

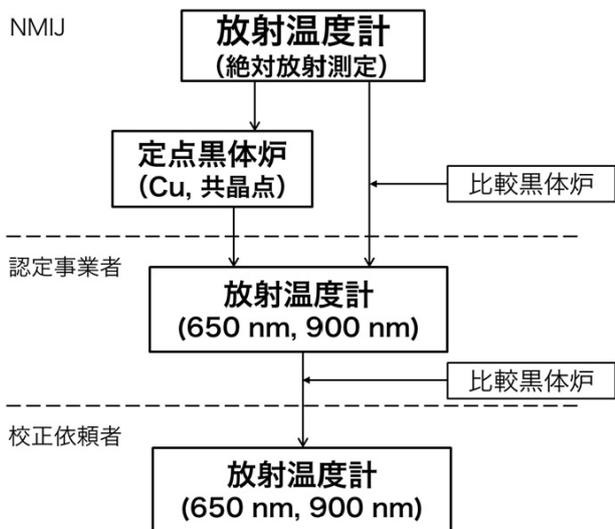


図 16 将来の高温域のトレーサビリティの可能性

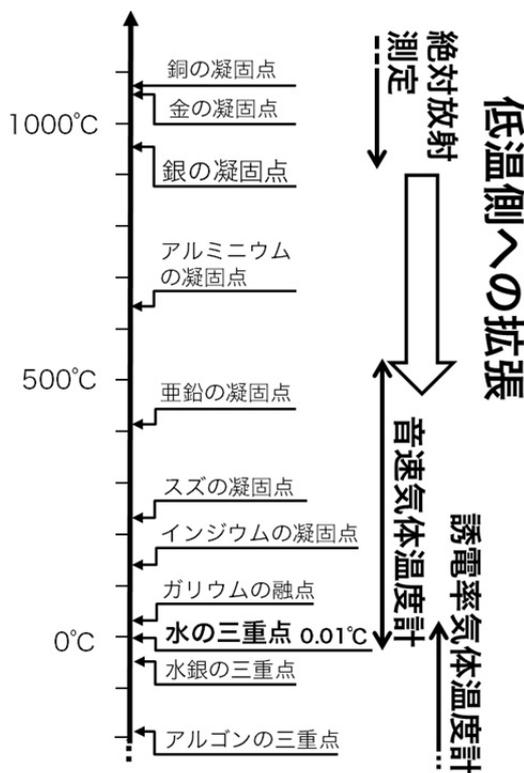


図 17 絶対放射測定による熱力学温度測定域の拡大

その周辺技術の調査を行った。NMIJでは現在ITS-90に基づいた放射温度標準の供給を行なっているが、近年のITS-90から熱力学温度への転換という国際的な動向もあり、熱力学温度に基づいた温度標準の開発が喫緊の課題となっている。そこで、各国の標準研究機関による絶対放射測定の方法の利点や不確かさを踏まえ、NMIJにおける方式の検討を行った。その結果、金属-炭素共晶点を始めとする温度定点黒体炉の温度を測定することを含め、温度測定の実用上、狭帯域放射温度計を絶対校正するのが適当であるとわかった。絶対校正には光源として波長可変レーザー、スーパーコンティニューム光源+分光器による二方式を検討し、それぞれの不確かさの目標値を掲げると同時に、予想される課題と解決のための研究方針を示した。

高温域での絶対放射測定による熱力学温度測定技術の確立後は、各国の熱力学温度測定との比較やトレーサビリティへの適応など、測定技術から熱力学温度標準へとつなげる取り組みが必要である。また、将来的な研究展開として、より低温側への拡充によってまだ測定技術が十分に確立されていない温度域の熱力学温度測定を目指すと同時に、音速気体温度計など他の一次温度計との競合により、温度値の信頼性と整合性を確保していきたいと考えている。

謝辞

本調査研究をまとめるにあたり、貴重なご指導・ご助言をいただきました新井優科長、石井順太郎室長、山田善郎首席研究員、笹島尚彦主任研究員には心より感謝いたします。また放射温度標準研究室の皆様にもご協力いただき、深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 計測自動制御学会 温度計測部会編：新編 温度計測（コロナ社，1992）1-4.
- 2) 山下次郎 福地充訳：第2版 キッテル 熱物理学（丸，1983）32-35.
- 3) Comptes Rendus de la XXe reunion de la Conférence Générale des Poids et Mesures, 79.
- 4) The International Temperature Scale of 1990 (ITS-90), Procès-Verbaux des Séances du Comité International des Poids et Mesures, 78e session (1989) T23-T42.
- 5) Supplementary Information for the International Temperature Scale of 1990, Bureau International des Poids

- et Mesures (1990).
- 6) R. L. Rusby, M. Durieux, A. L. Reesink, R. P. Hudson, G. Schuster, M. Kuhne, W. E. Fogle, R. J. Soulen and E. D. Adams: The Provisional Low Temperature Scale from 0.9 mK to 1 K, PLTS-2000, Doc. CCT=2000-26 and Doc. CCT=2000-26a (2000).
- 7) Technique for Approximating the International Temperature Scale of 1990, Bureau International des Poids et Mesures, (1990).
- 8) Y. Yamada, H. Sakate, F. Sakuma, A. Ono: Radiometric observation of melting and freezing plateaus for a series of metal-carbon eutectic points in the range 1330 °C to 1950 °C, Metrologia 36 (1999) 207.
- 9) N. Sasajima, Y. Yamada, H. Sakuma: Investigation of Fixed Points Exceeding 2500 °C Using Metal Carbide-Carbon Eutectics, Temperature: Its Measurement and Control in Science and Industry, 7 (2003) 279-284.
- 10) Y. Yamada, Y. Wang, N. Sasajima: Metal Carbide-Carbon Peritectic Systems as High-Temperature Fixed Points in Thermometry, Metrologia 43 (2006) L23.
- 11) R. E. Edsinger and J. F. Schooley: Differences between Thermodynamic Temperature and t (IPTS-68) in the Range 230 °C to 660 °C, Metrologia, 26 (1989) 95.
- 12) H. J. Jung: A Measurement of Thermodynamic Temperatures Between 683 K and 933 K by an Infrared Pyrometer, Metrologia, 23 (1986) 19.
- 13) J. Fischer and H. J. Jung: Determination of the Thermodynamic Temperatures of the Freezing Points of Silver and Gold by Near-Infrared Pyrometry, Metrologia, 26 (1989) 245.
- 14) T. P. Jones and J. Tapping: The Determination of the Thermodynamic Temperatures of Thermometry Fixed Points in the Range 660 °C to 1064 °C, Metrologia, 25 (1988) 41.
- 15) J. Fischer, M. de Podesta, K. D. Hill, M. Moldover, L. Pitre, R. Rusby, P. Steur, O. Tamura, R. White and L. Wolber: Present Estimates of the Differences Between Thermodynamic Temperatures and the ITS-90, Int. J. Thermophys., 32 (2011) 12-25.
- 16) D. C. Ripple, R. Davis, B. Fellmuth, J. Fischer, G. Machin, T. Quinn, P. Steur, O. Tamura and D. R. White: The Roles of the Mise en Pratique for the Definition of the Kelvin, International Journal of Thermophysics, 31 (2010) 1795-1808.
- 17) Mise en pratique for the definition of the kelvin, Adopted

- by the CCT in April (2006).
- 18) Creation of a Mise en Pratique for the Definition of the Kelvin, Recommendation T3 (2005).
 - 19) J. Fischer and B. Fellmuth: Temperature Metrology, Reports on Progress in Physics, 68 (2005) 1043-1094.
 - 20) K. H. Berry: NPL-75: A Low Temperature Gas Thermometry Scale from 2.6 K to 27.1 K, Metrologia, 15 (1979) 89-115.
 - 21) R. C. Kemp, W. R. Kemp and L. M. Besley: A Determination of Thermodynamic Temperature and Measurement of the Second Virial Coefficient of 4He Between 13.81 K and 287 K Using a Constant-Volume Gas Thermometer, Metrologia, 23 (1986) 61.
 - 22) P. P. M. Steur and M. Durieux: Constant-Volume Gas Thermometry Between 4 K and 100 K, Metrologia, 23, (1986) 1.
 - 23) O. Tamura, S. Takasu, T. Nakano and H. Sakurai: NMIJ Constant-Volume Gas Thermometer for Realization of the ITS-90 and Thermodynamic Temperature Measurement, International Journal of Thermophysics, 29 (2008) 31-41.
 - 24) L. Pitre, F. Sparasci, D. Truong, A. Guillou, L. Risegari and M. E. Himbert: Measurement of the Boltzmann Constant k_B Using a Quasi-Spherical Acoustic Resonator, Int. J. Thermophys., 32 (2011) 1825-1886.
 - 25) H. Plumb and G. Cataland: Acoustical Thermometer and the National Bureau of Standards Provisional Temperature Scale 2-20, Metrologia, 2 (1965) 127.
 - 26) A. R. Colclough: Low Frequency Acoustic Thermometry in the Range 4.2-20 K with Implications for the Value of the Gas Constant, Proceedings of the Royal Society A, 365 (1979) 349.
 - 27) J. T. Zhang, H. Lin, X. J. Feng, J. P. Sun, K. A. Gillis, M. R. Moldover and Y. Y. Duan: Progress Toward Redetermining the Boltzmann Constant with a Fixed-Path-Length Cylindrical Resonator, Int. J. Thermophys., 32 (2011) 1297-1329.
 - 28) M. R. Moldover, J. P. M. Trusler and T. J. Edwards: Measurement of the Universal Gas Constant R Using a Spherical Acoustic Resonator, Physical Review Letters, 60 (1988) 249-252.
 - 29) M. B. Ewing and J. P. M. Trusler: Primary acoustic thermometry between T D 90 K and T D 300 K, Journal of Chemical Thermodynamics, 32 (2000) 1229-1255.
 - 30) G. F. Strouse, D. R. Defibaugh, M. R. Moldover and D. C. Ripple: Progress in Primary Acoustic Thermometry at NIST 273 K to 505 K, Temperature Its Measurement and Control in Science and Industry, 7 (2003) 31-36.
 - 31) M. de Podesta, G. Sutton, R. Underwood, M. Perkin, S. Davidson and P. Morantz, Assessment of Uncertainty in the Determination of the Boltzmann Constant by an Acoustic Technique, Int. J. Thermophys., 32 (2011) 413-426.
 - 32) D. C. Ripple, D. R. Defibaugh, M. R. Moldover and G. F. Strouse: Techniques for Primary Acoustic Thermometry to 800 K, Temperature Its Measurement and Control in Science and Industry, 7 (2003) 25-30.
 - 33) H. Luther, K. Grohmann and B. Fellmuth: Determination of thermodynamic temperature and 4He virial coefficients between 4,2 K and 27,0 K by dielectric constant gas thermometry, Metrologia, 33 (1996) 341.
 - 34) G. Lach, B. Jeziorski and K. Szalewicz: Radiative Corrections to the Polarizability of Helium, Physical Review Letters, 92 (2004) 23.
 - 35) C. Gaiser, B. Fellmuth and N. Haft: Dielectric-Constant Gas-Thermometry Scale from 2.5 K to 36 K Applying 3He, 4He, and Neon in Different Temperature Ranges, Int. J. Thermophys., 31 (2010) 1428-1437.
 - 36) B. Fellmuth, J. Fischer, C. Gaiser, O. Jusko, T. Priuenrom, W. Sabuga and T. Zandt: Determination of the Boltzmann constant by dielectric-constant gas thermometry, Metrologia, 48 (2011) 382-390.
 - 37) H. Nyquist: Thermal Agitation of Electric Charge in Conductors, Physical Review, 32 (1928) 110-113.
 - 38) H. Brixly, R. Hecker, J. Oehmen, K. F. Rittinghaus, W. Setiawan and E. Zimmermann: Noise Thermometry for Industrial and Metrological Applications at KFA Julich, Temperature Its Measurement and Control in Science and Industry, 6 (1992) 993-996.
 - 39) S. P. Benz, J. M. Martinis, S. W. Nam, W. L. Tew and D. R. White: A New Approach to Johnson Noise Thermometry Using a Josephson Quantized Voltage Source for Calibration, Temperature Its Measurement and Control in Science and Industry, 8 (2002) 37-44.
 - 40) S. W. Nam, S. P. Benz, J. M. Martinis, P. Dresselhaus, W. L. Tew and D. R. White: Temperature Its Measurement and Control in Science and Industry, 7 (2003) 37-42.
 - 41) G. Neuer, J. Fischer, F. Edler and R. Thomas: Comparison of Temperature Measurement by Noise Thermometry and Radiation Thermometry, Measurement, 30 (2001) 211-221.
 - 42) G. Schuster, A. Hoffmann and D. Hechtficher: 3He Melting Pressure-Temperature Relation in the Range from 1

- mK to 1000 mK, Czechoslovak Journal of Physics, 46 (1996) 481.
- 43) C. P. Lusher, J. Li, V. A. Maidanov, M. E. Digby, H. Dyball, A. Casey, J. Nyeki, V. V. Dmitriev, B. P. Cowan and J. Sanders: Current Sensing Noise Thermometry Using a Low Tc DC SQUID Preamplifier, Measurement Science and Technology, 12 (2001) 1-15.
- 44) R. J. Soulen, W. E. Fogle and J. H. Colwell: Measurements of Absolute Temperature Below 0.75 K Using a Josephson-Junction Noise Thermometer, Journal of Low Temperature Physics, 94 (1994) 385.
- 45) B. Fellmuth, D. Hechtfischer and A. Hoffman: The Ultra-Low Temperature Scale of PTB, Temperature Its Measurement and Control in Science and Industry, 7 (2003) 71-76.
- 46) M. Planck: Uber das Gesetz der Energieverteilung im Normalspectrum, Annalen der Physik, 4 (1901) 553.
- 47) J. E. Martin, N. P. Fox and P. J. Key: A Cryogenic Radiometer for Absolute Radiometric Measurements, Metrologia, 21 (1985) 147.
- 48) T. J. Quinn and J. E. Martin: A Radiometric Determination of the Stefan-Boltzmann Constant and Thermodynamic Temperatures between $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$, Philosophical Transactions of The Royal Society of London, 316 (1985) 85-189.
- 49) J. E. Martin, T. J. Quinn and B. Chu: Further Measurements of Thermodynamic Temperature Using a Total Radiation Thermometer: the Range $-130\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$, Metrologia (1988) 107.
- 50) F. Sakuma and S. Hattori: in Temperature: Its Measurement and Control in Science and Industry, ed. By Schooley, J. F., New York, AIP (1982) 421-427.
- 51) P. Saunders, and D. R. White: Metrologia, 40 (2003) 195-203.
- 52) G. Machin, P. Bloembergen, J. Hartmann, M. Sadli, Y. Yamada: A Concerted International Project to Establish High-Temperature Fixed Points for Primary Thermometry, Int. J. Thermophys., 28 (2007) 1976-1982.
- 53) H. W. Yoon, C. E. Gibson, G. P. Eppeldauer, A. W. Smith, S. W. Brown and K. R. Lykke: Thermodynamic Radiation Thermometry Using Radiometers Calibrated for Radiance Responsivity, Int. J. Thermophys., Online First, 19 August 2011.
- 54) H. W. Yoon, C. E. Gibson, G. P. Eppeldauer, A. W. Smith, S. W. Brown and K. R. Lykke: Uncertainty Analysis and Maintenance of the NIST Detector-based Temperature Scale, Acta Metrologica Sinica, 29 (2008) 31-37.
- 55) S. W. Brown, G. P. Eppeldauer and K. R. Lykke: Facility for Spectral Irradiance and Radiance Responsivity Calibrations Using Uniform Sources, Applied Optics, 45 (2006) 8218-8237.
- 56) J. M. Houston and J. P. Rice: NIST Reference Cryogenic Radiometer Designed for Versatile Performance, Metrologia, 43 (2006) S31-S35.
- 57) K. Anhalt, J. Hartmann, D. Lowe, G. Machin, M. Sadli and Y. Yamada: Thermodynamic temperature determinations of Co-C, Pd-C, Pt-C and Ru-C eutectic fixed-point cells, Metrologia, 43 (2006) S78.
- 58) J. Fischer, Fu. Lei and M. Stock: Present State of the Determination of Thermodynamic Temperatures near the Freezing Point of Silver by Absolute Cryoradiometry, Metrologia, 28 (1991) 243.
- 59) M. Stock, J. Fischer, R. Friedrich, H. J. Jung, R. Thornagel, G. Ulm and B. Wende: Present State of the Comparison between Radiometric Scales Based on Three Primary Standards, Metrologia, 30 (1993) 439.
- 60) K. Anhalt: Radiometric Measurement of Thermodynamic Temperatures during the Phase Transformation of Metal-Carbon Eutectic Alloys for a New High-Temperature Scale above $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, PhD thesis, T. U. Berlin (2008).
- 61) K. Anhalt, J. Hartmann, D. Lowe, G. Machin, M. Sadli and Y. Yamada: Thermodynamic Temperature Determinations of Co-C, Pd-C, Pt-C and Ru-C Eutectic Fixed-Point Cells, Metrologia, 43 (2006) S78.
- 62) J. Hartmann, K. Anhalt, R. D. Taubert and J. Hollandt: Absolute Radiometry for the *MeP*-K: The Irradiance Measurement Method, Int. J. Thermophys., 32 (2011) 1707-1718.
- 63) N. Noulkhow: Radiometric Measurement of Thermodynamic Temperatures in the Temperature Range from $419\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $660\text{ }^{\circ}\text{C}$ for an Improved Temperature Scale, PhD thesis, T. U. Berlin (2008).
- 64) K. Anhalt, A. Zelenjuk, D. R. Taubert, T. Keawprasert and J. Hartmann: New PTB Setup for the Absolute Calibration of the Spectral Responsivity of Radiation Thermometers, Int. J. Thermophys., 30 (2009) 192-202.
- 65) T. Keawprasert, K. Anhalt, D. R. Taubert and J. Hartmann: Monochromator-Based Absolute Calibration of Radiation Thermometers, Int. J. Thermophys., 32 (2011) 1697-1706.
- 66) T. Keawprasert: Monochromator-based absolute

- calibration of radiation thermometers for thermodynamic temperature measurements of high-temperature fixed-points, PhD thesis, T. U. Berlin (2011).
- 67) N. P. Fox, J. E. Martin and D. H. Nettleton: Absolute Spectral Radiometric Determination of the Thermodynamic Temperatures of the Melting/Freezing Points of Gold, Silver and Aluminium, *Metrologia*, 28 (1991) 357.
- 68) E. R. Woolliams, M. R. Dury, T. A. Burnitt, P. E. R. Alexander, R. Winkler, W. S. Hartree, S. G. R. Salim and G. Machin: Primary Radiometry for the Mise-en-Pratique for the Definition of the Kelvin: The Hybrid Method, *Int. J. Thermophys.* 32 (2011) 1-11.
- 69) S. G. R. Salim: Reference Spectrometry for Calibration of Optical Earth Observation Satellites, PhD thesis, City University London (2010).
- 70) X. Lu, Z. Yuan, X. Hao, Y. Lin and J. Yang: Calibration of the Irradiance Responsivity of a Filter Radiometer for T Measurement at NIM, *Int. J. Thermophys.*, 32 (2011) 278-284.
- 71) S. Briaudeau, M. Sadli, F. Bourson, B. Rougi, A. Rihan and J.-J. Zondy: *Int. J. Thermophys.* 32 (2011) 2183-2196.
- 72) A. D. W. Todd and D. J. Woods: Absolute Calibration of a Linear Pyrometer (LP3) Traceable to a Cryogenic Radiometer, *Proceedings of NEWRAD 2011: 11th International Conference on New Developments and Applications in Optical Radiometry* (2011) 274-275.
- 73) A. D. W. Todd and D. J. Woods: TiC-C Fixed Point Measurement Using a Linear Pyrometer and a Filter Radiometer, *Proceedings of NEWRAD 2011: 11th International Conference on New Developments and Applications in Optical Radiometry* (2011) 96-97.
- 74) M. Ballico: Thermodynamic Temperature Measurements Traceable to Photometric Standards, 1st TEMPMEKO and ISHM Joint International Symposium on Temperature, Humidity, Moisture, and Thermal Measurements, Portoroz, SLOVENIA, MAY 31-JUN 04, 2010.
- 75) M. Noorma, P. Toivanen, F. Manoocheri and E. Ikonen: Characterization of Filter Radiometers with a Wavelength-Tunable Laser Source, *Metrologia*, 40 (2003) S220-S223.
- 76) M. Schuster, S. Nevas and A. Sperling: Correction Algorithm for Interference Affected Measurement Data, *Proceedings of NEWRAD 2011: 11th International Conference on New Developments and Applications in Optical Radiometry* (2011) 241-242.
- 77) J. M. Dudley, G. Genty and S. Coen: Supercontinuum Generation in Photonic Crystal Fiber, *Reviews of Modern Physics*, 78 (2006) 1135-1184.
- 78) J. T. Woodward, A. W. Smith, C. A. Jenkins, C. Lin, S. W. Brown and K. R. Lykke: Supercontinuum Sources for Metrology, *Metrologia*, 46 (2009) S277-S282.
- 79) Y. Zong, S. Brown, G. Eppeldauer, K. Lykke and Yoshi Ohno: New Method for Spectral Irradiance and Radiance Responsivity Calibration Using Pulsed Tunable Lasers from 210 nm to 2500 nm, *Proceedings of NEWRAD 2011: 11th International Conference on New Developments and Applications in Optical Radiometry* (2011) 221-222.
- 80) S. Winter, D. Friedrich and T. Fey: The Concept of PTB's Next Generation Solar Cell and Detector Calibration Facility, *Proceedings of NEWRAD 2011: 11th International Conference on New Developments and Applications in Optical Radiometry* (2011) 197-198.