

電気標準における改定動向とその影響

物理計測標準研究部門
量子電気標準研究グループ
金子晋久

2016年2月17日
TKP東京駅大手町コンファレンスセンター
国際計量標準シンポジウム
「新時代を迎える計量基本単位 一新SI最新動向」
～計測標準フォーラム第13回講演会～

目次

- CCEM(電気・磁気諮問委員会)の活動・役割
- 現在の電気量のSI単位と協定値(1990)について
- R_K (フォン・クリッツィング定数: h/e^2)の新しい値
- K_J (ジョセフソン定数: $2e/h$)の新しい値
- 抵抗・電圧等トレーサビリティへの影響
- 纏め

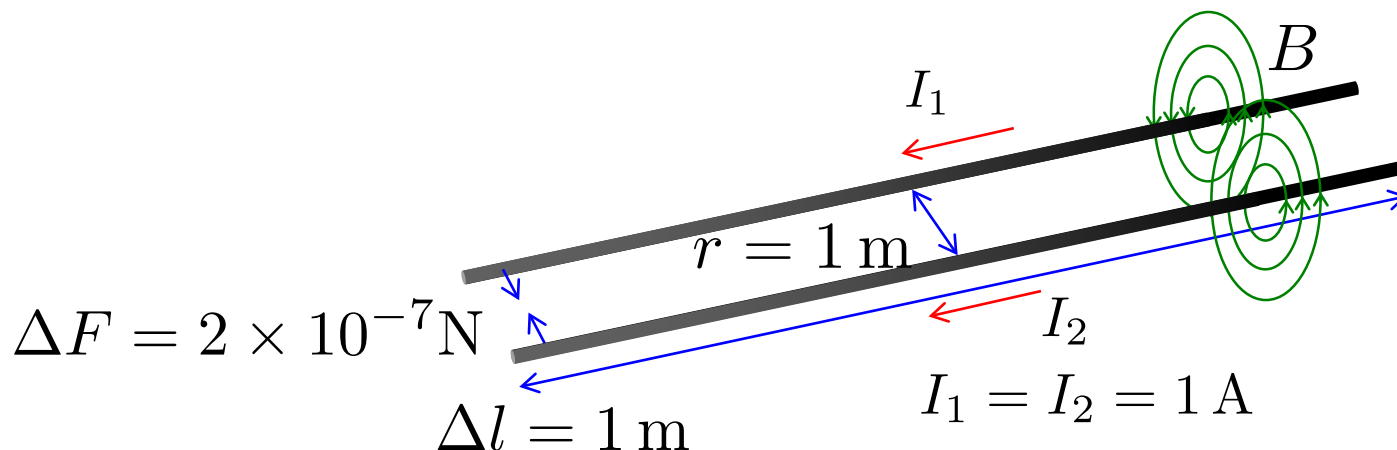
CCEMにおける活動

- 1990年協定値使用開始(純粋なSIトレーサビリティから離脱)
- 1992以来 'electrical methods for monitoring the kilogram' ワーキンググループが設置され、再定義への議論の場所となる。
- 2007の決議で改定を後押しする方向で議決。ただし、実験データが必要。
- 2009年実機を用いた単位の実現方法の提案
- 2013task group設置「communication and implementation of changes」

 このシンポジウムや多くの解説論文など

現在の電流の定義 = μ_0 の定義

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上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 2×10^{-7} ニュートンの力を及ぼし合う一定の電流



アンペールの法則から
真空の透磁率 μ_0 導出

$$\Delta F = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi r} \Delta l$$



$$2 \times 10^{-7} = \frac{\mu_0 \times 1 \times 1}{2\pi \times 1} \times 1$$

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$$

1990年の協定値への移行

1990

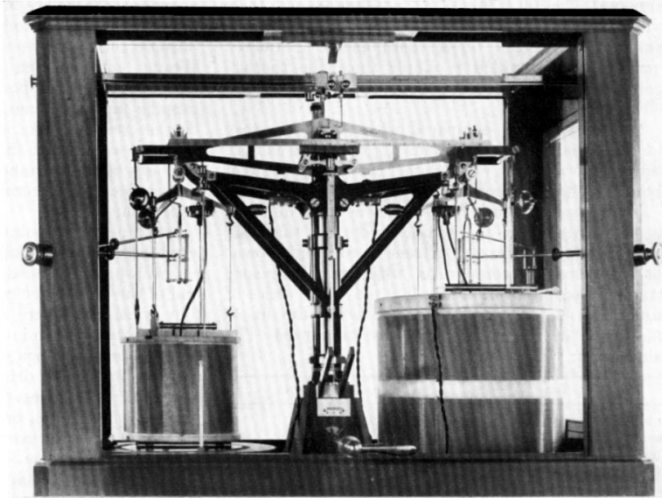
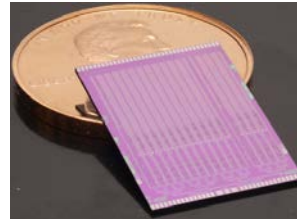


Fig. 1. Current balance of the National Physical Laboratory. One large coil has been lowered so that the suspended coil can be seen

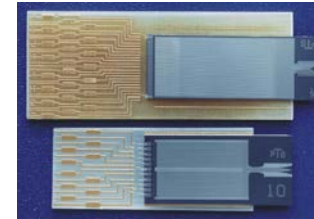
アンペアは真空中に1メートルの間隔で平行に配置された無限に小さい円形断面積を有する無限に長い二本の直線上導体のそれぞれを流れ、これらの導体の長さ1メートルにつき 2×10^{-7} ニュートンの力を及ぼし合う一定の電流

$\approx 10^{-6}$ $\approx 10^{-9}$
 古典 量子

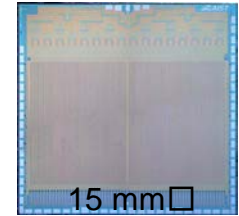
Credit: NIST



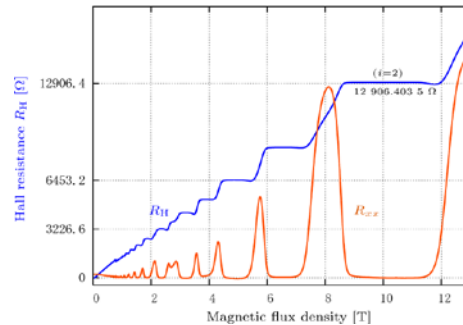
Credit: PTB



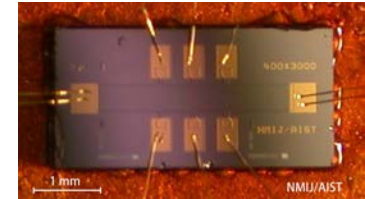
Credit: NMIJ/AIST



$$U_J = n \frac{f}{K_J}, \quad K_J = \frac{2e}{h}$$



Credit: NMIJ/AIST



$$R_H(i) = \frac{R_K}{i}, \quad R_K = \frac{h}{e^2}$$

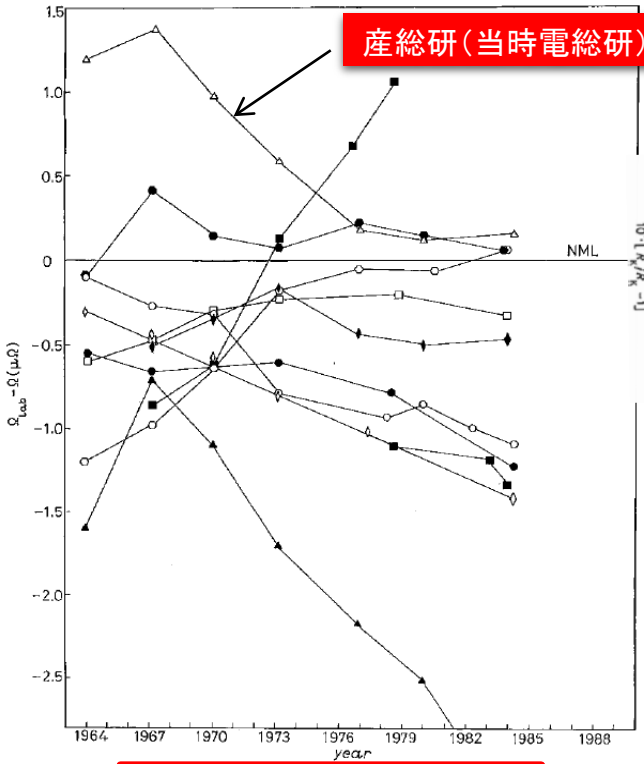
巨視的量子効果: 安定、高い再現性、高い普遍性

量子ホール効果による抵抗標準の劇的高度化

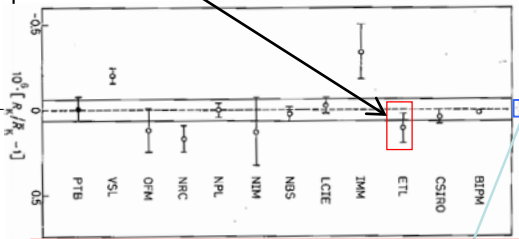
電圧標準においてもジョセフソン効果による同様の劇的高度化

1980年 量子ホール効果発見
1985年 ノーベル物理学賞(von Klitzing)

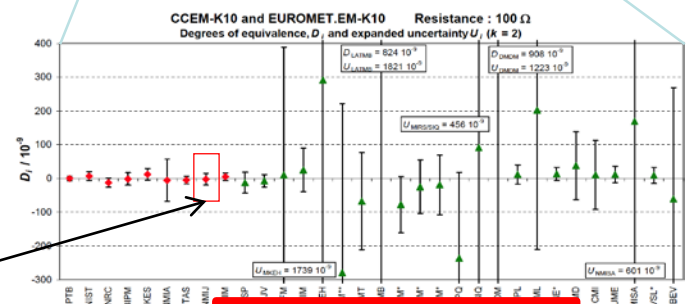
1962年 ジョセフソン効果発見
1973年 ノーベル物理学賞(Josephson)



量子ホール発見前



量子ホール発見後(1987)



現在(2010発行)

量子ホール以前:
国際的に 10^{-6} レベルの整合性

量子ホール効果発見

3×10^{-10} 程度の再現性
国際比較で 10^{-8} レベルの整合性

1990協定値の起源とその使用方法

1990協定値の選択方法

*“The values should be so chosen that they are unlikely to require significant change for the foreseeable future. This means that the uncertainties should be **conservatively** assigned.”*

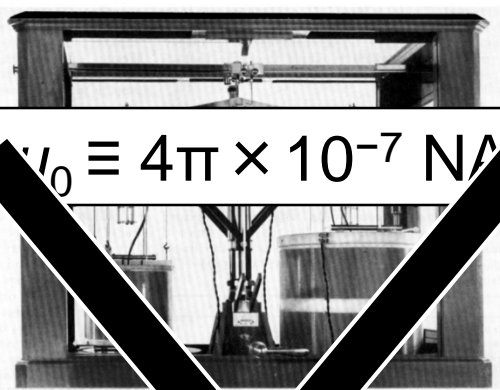
＝その値は近い将来大きな修正が必要とされないよう選ばれ、これは、、、不確かさは保守的に設定される事を意味する。

- ジョセフソンと K_{J-90} を用いた場合、 1σ 不確かさは 4×10^{-7} (CIPM 1988, Resolution 1, PV, 56, 44).
- 量子ホール R_{K-90} を用いた場合、 1σ 不確かさは 2×10^{-7} (CIPM 1988, Resolution 2, PV, 56, 45). → 1998年に 1×10^{-7} へ減少 (after review of the CODATA 1998 adjustment (CIPM 2001, PV, 68, 101, following CCEM, 22, 90))

基本的にかなり保守的

1990年協定値 (妥協案) への終止符

定義:



$\mu_0 \equiv 4\pi \times 10^{-7} \text{ NA}^{-2}$

Fig. 1. Current balance of the National Institute of Standards and Technology. One of the coils is lowered so that the suspended

互換性なし

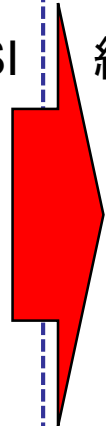


協定値:

$R_{K-90} \equiv 25\,812.807 \, \Omega$

$K_{J-90} \equiv 483\,597.9 \text{ GHz/V}$

準SI 純SI



定義:

$h \equiv 6.626\,069 \text{ XX Js}$

$e \equiv 1.602\,176 \text{ XX C}$

直接のリンク



Practical units:

$R_K = h/e^2 \equiv 25\,812.807 \text{ XX } \Omega$

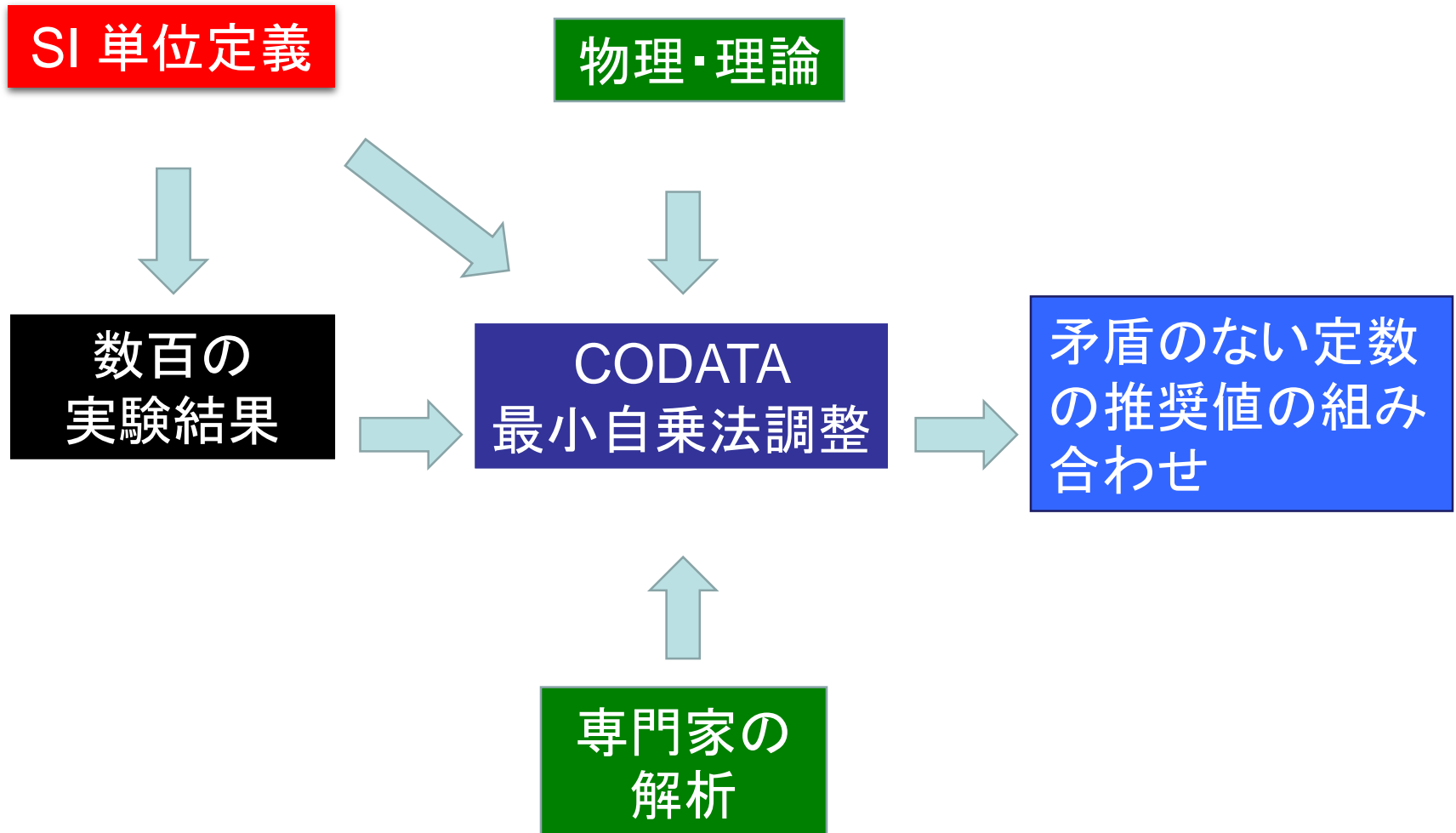
$K_J = 2e/h \equiv 483\,597.9 \text{ XX GHz/V}$

$\mu_0 = 4\pi \times (1+\delta) \times 10^{-7} \text{ NA}^{-2}$

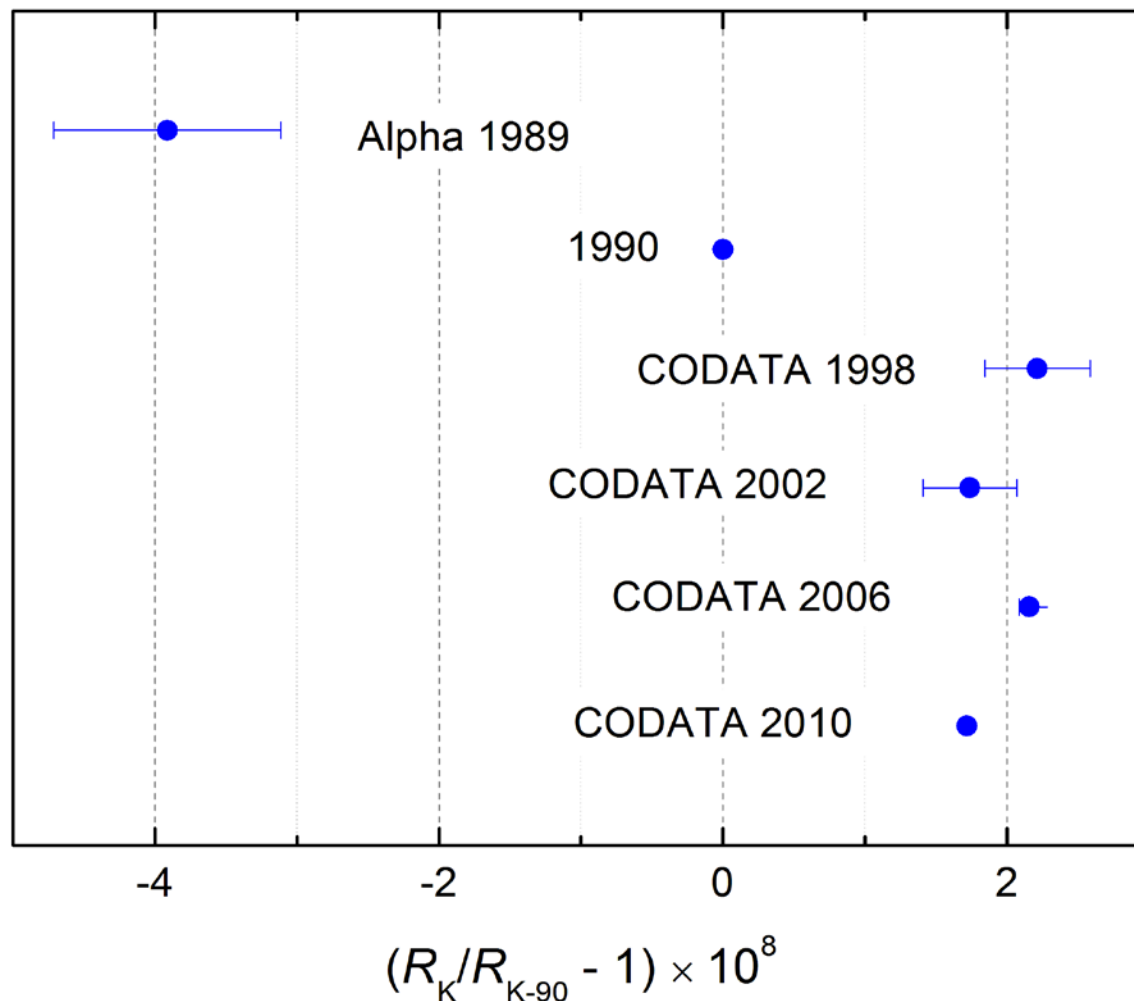
アンペアの定義案

CGPM-24, Resolution 1	和 訳	懸案事項・対処方針*
<p>the ampere will continue to be the unit of electric current, but its magnitude will be set by fixing the numerical value of the elementary charge to be equal to exactly $1.602\ 17\times 10^{-19}$ when it is expressed in the SI unit s A, which is equal to C,</p>	<p>アンペアは今後も電流の単位として使用されるが、その大きさは、SI単位s Aで表したときの電気素量の値を正確に$1.602\ 17\times 10^{-19}$(=C)と定めることによって設定される。</p>	<p>アンペアの新しい定義として本案を支持する。 ただし、次回のCODATAで最終確定する予定のXの値によっては、抵抗の場合2×10^{-8}程度(産総研最高測定能力と同程度)、電圧の場合1×10^{-7}程度(産総研最高測定能力の20倍程度)の値の変更が必要となる。 このため産業界・教育界・学会への周知活動を行い理解を求めることが必要である。</p>

どのようにして定数は決められるか??

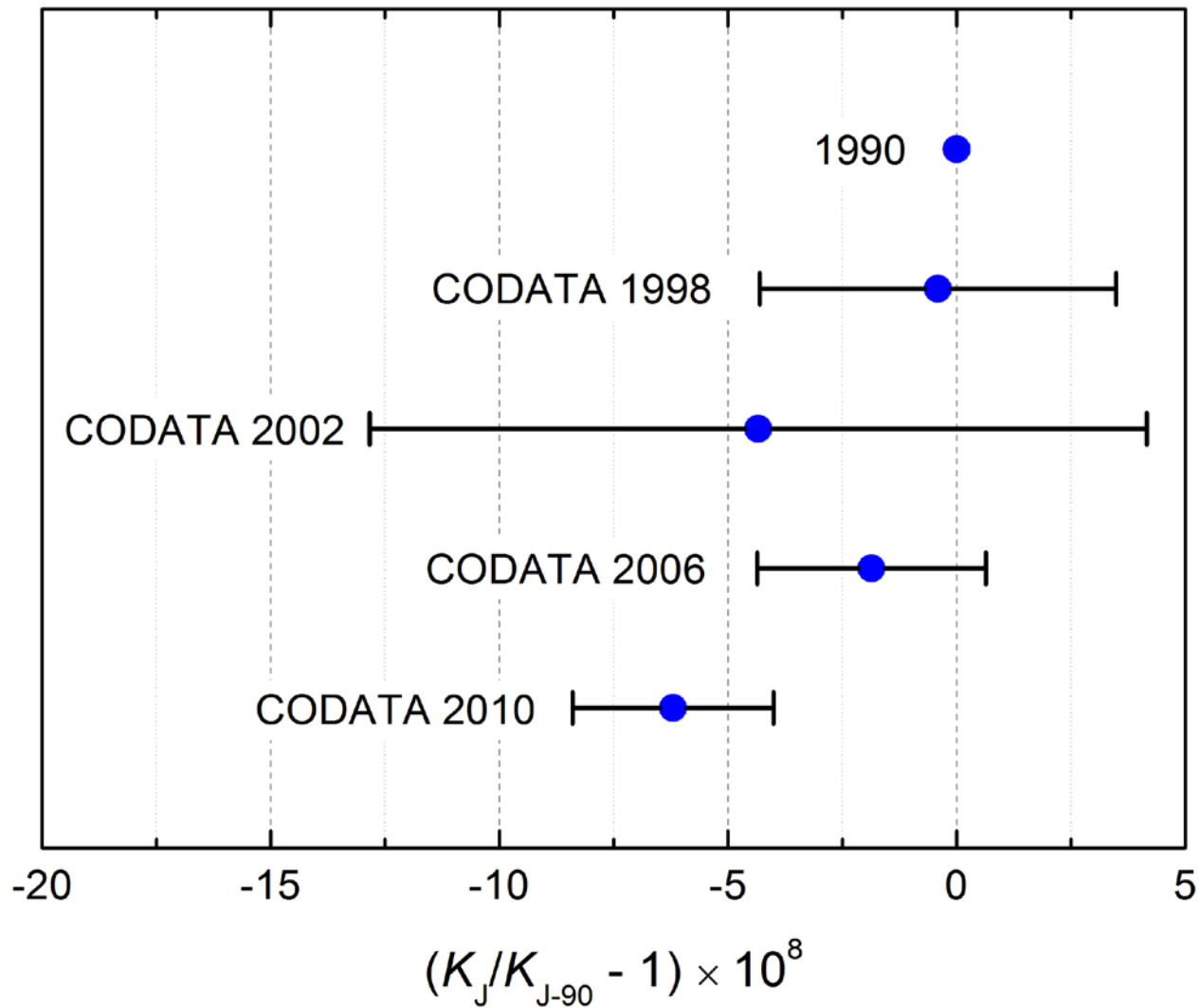


R_K の変遷



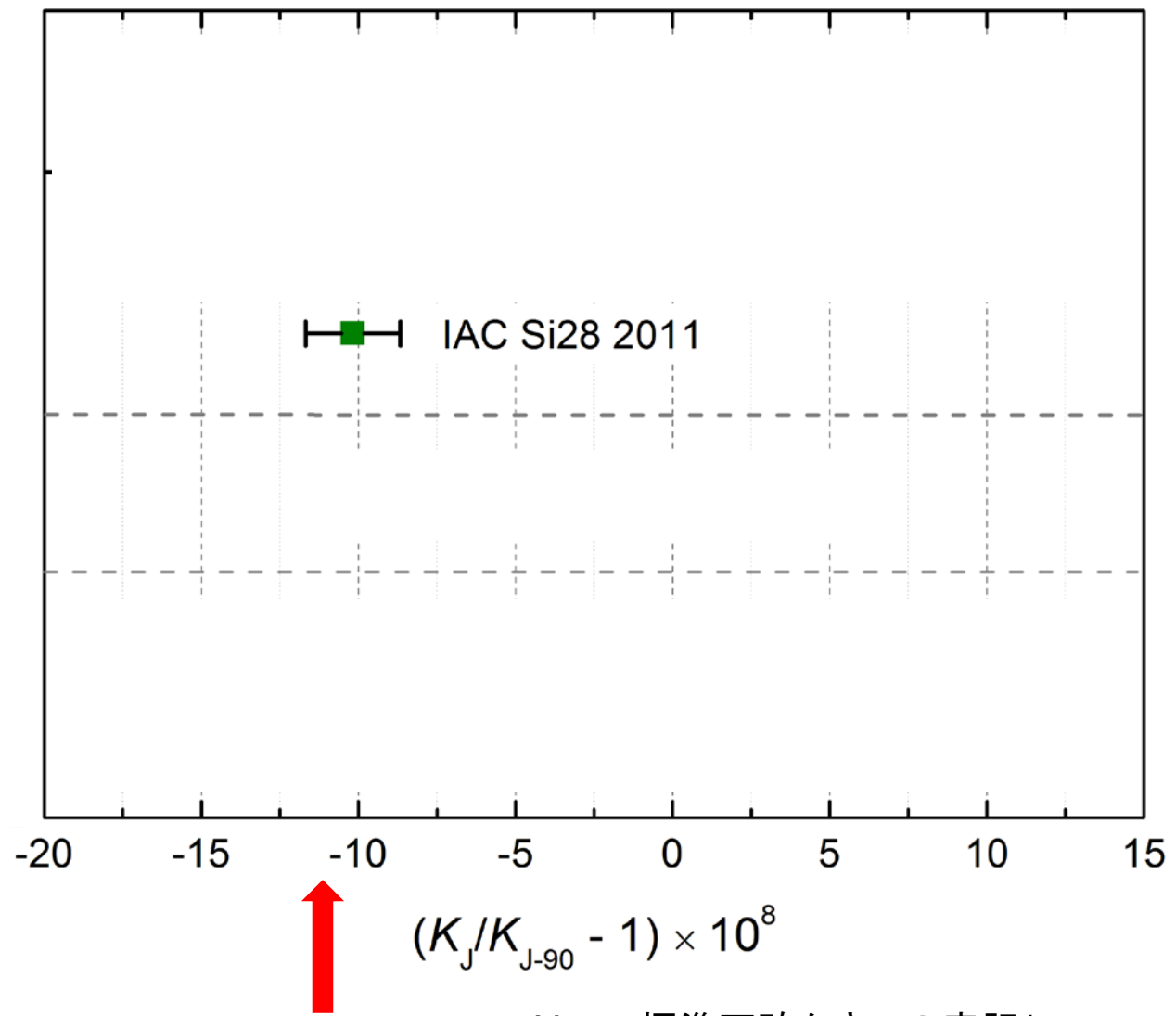
Note: 標準不確かさでの表記(not expanded $k=2$)

K_J の変遷



Note: 標準不確かさでの表記(not expanded $k=2$)

2014年の値



$$(K_J/K_{J-90} - 1) \times 10^8$$

Note: 標準不確かさでの表記(not expanded $k=2$)

新しいSI

1990年の値の置き換えつまり、小さな変化は不可避

$$\text{相対変化: } R_{K-90} \rightarrow R_K : 2 \times 10^{-8}$$

$$\text{相対変化: } K_{J-90} \rightarrow K_J : 1 \times 10^{-7}$$

この影響は？

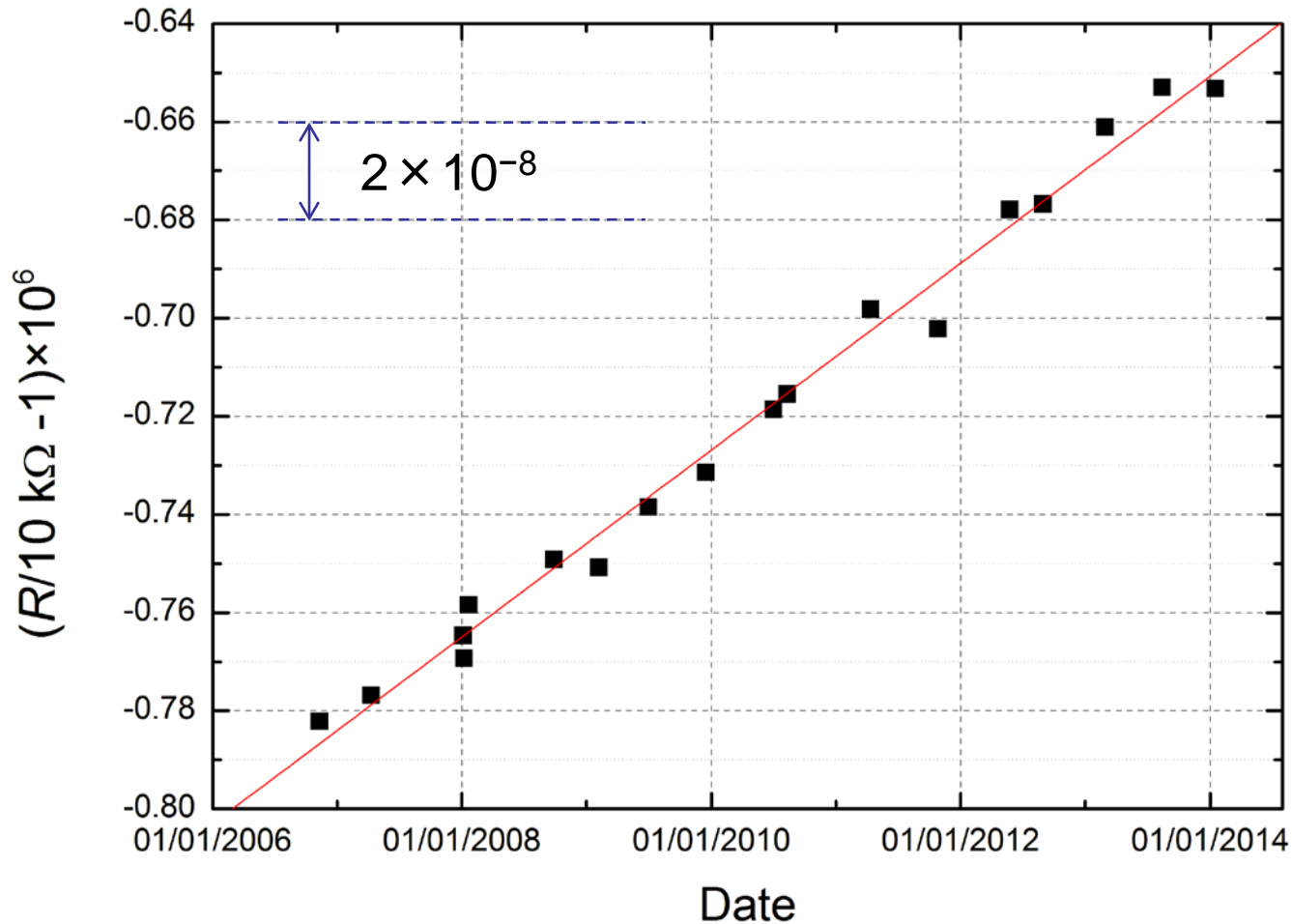
抵抗

- QHR-QHR 普遍性: $<1 \times 10^{-10}$
- On site QHR 比較: $\approx 1 \times 10^{-9}$
- 校正業務 CMCs: $>1 \times 10^{-8}$
(通常、産業界では 1×10^{-7} より小さな不確かさは不要)

商業化されたQHRシステムは存在するが、産業界ではほとんど使用されておらず、**国立標準研**に限られる。
(→グラフェンQHRシステムへの期待)

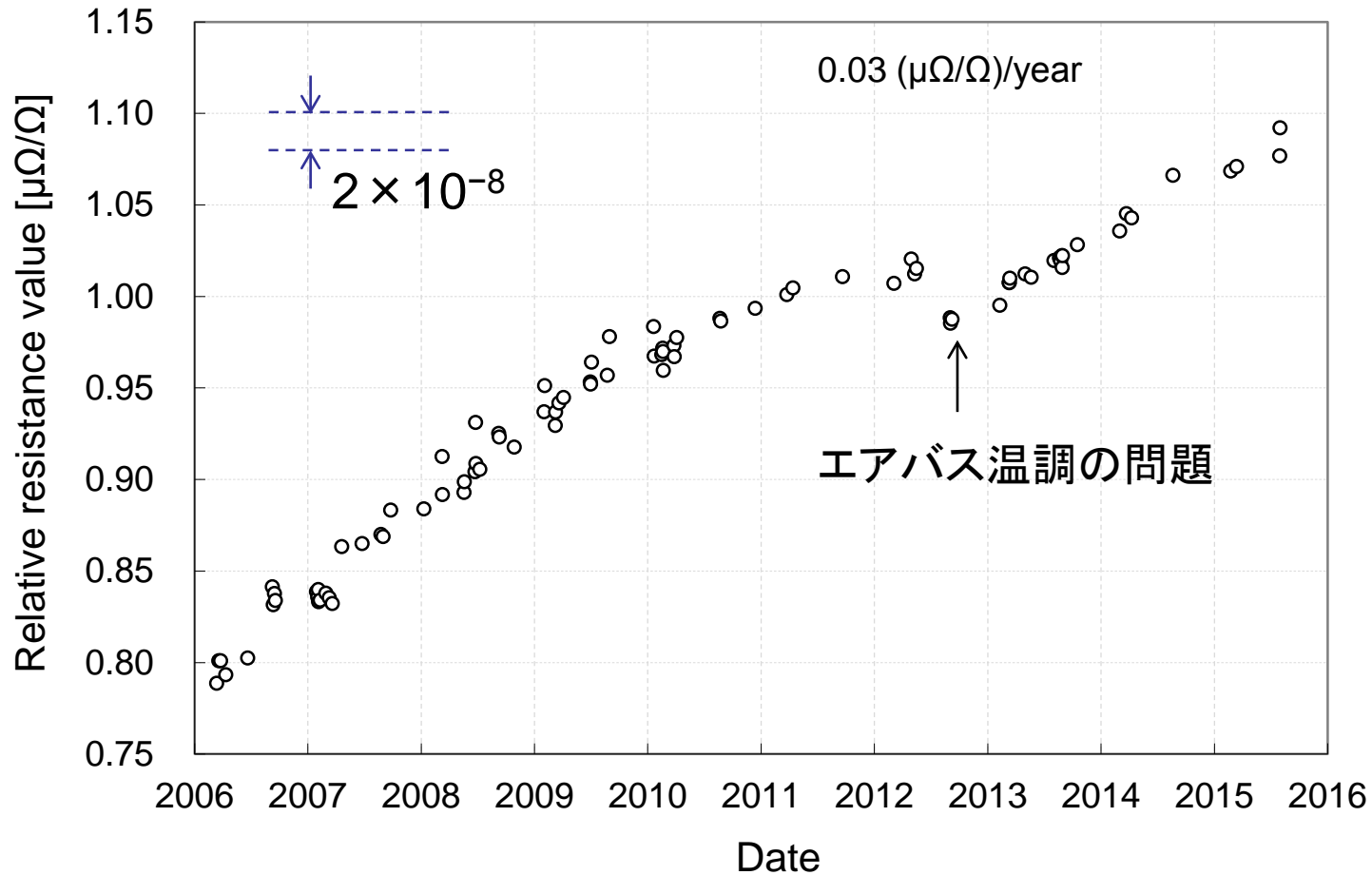


10 kΩ抵抗器の長期ドリフト



BIPMにおける10 kΩ抵抗器のドリフト(QHRベース), Credit: BIPM

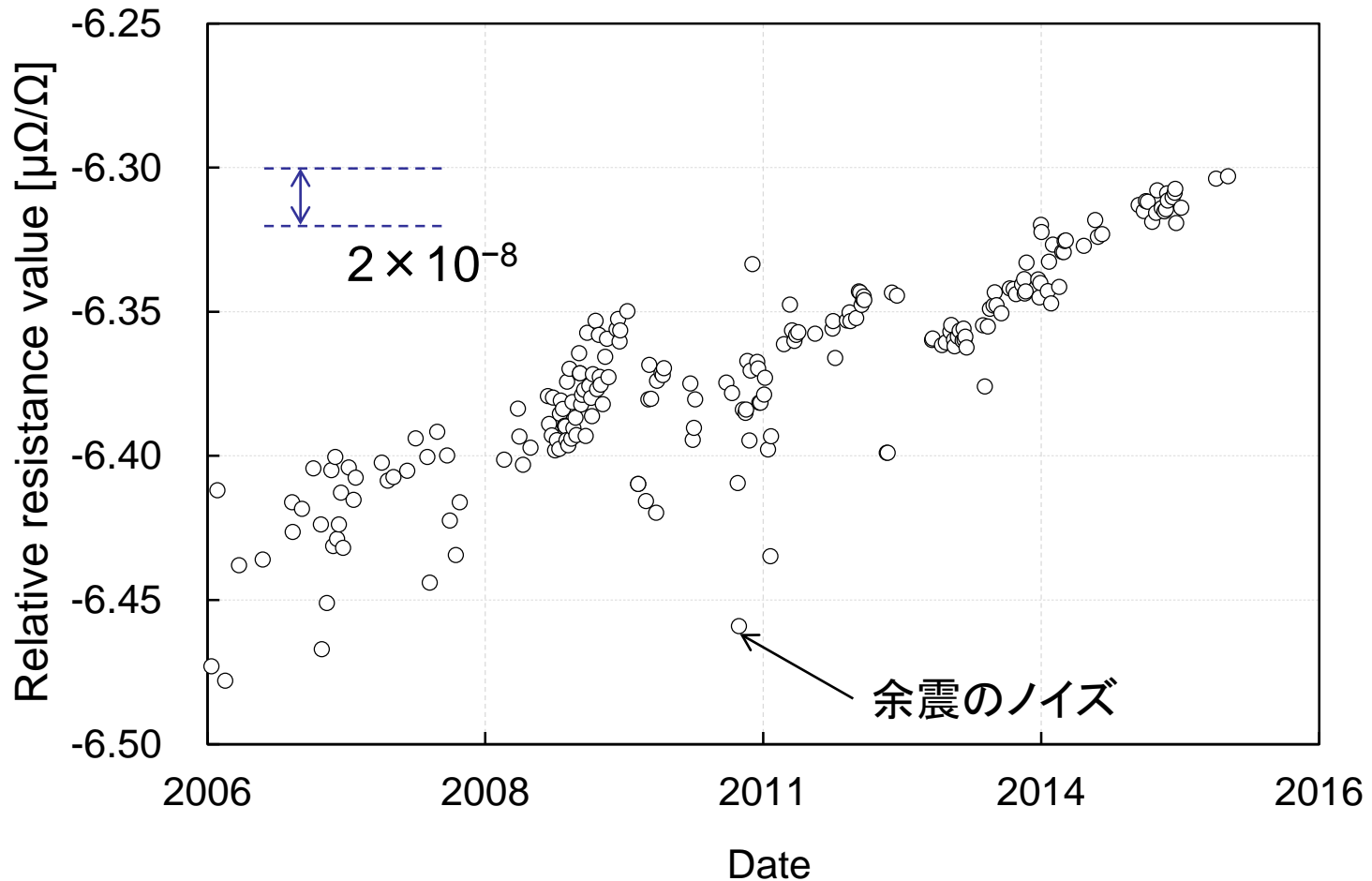
100 Ω抵抗器の長期ドリフト



産総研で維持されている抵抗器の経時変化(QHR直接測定)

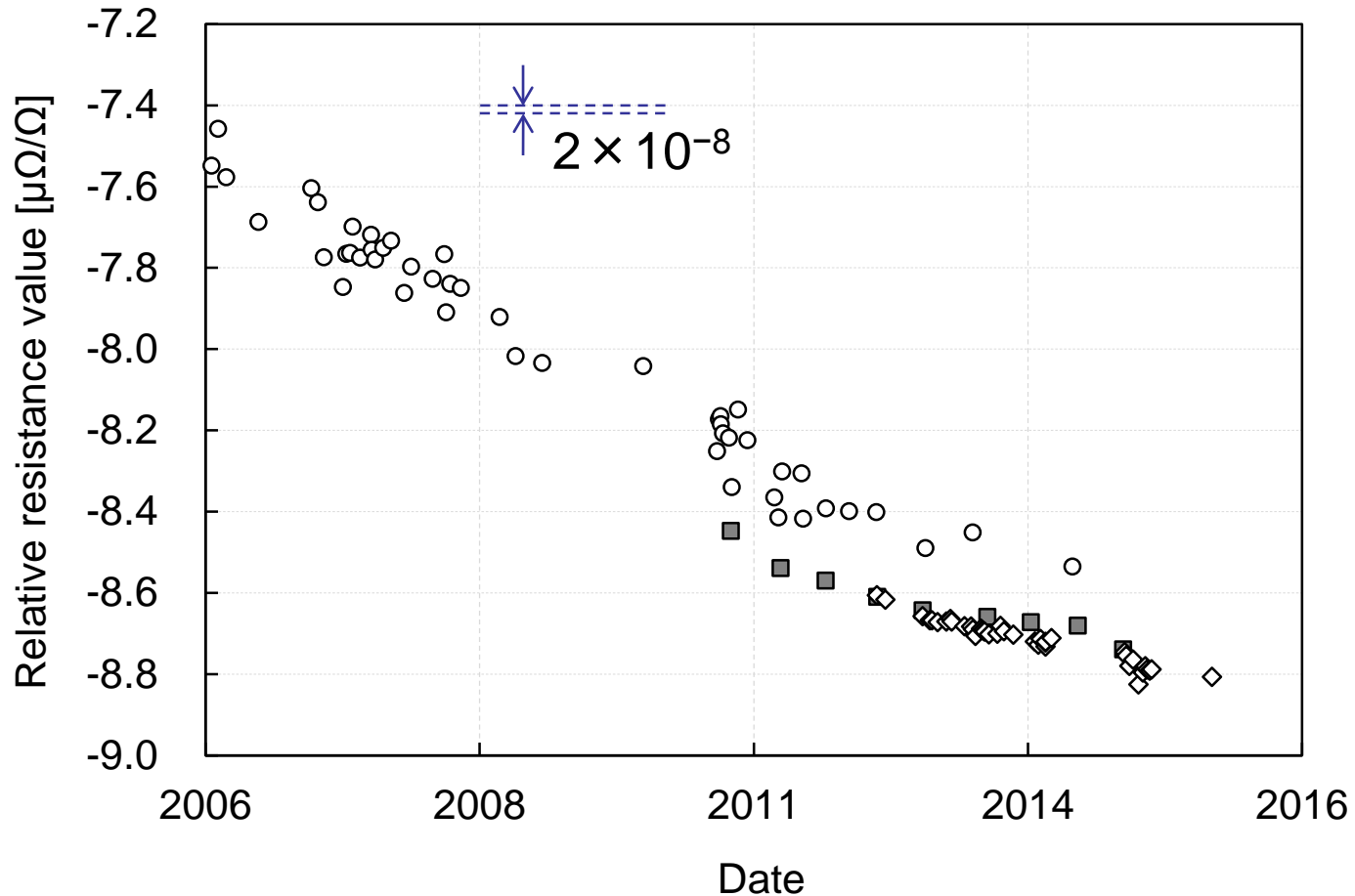
Credit: NMIJ/AIST

1 Ω抵抗器の長期ドリフト



産総研で維持されている抵抗器の経時変化, Credit: NMIJ/AIST

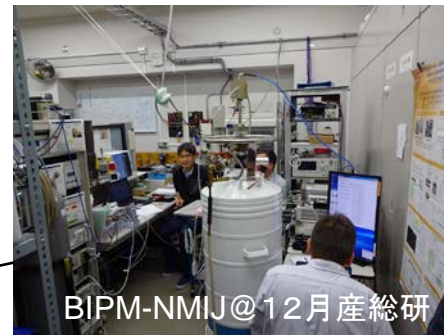
10 kΩ抵抗器の長期ドリフト



産総研で維持されている抵抗器の経時変化, Credit: NMIJ/AIST

電圧

- 普遍性: 10^{-22} !
- On site ジョセフソン比較: $to < 1 \times 10^{-10}$
- On site ツェナー比較: $\approx 5 \times 10^{-9}$
- ツェナーを仲介器とした比較校正、校正業務, CMCs: $\approx 2 \times 10^{-8}$



1608

IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT, VOL. 62, NO. 6, JUNE 2013

The North American Josephson Voltage Interlaboratory Comparison

Harold V. Parks, Yi-hua Tang, Paul Reese, Jeff Gust, and James J. Novak

Abstract—The ninth North American Josephson voltage standard (JVS) interlaboratory comparison (ILC) at 10 V was completed in 2011. An on-site comparison was conducted between the National Institute of Standards and Technology compact JVS and the pivot laboratory system. A set of four traveling Zener voltage standards was then shipped from the pivot laboratory to the other participants. We give the results from the 2011 ILC and review recent comparisons which have used the same traveling standards and similar procedures.

Index Terms—Interlaboratory comparison (ILC), Josephson voltage standards (JVSs), measurement standards, uncertainty, voltage measurement.

I. INTRODUCTION

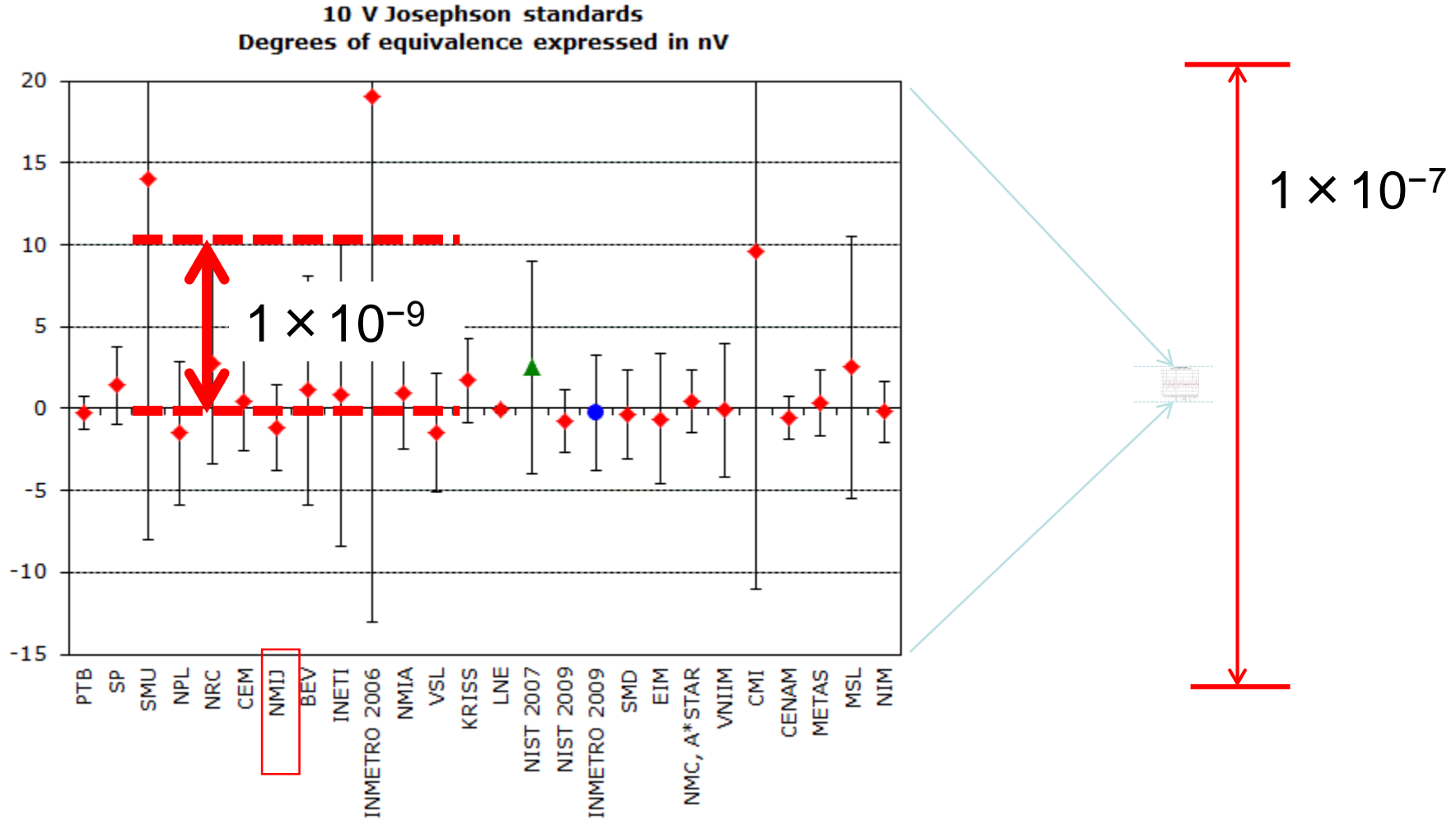
THE 10-V Josephson voltage interlaboratory comparison (ILC), sponsored by the NCSL International (NCSLI), provides the participating laboratories a means of comparing dc voltage measurements to verify the reliability of their

TABLE 1
PARTICIPANTS IN THE 2011 NCSLI JOSEPHSON VOLTAGE ILC

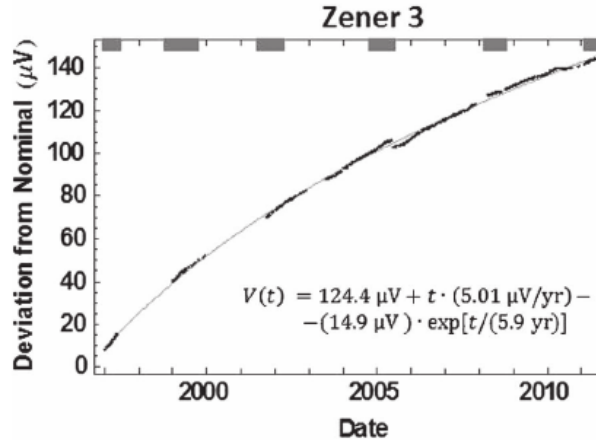
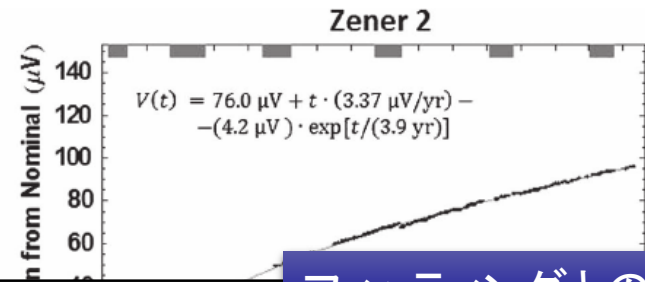
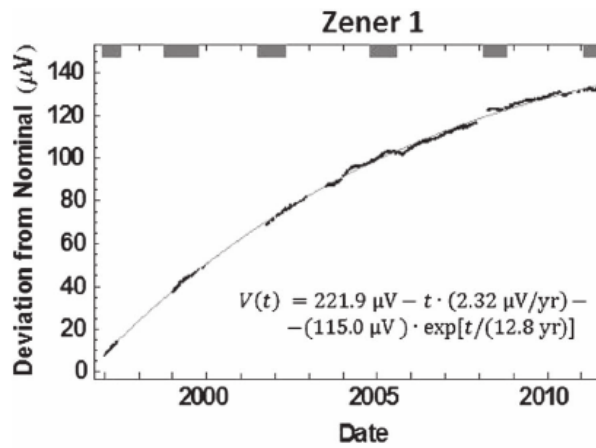
Agilent Technologies, Loveland, CO
Bionetics Corporation, Kennedy Space Center, FL
Boeing, Seattle, WA
Fluke Calibration, Everett, WA
Idaho National Laboratory, Idaho Falls, ID
Lockheed Martin Technical Operations, Stennis Space Center, MS
Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM
NIST, Gaithersburg, MD (on site comparison with the pivot only)
Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM (pivot)
U.S. Air Force Primary Standards Laboratory, Heath, OH
U.S. Army Primary Standards Laboratory, Redstone Arsenal, AL
U.S. Navy Mid Atlantic Regional Calibration Center, Norfolk, VA
U.S. Navy Primary Standards Laboratory, San Diego, CA

Zener voltage standards has been used in the six NCSLI ILCs performed since 1997 [2], [5]–[10], so a great deal of data is

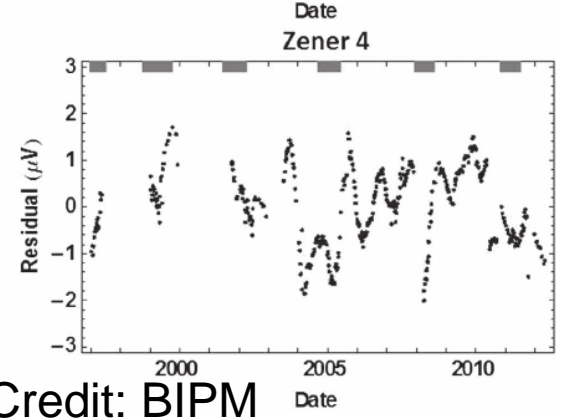
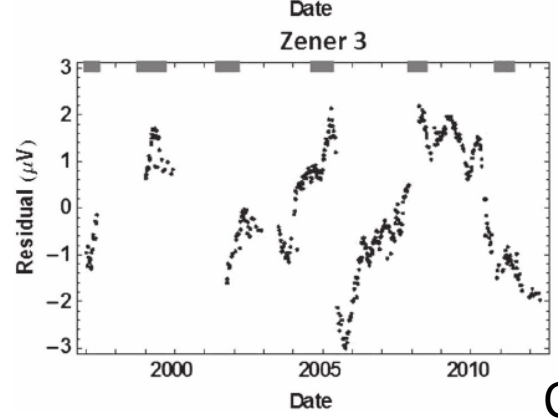
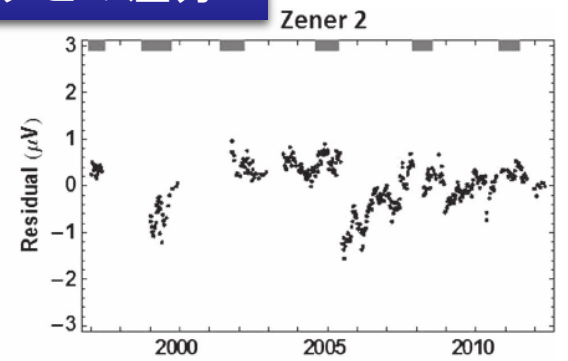
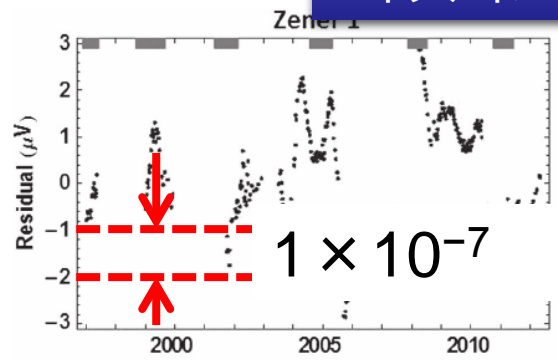
ジョセフソン直接比較による国際比較



ツェナー電圧標準の長期ドリフト

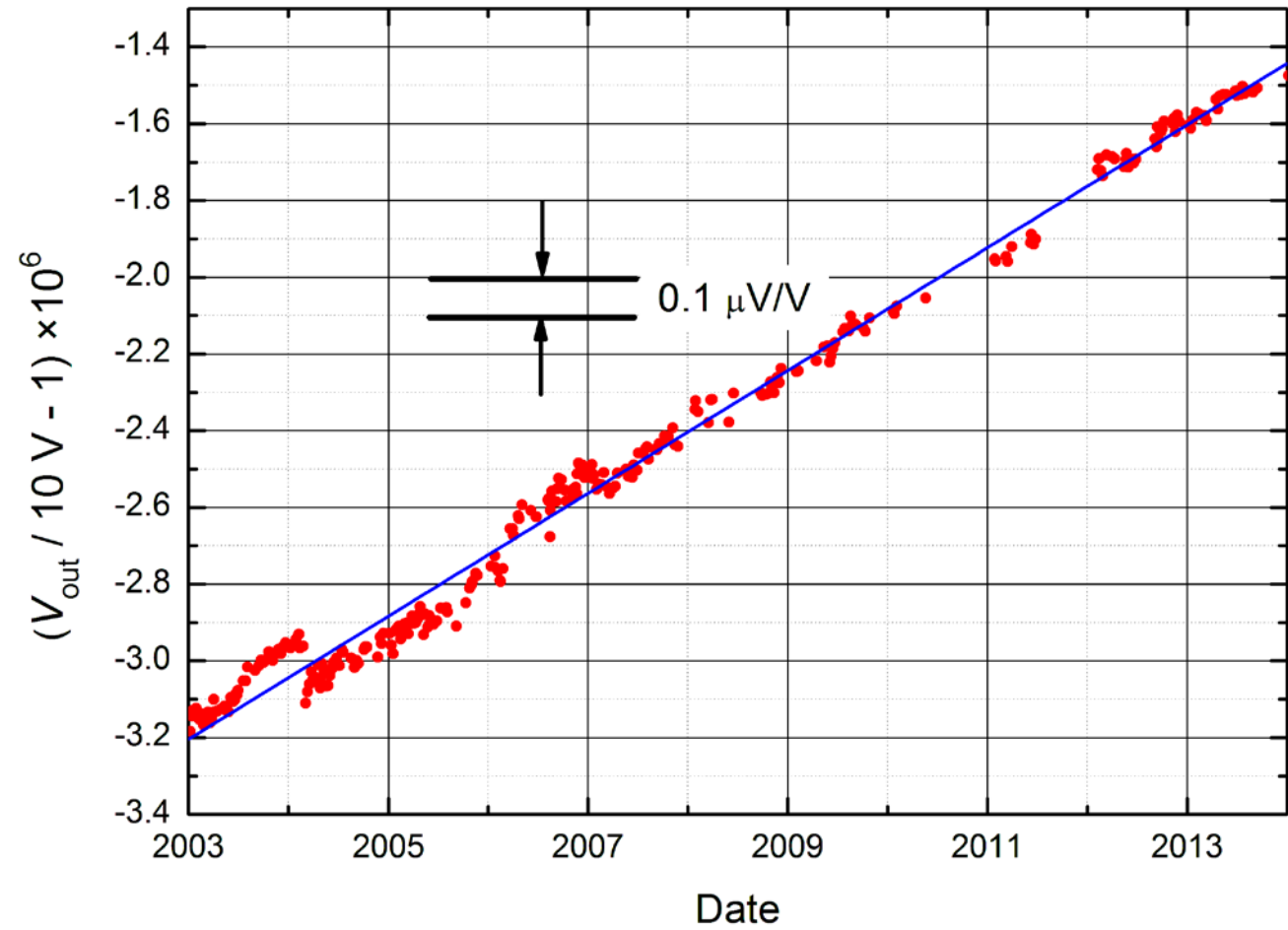


フィッティングとの差分



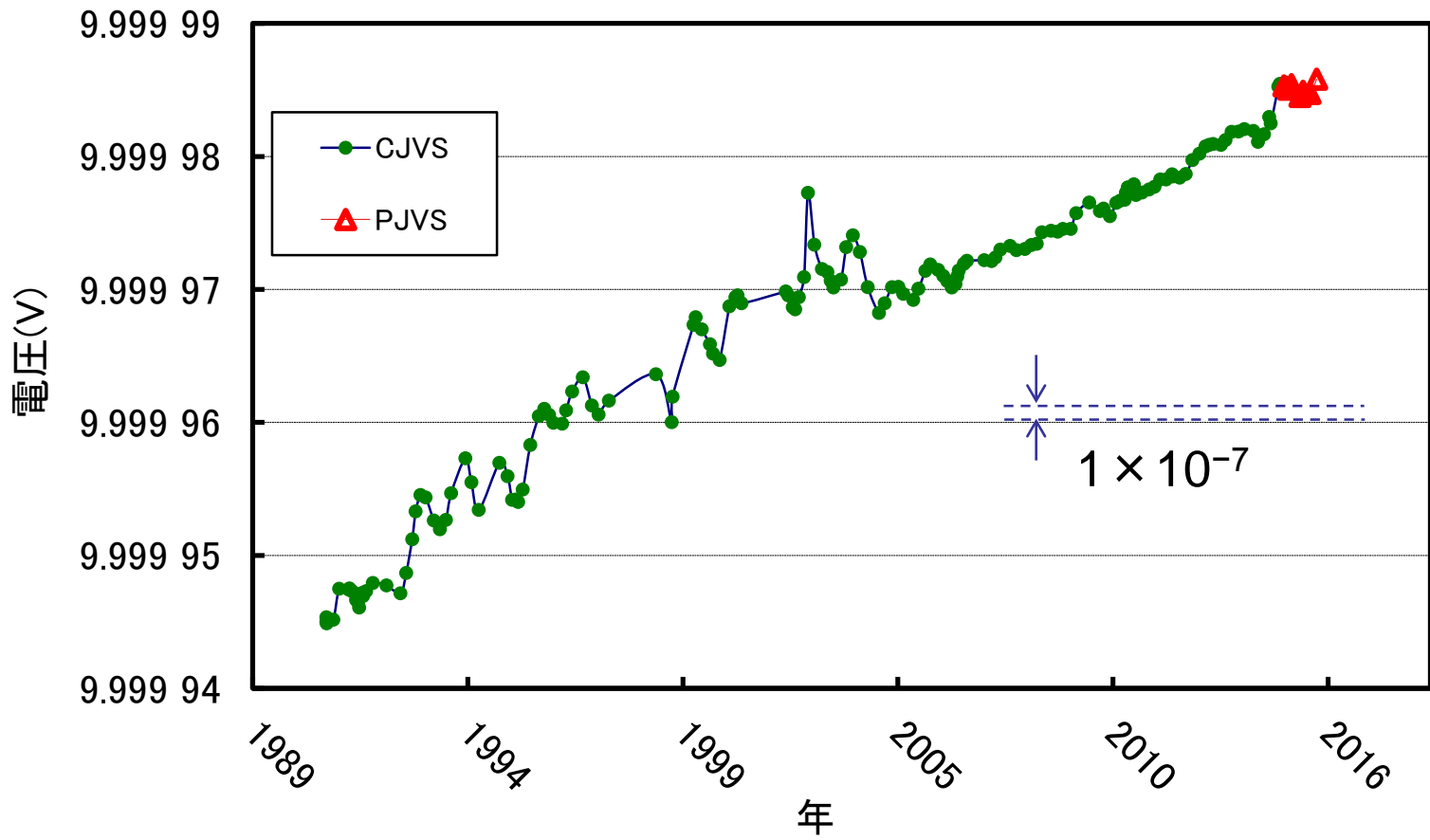
Credit: BIPM

ツェナー電圧標準の長期ドリフト



BIPMで維持されている安定なツェナーの経時変化, Credit: BIPM

ツェナー電圧標準の長期ドリフト



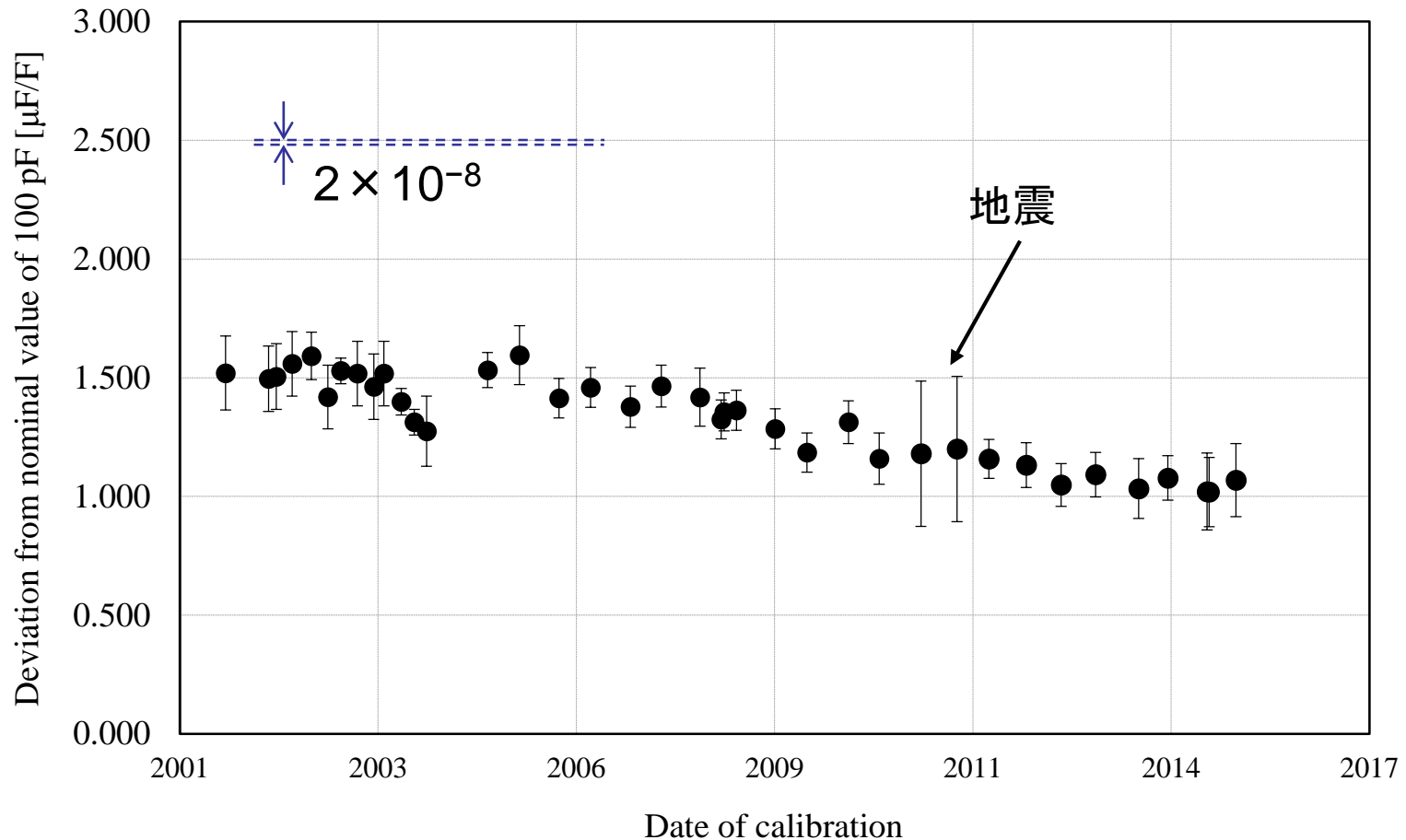
産総研で維持されている安定なツェナーの経時変化, Credit: NMIJ/AIST

他の電気量への影響

- ジョセフソンと、QHR (共にプライマリー) が抵抗、電圧全ての出发点となる。
- キャパシタンス測定 (10^{-8} level) : 抵抗と同じレベルの影響
- 電力測定など多くの電気測定は1ppmを切ることはまれであり影響なし。
- 結論: 広範な再測定、再校正、値の調整の必要なし(プライマリーを除く)

標準キャパシタの長期ドリフト

(100 pF, 1592 Hz, 100 V)



産総研で維持されている標準キャパシタの経時変化, Credit: NMIJ/AIST

日本における電気標準における再定義の影響

- 歓迎すべき点：
 - 協定値 (adopted values) からの脱却
 - 完全なSITレーサビリティが実現
- 努力すべき点
 - 教育活動をまんべんなく行えるか
 - クラブ、大学などでの授業、講演機会を最大限に利用する
 - CCEM WG設置
 - 値の変更の周知
 - 抵抗: $\Delta(h/(e^2)) = 2E-8 \leftarrow U_{nmij} = 5.8E-8$ (実力的にはこの1/10)
 - 電圧: $\Delta(2e/h) = -1E-7 \leftarrow U_{nmij} = 3E-9$

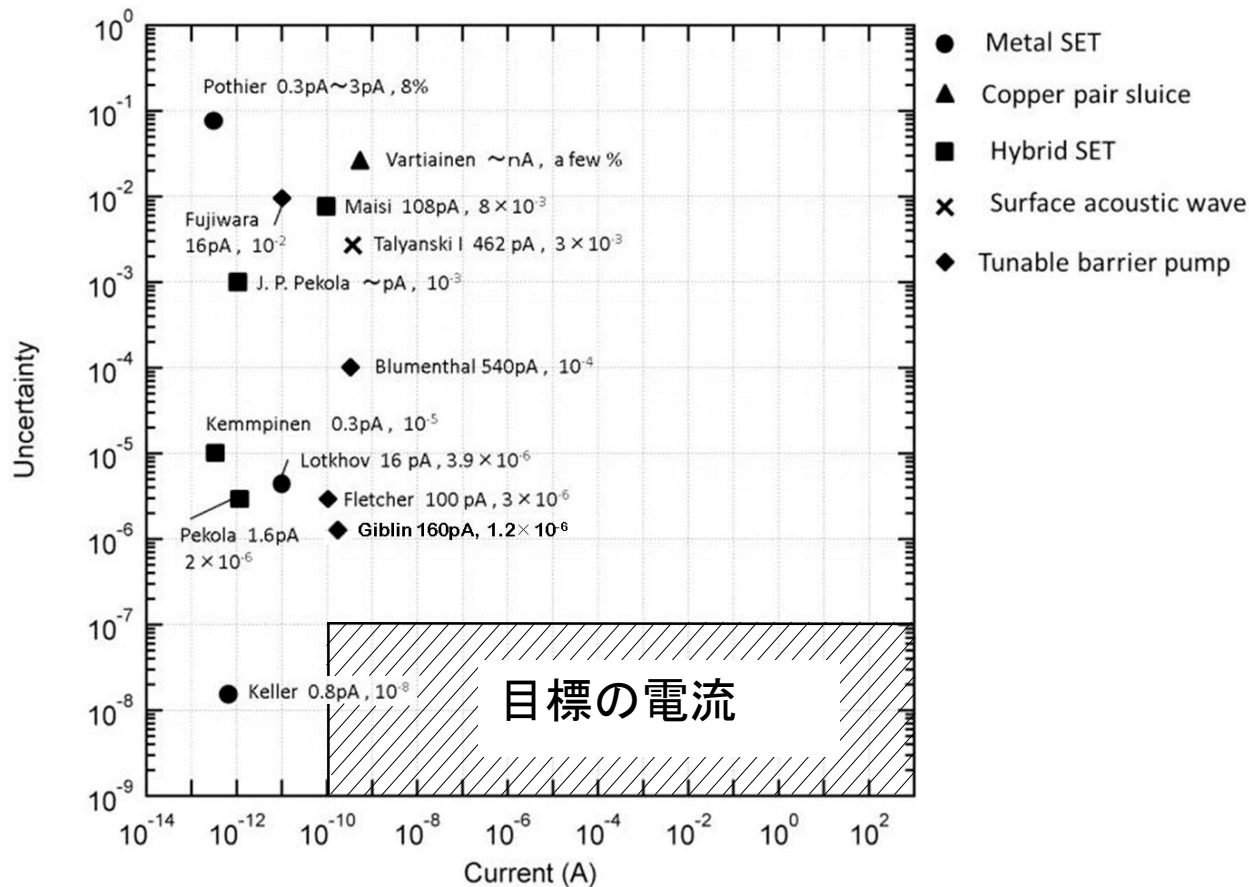
定義改定の影響

ただし、ほとんどの校正事業者は二次標準器の安定性が主要因、つまり値の変更は不確かさの範囲内

再定義後の電気量の実現方法

- V, Ω は変更なし
 - Ω : 量子ホール効果
 - V : ジョセフソン効果
- A も基本的には変更なし
 - $A = V/\Omega$ (ジョセフソン効果/量子ホール効果)
 - $I = ef$ で微小電流は変更可能 (コストとの兼ね合い)
 - 単電子ポンプを利用する事でpAレベルの標準供給は原理的には可能

単電子ポンプの研究の状況



1990年電気量協定値からの変化量想定値

物理量	数式	相対変化
電圧	$V = V_{90} [1 - (100 \times 10^{-9})]$	-100 ppb
抵抗	$\Omega = \Omega_{90} [1 - (17 \times 10^{-9})]$	-17 ppb
電流	$A = A_{90} [1 - (83 \times 10^{-9})]$	-83 ppb
電荷	$C = C_{90} [1 - (83 \times 10^{-9})]$	-83 ppb
電力	$W = W_{90} [1 - (183 \times 10^{-9})]$	-183 ppb
キャパシタンス*	$F = F_{90} [1 + (17 \times 10^{-9})]$	17 ppb
インダクタンス	$H = H_{90} [1 - (17 \times 10^{-9})]$	-17 ppb

*量子化ホール抵抗を用いた場合の変化。カリキュラブルキャパシタ (calculable capacitor)を用いた場合はキャパシタンスの変化はない

改訂の実行

- CCMロードマップに従い2018改訂
- 実際の改訂実行予定については今後決定
 - 1年前には値を決定:ソフトウェアや品質システムなどの改訂作業の調整の時間が必要
- 産総研などの国立標準研や産業界との会話を活発化させガイドライン等の設定に努力

結論

- 1990協定値の変更に伴い、**小さな変更**は不可避。
- 相対変化： $R_{K-90} \rightarrow R_K : 2 \times 10^{-8}$
- 相対変化： $K_{J-90} \rightarrow K_J : 1 \times 10^{-7}$
- この変化は、量子一次標準を運用している場所ではしか見えない程度。ほとんどの**二次標準器**では(最も安定な機器でも)**影響なし**。
- **SIに直接トレーサブル**となる長期的利便性は極めて重要