

ウラン廃棄物を対象とした非破壊測定装置の運用実績 続報

Further Study of Measurement Performance of the NDA Using Q2 System
for Uranium Waste Drum

長沼 政喜 小原 義之 宮本 泰徳 村下 達也
牧田 彰典 野廣 哲也

Masaki NAGANUMA, Yoshiyuki OHARA, Yasunori MIYAMOTO, Tatuya MURASHITA
Akinori MAKITA and Tetuya NOHIRO

人形峠環境技術センター
環境保全技術開発部

Environmental Research and Development Department
Ningyo-toge Environmental Engineering Center

June 2014

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency.
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

ウラン廃棄物を対象とした非破壊測定装置の運用実績 続報

日本原子力研究開発機構 人形峠環境技術センター
環境保全技術開発部

長沼 政喜、 小原 義之
宮本 泰徳*1、 村下 達也*1、 牧田 彰典*1、 野廣 哲也*2

(2014年3月28日 受理)

日本原子力研究開発機構人形峠環境技術センターでは、昭和50年~平成14年まで、ウラン鉱石からウランを抽出し製錬・転換・濃縮して原子炉の燃料とするための研究開発、および使用済み燃料を再処理して回収したウランを転換・再濃縮する技術開発を行ってきた。

この間に発生した放射性廃棄物は、ドラム缶に密封した状態で当センターの廃棄物貯蔵庫に約15,000本保管しているが、昭和50年~平成12年までに発生した廃棄物に関する廃棄物管理情報に統一性がなかった。

平成10年頃、当センターの主要核物質取扱施設の核物質不明量 (Material Unaccounted For ; MUF) が保障措置上の課題として国際原子力機関に指摘された。この課題解決のため、当センターでは廃棄物中のウラン量を統一した手法で測定し再評価することの必要性および緊急性が認識された。

このため、当センターでは、平成12年に米国 CANBERRA 社製の Q2 低レベル廃棄物ドラム缶測定装置 (以下、「Q2」という。) を導入し、廃棄物ドラム缶の非破壊でのウラン量測定を行ってきた。

平成19年に Q2 に用いられている解析システムを旧 OS2 解析システム (以下「OS2 システム」という) から windows 解析システム (以下「win システム」という) へと変更した。変更によって解析システムの性能は向上したが、OS2 システムによって得られた定量値と win システムによって得られた定量値は完全には一致しなかった。特にウラン量の多いドラム缶では差異が顕著で、win システムによる定量値は大きく増加した。OS2 システムで測定したドラム缶を win システムで再測定すべきか検討されたが、OS2 システムで測定されたドラム缶は約1万本と膨大なため、現実的に困難と考えられた。そこで今回 OS2 システムと win システムのデータを解析し、ウラン量の補正を行う計算方法を検討した。

人形峠環境技術センター：〒708-0698 岡山県苫田郡鏡野町上齋原 1550

*1 人形峠原子力産業株式会社

*2 検査開発株式会社

Further Study of Measurement Performance of the NDA Using Q2 System
for Uranium Waste Drum

Masaki NAGANUMA, Yoshiyuki OHARA, Yasunori MIYAMOTO*¹,
Tatuya MURASHITA*¹, Akinori MAKITA*¹ and Tetuya NOHIRO*²

Environmental Research and Development Department
Ningyo-toge Environmental Engineering Center, Japan Atomic Energy Agency
Kagamino-cho, Tomata-gun, Okayama-ken

(Received March 28, 2014)

In Japan Atomic Energy Agency Ningyo-toge Environmental Engineering Center, exploration for uranium and technical development of uranium refining, conversion and enrichment which are the front end of a nuclear fuel cycle have been performed since 1975. By these research and development, about 15,000 radioactive waste drums (200 liters/drum) have occurred by now. These drums are kept in the radioactive waste storage warehouse. This is decided by the regulation law of Japan. The analytical and measurement technique of the amount of uranium which are included in radioactive waste drum were very an inexperienced in these days. Therefore, strict measurement till 2000 was not able to be started. Such a situation as this, we introduced “Q2 low-level-waste drum measuring system” which is a bulk measuring method of the passive gamma ray in 2000.

In 2007, OS2 analyzing operation system (OS2 system) which was used in Q2, was replaced with windows system(win system). This replacement improved the performance of the analysis of Q2. But quantified values of uranium obtained from win system did not correspond exactly to OS2 system. The difference of quantified values of each system was greater in the drum containing much uranium. We considered whether the drum which was measured by OS2 system, should be measured again by win system. But it was difficult to measure these drum by win system, because the number of these drums which had been measured by OS2 system was over 9,800. So in this study, we analyzed the data of OS2 system and the data of win system, and we studied a calculation method for adjusting quantified values of uranium obtained by each system.

Keywords: Nda, Q2system, Uranium Waste Drum, Ningyo-toge Environmental Engineering Center

*¹Ningyo-toge Genshiryoku Sangyou Co. Ltd.

*²Inspection Development Company Ltd.

目次

1. はじめに	1
2. 廃棄物管理の現状	2
3. 実廃棄物ドラム缶の測定	3
3.1. Q2 装置の概要	3
3.2. Q2 解析システムの変更	3
3.3. 解析システムの差異	4
3.4. OS2 システムから win システムへの補正式	4
4. 結果	7
5. まとめ	11
謝辞	11
参考文献	11

Contents

1. Introduction	1
2. Present Situation	2
3. Measurement of the Actual Waste Drum	3
3.1. Measurement System Structure	3
3.2. Replacement of the Analyzing System of Q2	3
3.3. Defference of Each Analyzing System	4
3.4. Adjusting Formula OS2 System to Win System	4
4. Result	7
5. Conclusion	11
Acknowledgment	11
References	11

図リスト

図 1	OS2 システムと win システムでの計数率の相関	6
図 2	ドラム缶重量と Peak Efficiency の相関.....	6
図 3	各ウラン量におけるドラム缶本数 (OS2 システム)	7
図 4	計数率の比較.....	8
図 5	ウラン量の比較.....	8
図 6	各計数率におけるドラム缶本数の比較.....	9
図 7	各計数率におけるドラム缶本数の比較 (2,000cps 以上)	9
図 8	各ウラン量におけるドラム缶本数の比較.....	10
図 9	各ウラン量におけるドラム缶本数の比較 (4kg 以上)	10

1.はじめに

日本原子力研究開発機構人形峠環境技術センター（以下「センター」という。）では、昭和 50 年～平成 14 年まで、ウラン鉱石からウランを抽出し製錬・転換・濃縮して原子炉の燃料とするための研究開発、および使用済み燃料を再処理して回収したウランを転換・再濃縮する技術開発を行ってきた。

この間に発生した放射性廃棄物（以下「廃棄物」という。）は、ドラム缶に密封した状態でセンターの廃棄物貯蔵庫（加工施設廃棄物貯蔵庫 1 棟、使用施設廃棄物貯蔵庫 14 棟および核原料物質廃棄物貯蔵庫 1 棟の合計 16 棟）に約 15,000 本保管しているが、昭和 50 年～平成 12 年までに発生した廃棄物は、材質別区分、放射能（センターで扱った放射能は、主にウランであることから、以下「ウラン」という。）評価方法、ウラン量表記等の管理基準が統一されていないことなど、廃棄物管理情報に統一性がなかった。

平成 10 年頃、センターの主要核物質取扱施設の核物質不明量（Material Unaccounted For ; MUF）が保障措置上の課題として国際原子力機関（以下、「IAEA」という。）に指摘された。この課題解決のため、センターでは廃棄物中のウラン量を統一した手法で測定し再評価することの必要性および緊急性が認識された。

このため、センターでは、平成 12 年にドラム缶に収納した状態でウラン量を定量することができる米国 CANBERRA 社製の Q2 を導入し、廃棄物ドラム缶の非破壊でのウラン量測定を行ってきた。

平成 19 年に Q2 に用いられている解析システムを旧 OS2 解析システム（以下「OS2 システム」という。）から windows 解析システム（以下「win システム」という。）へと変更した。これに伴い波形解析ソフトやマルチチャンネルアナライザー(MCA) も windows 対応となった。変更によって解析システムの性能は向上したが、OS2 システムによって得られた定量値と win システムによって得られた定量値は完全には一致しなかった。特にウラン量の多いドラム缶で差異が顕著で、win システムによる定量値は大きく増加した。OS2 で測定したドラム缶を win システムで再測定すべきか検討されたが、OS2 システムで測定されたドラム缶は約 1 万本と膨大なため、多くの時間と労力が必要となり現実的に困難と考えられた。そこで今回 OS2 システムと win システムの測定データを解析し、ウラン量の補正を行う計算方法について検討した。

2.廃棄物管理の現状

センターでは、昭和 50 年～平成 14 年まで、ウラン鉱石からウランを抽出し製錬・転換・濃縮して原子炉の燃料とするための研究開発および使用済み燃料を再処理して回収したウランの、転換・再濃縮する技術開発を行ってきた。

この間に発生した廃棄物は、ドラム缶に密封した状態でセンターの廃棄物貯蔵庫に約 15,000 本保管しているが、昭和 50 年～平成 12 年までに発生した廃棄物は、廃棄物管理情報に統一性がなかった。

特にウラン量については、中和殿物等の廃液処理から発生した廃棄物では、一部の廃棄物から採取したサンプルを分析してウラン量を求めているが、金属類や雑固体等の廃棄物では、ドラム缶収納時に適用可能な実用的ウラン定量手法がなかったため、サーベイメーターによりドラム缶表面線量を測定し $0.2\mu\text{Sv}$ 以上を 1gU 、 $0.2\mu\text{Sv}$ 未満を 0gU としていた。あるいは測定を実施することなくウラン量をゼロとしていた。

平成 10 年頃、核物質不明量 (MUF) が保障措置上の課題として IAEA に指摘された。この課題解決のため、センターでは廃棄物中のウラン量を統一した手法で測定し再評価することの必要性および緊急性が認識された。

このため、センターでは、平成 12 年にドラム缶に収納した状態でウラン量を定量することができる米国 CANBERRA 社製の Q2 を導入し、廃棄物ドラム缶の非破壊でのウラン量測定を行ってきた。

この間、平成 12 年に適応性確認試験により装置の特性を把握したうえで、模擬廃棄物を使った装置の校正を行い、平成 13 年～平成 23 年の間で、廃棄物貯蔵庫に保管している約 15,000 本の廃棄物ドラム缶について、ほぼ全数の測定を実施した。

平成 19 年に Q2 に用いられている解析システムを OS2 システムから win システムへと変更した。これに伴い波形解析ソフトや廃棄物ドラム缶解析ソフト、MCA も windows 対応へと刷新された。変更によって解析システムの性能は向上した。OS2 システムではウラン量の多いドラム缶を測定した場合、パイルアップによる数え落としを生じており定量値に影響していた。これに対し新しい win システムでは性能の向上により数え落としの問題は解消された。このため OS2 システムで測定したドラム缶を再度 win システムで測定したところ両者の定量値は完全には一致しなかった。特にウラン量の多いドラム缶では差異が顕著で、win システムの定量値は大きく増加した。このことから OS2 で測定したドラム缶に対して win システムでの再測定の必要性を議論した。しかし、OS2 システムで測定されたドラム缶は約 1 万本と膨大なため、多くの時間と労力が必要となり現実的に困難と考えられた。

本報告では、OS2 システムから得られた測定データと win システムから得られた測定データを解析し、OS2 システムの測定値から win システムの測定値に相当するウラン量へ補正する計算方法を検討した。

3.実廃棄物ドラム缶の測定

3.1.Q2 装置の概要

Q2 は、廃棄物ドラム缶内の U238 の子孫核種である Pa234m から放出される 1001keV の γ 線を NaI シンチレーション検出器で測定し、MCA でエネルギースペクトルを解析することにより、廃棄物ドラム缶内に存在するウラン量を定量するものである。なお、Q2 で測定される 1001keV エネルギースペクトルからウラン量を定量する計算式を式(3-1-1)に示す。

$$238\text{U}(\text{g}) = \text{放射能}(\text{g})/\text{比放射能}(\text{Bq/g}) \quad \text{式}(3-1-1)$$

$$\text{放射能}(\text{Bq}) = \text{ピーク計数値}/\text{測定時間} \cdot \text{計数効率} \cdot \text{放出比}$$

・装置仕様

○本体

ドラム缶専用のバックグラウンド放射線遮蔽箱 (CANBERRA 社製)

外寸法 : W1,730×D1,220×H1,520 (mm)

総重量約 : 7,200kg

装置計測部仕様

遮蔽体 (鉄) : 100mm

ドラム缶回転用ターンテーブル+ドラム缶重量測定装置 (CANBERRA 社製)

最大積載量 : 450kg

回転速度 : 12rpm

○計測部

検出器 : NaI シンチレーション検出器 2 台 (温度調節機能付き、CANBERRA 社製)

マルチチャンネルアナライザー : DSA-1000 (512ch : 2000keV、CANBERRA 社製)

解析ソフトウェア : Genie2000、waste assay software (CANBERRA 社製)

3.2.Q2 解析システムの変更

平成 19 年、CANBERRA 社より OS2 を基本ソフトとする解析システムの製造中止の連絡を受け、サポート体制やメンテナンスの観点から windows を基本ソフトとする解析システムへと変更した。これに伴い、波形解析ソフトは geniePC から genie2000 へ、廃棄物ドラム缶測定ソフトは WAS から NDA-2000 へと変更となった。また、MCA も刷新され DSA-1000 となった。OS2 システムの MCA はアナログ処理であったが、win システムの MCA はデジタルシグナルプロセッサによるデジタル処理となった。

3.3.解析システムの差異

OS2 システムにおけるウランの定量は、U238 の子孫核種である Pa234m の 766keV と 1001keV の両方のピークを解析対象とし、両ピークの放射能とその誤差から計算される加重平均を用いて計算されていた。ところが Q2 の検出器は NaI シンチレーションであり、766keV ピーク近辺に現れる他の天然核種由来のピークを分離して解析することが困難であった。また 766keV ピークは 1001keV ピークに比較して検出限界放射能(MDA)が高い。従って、win システムでは他の核種からの影響が少なく、MDA が小さい Pa234m の 1001keV ピークのみをウラン定量の解析対象にした。

また、従来の OS2 システムでは MCA がアナログ処理であったが、win システムではデジタル処理となった。従来の OS2 システムでは、ウラン量の多いドラム缶において γ 線を高レートで検出することによって 2 つ以上のパルス信号が偶発的に重なり合うパイルアップという現象が起こっていた。パイルアップによって OS2 ではピーク計数率の減少がもたらされウランの定量値に影響した。新しい win システムでは MCA がデジタル処理となったため、パイルアップを別々の信号として解析できるように性能が向上した。性能の向上により同一ドラム缶を測定した場合であっても OS2 システムと win システムの間でピーク計数率や定量値は完全には一致しなかった。特に高ウラン量のドラム缶ではパイルアップの影響が解消されたことから win システムでのウランの定量値の増加が顕著となった。

3.4.OS2 システムから win システムへの補正式

本報告では OS2 によって測定されたデータに対して計算による補正を試みた。補正の計算方法は以下の通りである。

実廃棄物ドラム缶を OS2 システムで測定した計数率を win システムで測定した場合に得られる計数率に換算し、ウラン量を計算する方法を示す。

測定データを換算するため、同じ実廃棄物ドラム缶を OS2 システムと win システムで測定し、OS2 システムでの計数率と win システムでの計数率の関係式を設定する。この関係式を使って OS2 システムで測定した実廃棄物ドラム缶の計数率を win システム用の計数率に換算する。

ウラン量の計算には計数率を放射能に換算するための Peak Efficiency が必要である。Peak Efficiency は win システムでは、実廃棄物ドラム缶の重量から計算している。したがって、OS2 システムでの計数率から換算した win システム用の計数率と、実廃棄物ドラム缶の重量から算出した Peak Efficiency を win システムで使われているウラン量換算式に入力してウラン量を計算する。

計数率の換算を行うため、同じ実廃棄物ドラム缶を OS2 システムと win システムで測定したデータが必要である。また、Peak Efficiency の算出のため、実廃棄物ドラム缶を測定したときのドラム缶重量と win システムが出力した Peak Efficiency のデータが必要である。

① 数率の換算

OS2 システムと win システムの両方で測定したドラム缶の中からウラン量が 1kg~20kg と出力されたドラム缶を 36 本選び、OS2 システムでの計数率と win システムでの計数率の相関を図 1 に示した。図 1 から win システムで測定した計数率は OS2 システムで測定した計数率から一意的に換算できることがわかる。このときの換算式を多項式近似で計算した。この結果、OS2 システムでの計数率から win システムでの計数率への換算式は式(3-4-1)で表される。

$$y = 1.887E-12x^4 - 1.464E-08x^3 + 1.079E-04x^2 + 8.423E-01x \quad \text{式(3-4-1)}$$

(x: OS2 システムでの計数率、y: win システムでの計数率)

② Peak Efficiency の算出

計数率の換算で使用した 36 本のドラム缶に重量の軽いドラム缶 1 本を加えた 37 本のドラム缶でドラム缶重量と win システムが出力した Peak Efficiency の相関を図 2 に示した。図 2 から Peak Efficiency はドラム缶重量から一意的に換算できることがわかる。このときの換算式を多項式近似で計算した。この結果、ドラム缶重量から win システムでの Peak Efficiency への換算式は式(3-4-2)で表される。

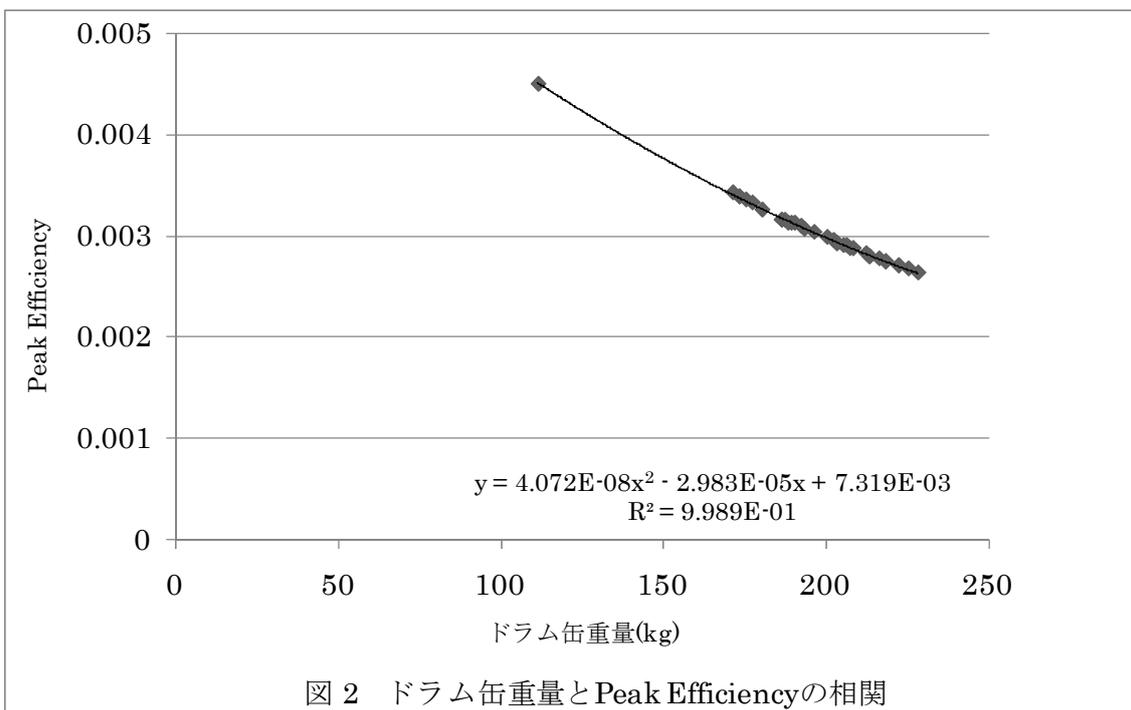
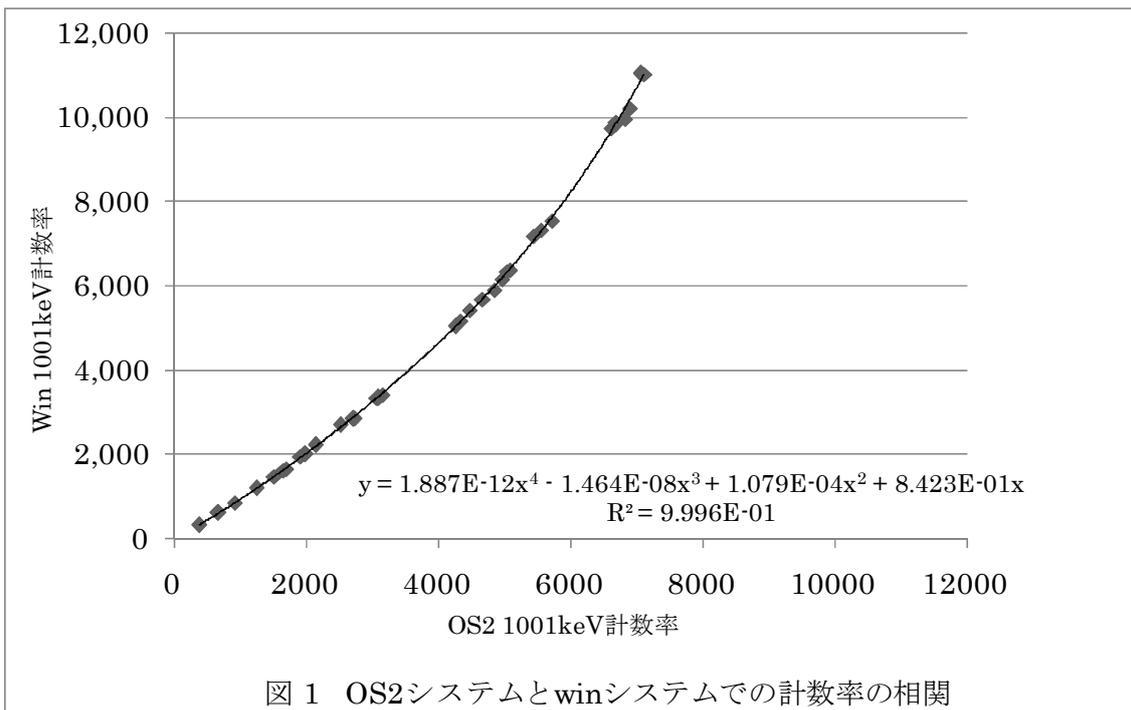
$$y = 4.072E-08x^2 - 2.983E-05x + 7.319E-03 \quad \text{式(3-4-2)}$$

(x: ドラム缶重量、y: win システムでの Peak Efficiency)

③ ウラン量の計算

OS2 システムでの測定データとドラム缶情報から得られた win システム用の計数率と Peak Efficiency からウラン量を計算する。ウラン量(W_{U238})は、win システム用の計数率 N_{win} を Peak Efficiency ($P_{Efficiency}$)、1001keV の放出率 $I_Y (=0.84)$ で割って放射能を計算し、放射能を比放射能 SA ($=1.24E+4$) で割って計算する。計算式を式(3-4-3)に示す。

$$W_{U238} = N_{win} / (P_{Efficiency} \times I_Y) / SA \quad \text{式(3-4-3)}$$

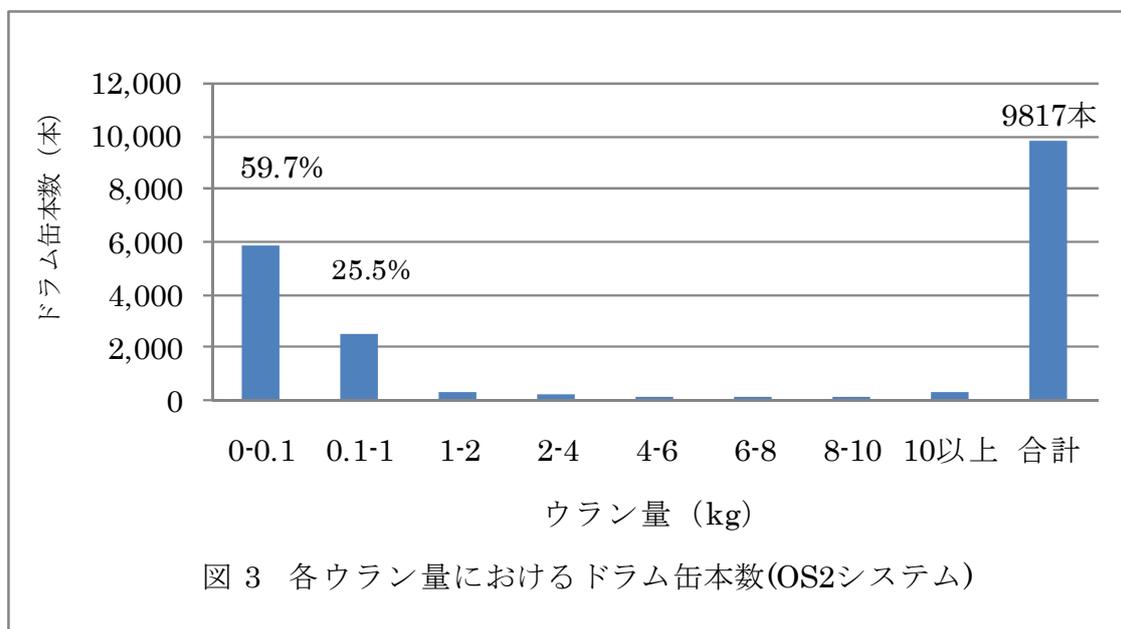


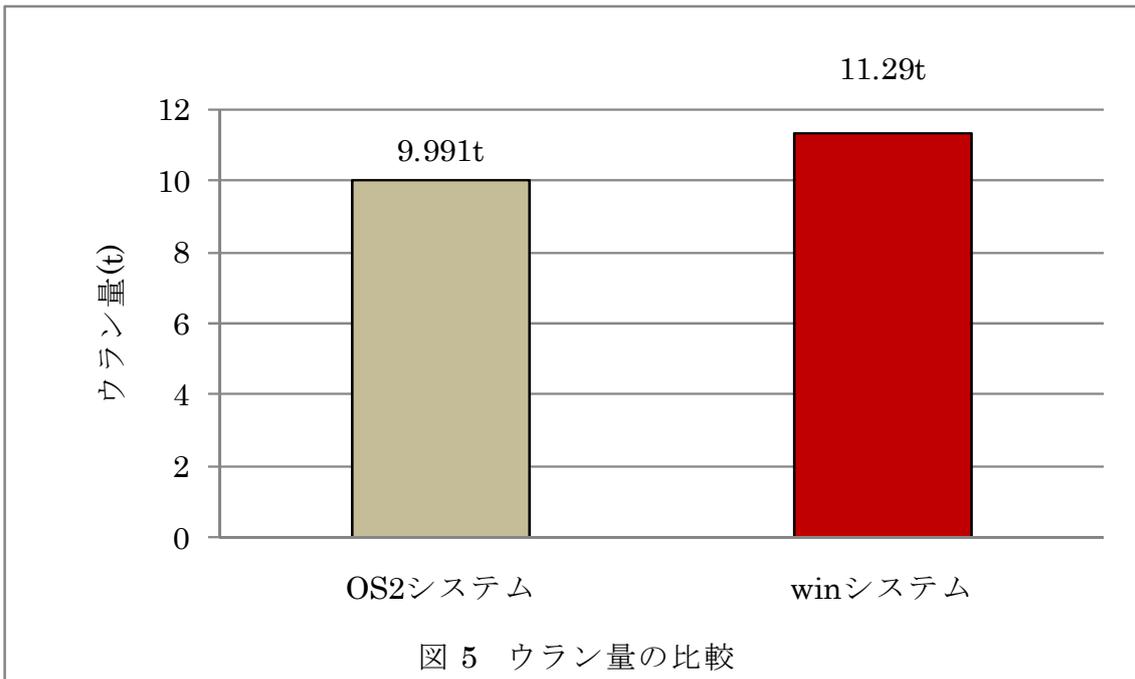
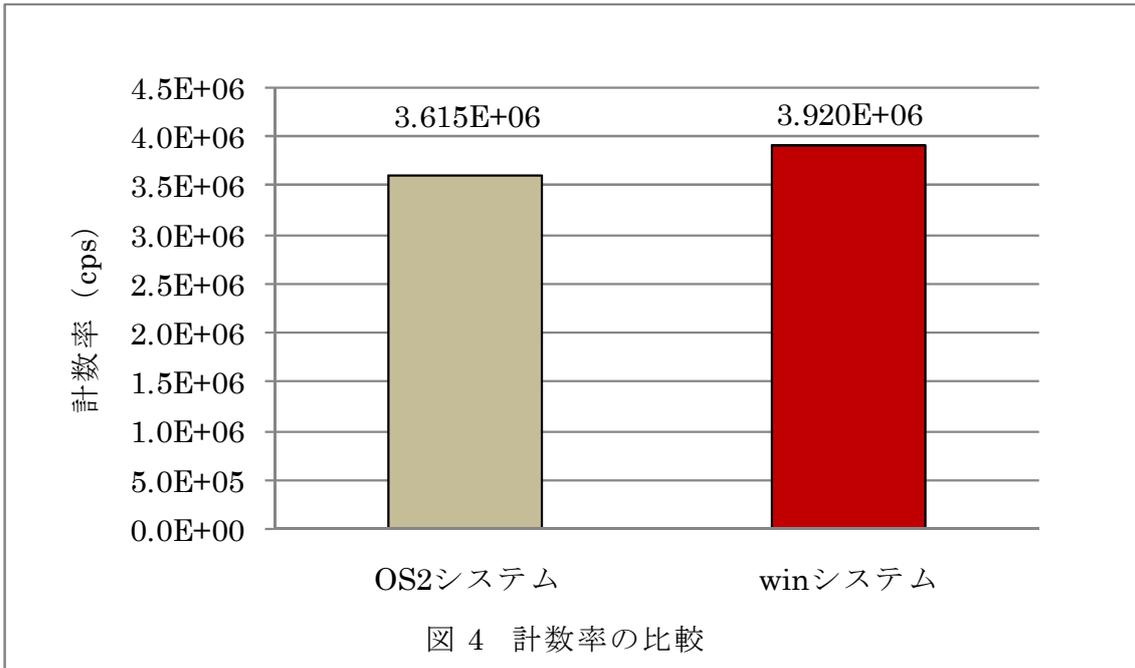
4.結果

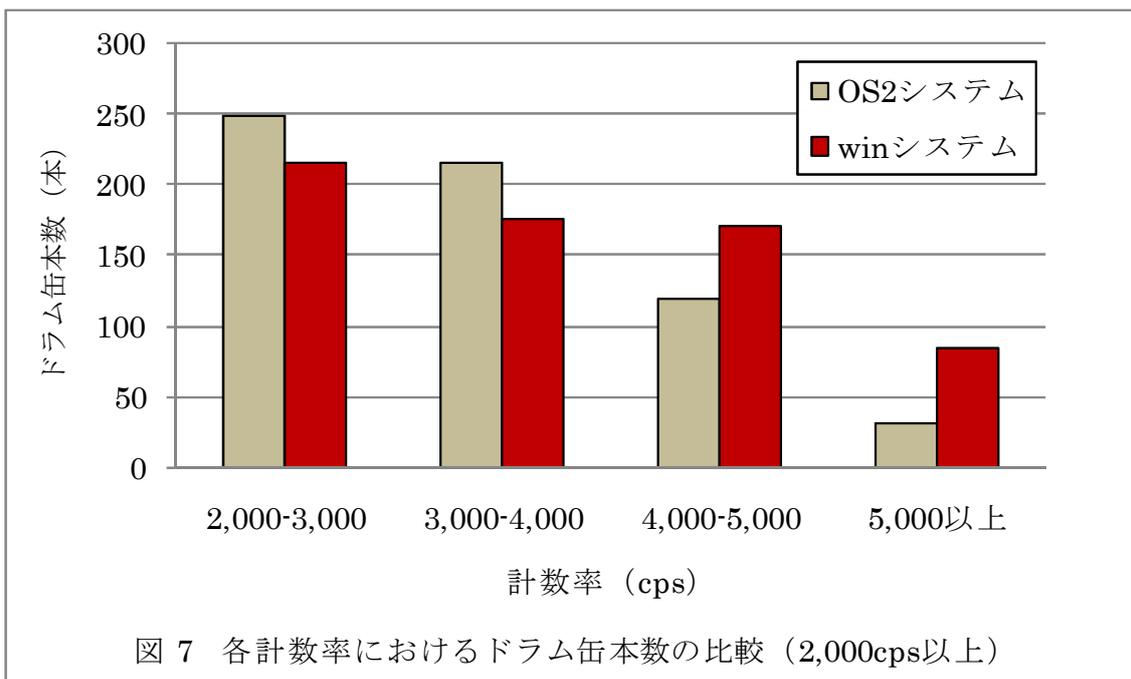
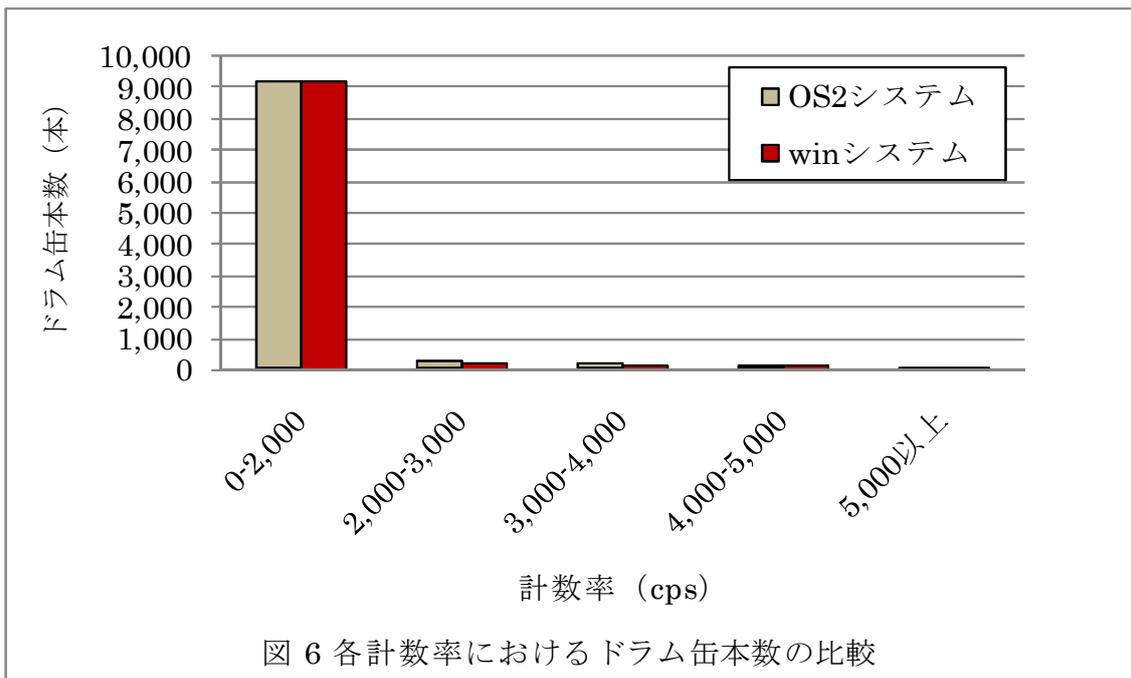
平成 25 年 9 月末現在、貯蔵庫（保管庫及び第 1 貯蔵庫～第 14 貯蔵庫）に保管されている Q2 によって測定された廃棄物ドラム缶は 14,260 本であり、Q2 によって測定されたドラム缶の総ウラン量は 21.37t である。これら廃棄物ドラム缶のうち本報告の解析対象となった OS2 システムで測定したドラム缶本数は 9817 本である（図 3）。その解析対象ドラム缶の総ウラン量は 9.991t である。ドラム缶総数 9817 本のうち 59.7%がウラン量 100g 未満であり、ウラン量 1kg 未満のドラム缶本数を合計すると全体の 85.2%である。このように比較的ウラン量の低いドラム缶が大部分を占めた。

OS2 システムの測定データごとのカウント数データから算出された計数率と、変換式を用いて測定データごとに補正を行った win システムによる計数率の合計について図 4 に示す。変換による補正の結果、OS2 と比較して win システムでは 8.4%の計数率の増加が確認された。また、変換による補正によって 4,000cps 以上のドラム缶本数の増加が認められた（図 6、図 7）。

変換式による補正前後のウラン量を図 5 に示す。結果、OS2 システムによる総ウラン量である 9.991t から変換により win システムでは総計 11.29t となった。これは OS2 システムと比較して 13.0%の増加である。加えて、Q2 によって測定したドラム缶全体のウラン量 21.37t と比較すると 22.66t となり増加割合は 6.1%となった。また、変換による補正によって 10kg 以上のウラン量を含むドラム缶数の増加が認められた（図 8、図 9）。







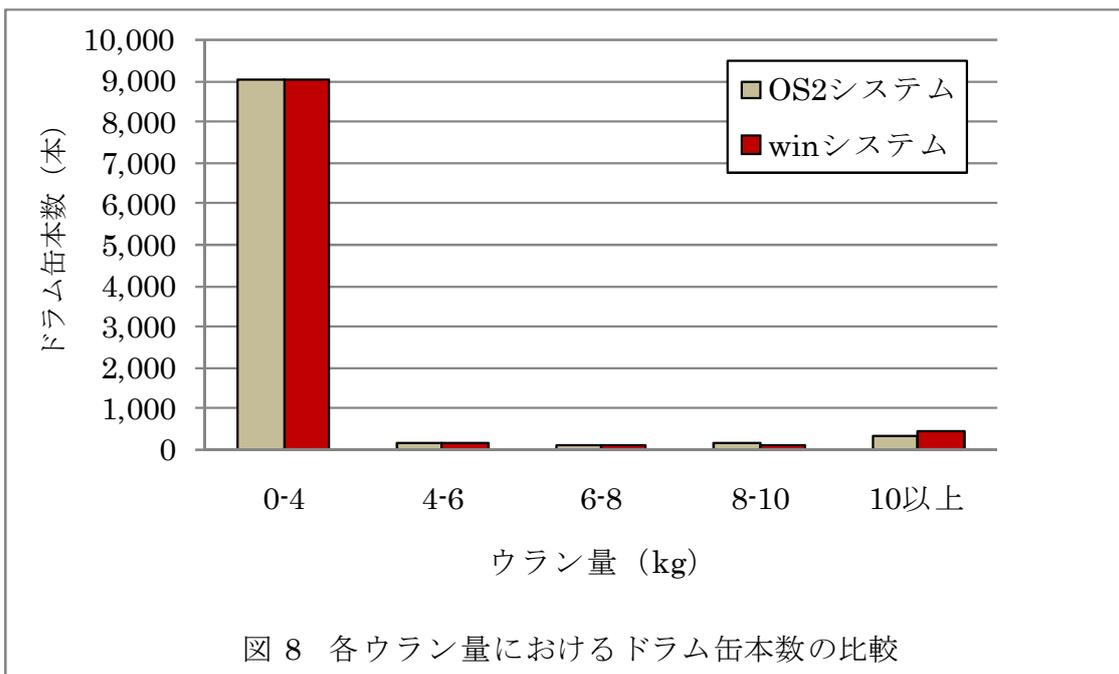


図 8 各ウラン量におけるドラム缶本数の比較

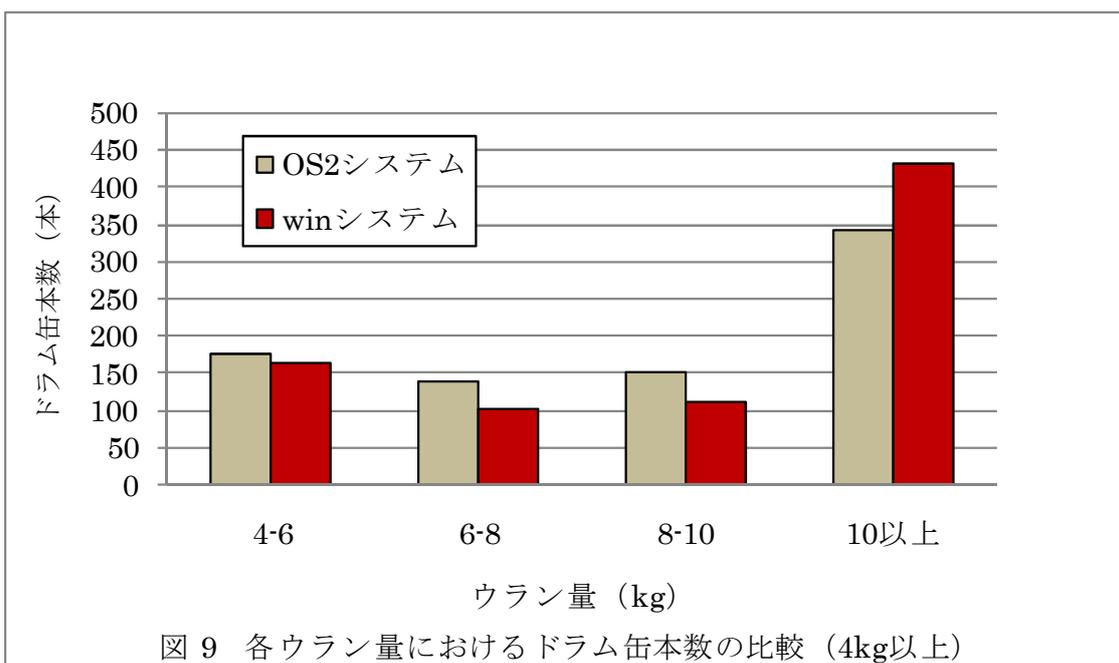


図 9 各ウラン量におけるドラム缶本数の比較 (4kg以上)

5.まとめ

平成 19 年に Q2 に用いられている解析システムを OS2 システムから win システムへと変更した。これに伴い波形解析ソフトや MCA も windows 対応へと刷新された。変更によって解析システムの性能は向上したが、OS2 と比較したウラン量の定量値に差異がみられた。

この点について OS2 システムと win システムのデータを解析し、両データから作成した変換式によるウラン量の補正を検討した。

その結果、OS2 による測定データのウラン量の集計である 9.991t に対して、win システムでは 11.29t となり 13%の増加となった。また、貯蔵庫（保管庫及び第 1 貯蔵庫～第 14 貯蔵庫）に保管されている Q2 によって測定された全廃棄物ドラム缶の総ウラン量に対しては 6%の増加となった。

今回検討したウラン量の補正值は、OS2 システムで測定されたドラム缶に関して win システムによる再測定の可否の判断材料の一つとなり、その後の廃棄物ドラム缶全体の保管の方向性への議論へ寄与するのではないかと考えられた。

以上

謝辞

このレポートを作成するにあたりご指導ご協力いただいた人形峠環境技術センターの岡田敏夫氏、横山薫氏に感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 小原義之、長沼政喜ほか：“ウラン廃棄物を対象とした非破壊測定装置の運用実績”、JAEA-Technology 2012-048, 2013, 39p.

This is a blank page.

国際単位系 (SI)

表1. SI基本単位

基本量	SI基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質の量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立法メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比体積	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 ^(a) , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率 ^(b)	(数字の)	1
比透磁率 ^(b)	(数字の)	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(c)	1 ^(b)	m ² /m ²
周波数	ヘルツ ^(d)	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m kg s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m ² kg s ⁻²
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ² kg ⁻¹ s ⁴ A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻²
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m ² kg ⁻¹ s ³ A ²
磁束	ウェーバ	Wb	Vs	m ² kg s ⁻² A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² kg s ⁻² A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光照射度	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd
放射線量	ルクス	lx	lm/m ²	m ⁻² cd
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	m ² s ⁻²
酸素活性	カタール	kat		s ⁻¹ mol

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
 (b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。
 (c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d) ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
 (f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
 (g) 単位シーベルト (PV.2002.70,205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI組立単位		
	名称	記号	SI基本単位による表し方
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
表面張力	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ = s ⁻¹
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² = s ⁻²
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比エネルギー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電荷密度	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電表面積	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
誘電率	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
透磁率	ファラド毎メートル	F/m	m ³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²
モルエネルギー	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
吸収線量率	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
放射線強度	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射輝度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ m ⁻² kg s ⁻³ = m ² kg s ⁻³
酵素活性濃度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² sr)	m ² m ⁻² kg s ⁻³ = kg s ⁻³
	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ³ s ⁻¹ mol

表5. SI接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ²⁴	ヨクト	y

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1 L=1 dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ kg

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI単位で表される数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1 MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322 Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1 nm=100 pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852 m
バイン	b	1 b=100 fm ² =(10 ¹² cm) ² =10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600) m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的関係は、 対数量の定義に依存。
ベレル	B	
デジベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI単位で表される数値
エル	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1 Pa s
ストークス	St	1 St=1 cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1 cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻²
フオト	ph	1 ph=1 cd sr cm ⁻² 10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1 cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1 Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe _e =(10 ³ /4π) A m ⁻¹

(c) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「△」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1 cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	f	1 フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1メートル系カラット=200 mg=2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カロリ	cal	1 cal=4.1858 J (「15°C」カロリ), 4.1868 J (「IT」カロリ), 4.184 J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ=1 μm=10 ⁻⁶ m

