

打ち合わせ資料 2018年8月9日@産総研つくば中央第三事業所

# 質量の単位「キログラム」の新たな定義

産業技術総合研究所

計量標準総合センター 工学計測標準研究部門

質量標準研究グループ長 倉本 直樹 (n.kuramoto@aist.go.jp)

- 質量の単位「キログラム」
  - 50 kg → 50 × 1 kg
  - 1 kgが具体的にどれくらいの質量か？  
→ キログラムの定義
  - 国際キログラム原器
- 単位の定義は科学技術の発展と共に進化
- まもなく普遍的な物理定数であるプランク定数を基準とする定義に移行予定



国際キログラム原器

- 世界に一つしかない分銅
- この分銅の質量がちょうど1 kg
- 質量が変動している可能性

# 長さの単位「メートル」の歴史

18世紀末のフランス(フランス革命の頃)

地球の子午線の長さを基準としてメートルを定義

1889年: 世界に一つしかないものさし 国際メートル原器

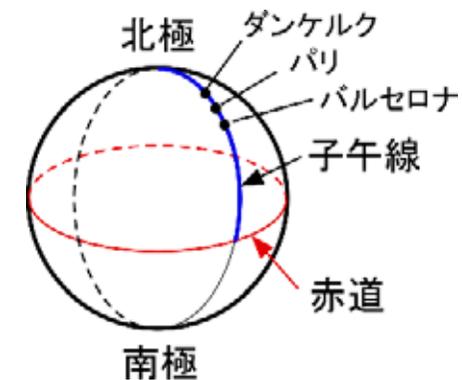
の長さとして再定義

→ 経年変化、損傷、紛失のリスク

1983年: レーザーに関する科学技術の発展をうけ、普遍的な物理定数である真空中の光

の速度に基づく現在の定義への改定

→ メートル原器と比較して、約1000倍高い精度で長さの基準をつくることが可能



メートルの定義の進化

## 国際単位系：世界共通の単位のシステム

- 7つの基本単位
  - メートル（長さ、m） : 真空中の光速度が基準
  - 秒（時間、s） : セシウム原子に共鳴するマイクロ波の周期
  - ケルビン（温度、K） : 水の三重点の熱力学温度
  - キログラム（質量、kg） : 国際キログラム原器の質量
  - アンペア（電流、A） : 仮想的な導体を流れる電流（透磁率を規定）
  - モル（物質量、mol） :  $^{12}\text{C}$  12 g中の原子数
  - カンデラ（光度、cd） : 540 THzの単色放射に対する視感効率
- 基本単位の定義：普遍的な物理定数あるいは物質固有の物理現象に基づく
- キログラム：人工物に依存する唯一の基本単位

# 質量の単位「キログラム」の歴史

18世紀末のフランス(フランス革命の頃)

「水1リットルの質量」として定義

1889年: 世界に一つしかない分銅 **国際キログラム原器** の質量  
として再定義



国際キログラム原器

現在: 依然として**国際キログラム原器**の質量が定義

- 約130年間、同一の分銅が世界中の質量の基準
- 表面汚染などによる100年間の質量変動は**100万分の50 g**
- **100万分の50 g / 1 kg = 1億分の5**(国際キログラム原器の長期安定性)
  - 2011年: 将来、プランク定数に基づく定義に移行する国際的合意
  - 産総研を含む世界各国の研究所でのプランク定数実施
  - ターゲット: **1億分の5** を凌ぐ精度

およそ指紋  
1個の質量!

## プランク定数とキログラム

プランク定数  $h = 6.626 \cdots \times 10^{-34} \text{ J s}$

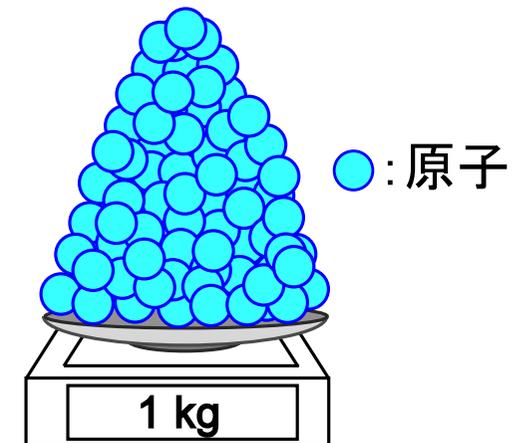
- $E = h\nu$ 、 $E$ : 光のエネルギー、 $\nu$ : 光の振動数
- 光の持つエネルギーの最小単位

プランク定数を基準として電子一個あたりの質量  $m(e)$  を高精度に導出可能

$$m(e) = \frac{2R_{\infty}h}{c\alpha^2}$$

$c$  : 真空中の光速度  
 $\alpha$  : 微細構造定数  
 $R_{\infty}$  : リュドベリ定数

- 電子の質量と任意の原子の質量との比は高い精度で分かっている
- プランク定数を基準として、非常に多数の原子の質量として1 kg を表現できる



# キログラムの新たな定義

第24回国際度量衡総会決議(2011年)

キログラムの大きさは、プランク定数の値を正確に  
 $6.626\ 06XX \times 10^{-34} \text{ J s}$ と定めることによって設定される

- XX: 定義改定の時点の最も信頼できる測定値から決定  
→ 世界各国の研究機関でのプランク定数測定

## プランク定数測定方法

- キップルバランス法(米国、カナダ、フランス、スイス、中国、韓国)
  - 電氣的測定によってプランク定数  $h$  を決定
- X線結晶密度法(日本、ドイツなど)
  - アボガドロ定数  $N_A$  を決定 → プランク定数  $h$  を導出

$$N_A = \frac{M_e}{m_e} = \frac{cM_e \alpha^2}{2R_\infty h}$$

$c$  : 真空中の光速  
 $\alpha$  : 微細構造定数  
 $R_\infty$  : リュードベリ定数

# アボガドロ定数 $N_A$

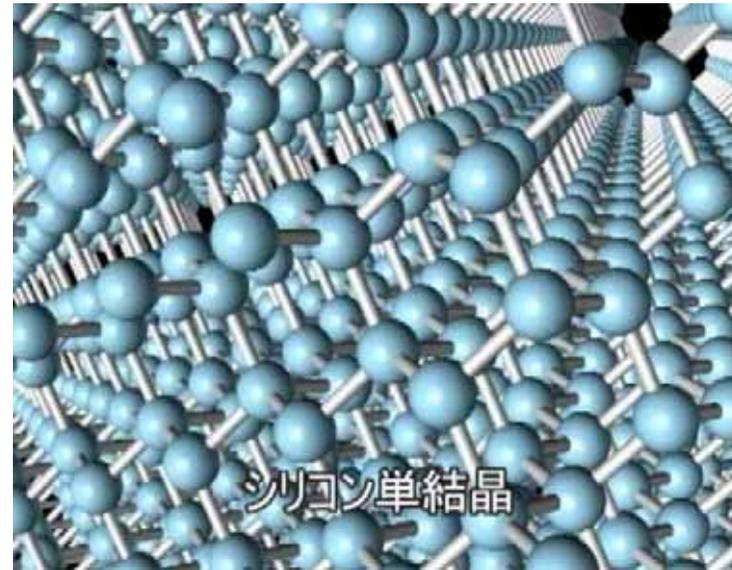
- 物質 1 mol に含まれる原子の数
  - $^{12}\text{C}$  12 g 中の  $^{12}\text{C}$  の数
- $N_A = 6.022 \dots \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$

## 最も単純な測定方法

- $^{12}\text{C}$  12 g 中の  $^{12}\text{C}$  を一つずつ数える
- 原子一個を操作できるピンセット
  - 操作速度：2 GHz、20億個/秒



10,000,000 年



結晶を使って原子をまとめて数える

## X線結晶密度法

# X線結晶密度法によるアボガドロ定数測定

## シリコン単結晶

- 格子定数:  $a$
- 密度:  $\rho$  (Si 球体の質量  $m$  と体積  $V$ 、 $\rho = m/V$ )
- モル質量:  $M$  ( $^{28}\text{Si}$ 、 $^{29}\text{Si}$ 、 $^{30}\text{Si}$ の存在比)
  - 同位体: 原子番号は一緒でも、質量数が異なる元素

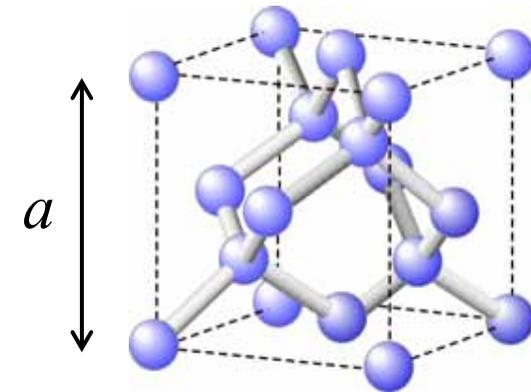
### 原子数

$$N_A = 8 \frac{V}{a^3} \frac{M}{m} = \frac{8M}{\rho a^3}$$

- 単位格子数
- molあたりの量への変換ファクター

## 産総研による $N_A$ の測定(2003)

- $N_A$  の測定精度:  $2 \times 10^{-7}$  (1億分の20)
  - ボトルネック: モル質量測定
- 国際キログラム原器の長期安定性:  $5 \times 10^{-8}$  (1億分の5)



## シリコン結晶単位格子

- 8個のSi原子を含む



## シリコン単結晶球体

- 質量: 約 1 kg
- 直径: 約 94 mm

## $^{28}\text{Si}$ 同位体濃縮結晶

	自然同位体比 Si	同位体濃縮 $^{28}\text{Si}$
$^{28}\text{Si}$	92 %	99.995 %
$^{29}\text{Si}$	5 %	0.003%
$^{30}\text{Si}$	3 %	0.002%
モル質量測定精度	$1 \times 10^{-7}$ (1億分の10)	$1 \times 10^{-8}$ (1億分の1)

## アボガドロ国際プロジェクト

- ターゲット:  $^{28}\text{Si}$ 同位体濃縮結晶の製作、アボガドロ定数高精度測定



国際度量衡局 (BIPM)



イタリア計量研究所 (INRIM)



欧州標準物質計測研究所 (IRMM)



米国標準技術研究所 (NIST)



オーストラリア計量研究所 (NMIA)



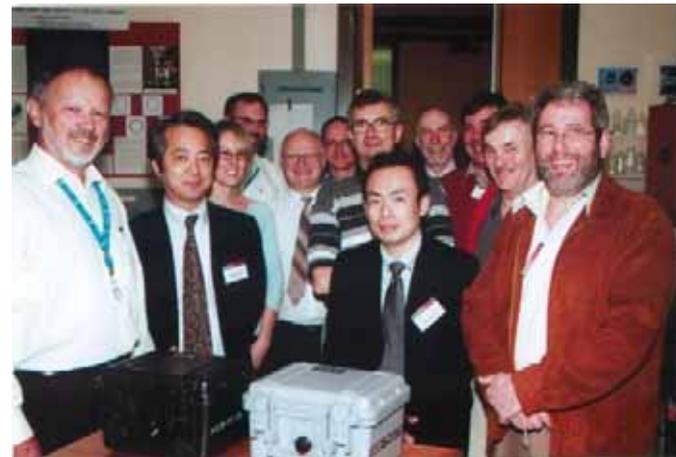
産業技術総合研究所 (AIST)



英国物理研究所 (NPL)



ドイツ物理工学研究所 (PTB)



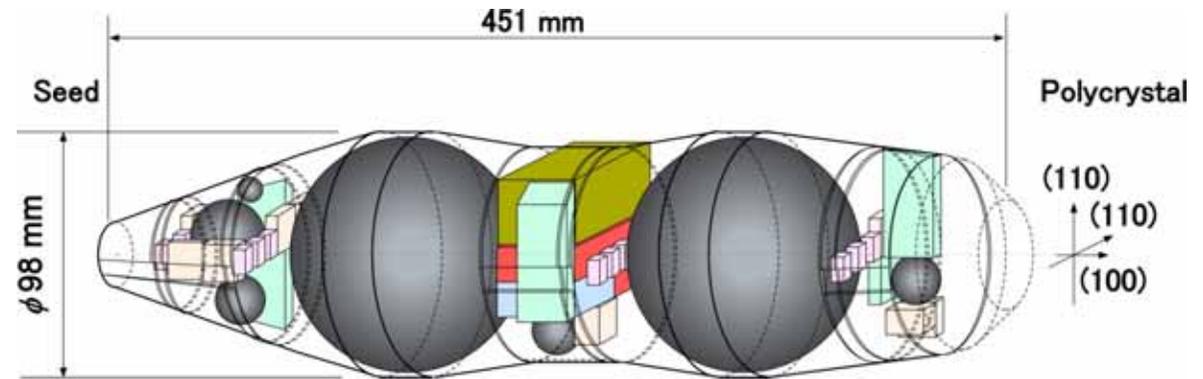
プロジェクト会合@ シドニー in 2008

# $^{28}\text{Si}$ 同位体濃縮結晶



$^{28}\text{Si}$ 同位体濃縮結晶

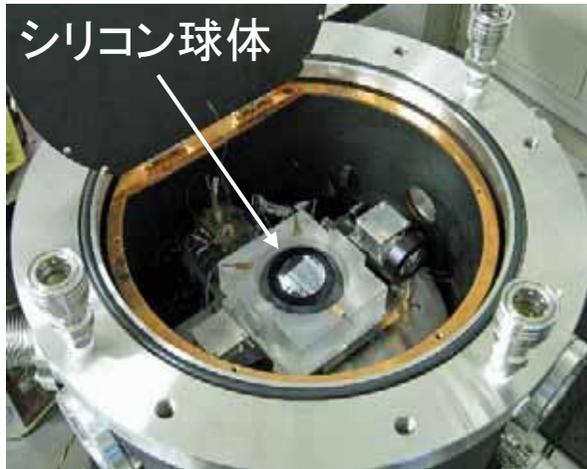
- 質量 : 5 kg
- 濃縮度 : 99.99 %



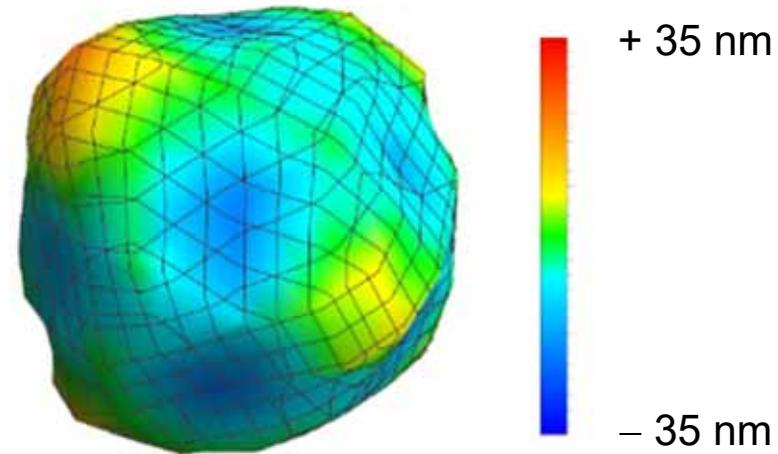
1 kg  $^{28}\text{Si}$  球体

- 体積、質量、表面分析、モル質量、格子定数

## シリコン球体体積測定

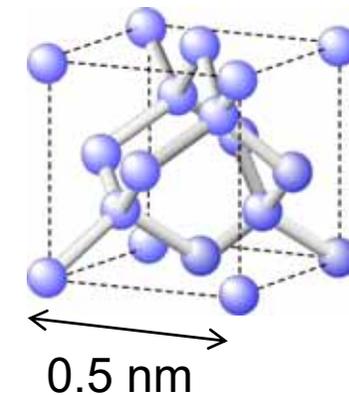


球体直径測定用レーザー干渉計



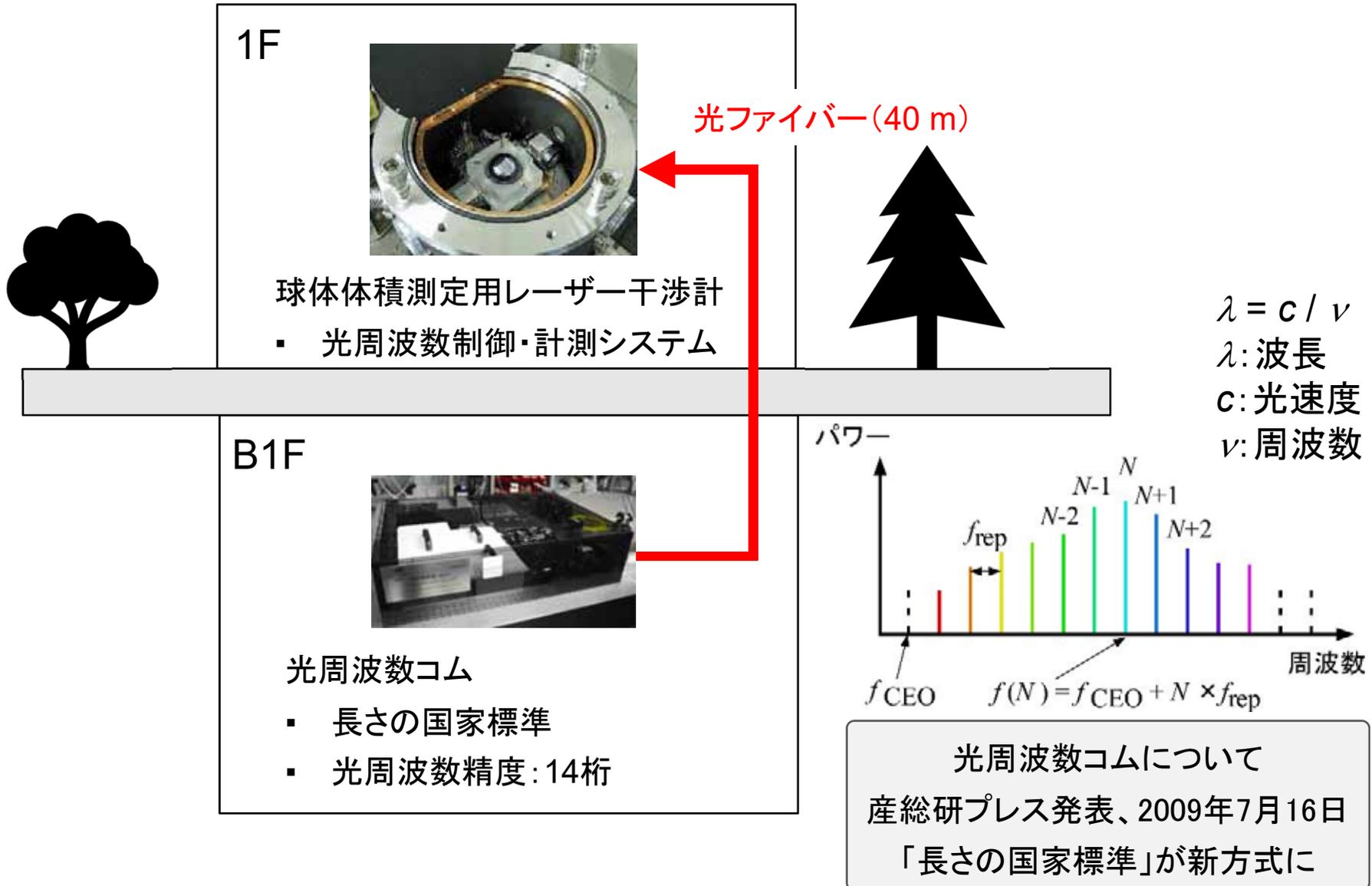
球体形状三次元図

- 光の物差しである「レーザー」を使って球体の直径を測定
- 直径測定精度: 0.6 nm (原子間距離に相当)
- 直径測定方位数: 2175
- 球体体積測定精度:  $2.0 \times 10^{-8}$  (1億分の2)



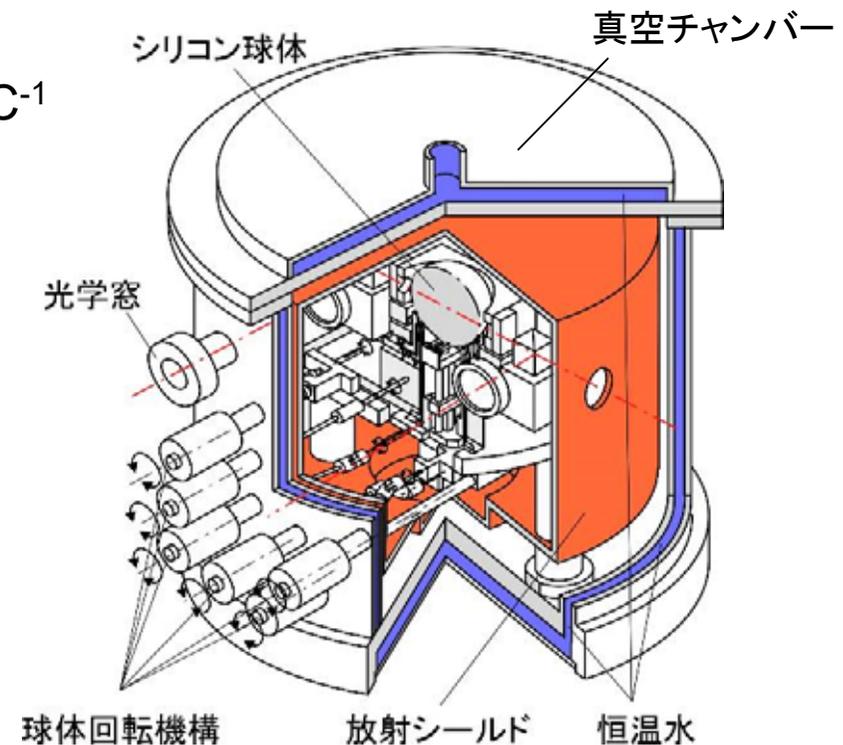
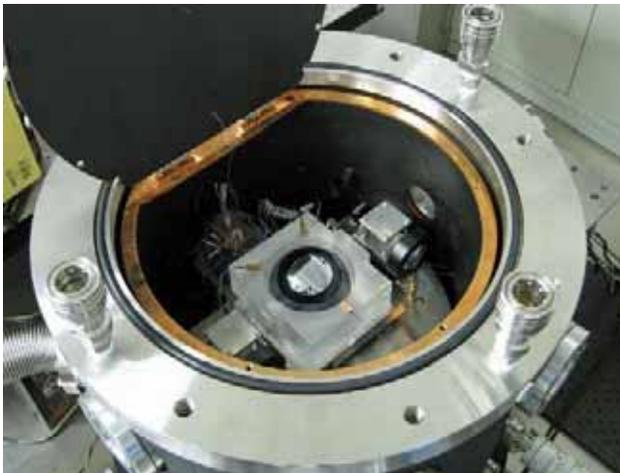
シリコン結晶単位格子

# 光周波数コムを基準とする球体直径測定方位



## シリコン球体温度制御システム

- 球体体積は温度によって変動
  - シリコンの線熱膨張係数:  $2.6 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
- 球体体積高精度測定
  - 球体温度を一定に制御
  - 高精度球体温度測定



- 特殊黒色塗料による球体-放射シールド間の熱交換促進

### 放射シールド温度の厳密な制御

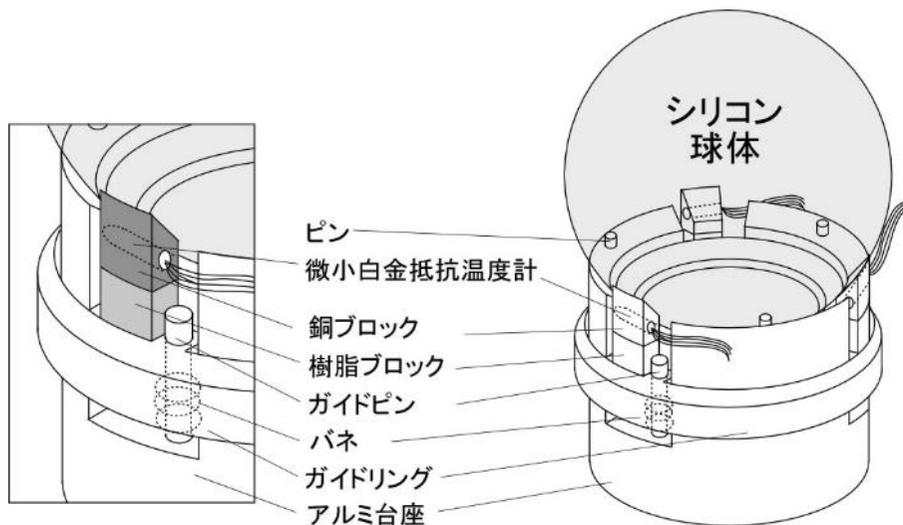
- 上面、側面、底面に面ヒーターおよび温度計を設置
- シールド温度のアクティブ制御

# シリコン球体温度測定

球体体積測定精度:  $1 \times 10^{-8}$

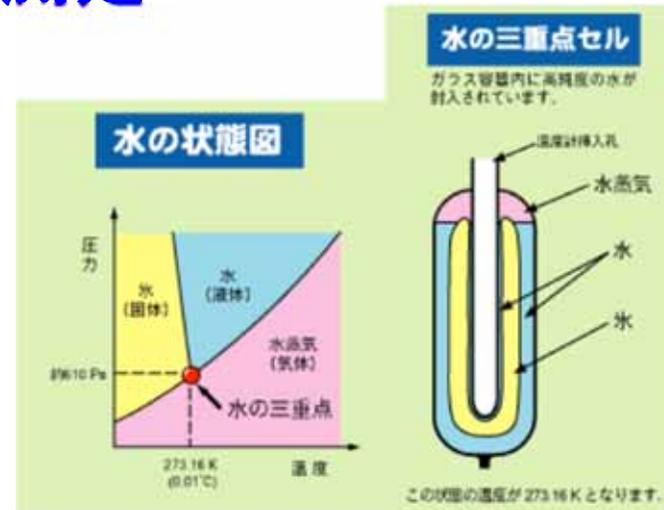


球体温度測定精度: 1000分の1 °C

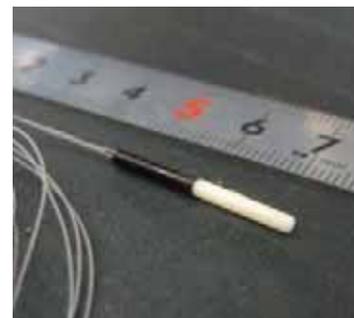


## シリコン球体測温システム

- 球体温度測定精度: 10000分の6 °C



水の三重点 (産総研HPより)



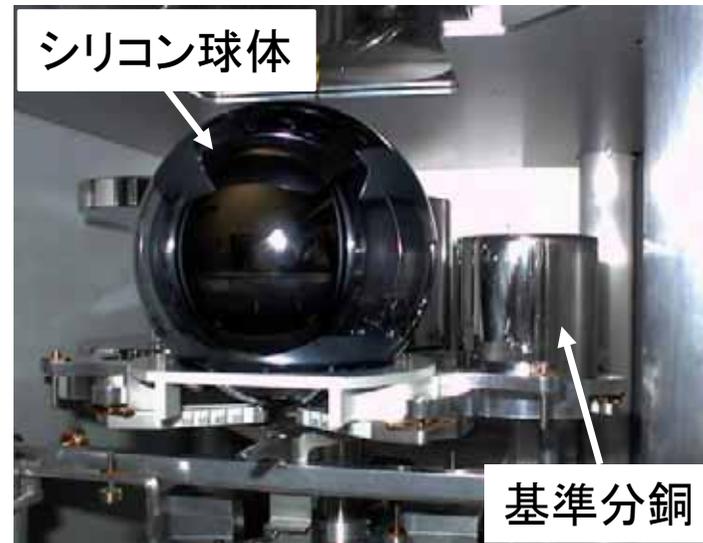
## 微小白金抵抗温度計

- 温度の国家標準である水の三重点セルを基準として校正

## シリコン球体質量測定



球体質量測定用真空天びん



基準分銅とシリコン球体の質量比較の様子



日本国キログラム原器

球体質量測定精度：0.000 006 g (100万分の6 g)

→  $0.000\ 006\ \text{g} / 1000\ \text{g} = 0.000\ 000\ 006$  (10億分の6)

## 日本国キログラム原器



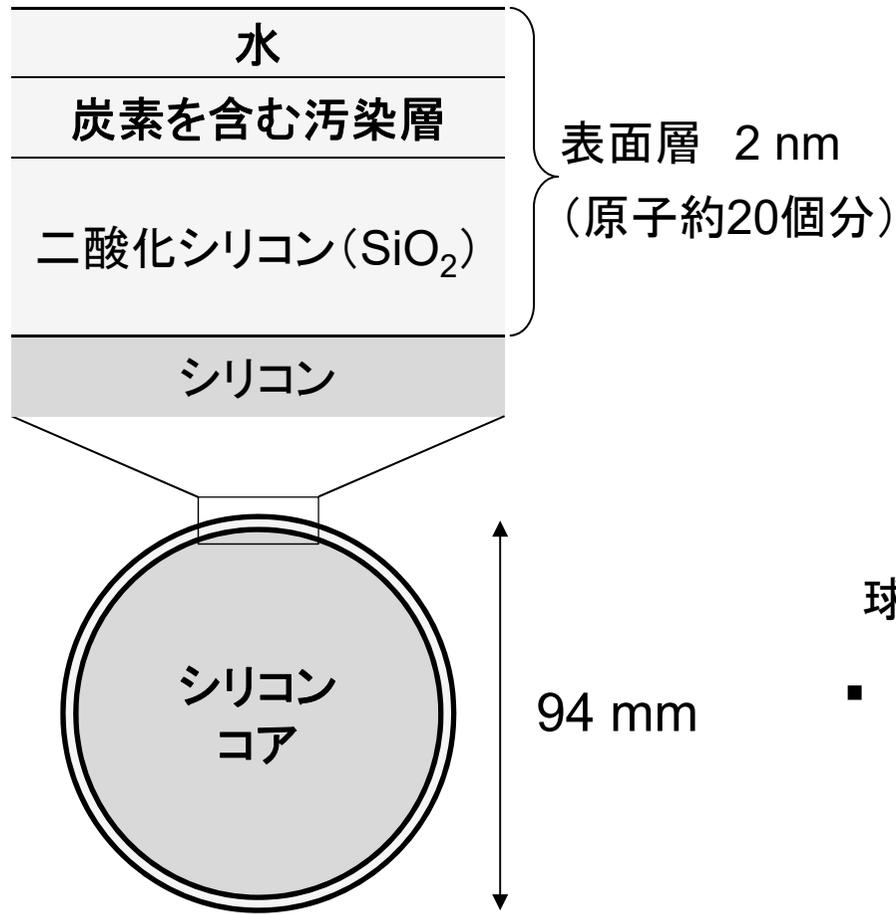
日本国キログラム原器



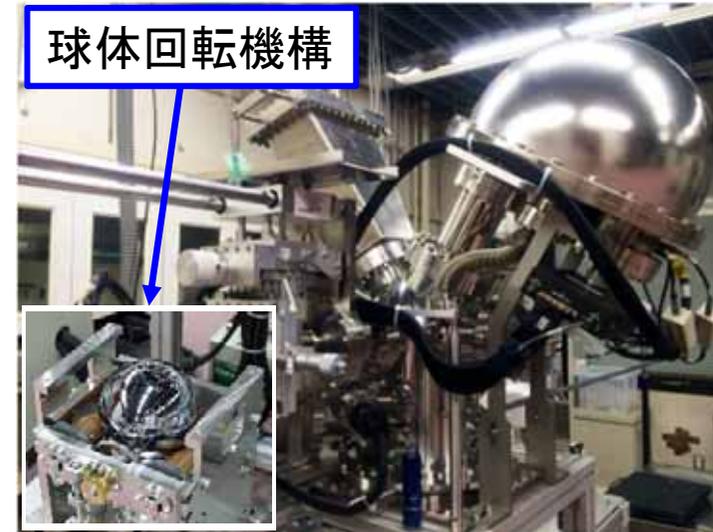
国際キログラム原器

- 国際キログラム原器のコピーの一つ
  - 同じ材質(白金イリジウム)、サイズ(高さ 39 mm、直径 39 mmの円筒)
- 1889年:パリから日本に輸送
- 約40年おきにパリに里帰りし、国際キログラム原器を基準として質量を決定
- 我が国の質量の国家標準として第三事業所の地下金庫で嚴重に保管

# シリコン球体表面分析



シリコン球体表面モデル



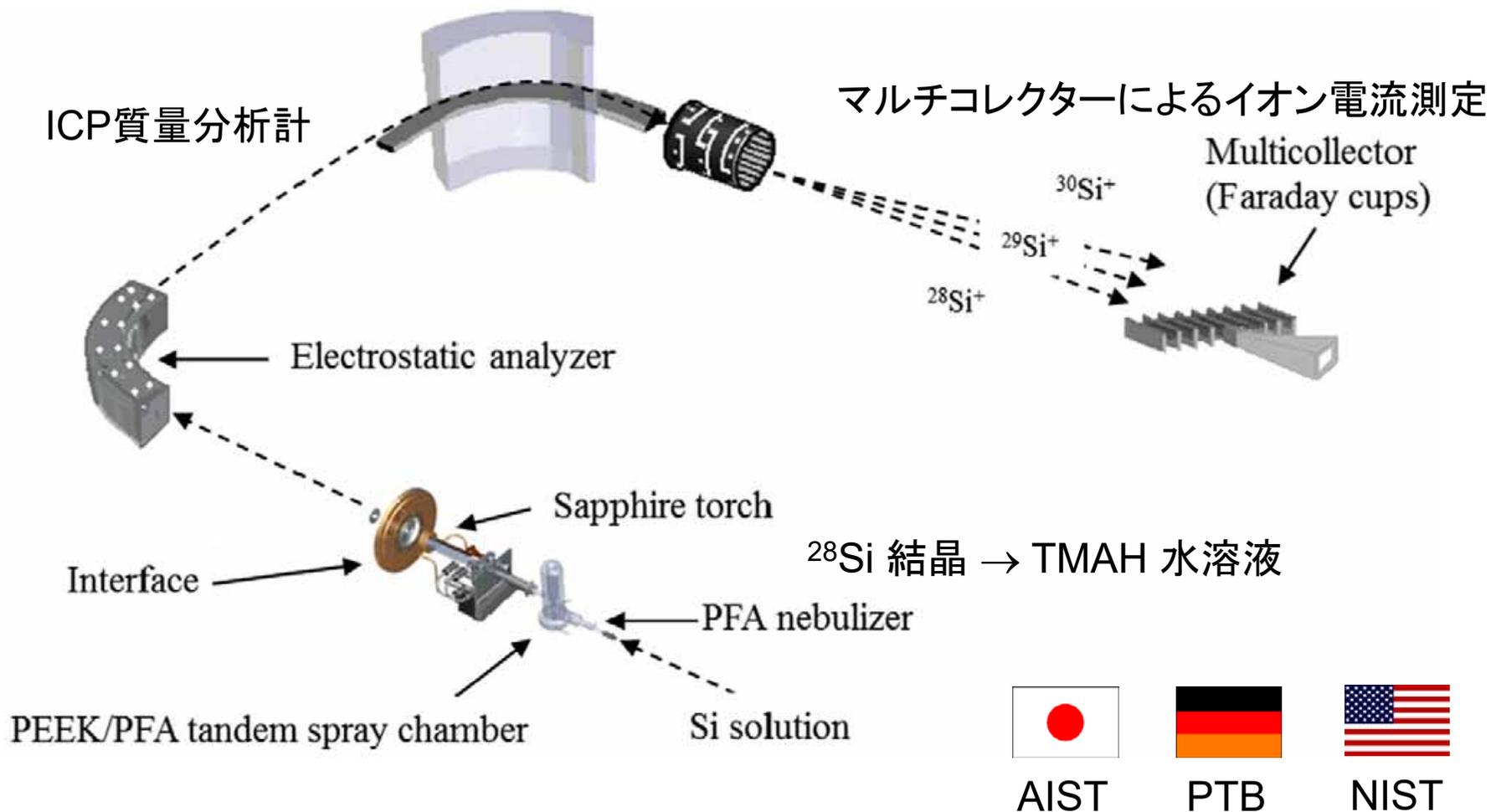
球体表面分析用X線光電子分光法システム

- $\text{SiO}_2$ 層厚さ、炭素汚染層厚さの球体全面にわたる評価が可能  
→ 表面層の質量と体積を決定



- シリコンコアの質量と体積の決定

# 同位体希釈分析法によるモル質量測定



モル質量測定精度:  $5 \times 10^{-9}$

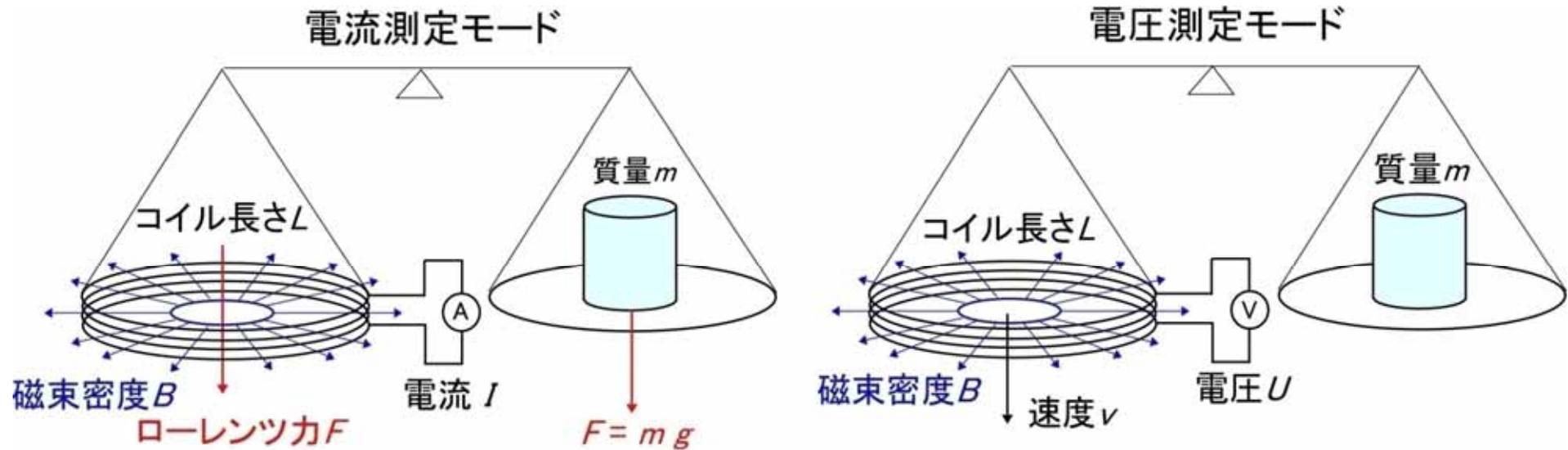
## アボガドロ定数測定結果

- $N_A = 6.022\,140\,84(15) \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ , 測定精度 :  $2.4 \times 10^{-8}$  (1億分の2.4)
  - N. Kuramoto *et al.*, *Metrologia*, **54**, 716-729 (2017)
- プランク定数導出精度: 1億分の2.4
  - 1 kgに換算すると 24  $\mu\text{g}$
  - 国際キログラム原器の長期安定性(50  $\mu\text{g}$ )を凌ぐ
- 日本、ドイツ、カナダ、アメリカ、フランスの研究機関が高精度なプランク定数測定に成功

## 科学技術データ委員会(CODATA)

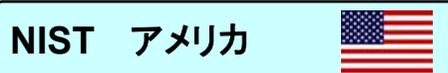
- 2017年10月: 新たなキログラムの定義の基準となるプランク定数の値「[特別調整値](#)」を決定

# キップルバランス法によるプランク定数測定

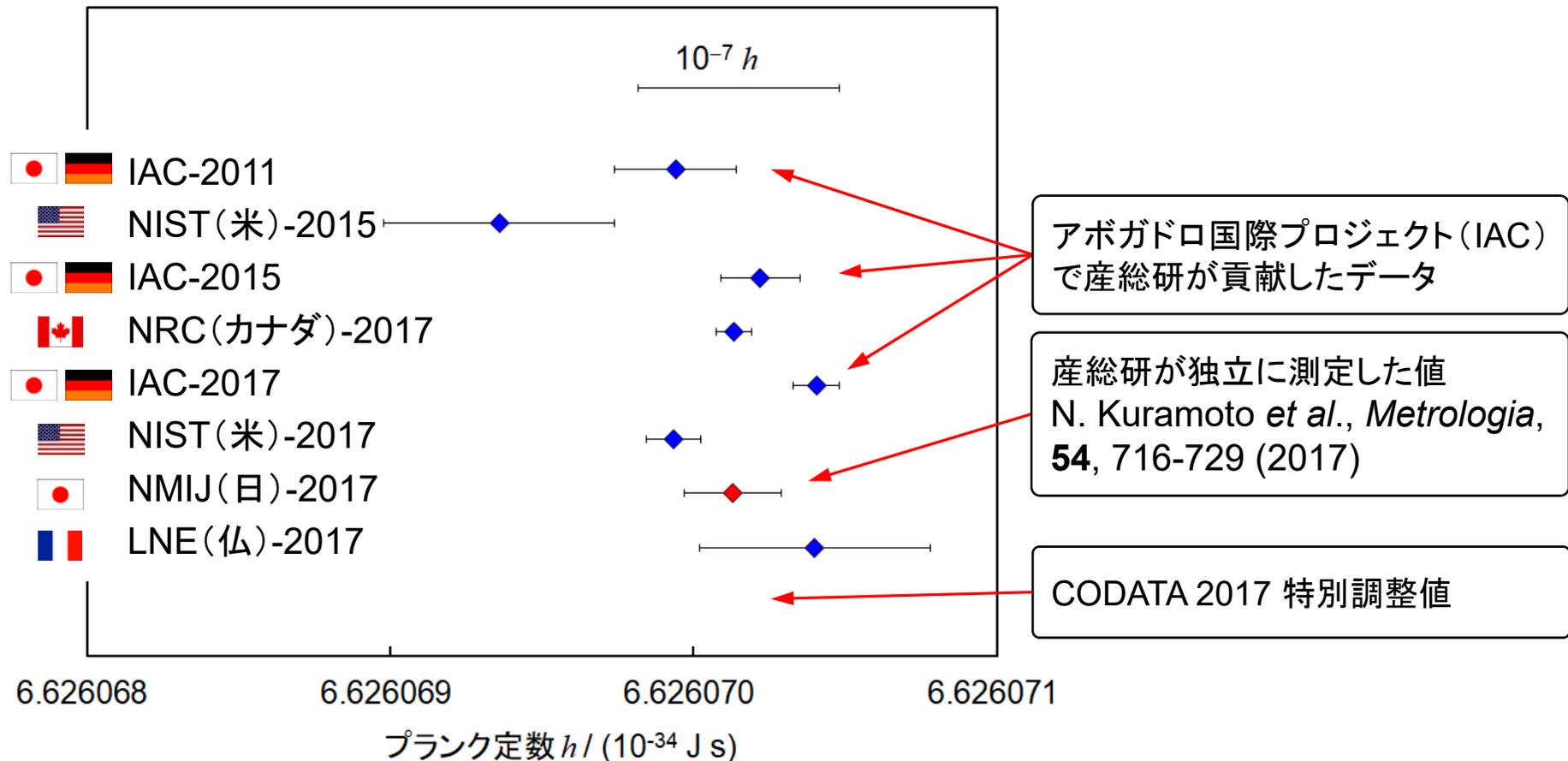


$$F = mg = I L B \rightarrow \underline{U I = F v = mg v} \leftarrow U = v L B$$

- 電気的工作率 ( $UI$ ) = 力学的工作率 ( $Fv$ )
- $m, g$ : 質量、時間、長さの測定
- $U, I$  ( $=U'/R'$ ): ジョセフソン効果と量子ホール効果



# 新たなキログラムの基準となるプランク定数の決定



- 8つの測定結果(日本、ドイツ、アメリカ、カナダ、フランス)に基づき特別調整値を決定
- 産総研: 4つのデータの測定に貢献、そのうち1つは産総研がほぼ独立に測定

# 新たなキログラムの基準となるプランク定数の決定

Table 1 in D. Newell, *Metrologia*, **55**, L13, 2018

Source	Identification <sup>a</sup>	Value
Schlamminger <i>et al</i> (2015)	NIST-15	$h$ $6.626\,069\,36(38) \times 10^{-34} \text{ J s}$
Wood <i>et al</i> (2017)	NRC-17	$h$ $6.626\,070\,133(60) \times 10^{-34} \text{ J s}$
Haddad <i>et al</i> (2017)	NIST-17	$h$ $6.626\,069\,934(88) \times 10^{-34} \text{ J s}$
Thomas <i>et al</i> (2017)		$h$ $6.626\,069\,934(88) \times 10^{-34} \text{ J s}$
Azuma <i>et al</i> (2015)		$h$ $6.626\,069\,934(88) \times 10^{-34} \text{ J s}$
Azuma <i>et al</i> (2015)		$h$ $6.626\,069\,934(88) \times 10^{-34} \text{ J s}$
Bartl <i>et al</i> (2017)		$h$ $6.626\,069\,934(88) \times 10^{-34} \text{ J s}$
Kuramoto <i>et al</i> (2017)	NMIJ-17	$N_A$ $6.022\,140\,78(15) \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$

産総研 計量標準総合センター  
**National Metrology Institute of Japan**



新たなキログラムの基準 (CODATA 特別調整値):  $h = 6.626\,070\,15 \times 10^{-34} \text{ J s}$

- 1889年(明治22年)以来、約130年ぶりとなるキログラムの定義改定
- 近代度量衡の歴史上初となる、普遍的な物理定数を基準とする質量標準の確立
- 科学の歴史に残る値の決定に、ドイツ、アメリカ、カナダ、フランスと共に貢献

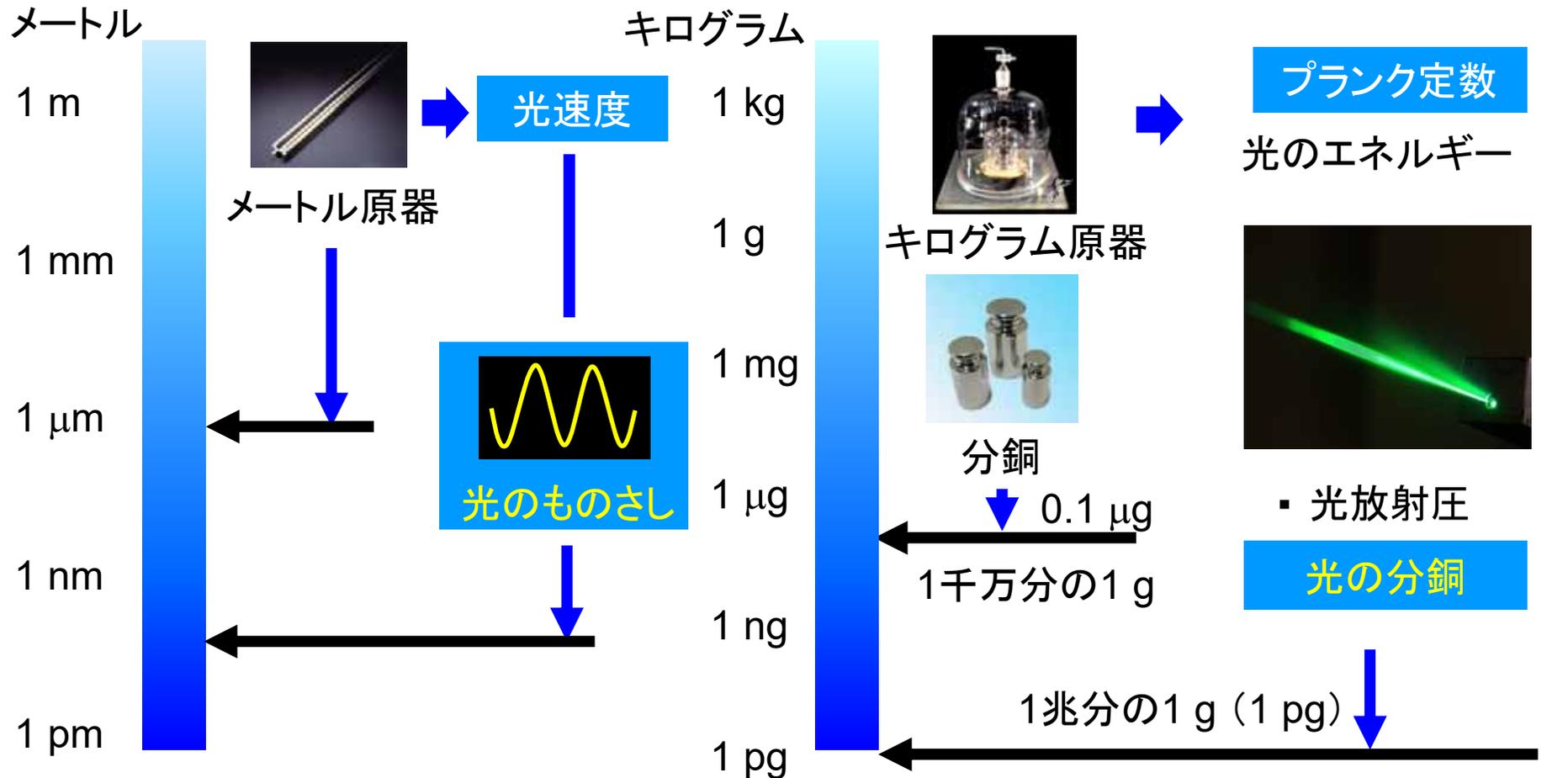
## 今後のスケジュール

- 2018年11月：第26回国際度量衡総会（メートル条約の最高議決機関）
  - プランク定数を基準とする新たな定義に移行するかどうかを審議
  - メートル条約加盟国代表団による定義改定案への投票
  - 改定案が承認されれば、定義改定の実現
- 2019年5月20日（世界計量記念日）：新たな定義の施行

## 四つの SI 基本単位同時改定

SI基本単位	現在の定義	新たな定義
キログラム (kg)	国際キログラム原器の質量	プランク定数 $h$
アンペア (A)	二本の導体間に働く力	電気素量 $e$
ケルビン (K)	水の三重点における熱力学温度	ボルツマン定数 $k$
モル (mol)	12 gの $^{12}\text{C}$ に含まれる原子の数	アボガドロ定数 $N_A$

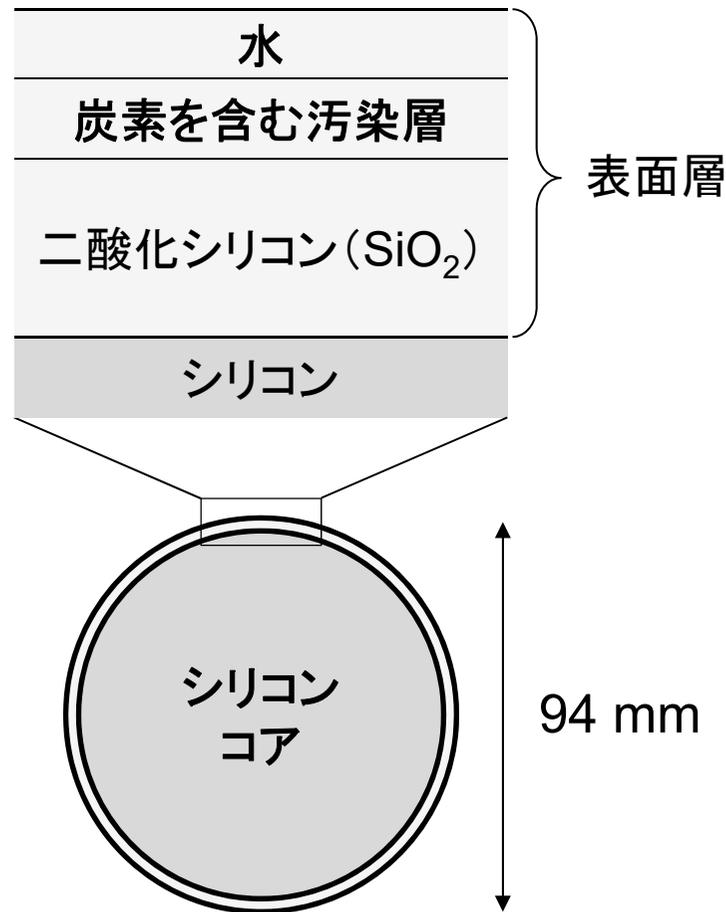
# 新たなキログラムの定義がもたらすもの



- ナノメートルオーダーの正確な長さ測定
- ナノテクノロジーの基盤確立に貢献

- ナノグラム、ピコグラムオーダーの正確な質量測定が可能に
- 正確な微小質量計測を可能とする技術基盤の提供

# 新しい定義に基づくキログラムの実現方法



シリコン球体表面モデル

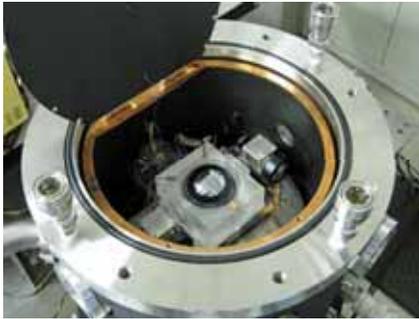
$$m_{\text{sphere}} = \underbrace{\frac{2hR_{\infty}}{c\alpha^2} \frac{A_r(\text{Si})}{A_r(\text{e})} \frac{8V_{\text{core}}}{a^3}}_{\text{シリコンコア質量}} - m_{\text{deficit}} + \underbrace{m_{\text{SL}}}_{\text{表面層質量}}$$

- $V_{\text{core}}$  : シリコンコアの体積
- $m_{\text{deficit}}$  : 不純物などによる質量補正
- $m_{\text{SL}}$  : 表面層質量

## 実現に必要な測定量

- シリコンコア体積、 $V_{\text{core}}$
- 表面層質量、 $m_{\text{SL}}$
- 格子定数、 $a$
- モル質量、 $A_r(\text{Si})$

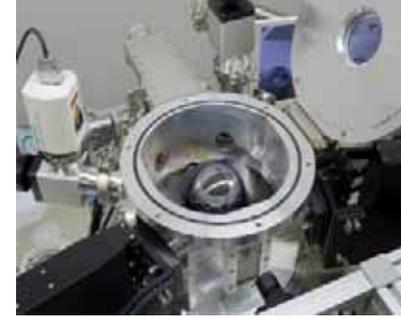
# NMIJにおけるキログラムの実現方法



レーザー干渉計による  
 $^{28}\text{Si}$ 球体体積測定



X線光電子分光法とX分光エリプソメトリーによる  
 $^{28}\text{Si}$ 球体表面分析



$^{28}\text{Si}$ 球体質量決定



真空天びんによる $^{28}\text{Si}$ 球体と分銅の質量比較

# 定義改定後の質量標準体系（案）

