技術報告

野菜（ズイキ）で作る自然放射能線源と教育利用の可能性

河野孝央^{*,†}, 安藤佳明^{**}, 泉 雄一^{**}

^{*}株式会社日本遮蔽技研

963-8041 福島県郡山市富田町字権現林11

^{**}株式会社日本環境調査研究所

342-0008 埼玉県吉川市旭8-3

[†] takao_kawano@nipponshaheigiken.com

2016年8月 4日 受付

2016年9月13日 受理

天然核種⁴⁰Kを含むズイキの葉柄部の皮をはぎ、乾燥、粉末化して、圧縮成形法を適用した。でき上がったディスク状ズイキ線源10個の重量、直径、厚さ、1分間計数（GMサーベイメータで主に⁴⁰K由来の β 線を測定）の平均値（標準偏差）は15.1(0.03) g, 9.98(0.1) mm, 35.2(0.01) mm, 163.4(10.5) cpmであった。また測定試験により、ズイキ線源は放射線防護の3原則と、放射線計数の統計的変動に関する測定実習に使用できることがわかった。

Key Words: taro stem, natural radioisotope, potassium-40, radiation source, radiation education

1. はじめに

中高生や一般の方々を対象にした放射線教育では、自然に存在する放射能と放射線を実感するための教材として、身の周りのいろいろな物質が利用される¹⁻⁴⁾。そのなかでも、天然の放射性核種⁵⁾である⁴⁰Kを含む乾燥昆布⁶⁻⁸⁾やインスタントコーヒー^{9, 10)}は、日常的に誰もが口にしたことのある飲食物であるため、身近で、分かりやすい教材といえる。

⁴⁰Kからは β 線（最大エネルギー 1.31 MeV, 89%）と γ 線（1.46 MeV, 11%）¹¹⁻¹⁴⁾が放出される。そのうち β 線は、GMサーベイメータで直接、測定することができる。そこで我々は最近の研究において、これらの飲食物を材料に自然放射能線源^{*, 15-19)}を製作し、放射線測定実習に使用できることを示した。なおこれらの実習

では、1回の測定における計数の積算時間を、1分間程度に抑えたいと考えている。1回の測定に1分以上の時間をかけると、結果が出るまでの待ち時間が実習を間延びさせ、受講者の集中力を損なう恐れがでてくるからである。しかしながら、たとえばインスタントコーヒーで作った線源の場合、わかりやすいグラフを描くための、十分な計数が、1分間測定では得られない。そのため、積算時間を数倍長くとるか、あるいは数人の測定データを加算して使用するなどの、工夫をしなければならなかった⁹⁾。

本研究では、こうした事情を背景に、1分間の測定でも、十分な計数が得られる自然放射能線源の材料を求めて、いろいろな飲食物を調べた^{20, 21)}。その結果、比較的多くのカリウムを含む野菜：芋茎を見いだすに至った。そこで芋茎の粉末に圧縮成形法¹⁵⁾を適用して、ディスク状の自然放射能線源を製作し、重量、形状（直径、厚さ）、1分間計数（3・2参照）を調べた。また教育用線源として、その実用性を評価するため、放射線防護の3原則^{22, 23)}や放射

*天然あるいは自然に存在する放射性同位元素⁵⁾を含む物質を材料に製作した放射線源の名称は、天然放射能線源または自然放射能線源がふさわしいと思われるが、本稿では自然放射能線源と呼ぶ。

線計数の統計的変動²⁴⁻²⁷⁾に関する測定試験を行った。

2. 芋茎とは

芋茎には、「はすいも」、「いもおじ」、「いもじ」、「ずい」、「といもがら」など、いろいろな呼び名があるが²⁸⁾、以後単に“ズイキ”と呼ぶ。ズイキは、色によって、赤ズイキ、白ズイキ、青ズイキの3種に分けられる²⁹⁾。本研究では、白ズイキを自然放射能線源の材料に使用した。白ズイキは、味噌汁や吸い物、酢の物など、いろいろな料理の食材に使用される。ためにスキヤキにいれて食したところ、セロリに蒟蒻の弾力が備わったような歯ごたえで、味に癖はなく、普通に食べることができた。

入手した“白ズイキ”をFig. 1に示す。これは、高知県産である³⁰⁾。30cm程度にカットされているため、もとの長さを直接測定する事はできなかったが、おそらく、1m程度はあると思われる。また太さは2~7cm程度であった。

この白ズイキを約50本、入手した。全重量は14.0kgであった。入手後まず、見た目で細いズイキと太いズイキに分けた。前者は葉に近い葉柄の部分であり、また後者は根に近い葉柄の部分であるが、さらに皮をむいて、皮の部分、皮をむいた細い葉柄と太い葉柄の部分の3部位に分け、線源材料に使用した。以後、この3部位を、EP部 (Epidermal part of stem)、UP部 (Upper part of stem)、LP部 (Lower part of stem)と呼ぶ。

Fig. 1 White Zuiki used as raw materials of natural radiation sources (Color online).

3. ズイキを材料に製作した自然放射能線源

3.1 圧縮成形法によるズイキ線源の製作

圧縮成形法を適用して自然放射能線源を製作するためには、材料を粉末にする必要がある¹⁵⁾。しかしながら入手したズイキは、水分を多く含む生の野菜である。そのため、3部位に分けたズイキを天日で乾燥させ^{**}、ハサミで刻み、ミキサー (TOSHIBA MX-932G)、乳鉢 (アズワン MMPS-T1)、挽き臼 (National EU6820) にかけて、粉末にした。なおズイキの乾燥には約1週間を要したが、14kgあった初期全重量は、その約2%にあたる280gに減少した。このことは、ズイキの98%は水分であり、乾燥することによって、カリウム濃度が50倍に濃縮されたことを意味する。

こうしてできあがったEP部、UP部、LP部の粉末から、それぞれ約15gをとりだし、円筒型枠 (内径35mm、高さ40mm、ステンレス製) に入れ、圧縮器にかけて、ディスク状に固形化した。これがズイキを材料に圧縮成形法で製作した自然放射能線源である (Fig. 2)。なお3種の自然放射能線源を、もとの材料の違いにより、EPズイキ線源、UPズイキ線源、LPズイキ線源と呼び、3者を総称してズイキ線源という。こうして製作したEP、UP、LPズイキ線源は、それぞれ4、4、6個、合計14個であった。

3.2 ズイキ線源のでき上がり状態

ズイキ線源14個のでき上がり状態を評価するため、重量、直径、厚さを調べた。またズイキ線源をGMサーベイメータ (ALOKA TGS-146) のプローブ表面中心に密着させた状態で、10分間の積算測定を5回行い、その平均値を10で割って1分間の計数率 (cpm) を求めた。以後、この計数率のことを1分間計数といい、線源強度の評価に使用する。なおズイキ線

^{**}乾燥ズイキも市販されているため、部位の区別をせずに使用するならば、この乾燥処理を省略することができる。

源の測定前後と途中に合計11回、線源を取り外した状態で10分間の積算測定を行い、バックグラウンドの1分間計数を求めた。その結果の平均値と標準偏差は 47.3 ± 3.1 cpm (主として宇宙線起源の γ 線や測定器構造物由来)であった。なお線源強度として測定したズイキ線源の1分間計数には、このバックグラウンド放射線が含まれる。

結果をFig. 3に示す。Fig. 3の横軸において、1から4はEPズイキ線源、5から8はUPズイキ線源、9から14はLPズイキ線源である。また縦軸は、左側の主軸が重量(g)、直径(mm)、厚さ(mm)であり、右側の副軸は1分間計数を表す。なおFig. 3に示した水平の実線は、それぞれの平均値である。

Fig. 3で重量と直径の結果を見ると、14個のズイキ線源はほとんど同じで、プロットした Δ と $\square$ 印はすべて、それぞれの平均値を表す実線にある。しかしながら厚さ($\square$ 印)の場合、EPズイキ線源は、UP及びLPズイキ線源に比べて、分厚く見える。実際、UPズイキ線源4個とLPズイキ線源6個の平均値と標準偏差は、両者とも 10.0 ± 0.1 mmであるのに対し、EPズイキ線源4個は 11.9 ± 0.2 mmであった。この差は16%程度であるが、圧縮してでき上がったディスク状固体のしまり(圧縮)具合の違いにより、生じたものと考えられる。

またFig. 3において、GMサーベイメータによる1分間計数で線源強度を比較すると、LPズイキ線源がもっとも強く、UPそしてEPズイキ

Fig. 2 Zuiki radiation sources fabricated from three different parts (Color online).

Fig. 3 Characteristics of Zuiki radiation sources fabricated from three different parts (All 1 minute counts include back ground counts: 47.3 ± 3.1 cpm).

線源の順になっている。またそれらの平均値と標準偏差は、EPズイキ線源（4個）: 103.8 ± 5.6 cpm, UPズイキ線源（4個）: 157.4 ± 6.9 cpm, LPズイキ線源（6個）: 170.7 ± 9.3 cpmであった。したがって、標準偏差の重なりから、UPズイキ線源とLPズイキ線源の間に有意な差があるとはいえない。しかしながらUP及びLPズイキ線源の線源強度は、標準偏差を考慮しても、EPズイキ線源より1.5倍程度、強いといえる。バックグラウンド計数（47.3 cpm）を差し引いた正味計数で比較するならば、2倍程度の違いになる。この差は、線源の厚みによる吸収を考えても有意であり、単位質量あたりの ^{40}K 含有量は、葉柄の皮を除く部分（UP, LP）が皮の部分（EP）よりも、多いことがわかる。これは後の γ 線スペクトル解析結果とも一致していた。

しかしながら、皮をむいたUP部とLP部を混合して材料にするならば、ほぼ同じ形状、同じ線源強度のズイキ線源を作ることができる。なおUP部とLP部で製作した自然放射能線源10個の重量、直径、厚さ、1分間計数の平均値と標準偏差は、それぞれ、 15.1 ± 0.03 g, 9.98 ± 0.1 mm, 35.2 ± 0.01 mmそして 163.4 ± 10.5 cpmであった。

3.3 γ 線スペクトル測定

Fig. 3に示したように、3種のズイキ線源からは、バックグラウンド計数とは明らかに区別できる強度の1分間計数が測定された。その放射線の発生源である核種を同定するため、ゲルマニウム検出器（ORTEC-GMX20-S, EG&G MCA7600）による γ 線スペクトル測定を行った。結果をFig. 4に示す。Fig. 4で(A)はバックグラウンド、(B), (C), (D)はそれぞれEP, UP, LPズイキ線源のスペクトルである。なお、横軸は γ 線のエネルギー（keV）、縦軸は10000秒測定で得られた各エネルギーチャンネルの γ 線計数を表す。

Fig. 4において、(A)バックグラウンドのス

Fig. 4 γ ray spectra of Zuiki radiation sources measured by a Ge detector system (All counting times were 10000 s).

ペクトルでは、宇宙線に起因する陽電子消滅 γ 線（511 keV）のピークがみられる。これに対し(B), (C), (D)のスペクトルでは、511 keVのほかに、 ^{40}K から放出される1461 keVの γ 線ピークが観測される。これらのスペクトルにより、3種のズイキ線源に含まれる γ 線核種は ^{40}K のみであることがわかる。また1461 keVのピーク面積から ^{40}K の放射能を求めたところ、EP, UP, LPズイキ線源それぞれ、 2.3 ± 0.1 Bq/g, 5.2 ± 0.2 Bq/g, 5.4 ± 0.2 Bq/gであった。したがってUP及びLPズイキ線源に含まれる ^{40}K の量はほぼ同じであり、EPズイキ線源はその1/2程度であることがわかる。以上の結果は、線源材料としてズイキを使用する場合、UP部とLP部を区別しなくてもよいことを示す。これらは、Fig. 3に示した線源強度の結果を再現している。また、ズイキから皮の部分を除いて材料にするならば、乾燥ズイキ15gで製作したズイキ線源は、75 Bq程度の ^{40}K を含む自然放射能線源になるといえる。

4. 放射線測定実習への応用

ズイキ線源が, 実際に放射線測定実習に使用できるかどうかを評価するため, 線源強度のもっとも強かったLPズイキ線源を用いて, 放射線防護の3原則と放射線計数の統計的変動に関する測定試験を行った。なおこの測定試験は, 放射線測定実習を模擬している。

4・1 放射線防護の3原則を理解するための測定試験

3章で製作したLPズイキ線源とGMサーベイメータを用いて, 積算計数の時間依存性, 及び1分間計数の距離と遮蔽依存性に関する測定試験を行った。なお, この試験で測定する積算計数や1分間計数は, 放射線防護の3原則における外部被ばく線量(率)に対応する。また, ここでの1分間計数は, 積算時間を1分に設定した測定(1分間測定)による計数であって, 3・

2 (Fig. 3) における, 10分間の積算測定を5回行って, その平均値から求めた1分間計数とは異なる。

4・1・1 積算計数の時間依存性試験

積算計数の時間依存性試験の様子をFig. 5の(A)と(B)に示す。(A)はLPズイキ線源を線源スタンドに取り付けたところであり, (B)は線源スタンドに取り付けたLPズイキ線源を, GMプローブの表面中心に密着させて, 測定しているところである。この測定では, 測定開始後1分ごとに10分間, そのときまでの積算計数を読み取って記録した。5回繰り返した測定結果を, Fig. 6の(A)に示す。Fig. 6の(A)において, 横軸は測定開始後の経過時間 (=計数の積算時間), 縦軸は積算計数である。なお, この積算計数には, バックグラウンド放射線が含まれる。Fig. 6の(A)で実線 (Calculation) は5回の平均値を近似する直線 ($Y=179X$, X : 経過時間, Y : 積算計数) であり, 経過時間と積算計

Fig. 5 Measurement setup of LP Zuiki radiation sources and GM survey meters (Color online).

数が比例関係にあることを示している。また5回行った測定結果のプロットをそれぞれ個別に見ても、経過時間と積算計数の比例関係を読み取ることができる。この結果により、被ばく線量を低減するためには、線源の取扱い時間を短くすればよいことが、容易にわかる。

4・1・2 1分間計数の距離依存性試験

1分間計数の距離依存性試験では、Fig. 5の(C)に示すように、GMプローブとLPズイキ線源との内側距離を0, 1, 2…30cmにとって、それぞれの位置で1分間測定を行った。この測定を5回繰り返して、Fig. 6の(B)を得た。Fig. 6の(B)において横軸は距離、縦軸はバックグラウンドを含む1分間計数である。なお横軸で0cmは、LPズイキ線源をGMプローブ表面に密着させた状態を意味する。Fig. 6の(B)で、プロットしたデータを全体的に見ると、1分間計数は、0から5cm程度まで、距離の増加にしたがって急に減少し、その後、この減少は、緩やかになることがわかる。Fig. 6の(B)で実線(Calculation)は、測定5回の平均値を近似する曲線であるが、距離と1分間計数の関係が逆二乗関数：

$$Y = A / (a + X)^2 + BKG \quad (1)$$

X : 距離 (cm),

Y : 1分間計数 (計数率cpm),

$A=900$ (定数),

a : GMプローブ表面から感度中心までの深さ (=2.3cm),

BKG : バックグラウンドの1分間計数 (計数率: 49cpm)

で表されることを示している。これは放射線防護の3原則のひとつである「逆二乗の法則」を説明する。また、5回行った測定結果のプロットを個別に見ても、それぞれに、逆二乗の法則を読みとることができる。これらの結果から、被ばく線量低減に対する距離の効果は、線源に近い位置ほど、大きいことがわかる。なおFig. 6(B)の結果は、 ^{40}K から放出される β 線が、約

Fig. 6 Results of three dependence tests with Zuiki radiation sources.

10cm程度の距離で、逆二乗の法則に従ってほぼ減衰し、なお残っている計数は、線源からの γ 線や宇宙線起源の γ 線によることを示している。

4・1・3 1分間計数の遮蔽依存性試験

1分間計数の遮蔽依存性試験では、Fig. 5の

(D)に示すように, LPズイキ線源とGMプローブの内側距離を10mmに固定し, その間に遮蔽体を挿入して, バックグラウンドを含む1分間測定を行った。なお用いた遮蔽体は, ケント紙 (KOKUYO, セ-KP39, 厚さ: 0.25 mm, 密度: 0.93 g/cm^3) を最大32枚8mmまで重ねて作ったものである。1分間の測定ごとに, 0 (遮蔽なし) から厚さ8mmまでの遮蔽体を順次, 取り替えながら, 一連の測定を5回繰り返した。結果をFig. 6の(C)に示す。横軸は遮蔽体の厚さ, 縦軸は1分間計数である。Fig. 6の(C)でデータを全体的に見ると, 1分間計数は, 遮蔽体の厚さが0から3mm程度まで大きく減少し, それ以上の厚さで, この減少は, 徐々に弱まることからわかる。また実線 (Calculation) は測定5回の平均値を近似する曲線であるが, 遮蔽体の厚さと1分間計数との関係が, 指数関数:

$$Y = Ae^{-\alpha X} + BKG \quad (2)$$

X : 遮蔽体の厚さ (mm),

Y : 計数率 (cpm),

$A=100$ (定数),

α : β 線の線減弱係数 ($=0.9 \text{ mm}^{-1}$),

BKG : バックグラウンドの計数率 ($=47 \text{ cpm}$) で表されることを示している。また, 個々の測定データからも, 遮蔽厚と遮蔽効果は指数関数的な関係にあることがわかる。この結果により, 遮蔽の効果は, はじめ厚さに比例して大きく増加するが, ある厚さを超えると小さくなるため, 適切な遮蔽厚があるといえる。

なおFig. 6(C)の結果は, ^{40}K から放出される β 線が, ケント紙12枚 (3mm厚) 程度ではほぼ完全に吸収され, それ以上の厚さでは, 線源や宇宙線起源の γ 線が, 計数として残っていることを示している。

以上, 測定試験の結果により, ズイキ線源は, 放射線防護の3原則に関する放射線測定などの実習に使用できることがわかった。

4.2 計数の統計的変動を理解するための測定試験

最後の試験は, 放射線計数の変動が, ガウス分布曲線で表される統計的性質によることを知るための測定²⁴⁻²⁷⁾である。この試験では, 時間依存性試験と同じ条件 (Fig. 5の(B)) で, 1分間測定を50回繰り返し, 得られた1分間計数の頻度分布を調べた。結果をFig. 7に○印で示す。同様に, 積算時間を5分に設定した5分間測定を50回繰り返し, 得られた5分間計数を5で割って, 50件の1分間計数を求めた。その頻度分布をFig. 7に◇印で示す。なお5分間の測定にもとづいて得られた1分間計数を以後, “1分間計数(5)” と表記する。

Fig. 7において1分間測定の場合, 横軸は1分間計数の区間を表す。その区間幅は20cpmである。縦軸は頻度であるが, 20cpmの区間幅内に得られた1分間計数の件数を表す。たとえば, $X=190 \text{ cpm}$ に対応する頻度 Y とは, 1分間計数が170~190cpmの間にあった測定結果の件数である。なお1分間測定で頻度がもっとも多い区間は170~190cpmで, 23件であった。また1分間計数50件の平均値と標準偏差は $188.1 \pm 17.9 \text{ cpm}$ であった。これらの数値を(3)式に代入してガウス分布曲線を求めた²⁴⁻²⁷⁾。

$$p(n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \exp\left(-\frac{(n-m)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3)$$

(3)式において, 右辺に含まれる n は1分間計数, m はその平均値 (188.1cpm), σ は標準

Fig. 7 Frequency distribution of 1- and 5-minute counts and Gaussian curves.

偏差 (17.9cpm) である。また左辺の $P(n)$ はガウス分布関数であるが、1分間計数 n が得られる確率を表す。なお(3)式は連続関数であり、1に規格化されているため、 $P(n)$ の値は、Fig. 7で頻度を表す数値に比べて非常に小さい。そこでガウス分布曲線のピークの高さが、Fig. 7の○印の頻度分布と同程度になるよう、正の数値(1000)をかけて拡大した。Fig. 7において(a)の点線がその結果である。1分間計数50件の頻度分布は、この曲線の周りにあることがわかる。したがってFig. 7に示した1分間計数のばらつきは、Fig. 7のガウス分布曲線(a)で表される計数の統計的変動に従っていることが理解される。

また、Fig. 7の1分間計数(5)の頻度分布(◇印)において、横軸の区間幅は10cpmであり、縦軸はその区間幅内の計数が得られた頻度である。1分間計数(5)の頻度は、180~190cpm間の29件が最も多く、50件の平均値と標準偏差は 185.4 ± 6.5 cpmであった。1分間測定の場合と同様に、この平均値と標準偏差を(3)式に代入してガウス分布曲線を求め、正の数値(500)をかけて拡大した。この拡大率は、1分間計数の場合(a)の1/2であるが、測定時間を5倍にとったことにより、ガウス分布曲線の広がり狭くなり、ピークの高さがほぼ2倍になったことを意味する。Fig. 7で(b)の曲線がその結果である。測定で得られた50件の1分間計数(5)の頻度分布(◇印)は、この曲線の周りにあることがわかる。したがってFig. 7に◇印で示した1分間計数(5)のばらつきは、(b)のガウス分布曲線で表される統計的変動に従っているといえる。

ここで、1分間計数(○印)と1分間計数(5)(◇印)を比較すると、50件の平均値はほとんど同じだが、1分間計数(5)の標準偏差は、1分間計数の2.78分の1であることがわかる。この値は積算時間の違い“5”倍の平方根に近い。この結果は、放射線計数の頻度分布がガウス分布曲線で表され、そのばらつきは積算時間の平

方根に反比例して、狭くなることを意味している。

5. まとめ

白ズイキを皮の部分、葉に近い葉柄の細い部分、根に近い葉柄の太い部分の3部位に分け、乾燥、粉末化したあと、圧縮成形法を適用して自然放射能線源(ズイキ線源)を製作した。その結果、皮をむいた葉柄の細い部分と太い部分で製作した線源は、皮の部分を材料に製作した線源の2倍程度の放射線強度(1分間計数)を示し、材料として皮の部分を除くならば、ほとんど同じ形状、同じ線源強度(~ 75 Bq/1個(15g))のズイキ線源を製作することがわかった。また、これらのズイキ線源の γ 線スペクトルを調べ、放射線は、ズイキに含まれる ^{40}K から放出されていることを確認した。

さらに、太い葉柄の部分で製作したズイキ線源を用いて、放射線防護の3原則や放射線計数の統計的変動を理解するための測定試験を行った。その結果、時間と線量の比例関係や、距離の逆二乗の法則、そして遮蔽厚と遮蔽効果の指数関数的な関係を説明するデータが得られた。また、積算時間1分と5分で、それぞれ50回の繰り返し測定を行い、得られた1分間計数の頻度分布を調べた。その結果、計数のばらつきは、ガウス分布曲線で表され、そのピーク幅は積算時間の平方根に反比例して狭くなることがわかった。

ズイキという野菜は、これまで、天然起源の放射性核種 ^{40}K を含む身の周りの物質として、注目されることは、あまりなかったと思われる。しかしながら、乾燥したズイキに含まれる ^{40}K の量は、乾燥昆布や乾し椎茸などに比べて2~7倍程度多く、そのため非常に有望な放射線教育の教材であり、自然放射能線源の材料であるといえる。なお、乾燥したズイキで製作した自然放射能線源(ズイキ線源)には、5Bq/g程度の ^{40}K が含まれるが、法の規制(^{40}K の規

制値: 100Bq/g)³¹⁾ を受けるほどではなく, したがって, 今後, いろいろな放射線教育の現場で, 自然の⁴⁰Kを含む野菜の代表例としてズイキが紹介され, またズイキ線源が, 放射線測定実習などで, 広く利用されることを期待している。

なお, これまでの放射線教育では, 身の回りに存在する天然放射能や自然の放射線を説明するため, 塩化カリウムや化学肥料を用いて, デモンストレーションの測定が行われてきた。しかしながら, ズイキなどの野菜に代表される自然食材にも放射能が含まれ, 放射線が出ている事を, 測定実験により体験し, 認識することは, 塩化カリウムや化学肥料の場合以上に, 天然放射能や自然放射線に対する受講者の興味を引き, 効果的な放射線教育につながると考えられる。

文 献

- 1) Eisenbud, M. and Gesell, T., Environmental Radioactivity, 4th ed., Chap 6, Academic Press (1997)
- 2) Martin, J. E., Physics for Radiation Protection, 2nd ed, Chapter, 6, pp. 255–303, Wiley-VCH, Weinheim (2006)
- 3) 鎌田正弘, 江坂享男, 中村麻利子, 天然放射能を教材とした学生実験の実施例, 化学と教育, **44**, 339–340 (1996)
- 4) 鎌田正裕, 渡部千春, 天然放射能を用いた放射化学実験法 (IX), 化学と教育, **48**, 524–527 (2000)
- 5) 日本放射化学会編, 放射化学の事典, pp. 29–30, 朝倉書店, 東京 (2015)
- 6) Kawano, T., Radiation sources fabricated from kelp powder for educational purposes, *Radiation Safety Management*, **8**, 1–7 (2009)
- 7) 河野孝央, 自然放射能線源—昆布ふりかけの場合— NIFS NEWS, 研究最前線, ISSN 1844-1600, 192, pp. 2–3 (2010)
- 8) 河野孝央, 乾燥昆布18種の自然放射能線源材料としての比較評価, *RADIOISOTOPES*, **64**, 123–131 (2015)
- 9) 河野孝央, 安藤佳明, 泉 雄一, 市販のインスタントコーヒーで作る自然放射能線源, *RADIOISOTOPES*, **64**, 621–630 (2015)
- 10) 河野孝央, 安藤佳明, 泉 雄一, 10種のインスタントコーヒーで作るコーヒープロック線源の比較評価, *RADIOISOTOPES*, **64**, 737–744 (2015)
- 11) McGraw-Hill, McGraw-Hill Encyclopedia of Science & Technology 14, 8th ed., pp. 254–256, McGraw-Hill, New York (1977)
- 12) Lederer, C. M. and Virginia Shirlley, S., Table of Isotopes, pp. 90–94, John Wiley & Sons, New York (1978)
- 13) 馬淵久夫編, 元素の事典, pp. 74–77, 朝倉書店, 東京 (1994)
- 14) 日本アイソトープ協会編, アイソトープ手帳10版, 机上版, 22, 丸善, 東京 (2002)
- 15) Kawano, T., Potassium chloride radiation sources fabricated by compressing and forming method, *Radiation Safety Management*, **5**, 5–11 (2006)
- 16) 河野孝央, 化学肥料を材料に製作した教育用ディスク状線源, *RADIOISOTOPES*, **57**, 703–708 (2008)
- 17) Kawano, T., Disk shaped radiation sources fabricated by compression and formation of sinter powder, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **5**(Supplement), 752–755 (2008)
- 18) 河野孝央, カリウム含有化学肥料で製作した自然放射能線源と放射線教育への応用, 日本放射線安全管理学会誌, **9**, 133–140 (2010)
- 19) 河野孝央, 化学肥料で作った教育用放射線源 (自然放射能線源), 健康文化, **46**, 85–89 (2011)
- 20) 香川芳子, 四訂食品成分表2000, 女子栄養大学出版部, 東京 (2000)
- 21) 香川芳子, 五訂食品成分表2010, 女子栄養大学出版部, 東京 (2009)
- 22) 柴田徳思編, 放射線概論, pp.472–474, 通商産業研究社, 東京 (2012)
- 23) Alan, M. and Sam, H., An Introduction to Radiation Protection, 5th, ed., pp. 64–68, Hodder Arnold London (2006)
- 24) プライス, 西野 治監修, 関口 晃訳, 放射線計測第13版, pp. 58–65, コロナ社, 東京 (1966)
- 25) G. F. Knoll, 木村逸郎, 阪井英次訳, 放射線計測ハンドブック第3版, pp. 75–97, 日刊工業新聞社, 東京 (2001)
- 26) Martin, J. E., Physics for Radiation Protection, pp. 591–599, Wiley-VCH, Weinheim (2006)
- 27) 河野孝央, 自然放射能線源を用いて行う放射線計数の統計的変動を理解するための測定実習, *RADIOISOTOPES*, **63**, 345–354 (2014)
- 28) <https://ja.wikipedia.org/wiki/「苺茎」を検索>
- 29) http://www.karusyoku.com/shun/shun_11_09.html
- 30) http://blogs.yahoo.co.jp/mu_tu_ren/61536022.html
- 31) 日本アイソトープ協会, 2012年度アイソトープ

ブ法令集 放射線障害防止法関係法令I, 247, 丸善, 東京 (2012)

Abstract

Natural Radiation Sources Fabricated from the Zuiki Taro Plant and Potential for Educational Use

Takao KAWANO*, †, Yoshiaki ANDO** and Yuuichi IZUMI**.

*Japan Shield Technical Research Co., Ltd., 11 Gongen-bayashi, Tomita, Koriyama, Fukushima Pref. 963-8041, Japan, **Japan Environment Research Co., Ltd., 8-3 Asahi, Yoshikawa, Saitama Pref. 342-0008, Japan

"Zuiki" is the stem of a taro plant containing natural radioactive potassium-40. Several zuiki stems were peeled, dried, and micronized; then, the compression and formation method was used to make ten disk-shaped sources.

These sources were measured as to their weight, thickness, diameter, and radiation count (using a GM-survey meter). The counted radiation was mainly attributed to β -rays from ^{40}K . The averages (SD's) of the weight, thickness, diameter, and radiation count were 15.1(0.03) g, 9.98(0.1) mm, 35.2(0.01) mm and 163.4(10.5) cpm, respectively. The usability of the sources for educational purposes was examined in three tests on the dependence of the radiation count versus time, distance, and shielding. Furthermore, the statistical fluctuation of the radiation counts was examined by making 50 measurements. It was concluded that the zuiki radiation sources were useful for demonstrating the three principles of radiation protection and the statistical fluctuation of radiation counts.

(Received August 4, 2016)

(Accepted September 13, 2016)