

## 解 説

### 温度標準の現状

山澤 一彰, 丹波 純  
(独) 産業技術総合研究所 計量標準総合センター

(受取日: 2013年8月21日, 受理日: 2013年9月26日)

#### Current Status of Temperature Standards

Kazuaki Yamazawa and Jun Tamba  
National Metrology Institute of Japan,  
National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (NMIJ, AIST)

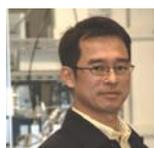
(Received Aug. 21, 2013; Accepted Sep. 26, 2013)

Temperature measurement is a common tool for scientific research and manufacturing products *etc.* However, the knowledge of temperature standards, *i.e.* how the unit of temperature is defined, how the temperature standards are actually realized and how they are disseminated, might not be widely recognized. In this article, we first summarize the current status of the temperature standards; from the definition of the base unit kelvin, to the temperature scale and the traceability of measurement. Then we refer to the evolution of the temperature standards, specifically the topics related to the redefinition of the unit kelvin.

Keywords: Temperature standards, the International System of Units (SI), the International Temperature Scale of 1990 (ITS-90), defined fixed points, traceability, thermodynamic temperature measurements



山澤 一彰  
Kazuaki Yamazawa  
E-mail: kazuaki-yamazawa@aist.go.jp



丹波 純  
Jun Tamba  
E-mail: j-tamba@aist.go.jp

## 1. はじめに

温度の測定は、工業プロセスの管理、研究開発、気象観測、地球環境変動の評価など様々なシーンで行われており、測定対象の規模や求められる測定精度は多岐にわたっている。日常生活においても誰もが気温や体温など、温度を測定した経験を持ち、本誌の多くの読者も、研究手段として精密な温度測定を行っておられるであろう。

しかしながら、本稿に述べる「温度標準」について、通常、詳しく知らなくても温度測定で困ることはないが、数 mK (ミリケルビン) より良い精度 (不確かさ) が求められる精密温度測定、特に温度の絶対値を議論する場合には「温度標準」に関する理解が不可欠となる。

本稿では、「温度標準」として、国際単位系 (SI) 基本単位である熱力学温度の単位ケルビンの定義、SI のケルビンを近似するものとして実際の温度測定に使用される国際温度目盛の実現方法、信頼性の高い温度測定に必要な「測定のトレーサビリティ」を解説する。また、関連したいくつかの研究トピックと SI におけるケルビンの定義改定の動向について簡単に紹介する。

## 2. 熱力学温度の単位ケルビン

### 2.1 定義の厳密化の歴史

国際単位系 (International System of Units (SI)) は、長さの単位メートル (m)、質量の単位キログラム (kg)、時間の単位秒 (s)、電流の単位アンペア (A)、熱力学温度の単位ケルビン (K)、物質量の単位モル (mol)、光度の単位カンデラ (cd) という 7 つの「基本単位」と、それらを組み合わせた「組立単位」(例えば、速さ  $m/s$ 、熱量  $J = kg \cdot m^2 \cdot s^{-2}$ ) から成り立っている。これらの単位の定義に忠実に測定を行えば、世界中で共通の尺度で物理量を測定することができる。

物理量の単位やその定義には普遍性が求められるが、これまでの科学や技術の進歩の歴史においては、まず物理量の発見、その定量化の方法の検討、そして測定の基準すなわち単位の定義と進んできた。さらに、ひとたび構築された単位の定義も、測定技術の向上や普及を踏まえ、適時見直しが行われてきた。

メートル条約の下での最初の温度標準は、メートル原器の熱膨張を補正するための温度測定に始まった。<sup>1)</sup> 1889 年の第 1 回国際度量衡総会 CGPM では水素気体温度計による百分割温度目盛が承認された。<sup>2)</sup> これは水の氷点および沸点に対して温度値 (0 °C および 100 °C) を付与し、その間の温度は気体の状態方程式に基づいた気体温度計を用いて決定する、というものであった。

氷点および沸点を正確に具現化するにあたっては、不確かな要素が多く、現在の測定技術から考えると精度が悪かった。例えば水の沸点は、1 気圧 (101 325 Pa) の圧力の下で、水の液相と気相とが共存する状態と定義される。沸点下での温度の測定には、水の液相と気相とが共存した状態で、正確に 1 気圧の状態を計測し、装置の圧力を制御する必要があるため、圧力を計測する配管内の水の凝結を防ぐなど、高度な技術が必要である。また氷点の定義は、純粋な水と氷とが共存する融解点/凝固点ではなく、氷と空気が飽和溶解した水との共存した状態である。水に溶解している空気の評価が困難であったため、その厳密な実現は難しい。

このように、氷点や沸点という基準点そのものを再現性良く厳密に実現させることが困難であることが水素気体温度計による百分割温度目盛の大きな欠点であった。そこで、より良い温度目盛の定義の実現にあたって、純粋な水のみ

による「水の三重点」が用いられるようになった。

1954 年の第 10 回国際度量衡総会 CGPM では、熱力学温度の単位を定め、水の三重点に 273.16 K の温度値が付与されることとなった。

その後、1967 年の国際度量衡総会において

「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」

となっている。<sup>2)</sup>

水の三重点とは、液体の水、水蒸気、氷の 3 つの相が共存する点である。水の沸点および氷点のように圧力の制御を必要としないため、それらと比べ、再現性が良い。Fig.1 に水の三重点セルの模式図、および三重点付近の水の相図を示す。

水の三重点セルは、ガラス製の容器に高純度の水のみを封入し、密封したものである。ガラス容器の中央には温度計を挿入するための挿入孔があり、通常のものでは内径は概ね 10 mm 程度、挿入長は 300 mm 程度となっている。水の三重点の実現には、セル全体を氷水などで冷却し、さらに挿入孔内部をドライアイスの粉末やヒートパイプを使用して冷却することで、挿入孔の周囲に氷のマントルが形成され、Fig.1 の模式図に示すような状態となる。三重点の状態となったセルは、デュワーの中で砕氷とともに保持したり、0.01 °C 付近に保たれた恒温水槽の中で保持したりすることで、数日から数ヶ月の間、水の三重点の状態を保持できる。

なお、模式図からも分かるように、実現した水の三重点セルにおいて、厳密に水の三重点の状態となっているのは、水面の近傍の水、水蒸気、氷の三態が共存する箇所であり、この部分の温度を 273.16 K と定義している。挿入した温度計の感温部がある挿入孔の底部付近の温度は、液面からの深さに応じた静水圧の影響を受けるため、その補正を行っている。

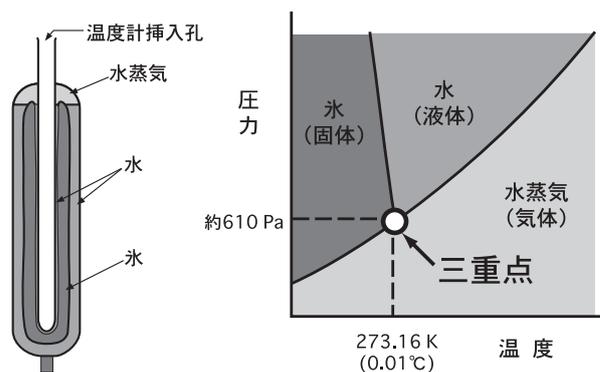


Fig.1 The triple point of water.

### 2.2 同位体を考慮して 0.1 mK レベルに

2007 年に開催された国際度量衡総会において、熱力学温度の単位ケルビンを明確化すべく、上記の定義に加え、水の同位体組成について下記の記述が追加された。<sup>3)</sup>

ケルビンの定義は、特定の同位体組成の水を参照したものであり、その組成は、1 モルの  $^1\text{H}$  あたり 0.000 155 76 モルの  $^2\text{H}$ 、1 モルの  $^{16}\text{O}$  あたり 0.000 379 9 モルの  $^{17}\text{O}$ 、及び 1 モルの  $^{16}\text{O}$  あたり 0.002 005 2 モルの  $^{18}\text{O}$  とする。

この記述が追加された経緯は以下の通りである。

2001年から2005年の間、国際度量衡委員会 (CIPM) 傘下の測温諮問委員会 (CCT) が主催し世界 22 機関が参加して、水の三重点の温度値の国際比較を行った。各国の国家計量標準機関の保有する国家計量標準の同等性を確認することが目的であり、手順としては、① まず各参加国は自身が保有する水の三重点温度の国家計量標準を基に移送用の水の三重点セルに値付けを行い、② 移送用セルを国際度量衡局に運搬し、③ 国際度量衡局では各国から集めた移送用セル相互間の温度差を測定し、④ 移送用セルを各国に返送し、各国では自身の移送用セルに自身が保有する水の三重点温度の国家計量標準を基に移送用の水の三重点セルに値付けを行って変動などの異常がないかを確認する、⑤ これらの一連の測定結果を取りまとめ、各国の水の三重点の国家計量標準の実現温度を相互比較する、というものであった。

この国際比較の結果を Fig.2 に示す。22 機関が保有する水の三重点温度の国家計量標準の差異を示しており、明らかに 2 つの集団に分かれた。<sup>4,5)</sup> Fig.2 内の○のプロットで示した 2 つの参加機関は、1990 年国際温度目盛の補正情報<sup>6)</sup> に記載された水の同位体組成を考慮した補正を行った。◇の機関は補正を行なわなかったものの、補正を行うためのデータを併せて報告していた。Fig.2 では、これらの機関については、元の補正前の報告値では無く、水の同位体組成を考慮した補正を行った後の結果をプロットしている。一方で、●のプロットで示したその他の機関は、こうした補正を行っておらず、○や◇で示した機関の補正後の結果と比べ温度値が数十μK 低い結果となった。水の三重点セルを製作する際には、まず、原料となる水が地球上のどの場所に由来するかによって同位体組成は異なる。また、水の純度を良くするために何度かの蒸溜工程を経るが、蒸溜を行う度に同位体組成は軽い組成に偏る。各国のセルが原料の水も異なり、製作の工程も異なれば、Fig.2 の結果は当初から予期し得た結果だったとも言えよう。

2005 年に行われた CCT では、この国際比較の結果を受け、水の三重点の同位体組成について活発な議論を行った。CIPM への定義の見直しの勧告、CIPM での決定を経て、先の記述が追加され、水の三重点によるケルビンの定義はより厳密化された(なお、同位体による多成分系であるため、相律として、三重点が「点」にはならず、領域になっている曖昧さは残っている)。

産業技術総合研究所計量標準総合センター (NMIJ/AIST) においても、この定義の変更に伴って温度の国家標準として維持、管理している水の三重点について、水の同位体組成とセルの実現温度との対比の研究を行った。その結果、従来水の三重点としていた温度よりも 42 μK 高い温度を、最近の測定技術による水の三重点の温度であると知見を得た。また、これまで 0.3 mK であった水の三重点の不確かさを、0.1 mK に低減させた。<sup>7)</sup>

水の三重点に使用する水の同位体組成は、これ以前にも、研究者の間では考慮すべき要因として知られていたが、そこまでの精度は求められていなかった。しかし、2005 年までに行われた国際比較では、測定技術の向上もあり、同位体組成の違いによる明確な差異が確認された。技術の進展により、単位の定義がより厳密化された例である。

同位体組成と同様、水の三重点セルが実現する温度に対して水の中の不純物も大きな影響を与える。セルを製作する上での洗浄工程や、水の蒸溜工程の工夫などが行われているが、製作済みのセルについての不純物の影響の評価は難しい。ガラスからの不純物の溶出による影響を論じた論文<sup>8)</sup>もあり、器物によって標準を維持することの難しさの

表れとも言える。不純物による影響を非破壊的に評価するために誘電特性から電気伝導度を推定する方法<sup>9)</sup>などが提案されている。また最近では、不純物の溶出の少ない石英ガラスを水の三重点セルの容器の材質として採用する事例も多い。

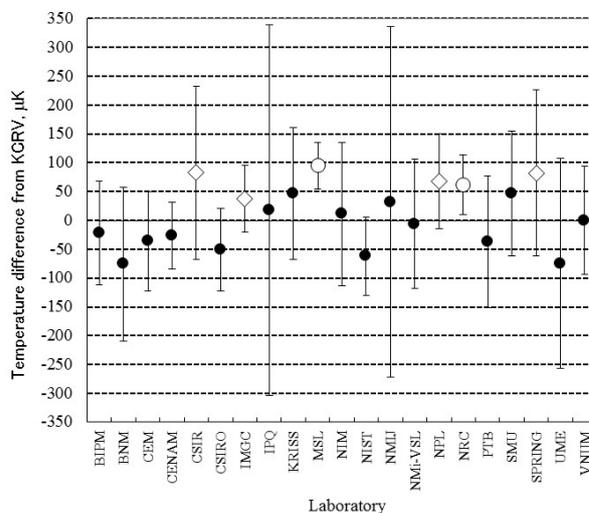


Fig.2 Results of the international key comparison of water-triple-point cells (CCT-K7). The values are reproduced by combining Tables 21 and 22 of the final report<sup>4)</sup>, along with the classification of the status of the isotopic correction. ○: laboratories that applied the isotopic correction. ◇: laboratories that did not apply the isotopic correction although they reported the isotopic compositions. The values have been corrected by the authors using this information ●: laboratories that did not apply the isotopic correction and reported no information regarding isotopic compositions.

### 3. 1990 年国際温度目盛と定点の実現

#### 3.1 国際温度目盛の歴史

水の三重点を用いたケルビンの定義から、原理的には、あらゆる平衡系の熱力学温度を決めることができる。しかしながら、定義に基づいた熱力学温度測定は、大掛かりな装置や長い測定時間が必要となる。そこで熱力学温度の近似値を与える、実用を目的とした使いやすい国際温度目盛が策定され、運用されてきた。歴史的には、1927 年の国際温度目盛 ITS-27、1948 年の ITS-48、1968 年の国際実用温度目盛 IPTS-68 を経て、現行の温度目盛の定義である 1990 年国際温度目盛 (the International Temperature Scale of 1990 (ITS-90))<sup>10)</sup> に変遷している。ITS-90 が目盛を定義する温度の下限は 0.65 K であるが、さらに低温については 0.9 mK から 1 K までの暫定低温目盛 (PLTS-2000) が規定された。

温度目盛を変更する目的は、熱力学温度との一致を目指して策定することと、補間計器の追加や変更によって温度範囲の拡大や精度の向上を目指すこととである。学術的研究で行われる精密測定においては、特に前者が重要であろう。熱力学温度からずれるのある温度目盛を用いて熱物性などの測定を行えば、観測される測定結果が目盛自体のずれに起因する歪みを持つことが問題となりうる。

ITS-90 には、物質の相平衡などを利用した温度定点を定義定点として定め、その定点間を補間することにより、温度標準を設定する方法が定められている。各定義定点の定

義温度は、前述の SI の定義を基に、各国の国家計量標準機関で行った熱力学温度測定の結果を CCT が集約し、目盛としての使いやすさを加味して ITS-90 の制定の際に決められたものである。補間計器は温度域ごとに異なり、蒸気圧温度計、定積気体温度計、白金抵抗温度計、放射温度計が温度域と共に定義されている。

### 3.2 温度定点

各国の国家計量標準機関が ITS-90 を基にした温度標準を実現し、標準の供給を行う際には、国家計量標準として Fig.3 に挙げたような定義定点を実現する装置や、補間を行うための温度計およびその測定装置などの付帯設備を保有して維持、管理することになる。例えば、インジウムの凝固点 (156.5985 °C) 以上の各定義定点は、金属が 101325 Pa の下で凝固する凝固点温度であり、Fig.4 に示すような電気炉と、グラファイト製のつぼ内に高純度の金属を鑄込んだ定点セルとを組み合わせた定点実現装置を使用する。Fig.4 のような装置で実現する定義定点は金属の凝固点であるので、定点の実現には、まず一旦電気炉の温度を融解点以上に上げて定点セル内の金属を完全に溶融させた後、電気炉の温度を適切に下げて凝固をさせる。定点セル内の金属は、一旦、過冷却状態になった後、結晶の発生と共に温度値が凝固点温度に復帰し、完全に凝固するまでの間、ほぼ一定の温度値が実現できる。この一定の温度値が実現できている状態を凝固プラトーと呼ぶ。

Fig.4 に示した定点セルは開放型定点セルと言い、石英製の容器内に定点金属を鑄込んだグラファイトのつぼを格納している。セル内には不活性ガスであるアルゴンガスを充填し、凝固点の実現を行う際にはその圧力が 101325 Pa となるように調節する。

前節の水の三重点セルと同様に、定義温度の正確な実現のためには、定点物質中の不純物による影響を評価し、必

要に応じて補正する必要がある。国家計量標準の基準セルとして使用するような接触式温度計用の定点セルは、およそ 1.5 kg の高純度金属を、不純物が混入しないように工夫をしながらグラファイト製のつぼに鑄込んだものである。金属の種類にもよるが、近年では公称純度が 6N (99.9999 %) 以上の高純度金属が市販されているものの、1.5 kg もの大量の高純度金属を入手し、鑄込むことは容易ではなく、各国家計量標準機関も工夫を凝らしながら定点セルを製作している。容器のグラファイトのつぼも大きな汚染源であり、事前に 1000 °C 程度の高温において、高真空中でベーキングを行うなどの前処理が必要である。

### 3.3 凝固点降下は 1 mK レベル

凝固プラトー中の温度値は、0.1 mK 以下の分解能で精密な測定をすると、実は一定ではなく、定点金属内の不純物の影響を受けながら変化している。不純物に起因する温度値の偏りは (1) 式で表される。<sup>11)</sup>

$$T_{\text{obs}} - T_{\text{pure}} = \sum_i c_{li} \left( \frac{\partial T}{\partial c_{li}} \right) \left( \frac{1}{F} \right)^{1-k_{0i}} \quad (1)$$

ここで  $T_{\text{obs}}$  は測定された温度値、 $T_{\text{pure}}$  が不純物のない理想状態の温度値である。個々の不純物元素  $i$  ごとに、その濃度  $c_{li}$  と、凝固点降下の濃度依存性  $\partial T / \partial c_{li}$ 、および不純物自身が定点金属の液相と固相との中への割合で混入するかを示す係数 (分配係数)  $k_{0i}$  とが異なっている。金属が融解した量の割合 (融解分率) を  $F$  とすると、(1) 式が表しているように凝固プラトーが進み  $1/F$  が大きくなるにつれて偏り  $T_{\text{obs}} - T_{\text{pure}}$  の絶対値が大きくなってゆく事が分かる。

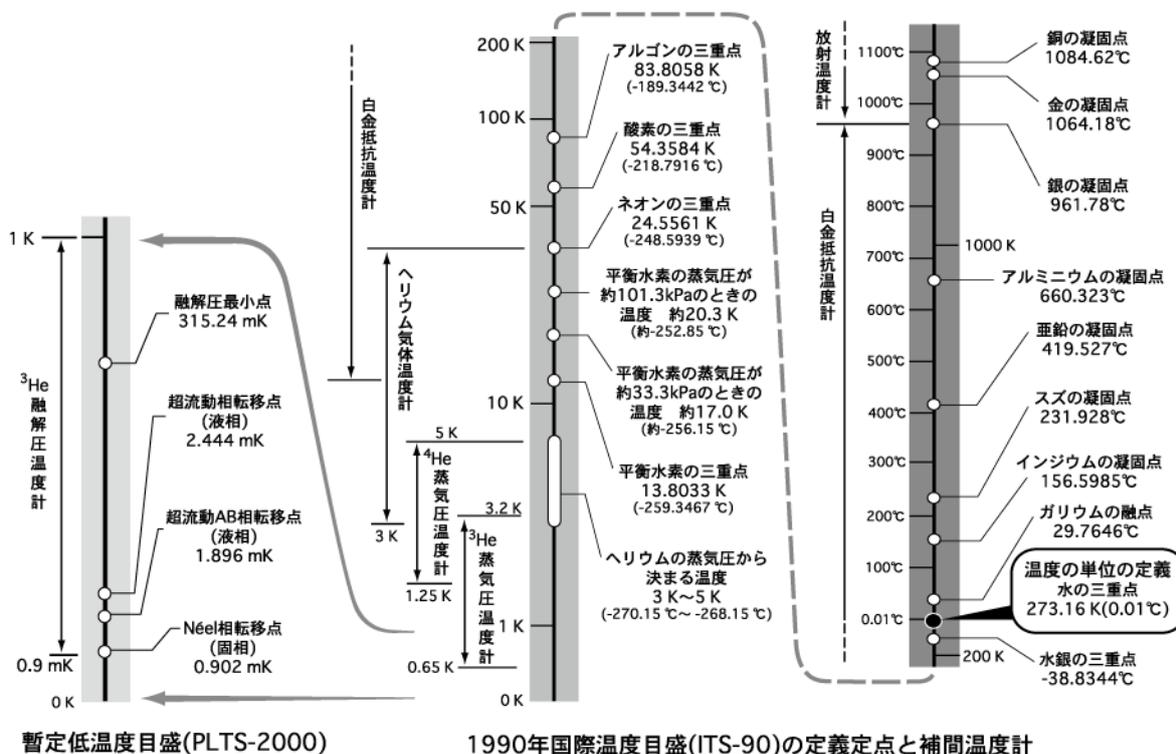


Fig.3 ITS-90 and PLTS-2000.

こうした不純物に起因する偏りを正確に評価するためには、① 個々の定点セルについて、混入している不純物の濃度  $c_i$  を ppm レベルよりも正確に評価する、② 個々の定点金属について、 $\partial T/\partial c_i$  および  $k_{0i}$  を把握する、③ 凝固プラトー中に刻々と変わる  $1/F$  を把握すること、が肝要になる。①については、グロー放電質量分析法 (GDMS) による分析をするのが主流である。②については、データが乏しく、公表されている金属の2元系相図などから読み取るなどの手法が採られる。③については、電気炉の精密な温度制御で、一定の割合で定点金属を凝固させることで推定することができる。例として Fig.5 に我々の開発した不純物測定装置による測定結果を示す。<sup>11)</sup> 不純物測定セル内に挿入した白金抵抗温度計の指示値を◇で、その際の電気炉ヒータの出力を○で示している。まず電気炉の融解点温度よりも3℃高い状態に保持し、定点セル内の金属試料を完全に融解し、続いて過冷却状態を誘発する操作を行った後、凝固点温度のおよそ2℃下の温度で一定となるように制御すると、白金抵抗温度計の指示値◇は一旦、過冷却状態を経て、その後 Fig.5 の時間軸で1時間から9時間の間にあるように凝固プラトーを示す。凝固プラトー中の温度値の変化は、Fig.5 に示した定点セル(セルNo.4)では1mKよりも小さい。このプラトーと同時に測定したヒータの出力○は、最初のうちは過冷却状態を誘発する操作からの復帰で安定しないものの、3時間から9時間の間はほぼ46.5Wで一定となる。その後、定点金属試料が完全に凝固すると、ヒータ出力は48Wとなる。この僅かなヒータ出力の差が、定点金属試料の凝固エンタルピーの現れである。ヒータ出力の時間積分により熱量を求め、金属試料の物質量と凝固エンタルピーとの積とを対比すると、刻々と変わる  $1/F$  を推定することができる。

また、こうした装置を使い、純度の異なる不純物測定セルの凝固プラトーを対比した結果を Fig.6 に示す。従来であれば、5N程度の純度の金属を鋳込んだNo.6の定点セルでは実現温度の正確な評価はできなかったが、 $1/F$  を正確に把握することで、高純度の金属を鋳込んだNo.4の定点セルでも、5N程度のNo.6でも、共に凝固点降下が $1/F$ に対しておおよそ比例関係にあることが分かる。

このように、 $1/F$  を正確に評価できるような装置を開発することで、1mKの桁やそれ以下の桁で生じている不純物に起因する凝固点降下を詳細に評価できるようになった。

以上のように、各国の研究機関は定点セル製作技術や、実現装置についての研究を積み重ね、定点の実現や定点における温度計の校正の不確かさを低減する研究開発を行っている。

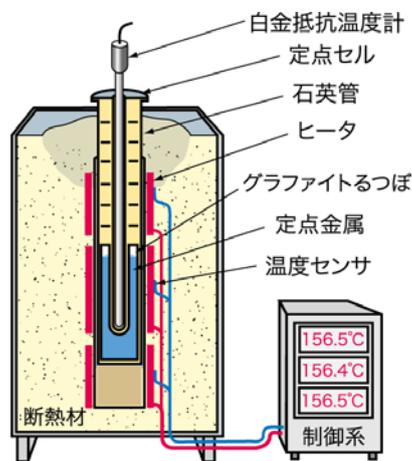


Fig.4 An example of a fixed point furnace with an open type cell.

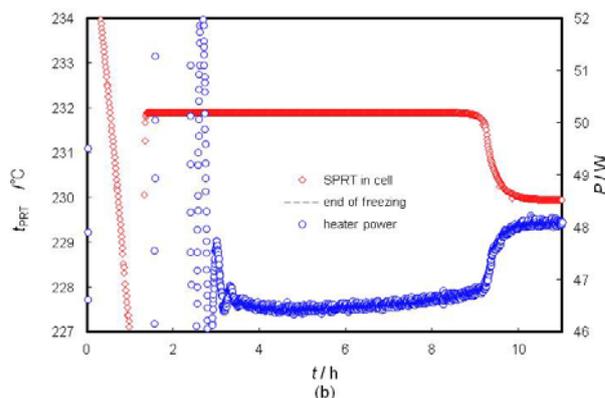


Fig.5 An example of a freezing plateau at the Sn fixed point. The heater power during the freeze was monitored simultaneously. Note that the change of the heating power is reflecting the enthalpy of the phase change of the fixed point metal.

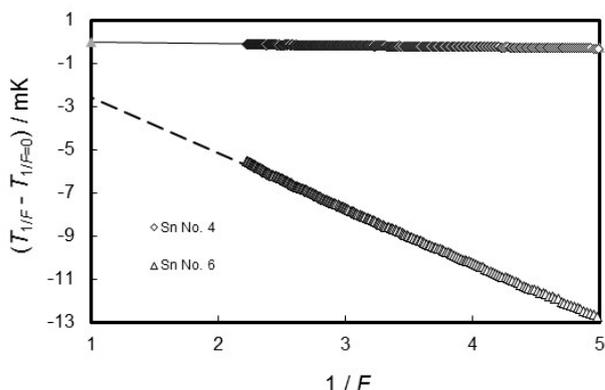


Fig.6 Comparison of the freezing curves of two Sn cells with different purities.

#### 4. 測定のトレーサビリティ

「正確な温度測定」のためには、世界各国のユーザが使用する温度計が統一的な基準に従って正しく校正されていなければならない。そのためには、まず、各国の温度の国家標準の整合性が求められる。そして、その国内において、国家標準に結びつく温度標準が供給され、必要なすべての温度計がこれに基づいて校正されなければならない。温度計ユーザの視点から見れば、用いる温度計は、校正の連鎖によって最終的には国家標準へ遡ることができる、すなわち「国家標準へトレーサブルな温度計」であることが求められる。

Fig.7 はこれを実現するための国際的な枠組みを示している。メートル条約の下で、計量標準の国際相互承認協定 (CIPM MRA<sup>12)</sup>) が締結されており、各国の国家計量標準機関が参加する国際比較などを通して、同等性の確認が行われている。また、各国の国家計量標準機関から、校正事業者を経て、ユーザが現場で使用される計測器の国家標準へのトレーサビリティを確保する体系が整備されている。日本国内では、計量法校正事業者登録制度 (JCSS) が整備されており、例として-196℃以上の温度領域の接触式温度計のトレーサビリティ体系を Fig.8 に示す。

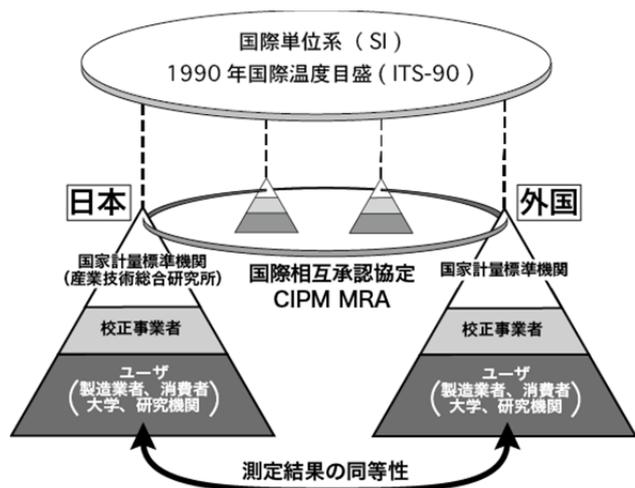


Fig.7 Traceability of measurements to the SI and the CIPM MRA.

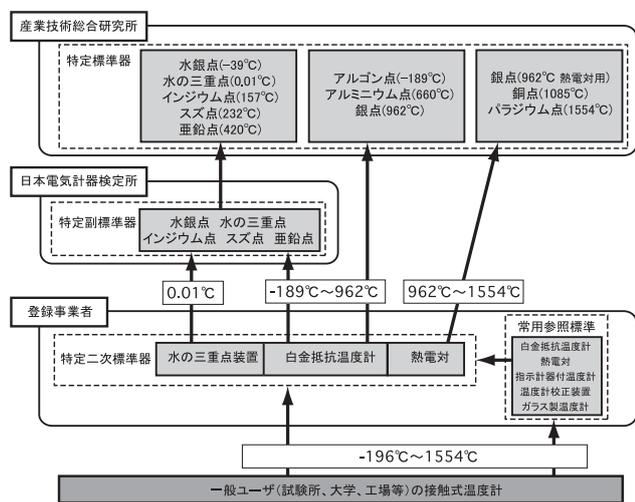


Fig.8 Traceability scheme of contact thermometry above -196 °C within Japan.

### 5. 温度標準の将来展望

メートル条約が締結されてから百年以上経過した今、SI は大きな変革を迎えようとしている。SI の 7 つの基本単位のうちケルビンを含む 4 つの定義を変更する方向性が 2011 年に行われた CGPM で決議された。熱力学温度の単位ケルビンについては、

ケルビンは今後も熱力学温度の単位として使用されるが、その大きさは、SI 単位  $m^2 kg s^{-2} K^{-1}$  (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。

(記号「X」は、最新の科学技術データ委員会基礎物理定数タスクグループによる調整 (CODATA 調整) に基づいて数値に 1 または 2 以上の桁が加えられることを示す。)<sup>13)</sup>

という変更案文を作成し、条件が整った時点で定義の変更を行うこととなった。基礎物理定数に基づく定義への移行の方向性は、キログラム、アンペア、モルについても決議されている。<sup>14)</sup>

主要な国家計量標準機関では、このケルビンの定義の変更の準備のため、各種の熱力学温度計を構築しボルツマン定数  $k$  の測定を行っている。これまで行われてきた様々な定義の変更と同様に、従来の定義と新たな定義との間に矛盾が発生しないように、慎重に検証を重ね、変更に向けた作業を行っている。2010 年に行われた第 25 回 CCT において、定義の変更にあたって条件として 2 つ以上の異なる原理の一次温度計による測定を基にして得られたボルツマン定数の値の相対不確かさのオーダーが  $10^{-6}$  以下となることと決議している。<sup>15)</sup> 最近の論文での最新データの公表状況から、近々に条件が達成されるのではと予測されている。

本稿の 2 節や 3 節でも触れたように、実際の器物に依存した定義には曖昧さがあることは事実である。読者の中には、上記に掲げられたように、条件が整い、ケルビンの定義変更が実現された日には、熱力学温度計による熱力学温度の測定を直接行うことができるため、国際温度目盛はその役割を終えると考えられる方もいるだろう。しかし、現実的には、そう簡単ではない。最も不確かさの小さい音響気体温度計 (AGT) でも、その不確かさは水の三重点の再現性よりも劣るものである。また、熱力学温度計も、本稿 3 節でも触れたように装置自体が大型で現場の測定に使用できるものではない。こうしたことから、現行の 1990 年国際温度目盛 ITS-90 は、当分の間はそのまま使用するということが国際的に合意されている。

ただ一方で、1990 年の発効以降、測定技術の進展に伴い、当時は熱力学温度目盛の最良の近似と言われていた ITS-90 についても、熱力学温度との差異が存在することが明らかになってきている。<sup>16)</sup> 現時点ではまだ見通せないものの、新しいケルビンの定義が行われた際には、各定義定点の熱力学温度の再評価や、再評価された値を基にした新たな温度目盛についての議論が生じる可能性もある。今回のケルビンの定義の変更は、非常に高い温度域や非常に低い温度域を除いては即効的に不確かさの低減などに結びつくものではなく、むしろ、今後の科学技術の進展を誘起し定義自体の曖昧さをなくすための最初のステップであるといえる。

NMIJ/AIST でも音響気体温度計 (AGT) および熱雑音温度計 (JNT) の熱力学温度計の新たな構築に着手している。

AGT は、金属製の共鳴器内に単原子分子の気体を封入して音響共鳴周波数を測定し、共鳴周波数と共鳴器の寸法とから気体の音速を求め、分子が相互作用しない理想気体を考えると、音速  $u$  は温度  $T$  の関数として

$$u^2 = \frac{\gamma k T}{m} \tag{2}$$

と書ける。ここで単原子分子の理想気体の比熱比  $\gamma=5/3$ 、 $m$  は気体の平均分子質量である。この関係から熱力学温度を測定するものである。1989 年に米国 NIST が初めてのデータを公表したが、定義変更に向けたボルツマン定数の測定で、フランス LNE、英国 NPL、伊 INRiM などが球状の共鳴器を利用した測定でめざましい成果を挙げている。NMIJ/AIST でも、球状の共鳴器を利用したシステムを開発する途上にある。

熱雑音温度計 (JNT) は抵抗体の発する熱雑音のスペクトル密度  $S_V$

$$S_V = 4kTR \tag{3}$$

を観測する。 $R$  は抵抗体の抵抗値である。非常に微小な雑音信号の観測のために 2 系統の増幅器を使用し、両信号の相関を取る事でノイズスペクトルを観測する。NMIJ/AIST では、雑音の基準発生源としてジョセフソン素子を使った量子基準雑音信号源を使用し、高精度な計測を目指している。

他にも低温域については、定積気体温度計 (CVGT) を開発し熱力学温度の測定結果を既に報告している。<sup>17)</sup>また、高温域については、絶対放射温度測定のプロジェクトを立ち上げ、NMIJ/AISTとして、幅広い温度域での熱力学温度測定を行うための装置を、研究開発により構築しつつあり、メートル条約や次世代の温度標準のための貢献を目指している。

## 文 献

- 1) 櫻井弘久：温度とは何か，コロナ社 (1992).
- 2) メートル条約に基づく組織と活動のあらまし，産業技術総合研究所 計量標準総合センター (2012).  
[https://www.nmij.jp/~imco/metric/aramashi\\_2012.pdf](https://www.nmij.jp/~imco/metric/aramashi_2012.pdf)
- 3) 国際文書第 8 版 (2006) 国際単位系 (SI)，日本規格協会 (2007).  
<https://www.nmij.jp/library/units/si/R8/SI8J.pdf>
- 4) M. Stock *et al.*, *Metrologia*, 2006, **43**, Tech. Suppl., 03001
- 5) J. Tamba *et al.*, *Int J. Thermophys* **29**, pp.1749–1760 (2008).
- 6) 櫻井弘久，田村収，新井優：1990 年国際温度目盛に関する補足情報，計量研究所報告 **41-4**, P.307 (1992).
- 7) 丹波：産総研 TODAY **9**, p.26 (2009).  
[http://www.aist.go.jp/aist\\_j/aistinfo/aist\\_today/vol09\\_03/vol09\\_03\\_p26.pdf](http://www.aist.go.jp/aist_j/aistinfo/aist_today/vol09_03/vol09_03_p26.pdf)
- 8) K. D. Hill, *Metrologia* **38**, 79 (2001).
- 9) M. J. Ballico, *Meas. Sci. Technol.* **10**, L33 (1999).
- 10) 1990 年国際温度目盛 (ITS-90)，計量研究所報告 **40-4**, P.60 (1991).
- 11) K. Yamazawa *et al.*, *Int J. Thermophys* **28**, pp.1941–1956 (2007).
- 12) 田中充：産総研 Today **4**, pp.14-15 (2004).  
[http://www.aist.go.jp/aist\\_j/aistinfo/aist\\_today/vol04\\_10/vol4\\_10\\_p14\\_15.pdf](http://www.aist.go.jp/aist_j/aistinfo/aist_today/vol04_10/vol4_10_p14_15.pdf)
- 13) 産総研計量標準総合センターによる和訳。原文は  
<http://www.bipm.org/en/convention/cgpm/resolutions.html>
- 14) 大苗 敦，洪 鋒雷，清水忠雄：パリティ **28**, pp.24–32 (2013).
- 15) <http://www.bipm.org/utis/common/pdf/CCT25.pdf>
- 16) J. Fischer, *et al.*, *Int. J. Thermophys.* **32**, pp.12–25 (2011).
- 17) O. Tamura *et al.*, *Int. J. Thermophys.* **32**, pp.1366–1377 (2011).