

# 標準改定の歴史、今回の改定と今後

産業技術総合研究所 計量標準総合センター  
臼田孝(国際度量衡委員)

日本学術会議 公開シンポジウム

# 単位の歴史

尺: 親指と人差し指を広げて物にあてて長さを測っている形

フィート: 足の大きさ

キュビット: 肘から中指の先までの長さ

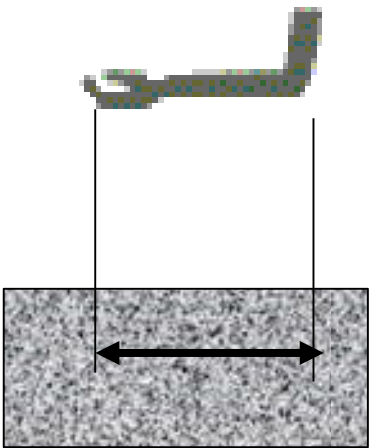
体の部位に由来

インチ: 大麦3粒の長さ

自然物に由来

カラット: ローマ帝国の質量単位・イナゴマメのタネの質量0.2グラム

# 古代エジプトの単位



キュビット:ファラオの肘から中指の先までの長さ

**定義**

花崗岩に刻まれた基準

**現示・原器**



木や金属で作った物差し

**複製・校正**



ピラミッドの建設

# 定義・現示・単位系

- 定義: 単位を決定する約束事  
不変であること・あいまいさが無い事→ファラオの腕の長さ(?), 地球の大きさ、... 光の速さ、量子(電子質量、特定の波長の光子エネルギー...)
- 現示: その約束事から実際に基準を作り出すこと  
技術的に確立していることが必要  
→職人技(?), 物理現象(振り子の等時性、干渉、...), 量子現象(超電導デバイス、原子トラップ...)
- 単位系: 単位や表現の合理的な組み合わせ  
首尾一貫していること(測定量が同じなら同じ単位)  
複数の基本単位の結合によって組立量を表現

現在は国際単位系(SI)に統合されています



# 国際単位系 (SI) 基本単位の定義

## 7つのSI基本単位 (名称・単位記号・定義)

### 長さ：メートル (単位記号：m)

メートルは、1秒の299 792 458分の1の時間に光が真空中を伝わる行程の長さである。

### 質量：キログラム (単位記号：kg)

キログラムは質量の単位であって、単位の大きさは国際キログラム原器の質量に等しい。

### 時間：秒 (単位記号：s)

秒は、セシウム 133の原子の基底状態の二つの超微細構造準位間の遷移に対応する放射の周期の9 192 631 770倍の継続時間である。

### 電流：アンペア (単位記号：A)

アンペアは、真空中に1メートルの間隔で平行に配置された無限に小さい円形断面積を有する無限に長い二本の直線状導体のそれぞれを流れ、これらの導体の長さ1メートルにつき  $2 \times 10^{-7}$  ニュートンの力を及ぼし合う一定の電流である。

### 熱力学温度：ケルビン (単位記号：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。

### 物質質量：モル (単位記号：mol)

1. モルは、0.012キログラムの炭素 12の中に存在する原子の数に等しい数の要素粒子を含む系の物質質量である。
2. モルを用いるとき、要素粒子 (原語：entités élémentaires) が指定されなければならないが、それは原子、分子、イオン、電子、その他の粒子又はこの種の粒子の特定の集合体であってよい。

### 光度：カンデラ (単位記号：cd)

カンデラは、周波数540テラヘルツの単色放射を放出し、所定方向におけるその放射強度が1/683ワット毎ステラジアンである光源の、その方向における光度である。

# 基本7単位とこれまでの定義

基礎定数または常用定数に基づく定義:

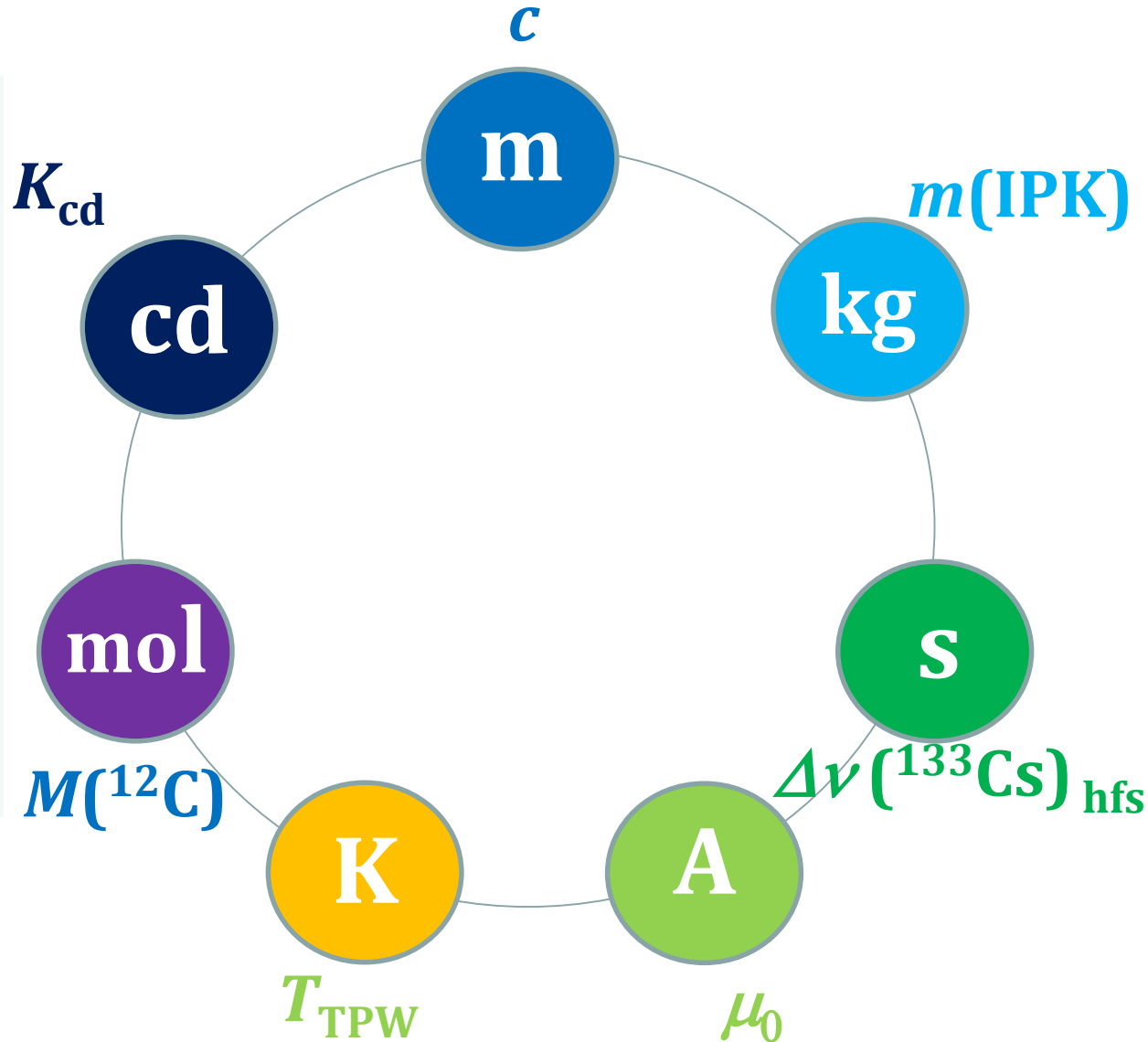
- 長さ ( $c$ : 光速)
- 電流 ( $\mu_0$  真空の透磁率)
- 光度 ( $K_{cd}$ : 視感効率)

物質定数に基づく定義:

- 時間 ( $^{133}\text{Cs}$ )
- 温度 ( $\text{H}_2\text{O}$ )
- 物質質量 ( $^{12}\text{C}$ )

原器に基づく定義:

- 質量 (IPK: 国際原器)



# 基本7単位とこれまでの定義

基礎定数または常用定数に基づく定義:

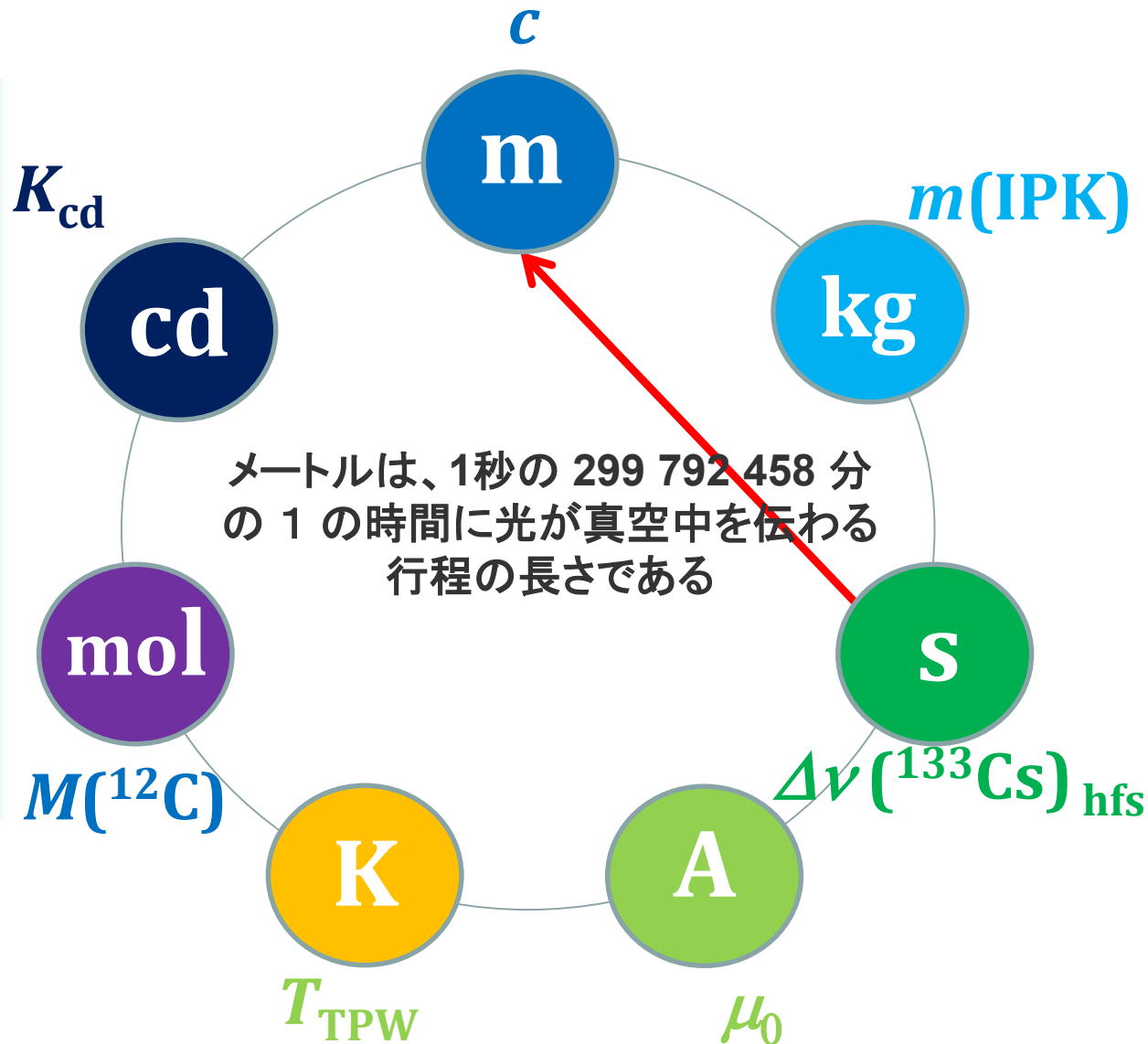
- 長さ ( $c$ : 光速)
- 電流 ( $\mu_0$  真空の透磁率)
- 光度 ( $K_{cd}$ : 視感効率)

物質定数に基づく定義:

- 時間 ( $^{133}\text{Cs}$ )
- 温度 ( $\text{H}_2\text{O}$ )
- 物質質量 ( $^{12}\text{C}$ )

原器に基づく定義:

- 質量 (IPK: 国際原器)





# 基本7単位とこれまでの定義

基礎定数または常用定数に基づく定義:

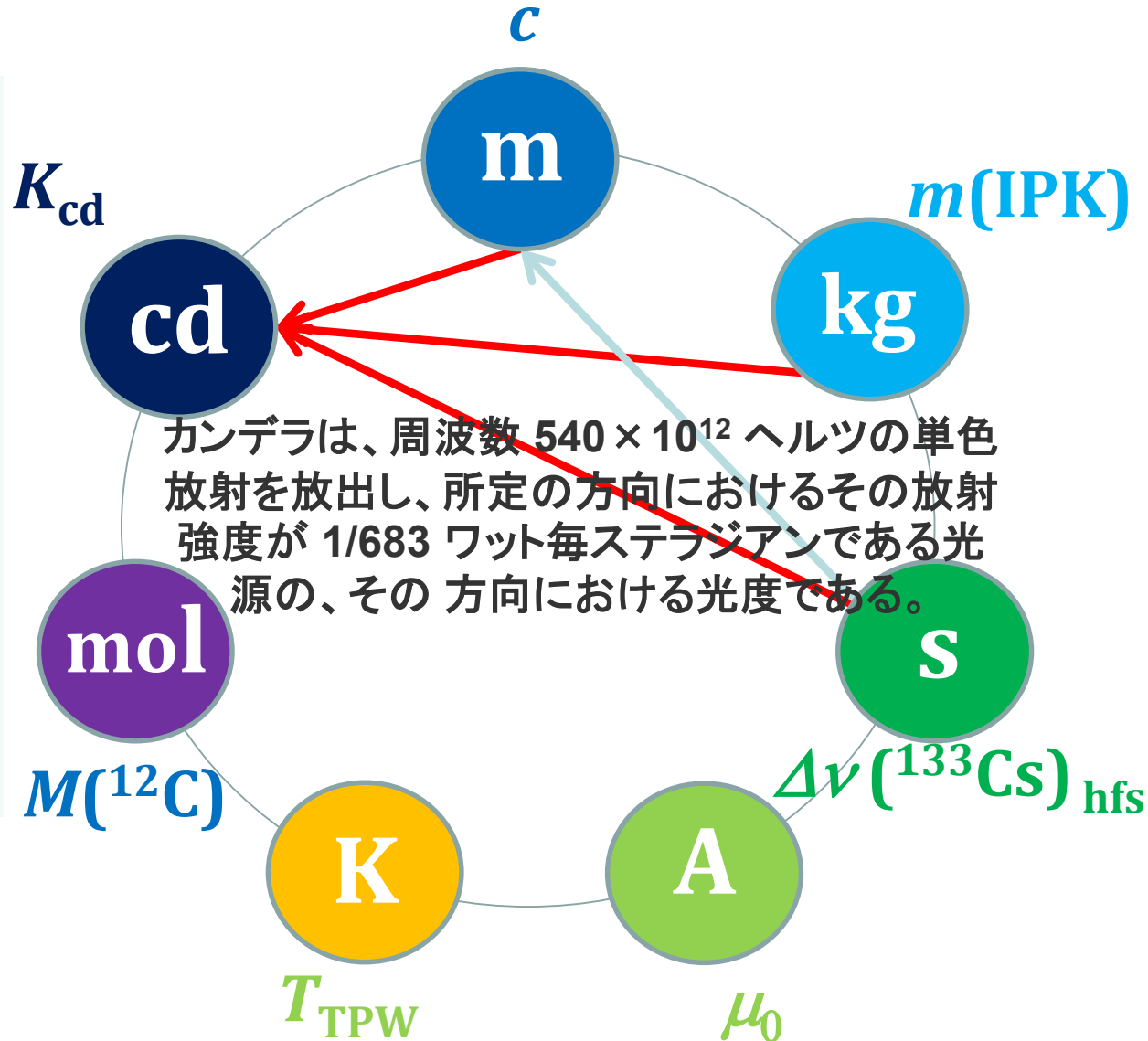
- 長さ ( $c$ : 光速)
- 電流 ( $\mu_0$  真空の透磁率)
- 光度 ( $K_{cd}$ : 視感効率)

物質定数に基づく定義:

- 時間 ( $^{133}\text{Cs}$ )
- 温度 ( $\text{H}_2\text{O}$ )
- 物質質量 ( $^{12}\text{C}$ )

原器に基づく定義:

- 質量 (IPK: 国際原器)



# 基本7単位とこれまでの定義

基礎定数または常用定数に基づく定義:

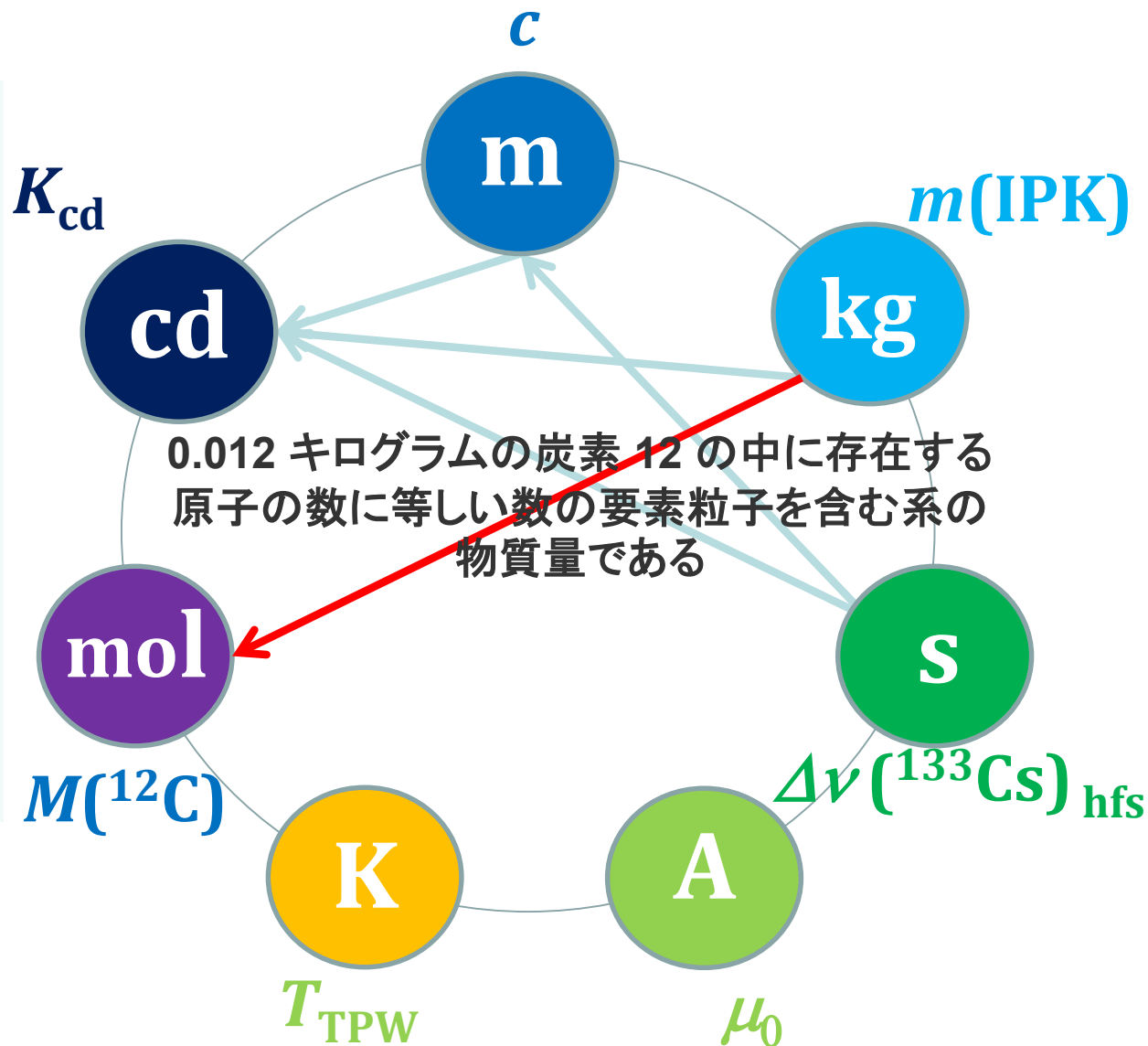
- 長さ ( $c$ : 光速)
- 電流 ( $\mu_0$  真空の透磁率)
- 光度 ( $K_{cd}$ : 視感効率)

物質定数に基づく定義:

- 時間 ( $^{133}\text{Cs}$ )
- 温度 ( $\text{H}_2\text{O}$ )
- 物質質量 ( $^{12}\text{C}$ )

原器に基づく定義:

- 質量 (IPK: 国際原器)



# 基本7単位とこれまでの定義

基礎定数または常用定数に基づく定義:

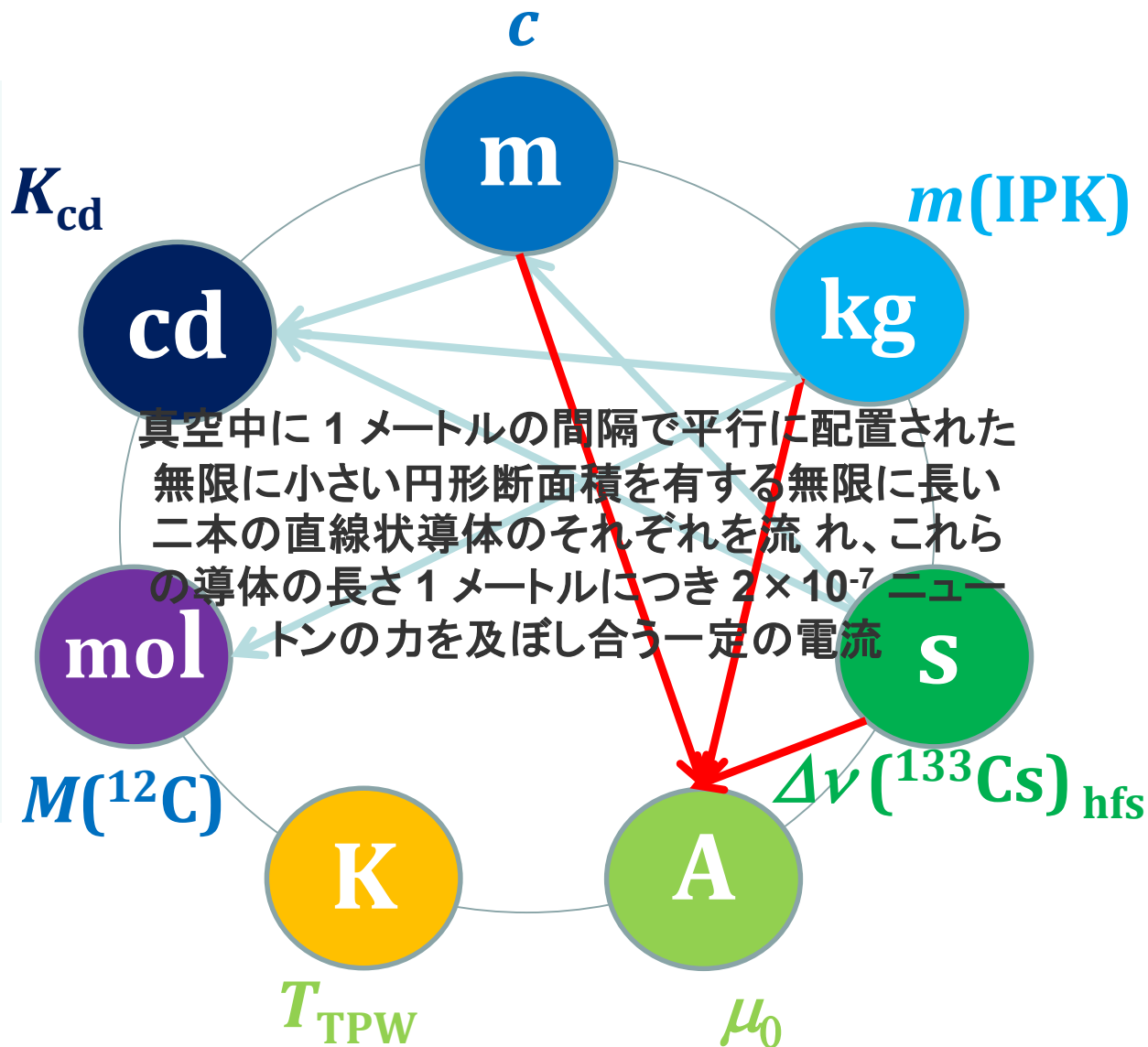
- 長さ ( $c$ : 光速)
- 電流 ( $\mu_0$  真空の透磁率)
- 光度 ( $K_{cd}$ : 視感効率)

物質定数に基づく定義:

- 時間 ( $^{133}\text{Cs}$ )
- 温度 ( $\text{H}_2\text{O}$ )
- 物質質量 ( $^{12}\text{C}$ )

原器に基づく定義:

- 質量 (IPK: 国際原器)



# 基本7単位とこれまでの定義

基礎定数または常用定数に基づく定義:

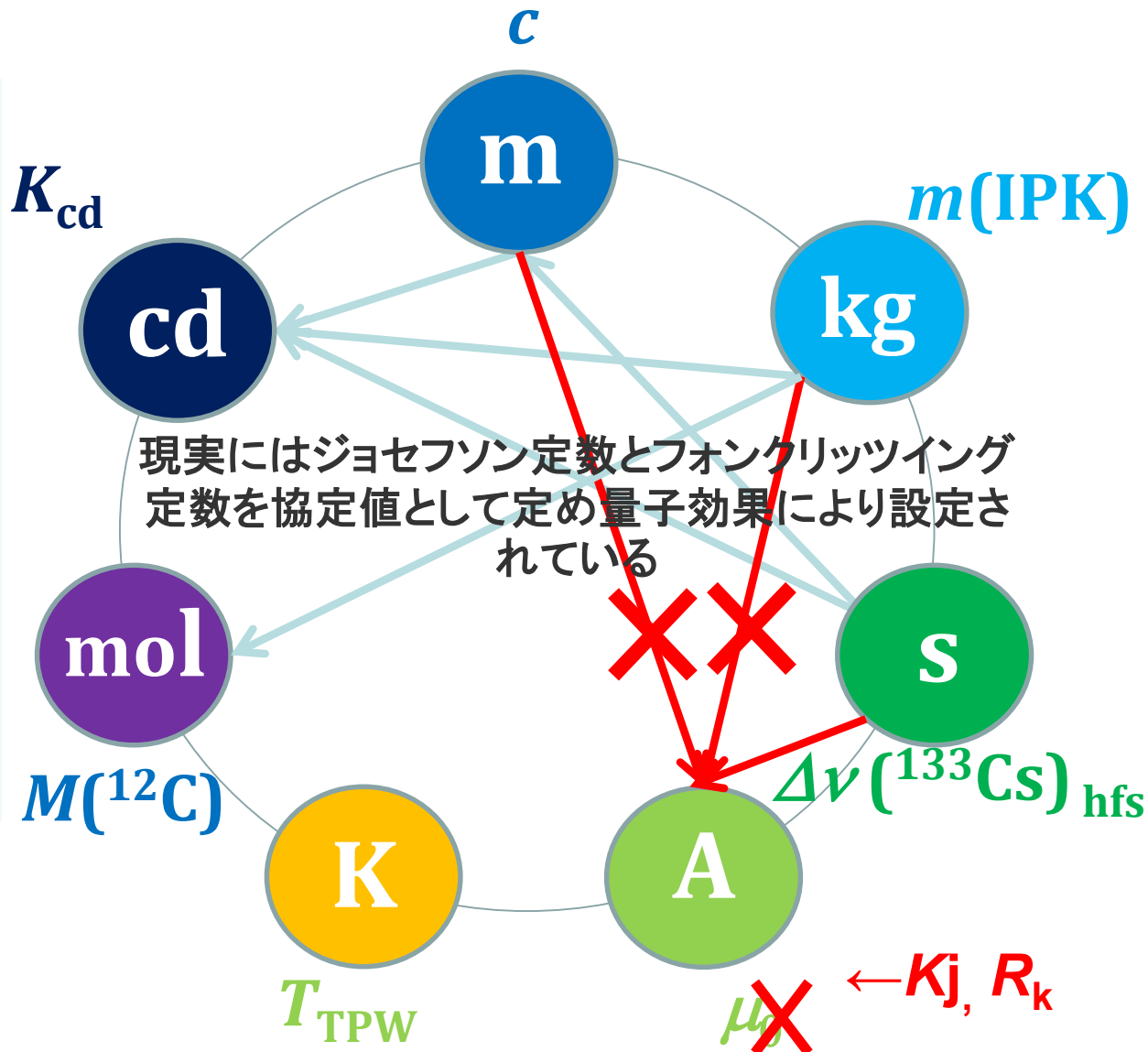
- 長さ ( $c$ : 光速)
- 電流 ( $\mu_0$  真空の透磁率)
- 光度 ( $K_{cd}$ : 視感効率)

物質定数に基づく定義:

- 時間 ( $^{133}\text{Cs}$ )
- 温度 ( $\text{H}_2\text{O}$ )
- 物質質量 ( $^{12}\text{C}$ )

原器に基づく定義:

- 質量 (IPK: 国際原器)



# 基本7単位とこれまでの定義

より普遍的

基礎定数または常用定数に基づく定義:

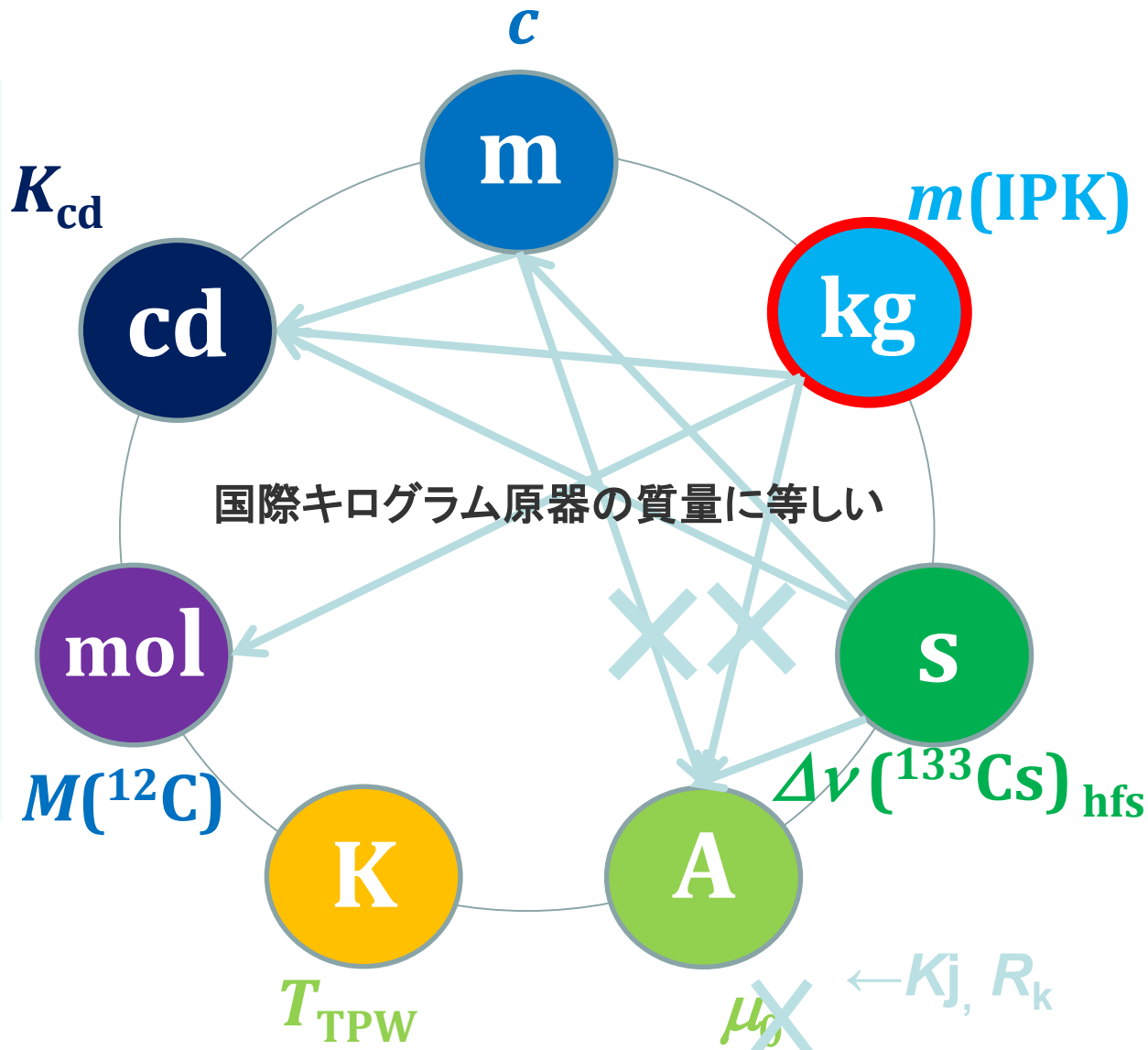
- 長さ ( $c$ : 光速)
- 電流 ( $\mu_0$  真空の透磁率)
- 光度 ( $K_{cd}$ : 視感効率)

物質定数に基づく定義:

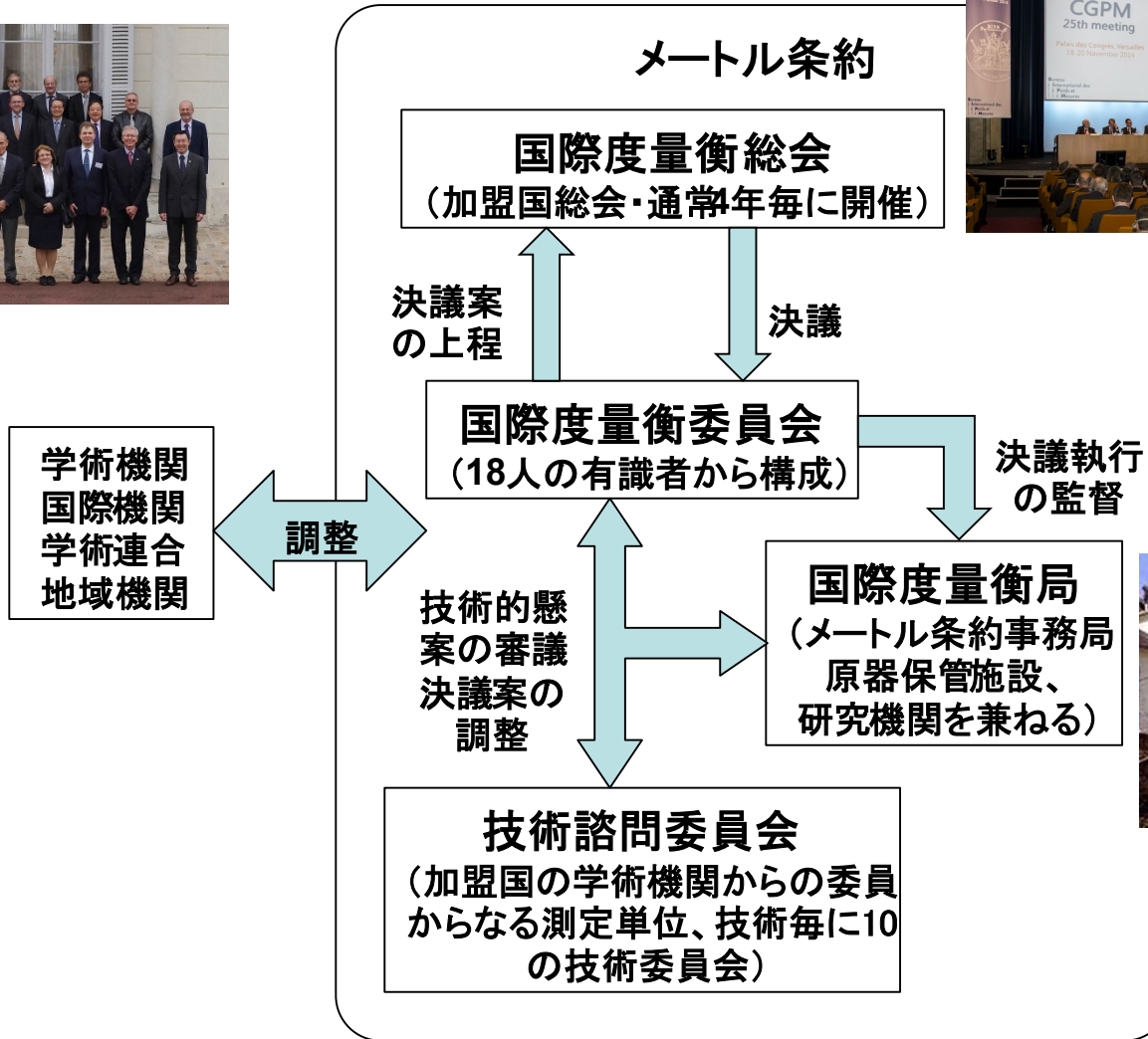
- 時間 ( $^{133}\text{Cs}$ )
- 温度 ( $\text{H}_2\text{O}$ )
- 物質質量 ( $^{12}\text{C}$ )

原器に基づく定義:

- 質量 (IPK: 国際原器)



# メートル条約と関連機関



画像はBIPM提供

# 国際度量衡総会における主な決議

第1回(1889年)原器に基づく長さ、質量単位の承認

キログラム原器の誕生

第9回(1948年)水の三重点に基づく国際温度目盛りの承認

水の三重点を $0.01^{\circ}\text{C}$ とする熱力学温度の体系の承認

第11回(1960年)「メートル」(m)の定義を真空中における放射波長に基づいて決定

→メートルの原器からの解放(この時はクリプトンランプの光の波長)

第13回(1967年)熱力学温度の単位名称とその記号「ケルビン」(K)及びその定義を決定

第14回(1971年)国際単位系(SI)基本単位として物質量の単位「モル」(mol)を採用

→7つの基本単位系の承認

第17回(1983年)「メートル」(m)を光速度に基づく定義に改定

→ここでメートルはふたたび定義が改定

# 国際度量衡総会における主な決議

## 第24回(2011年)

- ▶ 今後考えられる国際単位系(SI)改定について
  - ✓ 将来の定義をプランク定数、ボルツマン定数などの基礎物理定数で定義すること
  - ✓ 具体的期限は定めず、世界の関係機関に研究加速を要請

## 第25回(2014年)

- ▶ 今後考えられる国際単位系(SI)改定について
  - ✓ キログラム、モル、アンペア、ケルビン4つの基本単位の改定を次回総会に向けて準備する
  - ✓ 全世界の研究機関に測定値報告の要請

2017年7月 定義改定に必要な測定値の締め切り

2017年10月 国際度量衡委員会で調整値の承認

## 第26回(2018年11月)

- ▶ 国際単位系(SI)改定について
  - ✓ キログラム、モル、アンペア、ケルビン4つの基本単位の改定
  - ✓ 改定の実施は2019年5月20日とする



# 基本7単位とこれまでの定義

より普遍的

基礎定数または常用定数に基づく定義:

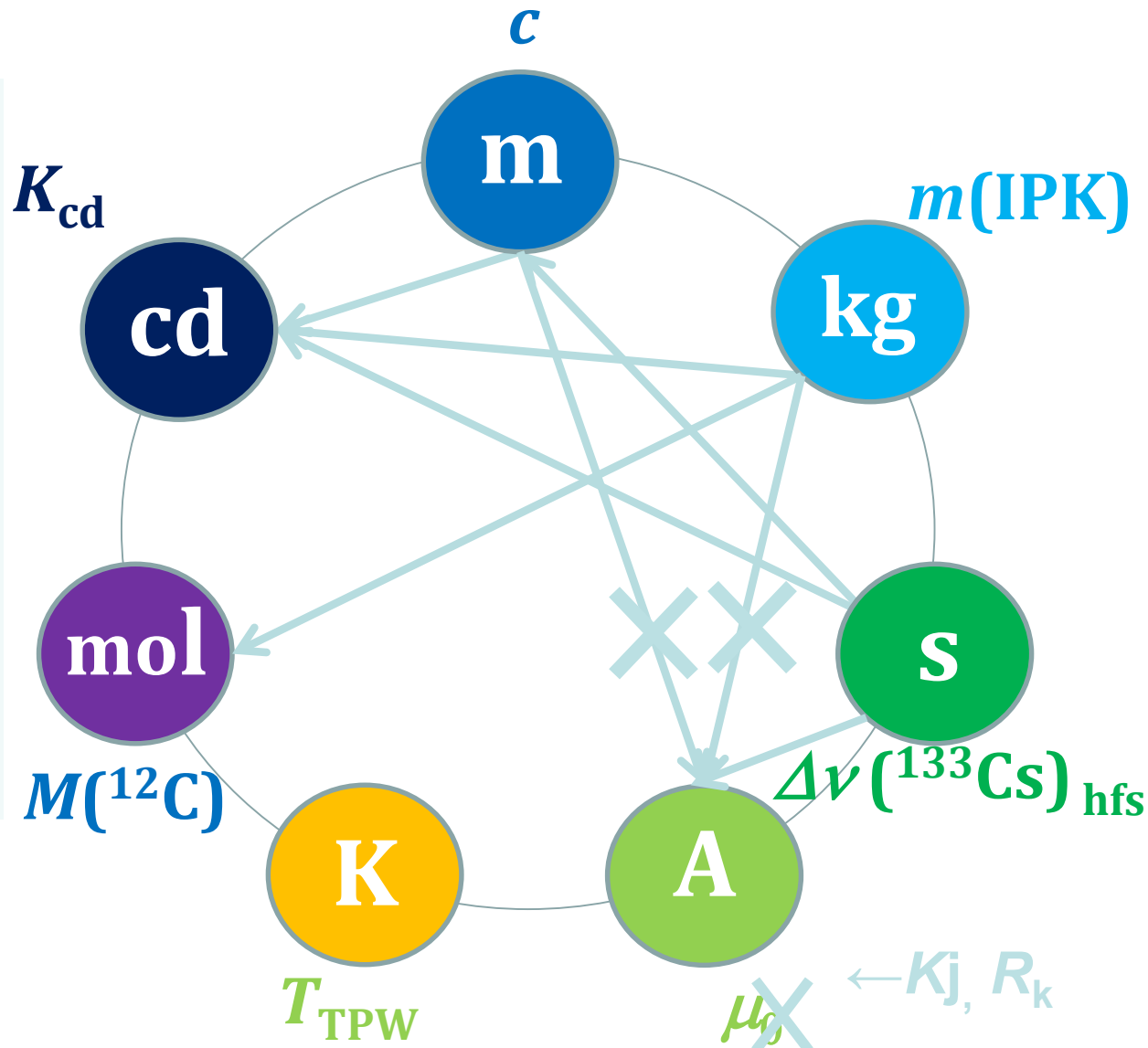
- 長さ ( $c$ : 光速)
- 電流 ( $\mu_0$  真空の透磁率)
- 光度 ( $K_{cd}$ : 視感効率)

物質定数に基づく定義:

- 時間 ( $^{133}\text{Cs}$ )
- 温度 ( $\text{H}_2\text{O}$ )
- 物質質量 ( $^{12}\text{C}$ )

原器に基づく定義:

- 質量 (IPK: 国際原器)



# 定義改定後の基本7単位

基礎定数または常用定数に基づく定義:

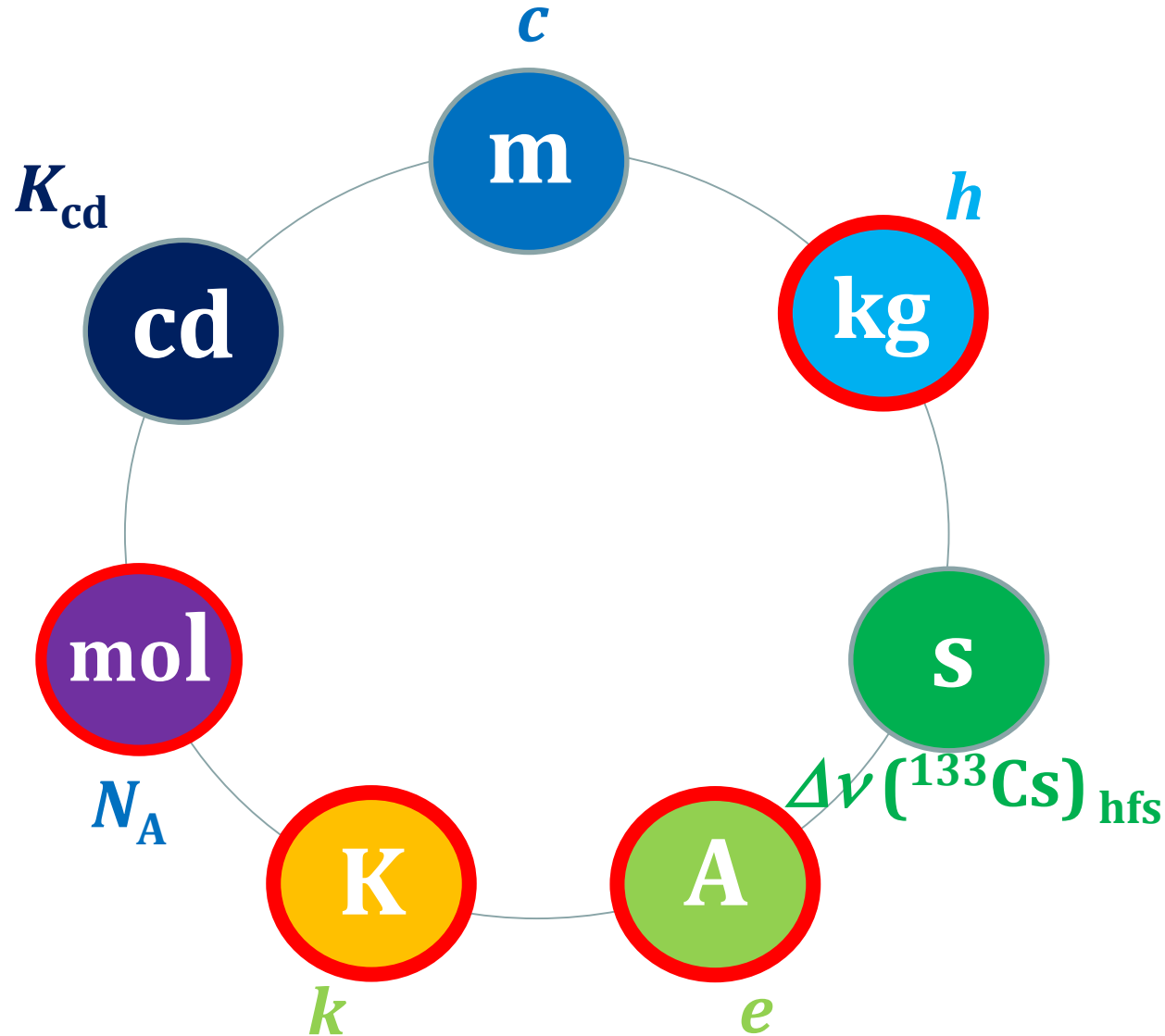
- 長さ ( $c$ : 光速)
- 質量 ( $h$ : プランク定数)
- 電流 ( $e$ : 電気素量)
- 光度 ( $K_{cd}$ : 視感効率)
- 温度 ( $k$ : ボルツマン定数)
- 物質質量 ( $N_A$ : アボガドロ定数)

物質定数に基づく定義:

- 時間 ( $^{133}\text{Cs}$ )

原器に基づく定義:

- 無し



# 定義改定後の基本7単位

基礎定数または常用定数に基づく定義:

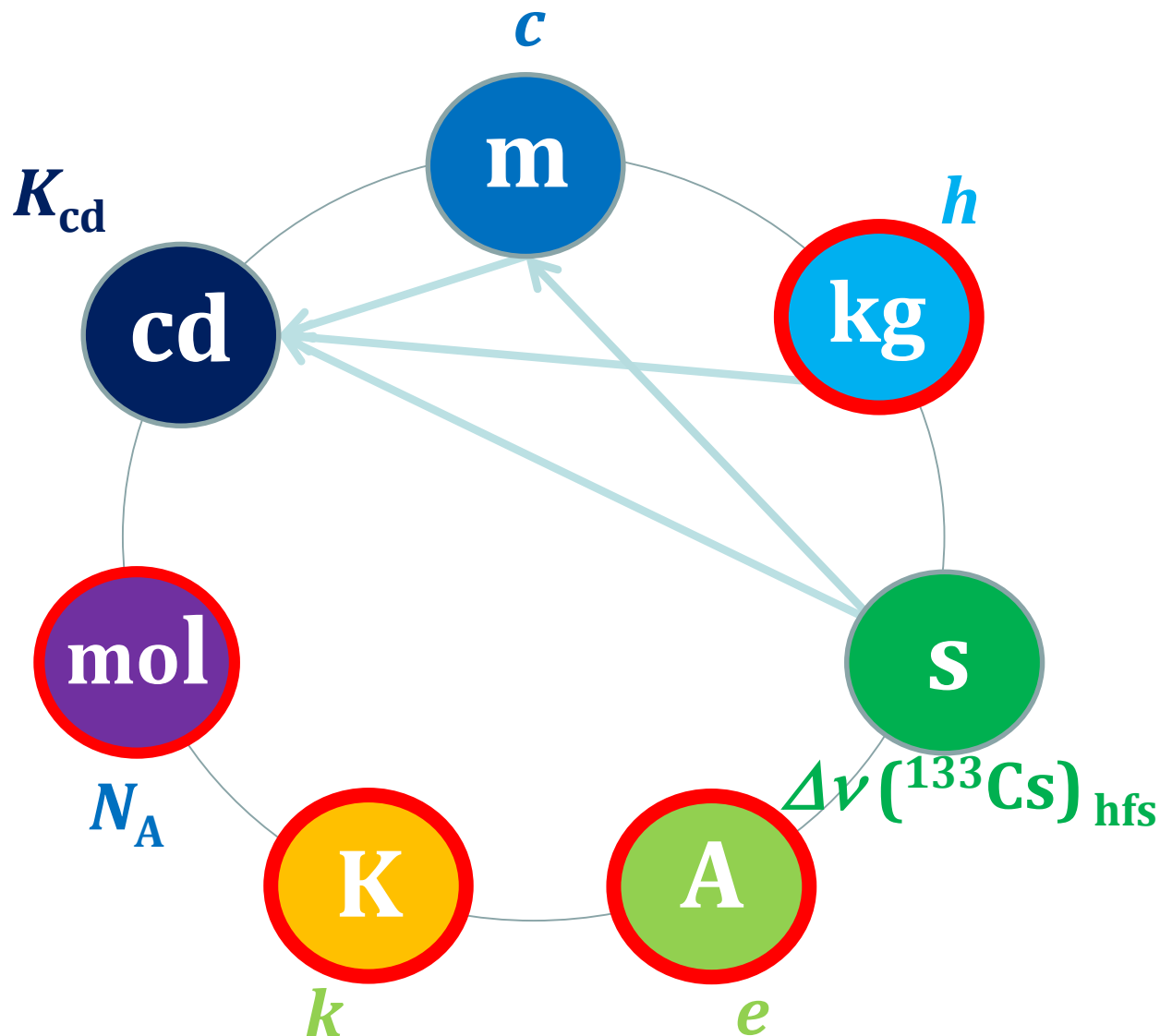
- 長さ ( $c$ : 光速)
- 質量 ( $h$ : プランク定数)
- 電流 ( $e$ : 電気素量)
- 光度 ( $K_{cd}$ : 視感効率)
- 温度 ( $k$ : ボルツマン定数)
- 物質質量 ( $N_A$ : アボガドロ定数)

物質定数に基づく定義:

- 時間 ( $^{133}\text{Cs}$ )

原器に基づく定義:

- 無し



# 定義改定後の基本7単位

基礎定数または常用定数に基づく定義:

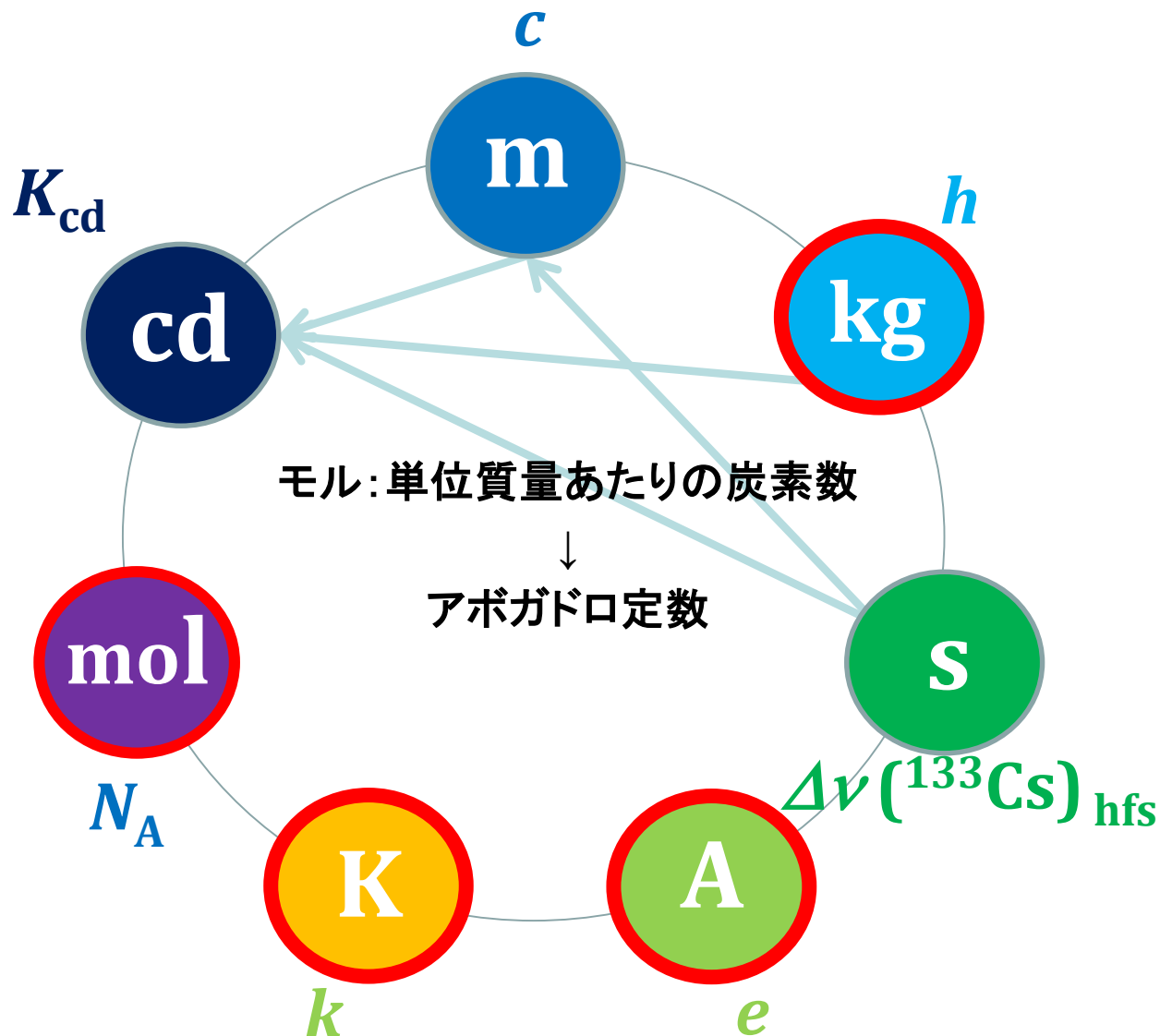
- 長さ ( $c$ : 光速)
- 質量 ( $h$ : プランク定数)
- 電流 ( $e$ : 電気素量)
- 光度 ( $K_{cd}$ : 視感効率)
- 温度 ( $k$ : ボルツマン定数)
- 物質質量 ( $N_A$ : アボガドロ定数)

物質定数に基づく定義:

- 時間 ( $^{133}\text{Cs}$ )

原器に基づく定義:

- 無し



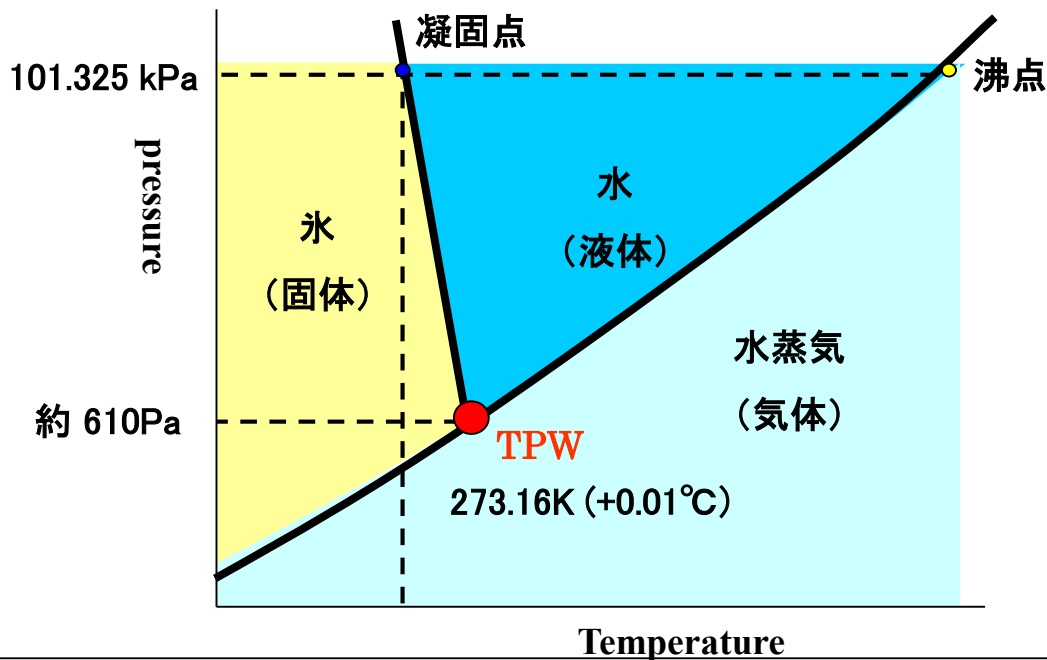
# 熱力学温度の単位: ケルビン (K)

「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

$$t / ^\circ\text{C} = T / \text{K} - 273.15$$



# ケルビンの新しい定義

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)

$T_{TPW}$ にはKを単位とする正確な数値がある.

$T_{TPW}$ : 水の三重点の温度

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  $m^2 kg s^{-2} K^{-1}$  で表したときのボルツマン定数の値を正確に  $1.380\ 649 \times 10^{-23}$  と定めることによって設定される. (2019年)

$k$ には $m^2 kg s^{-2} K^{-1}$  ( $=J K^{-1}$ )を単位とする正確な数値がある.

$k$ : ボルツマン定数

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.

$$E_{thermal} = kT$$

# 定義改定後の基本7単位

基礎定数または常用定数に基づく定義:

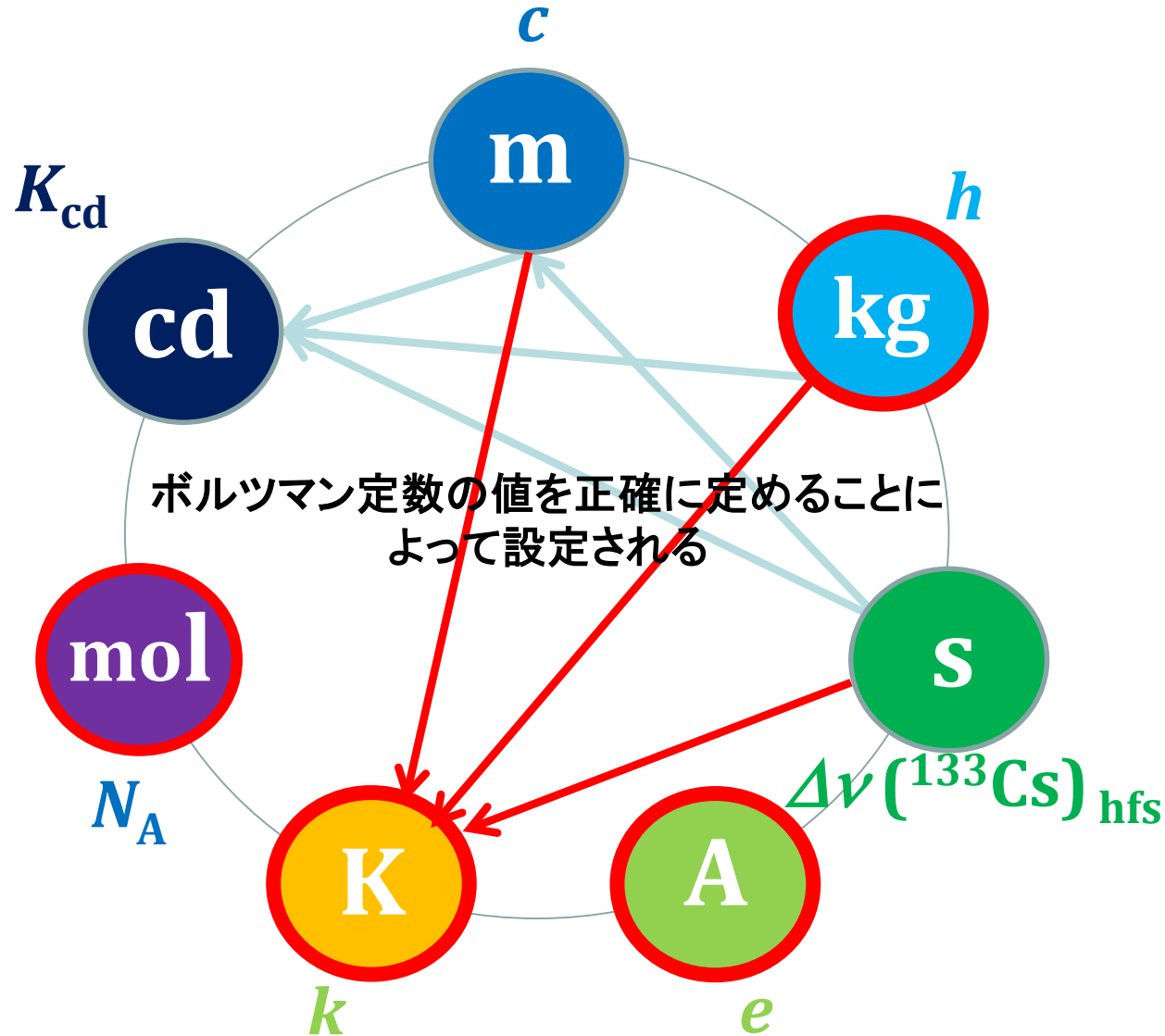
- 長さ ( $c$ : 光速)
- 質量 ( $h$ : プランク定数)
- 電流 ( $e$ : 電気素量)
- 光度 ( $K_{cd}$ : 視感効率)
- 温度 ( $k$ : ボルツマン定数)
- 物質質量 ( $N_A$ : アボガドロ定数)

物質定数に基づく定義:

- 時間 ( $^{133}\text{Cs}$ )

原器に基づく定義:

- 無し



# 定義改定後の基本7単位

基礎定数または常用定数に基づく定義:

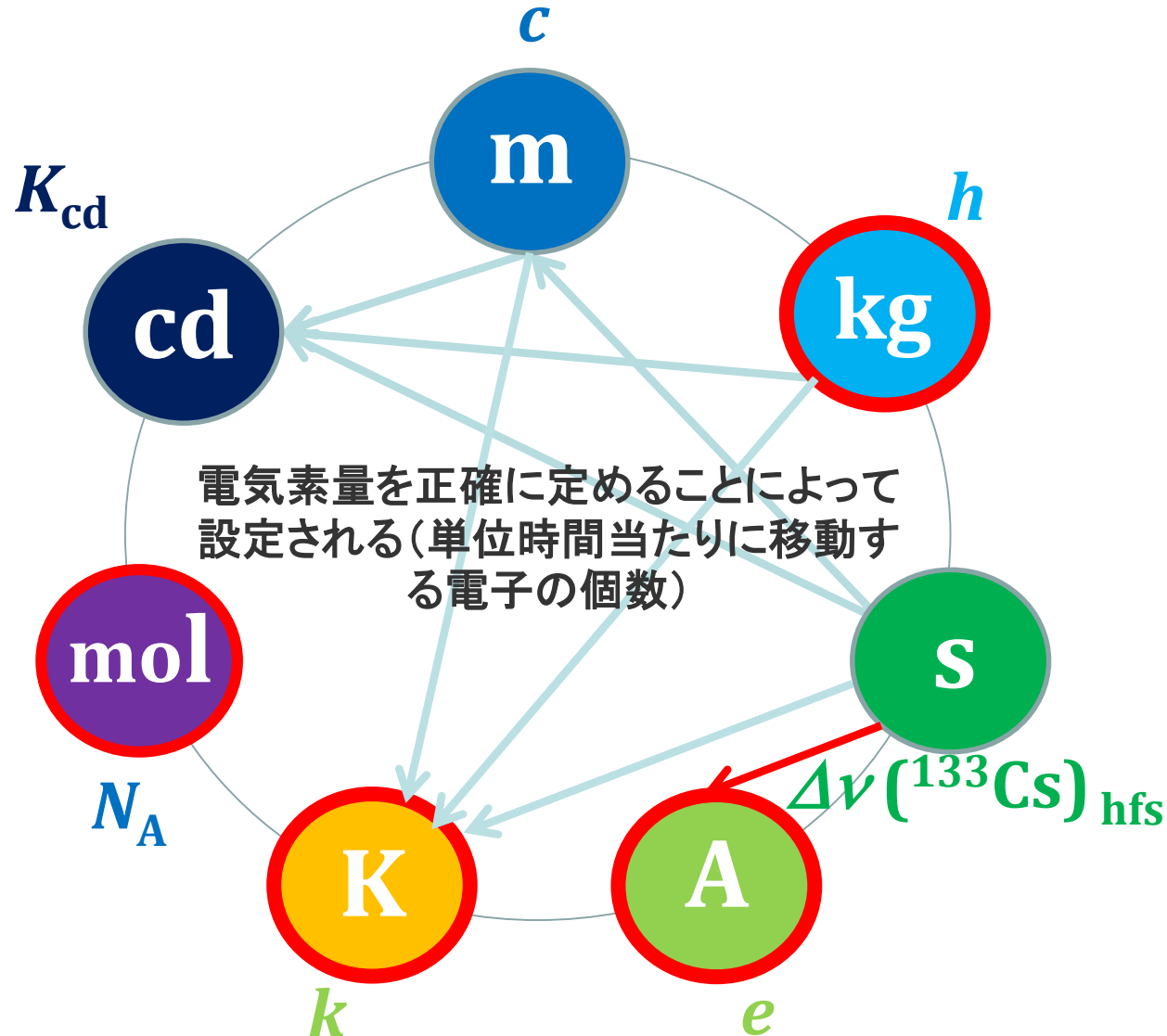
- 長さ ( $c$ : 光速)
- 質量 ( $h$ : プランク定数)
- 電流 ( $e$ : 電気素量)
- 光度 ( $K_{cd}$ : 視感効率)
- 温度 ( $k$ : ボルツマン定数)
- 物質質量 ( $N_A$ : アボガドロ定数)

物質定数に基づく定義:

- 時間 ( $^{133}\text{Cs}$ )

原器に基づく定義:

- 無し





# 定義改定後の基本7単位

基礎定数または常用定数に基づく定義:

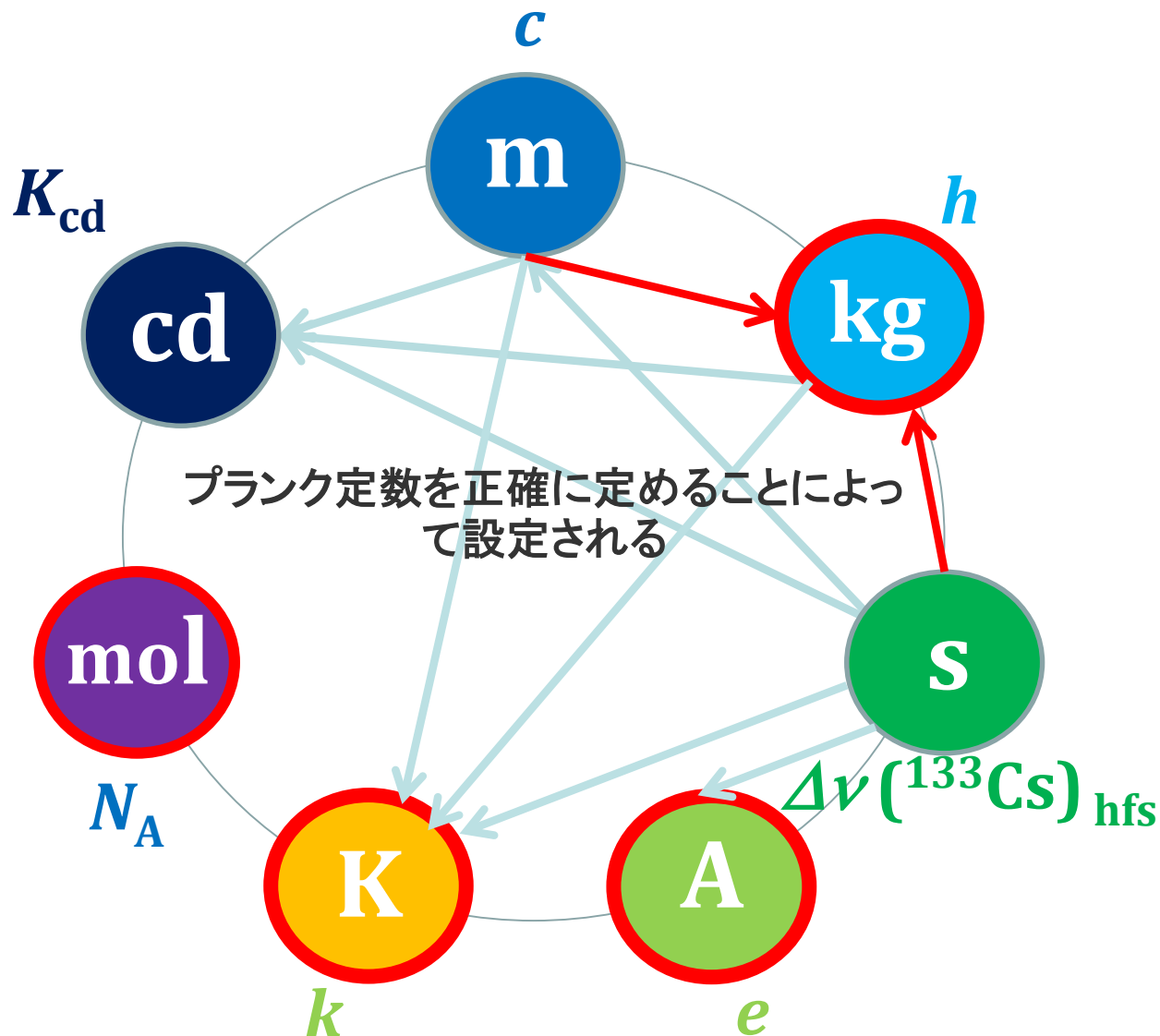
- 長さ ( $c$ : 光速)
- 質量 ( $h$ : プランク定数)
- 電流 ( $e$ : 電気素量)
- 光度 ( $K_{cd}$ : 視感効率)
- 温度 ( $k$ : ボルツマン定数)
- 物質質量 ( $N_A$ : アボガドロ定数)

物質定数に基づく定義:

- 時間 ( $^{133}\text{Cs}$ )

原器に基づく定義:

- 無し



# CODATAによる調整値と確定値

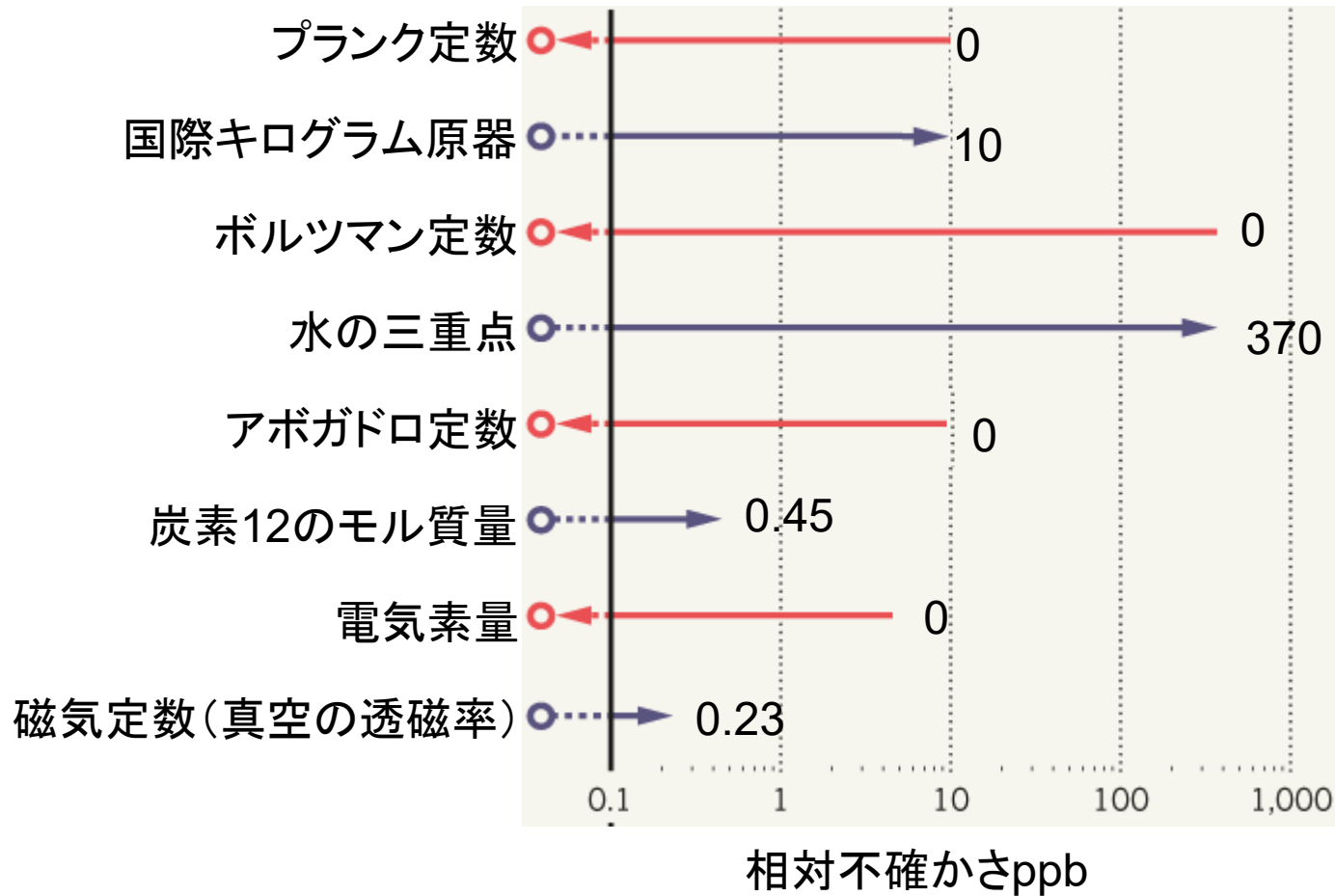
## 調整値

Quantity	Value	Relative standard uncertainty $u_r$
$h$	$6.626\ 070\ 150(69) \times 10^{-34} \text{ J s}$	$1.0 \times 10^{-8}$
$e$	$1.602\ 176\ 6341(83) \times 10^{-19} \text{ C}$	$5.2 \times 10^{-9}$
$k$	$1.380\ 649\ 03(51) \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$	$3.7 \times 10^{-7}$
$N_A$	$6.022\ 140\ 758(62) \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$	$1.0 \times 10^{-8}$

## 確定値

Quantity	Value
$h$	$6.626\ 070\ 15 \times 10^{-34} \text{ J s}$
$e$	$1.602\ 176\ 634 \times 10^{-19} \text{ C}$
$k$	$1.380\ 649 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$
$N_A$	$6.022\ 140\ 76 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$

# 定義改定後の変化量



# 定義改定前後の校正値の違い

- キログラム: 1キログラムにつき10ppb(10億分の10: 10 $\mu$ グラム)の不確かさがキログラム原器に付与される。測定結果自体のジャンプはない。
- 電流(電気量): 現在のジョセフソン電圧標準に対して100ppb程度、量子ホール抵抗標準に対して20ppb程度のジャンプを生じる。一次階層校正事業者レベルでは標準電圧源、標準抵抗の短期安定度に包含されるレベルであり、影響は無い。
- 熱力学温度: 水の三重点(273.16ケルビン)において370ppb(約0.13ミリケルビン)の不確かさが生じる。これは水の三重点再現性よりも大きな不確かさであるが、当面温度目盛り(90年の国際温度目盛り: ITS-90)が維持されるので温度計測における影響は全くない。
- 物質質量: 炭素12の1モルが厳密には12グラムでなくなる。

# 本日のシンポジウムに寄せて

- 現時点で直ちに精度の向上が無くとも将来に活用の余地を残す  
→長さ定義改定の経緯との対比。
- 定義とは未来の我々に向けたメッセージ。未来の人類の方が賢いだろう、出来る限り汎用な表現とすべきだろう。
- 科学が細分化している中において、基礎物理定数をキーワードに議論をすることは、まさに FundamentalでUniversalな理解をもたらすだろう。
- 世界的な協力で得られた偉業。平和の恩恵、科学の透明性にも一石。