

新しいキログラムの定義とキログラム原器の重要文化財指定

産業技術総合研究所 計量標準総合センター 質量標準研究グループ 倉本直樹

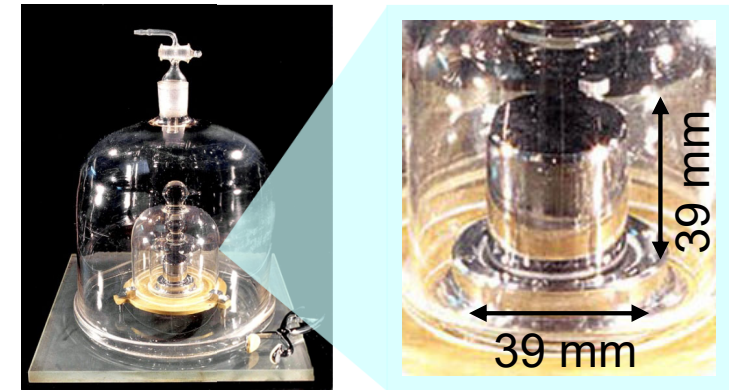


引用元: NHK 暮らし☆解説「日本も貢献 1 kgの定義変わります！」
<http://www.nhk.or.jp/kaisetsu-blog/700/309325.html>

- キログラムの新しい定義が導かれた経緯
- 産業技術総合研究所(産総研)で実施した研究開発
- 定義が新しくなったことの影響
- キログラム原器の重要文化財への指定

質量の単位「キログラム」

- キログラムの定義
 - 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の質量
 - ただし、2019年5月19日まで
- 単位の定義は科学技術の発展と共に進化
- 2019年5月20日：普遍的な物理定数(世界中どこでも変わらず、時間とともに変化しない)であるプランク定数を基準とする定義に進化



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
- 国際度量衡局で管理
- 質量が変動していた可能性
→ 世界中の質量の基準が変動していた？

キログラムの歴史

約230年前のフランス(18世紀末、フランス革命の頃)

1 kg = 水1リットルの質量

1889年 → 1 kg = 国際キログラム原器の質量



水1リットル



国際キログラム原器

- 2019年5月19日までこの定義が継続
- 130年間、同一の分銅が世界中の質量の基準として使われ続けた

1990年頃 表面の汚れなどために国際キログラム原器の質量が100年間で50 μ g (1億分の5 kg)程度変動した可能性

→ 「モノ」でないものでキログラムを定義しよう

2011年 将来、プランク定数にもとづく定義に移行する国際的合意

→ 国際キログラム原器への引退勧告

→ 1億分の5よりも高い精度でのプランク定数測定

およそ指紋の
1個分の質量!



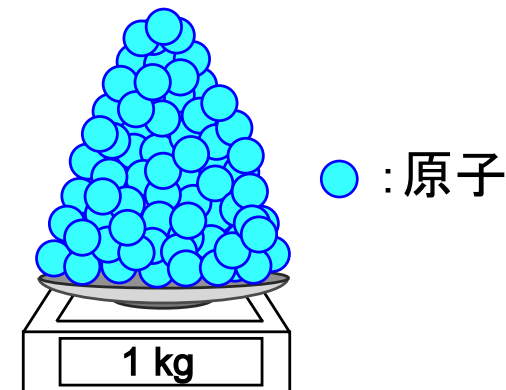
プランク定数とキログラム

プランク定数 h

- 原子や分子の振る舞いを説明するための物理定数
- $h = 0.000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 662 \dots \text{J s}$

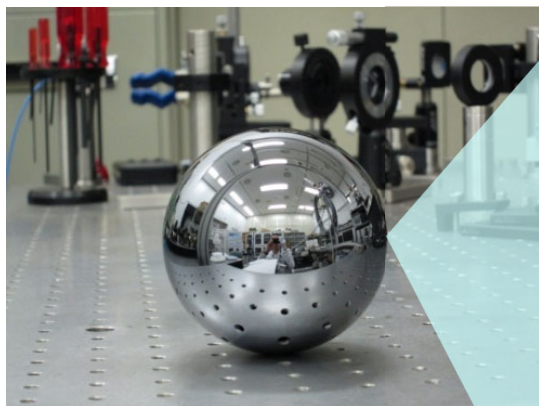
プランク定数を基準として、炭素、酸素、シリコンなどの
様々な原子の質量を導出できる

→ 非常に多数の原子の質量として1 kg を表現できる



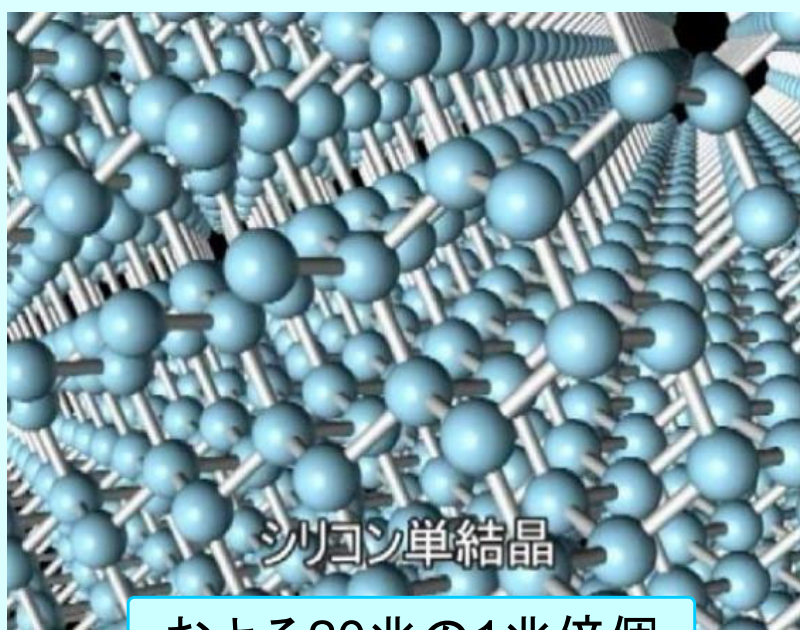
X線結晶密度法

原子1個の質量 \longleftrightarrow プランク定数



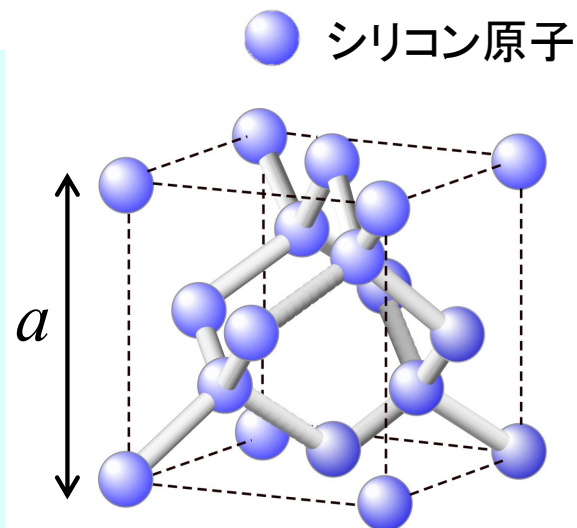
シリコン単結晶球体

- 質量: 約 1 kg
- 体積: 約 430 cm³



シリコン単結晶

およそ20兆の1兆倍個



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の質量と体積を測定

単位格子の体積 a^3 を測定

$$\text{シリコン単結晶球体中の原子数} = \frac{\text{球体体積}}{\text{単位格子体積}} \times 8$$

$$\text{シリコン原子1個の質量} = \frac{\text{シリコン球体の質量}}{\text{シリコン原子の数}}$$

プランク定数

質量の異なるシリコン原子 ^{28}Si 、 ^{29}Si 、 ^{30}Si

産総研によるX線結晶密度法を用いたプランク定数測定(2003)

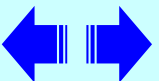
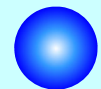
- 測定精度: 1億分の20
- プランク定数にもとづく新しい定義を導くための目標精度 : 1億分の5



シリコン: 3種類の同位体



- 同位体: 原子量(質量)が異なる
- $^{28}\text{Si} : ^{29}\text{Si} : ^{30}\text{Si} = \text{約 } 92\% : \text{約 } 5\% : \text{約 } 3\%$



$^{28}\text{Si} : 99.99\%$

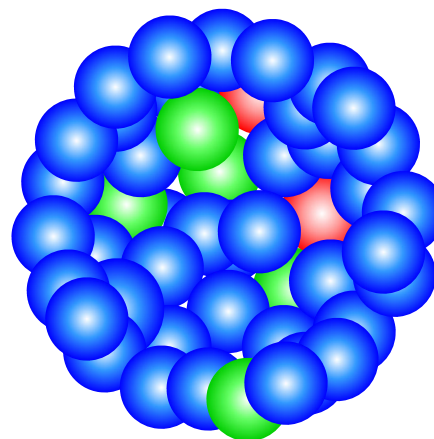
h  ^{28}Si 

h  ^{29}Si 

h  ^{30}Si 

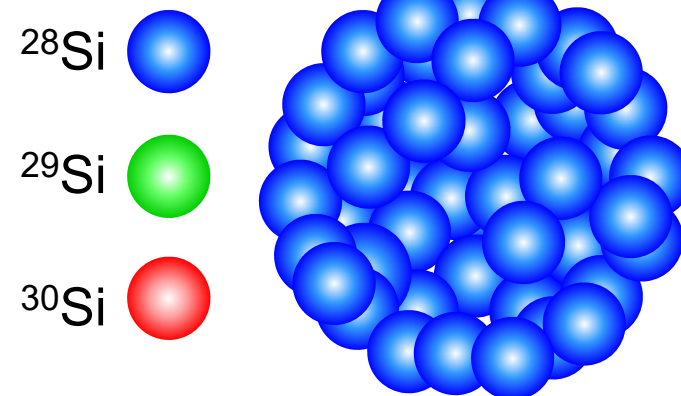
- $^{28}\text{Si} : ^{29}\text{Si} : ^{30}\text{Si} = ?\% : ?\% : ?\%$
- 高精度な同位体存在比測定が必要

自然同位体比Si単結晶



1×10^{-7} (1億分の10)

^{28}Si 同位体濃縮単結晶



1×10^{-8} (1億分の1)

同位体存在比の測定精度

アボガドロ国際プロジェクト









ターゲット

- ^{28}Si 同位体濃縮結晶の製作
- プランク定数高精度測定

実施期間

- 2004年～、現在も実施中

プロジェクト参加機関

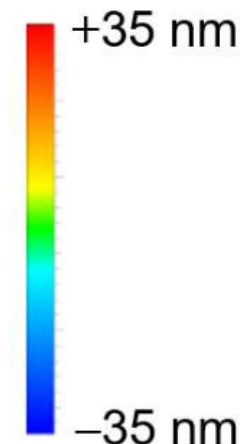
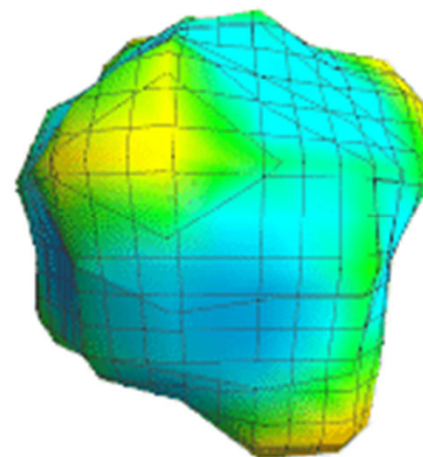
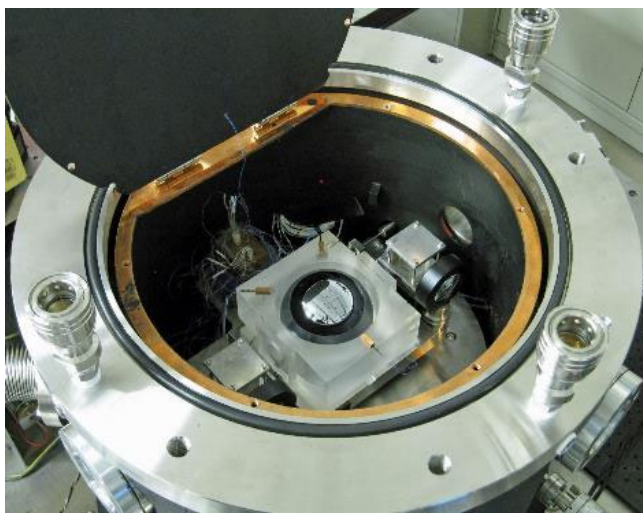
-  産業技術総合研究所 (AIST)
-  国際度量衡局 (BIPM)
-  イタリア計量研究所 (INRIM)
-  欧州標準物質計測研究所 (IRMM)
-  米国標準技術研究所 (NIST)
-  オーストラリア計量研究所 (NMIA)
-  英国物理研究所 (NPL)
-  ドイツ物理工学研究所 (PTB)



1 kg ^{28}Si 同位体濃縮結晶球体

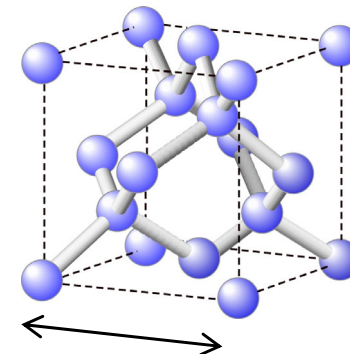
- ^{28}Si の存在比率：99.99 %
- 体積や質量などを様々な研究機関で測定

シリコン単結晶球体体積測定



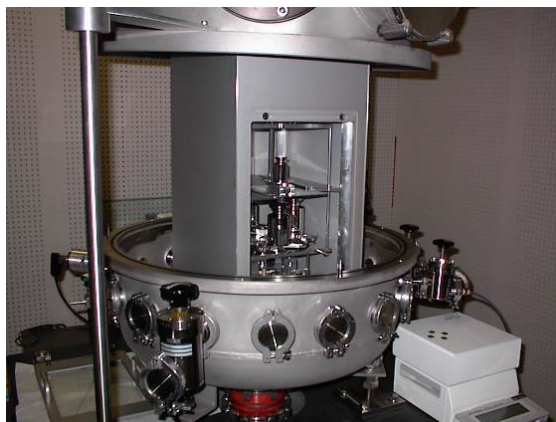
シリコン球体の体積を測定するために産総研で開発されたレーザー干渉計

- 光の物差し(レーザー)を使って球体直径を多方位から測定し、平均直径から体積を決定
- 直径測定精度: 0.6 nm (100億分の6メートル)
- 球体体積測定精度: 2.0×10^{-8} (1億分の2)
- 日、独、豪、伊、中国、韓国、米国で干渉計の開発が行われたが、原子レベルの精度での球体直径測定に成功したのは産総研とドイツ物理工学研究所のみ

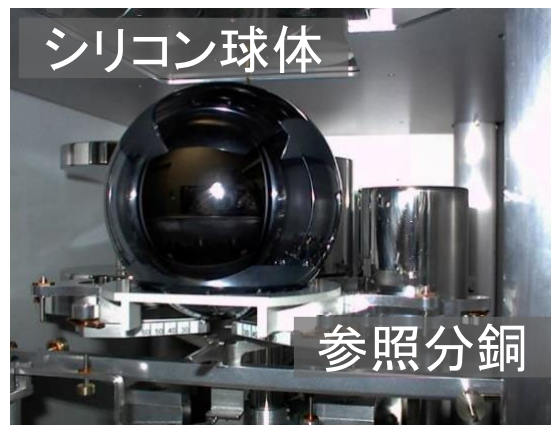


100億分の5メートル

シリコン単結晶球体質量測定



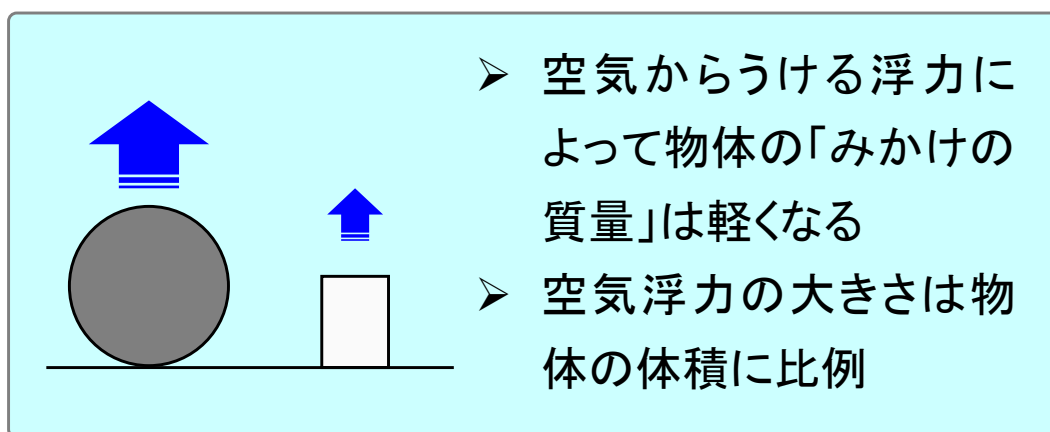
真空天びん



参照分銅(ステンレス鋼製)と
シリコン球体の質量比較



日本国キログラム原器
▪ 質量の国家標準



- 真空中での質量を比較することで
 - 空気浮力測定が不要
 - 球体質量測定精度: 10億分の6 kg

プランク定数測定結果

- $h = 6.626\ 070\ 13(16) \times 10^{-34}$ J s, 測定精度 : 1億分の2.4
 - N. Kuramoto *et al.*, *Metrologia*, **54**, 716–729 (2017)→ プランク定数にもとづく新しい定義を導くための目標精度 (1億分の5) をしのぐ
- 2017年7月までに、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

プランク定数の定義値

- 2017年10月 : 新しいキログラムの定義の基準となるプランク定数の定義値決定
 - $h = 6.626\ 070\ 15 \times 10^{-34}$ J s
- 2019年5月20日 : 新しいキログラムの定義の施行
 - キログラムは質量のSI単位であり、プランク定数を単位 J s で表したときに、その数値を $6.626\ 070\ 15 \times 10^{-34}$ と定めることによって定義される

新たなキログラムの基準となるプランク定数の決定

プランク定数の定義値決定の詳細をまとめた論文 D. Newell *et al.*, *Metrologia*, **55**, L13, 2018

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

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



プランク定数の定義値: $h = 6.626\,070\,15 \times 10^{-34}$ J s

- 明治22年以来、130年ぶりとなるキログラムの定義改定が実現
- 近代度量衡の歴史上初となる、物理定数を基準とする質量の単位の確立
- 科学の歴史に残る値の決定に、日本人の研究者の名前や日本の研究所の名前が明確に残り続けるかたちで貢献

キログラムの定義改定が質量の国家標準におよぼす影響

定義改定前

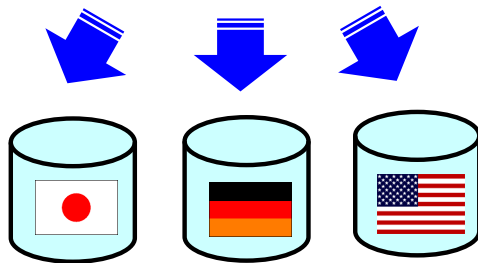
国際キログラム原器の質量

国際度量衡局



国際キログラム原器

天びんによる
質量比較



各国のキログラム原器

- 国際キログラム原器にもとづき、各国の国家標準(キログラム原器)の質量を測定

定義改定後

プランク定数定義値

産総研

ドイツ

カナダ

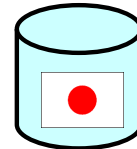
米国

X線結晶
密度法

X線結晶
密度法

キップル
バランス法

キップル
バランス法



各国の質量の国家標準

- 原理的には、各国が独自に国家標準を設定可能
- 国家標準の精度は、各国の技術力によって変動
- 現在、キログラム実現能力の国際比較を実施中
→ 十分な国際整合性を確認後、各国が独自にキログラムを実現する状態に移行予定

X線結晶密度法によるキログラムの実現原理

プランク定数の定義値 → シリコン原子の質量 m_{Si}
 球体体積測定など → 球体中のシリコン原子の数 n_{Si}



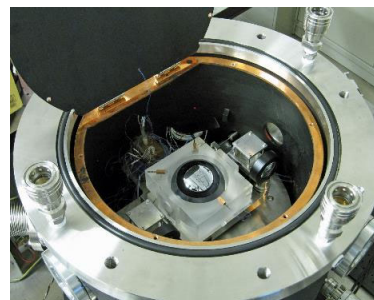
$m_{Si} \times n_{Si}$
 シリコン単結晶球体
 質量



天びんによる
 質量比較



^{28}Si 単結晶球体



球体体積測定用
 レーザー干渉計



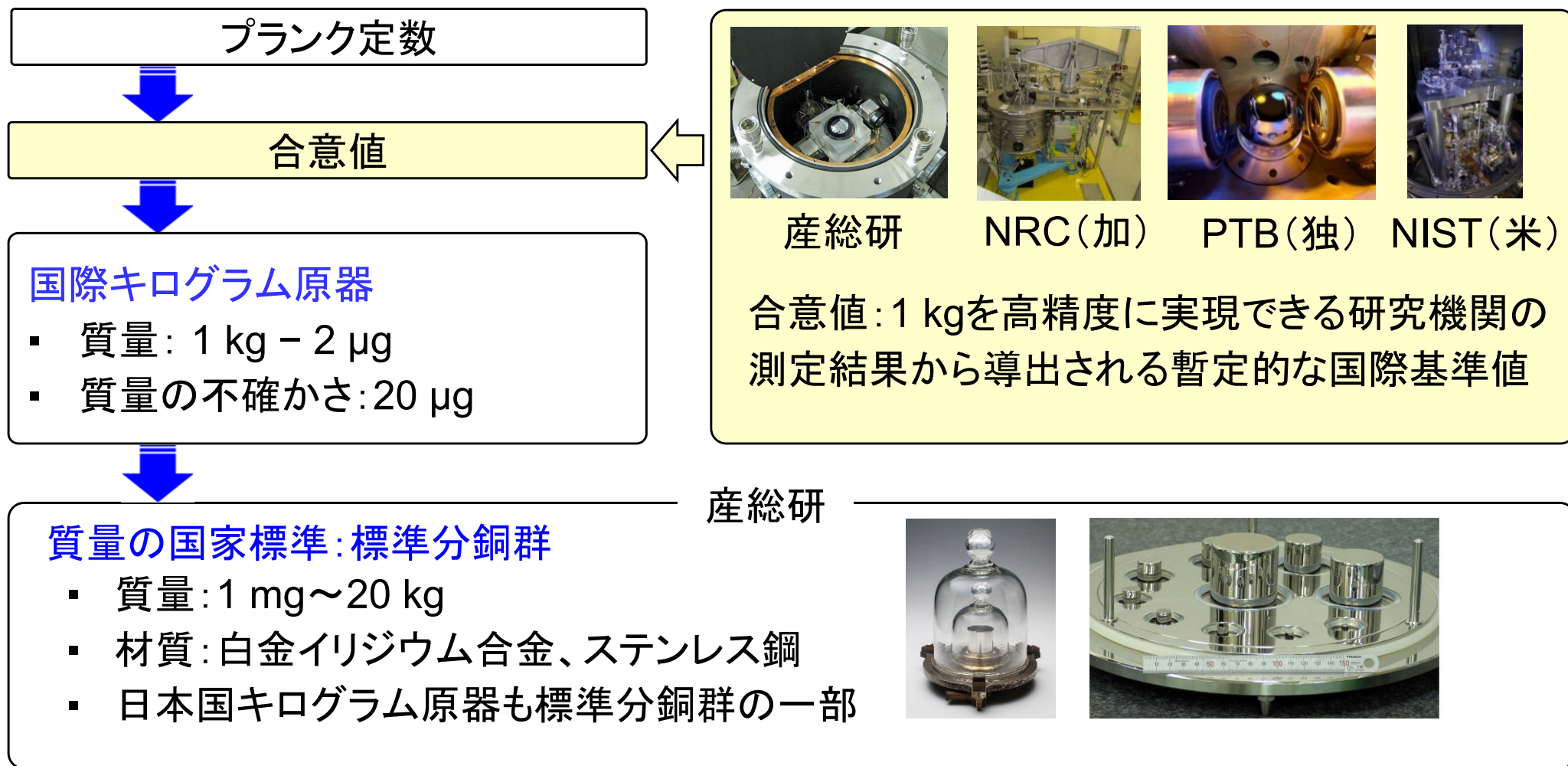
質量の国家標準

^{28}Si 単結晶球体の役割

定義改定前 ^{28}Si 単結晶球体質量 → プランク定数
 定義改定後 プランク定数定義値 → ^{28}Si 単結晶球体質量

➤ 日本の実現精度は世界で三番目に高く、トップレベル

現在の質量トレーサビリティ体系



産総研

質量の国家標準：標準分銅群

- 質量：1 mg～20 kg
- 材質：白金イリジウム合金、ステンレス鋼
- 日本国キログラム原器も標準分銅群の一部



JCSS校正事業者

標準分銅

- 質量：1 mg～20 kg
- 材質：ステンレス鋼



都道府県計量検定所

特級基準分銅

- 質量：1 mg～20 kg
- 材質：ステンレス鋼



校正

- 用途：精度管理など



検査・検定

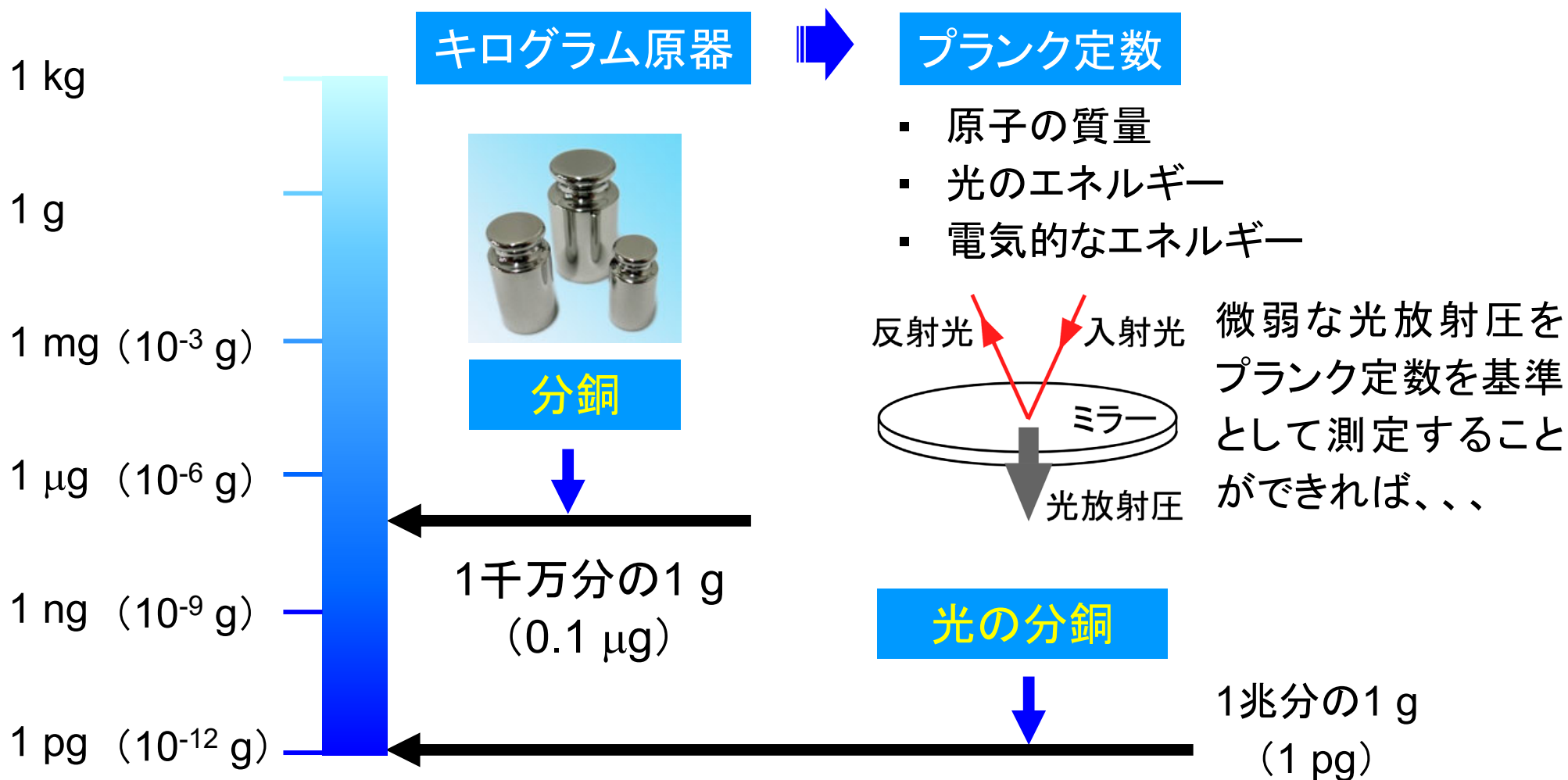
- 用途：取引または証明（法定計量）

ユーザー



様々な分銅、はかり

新たなキログラムの定義がもたらす影響



- ピコグラム (1兆分の1 g) オーダーの正確な質量測定が可能に
- 微小な質量の測定を実現するための技術基盤

まとめ

- 様々な計測技術の進歩によって、プランク定数の測定精度が国際キログラム原器の質量の長期安定性よりも良くなりました
- 2019年5月、プランク定数にもとづく新たな定義が施行されました
- 科学の歴史に残るキログラムの定義改定に、日本人の研究者の名前や日本の研究機関の名前が今後も明確に残り続けるかたちで貢献することができました
- 現在、日本では、シリコン単結晶製の球体を使って、世界トップレベルの精度で質量の国家標準を設定する研究が進んでいます
- 新しいキログラムの定義は、微小な質量を測定するための技術基盤となることが期待されています

日本国キログラム原器が国の重要文化財に

- 重文指定: 2022年3月22日
- 1890年に日本に到着して以来、明治、大正、昭和、平成、令和の五つの時代にわたる約130年間、日本の質量の基準として、明治以降の近代化と産業発展に大きく貢献



日本国キログラム原器



産総研の地下金庫室に設置された原器保管用金庫

- YouTubeで公開中 <https://www.youtube.com/watch?v=TeDFibfNCgs>

日本国キログラム原器は質量の国家標準の一部です

→ 一般の方に直接ご覧いただけるのは、しばらく先になりそうです

ご清聴ありがとうございました

- キログラムの定義改定にかかる詳細な情報は、産業技術総合研究所
質量標準研究グループHPに掲載されております

<https://unit.aist.go.jp/riem/mass-std/>

- キログラム原器およびその重要文化財への指定に関する情報は、下記の特設HPに掲載されています

https://unit.aist.go.jp/nmij/info/kg_prototype/kg_prototype.html

- ご不明な点があれば、下記のメールアドレスまで遠慮なくお知らせください。

産業技術総合研究所 質量標準研究グループ長 倉本直樹

n.kuramoto@aist.go.jp