土壤中のウランの野菜への移行に関する実験的考察

森嶋彌重, 古賀妙子, 河合 廣, 本田嘉秀*, 桂山幸典**

近畿大学原子力研究所, *近畿大学理工学部原子炉工学科

東大阪市小若江3-4-1

**京都大学原子炉実験所

大阪府泉南郡熊取町

1976年 7月15日 受理

奈良県室生地区で採取した高ウラン土壌を用い、ポット法によって温室内で野菜を栽培して土壌中のウランの野菜への移行、分布を検討した。

1) ハツカダイコンにおける部位別のウランの生物学的吸収比は子葉、上位葉において、もっとも高かったが植物に必須の栄養素である土壌中の窒素、リン、カリウムなどの存在量によって影響を受け、欠乏肥料区において収穫したハツカダイコンのウランの生物学的吸収比は三要素区に比較して高かった。また植物体内のウランの分布はその部位の灰分重量の割合に、ほぼ比例していた。ピーマン、きゅうりのウラン分布についても同様であった。

2) ハツカダイコンにおいては、植物の生長に伴い葉部のウラン濃度はむしろ増加し、根部においては減少の傾向が見られた。

3) ハツカダイコンの葉部のウラン濃度と栽培土壌中のウラン濃度との間には正の相関が見られた。

1. はじめに

原子力産業の発展に伴い、大量のウランの使用が必至となってきた現在、原子力発電所、ウラン鉱山および核燃料再処理工場等からの核燃料廃棄物の環境への放出が問題となる。わが国においても、ウラン鉱山に近い地区においてウランによる河川水の汚染が報告されており^{1),2)}、これらの河川水をかんがい用水として利用したとき植物へのウランの蓄積が関心事となる。従来、土壌—植物—動物—人などの陸圏および水圏における自然の生物学的連鎖におけるウランの挙動に関する研究^{3),4)} および植物によってはウランを選択的に摂取することが知られウランの需要を満足するウラン鉱を探索する目的からもウランの環境中における挙動に関する研究⁵⁾が行われてきた。また山本ら⁶⁾は岡山県人形峠付近の吉井川流域の土壌を用いて硝酸ウラニルなどを添加した実験系およびウランを含む水耕栽培法によって白菜へのウランの吸収に関する研究を行った。今回われわれは環境におけるウランの移行と分布に関する研究の一環として奈良県室生地区で採取した自然の高ウラン土壌を用いて植物への土壌中のウランの移行と分布を実験的に検討した。農作物中のウラン分布について調査した結果⁷⁾、葉菜、根菜が他の農作物に比較してウランレベルが高かったことおよび短期間に生育、収穫が可能で栽培が簡単であることなどの

理由からハツカダイコンを供試植物として選択した。

2. 材料および方法

2.1 材 料

1) 土 壤

高ウラン土壌は奈良県室生村で採取し、対照土壌には近畿大学原子力研究所構内の土壌を使用した。その土性はともに砂質土壌で、その化学的諸特性⁷⁾はそれぞれ pH 4.8および pH 6.9 (水懸濁液, 1:2.5)、灼熱減量 81 mg/乾土 g および 48 mg/乾土 g、塩基性交換容量 9.6 meq/乾土 100 g および 7.9 meq/乾土 100 g であった。また 0.2N クエン酸溶液による土壌中のウランの溶出率はそれぞれ 8 % および 14 % であった。

2) 野 菜

ハツカダイコンは赤丸ハツカダイコン「サクサ」輸入種を、ピーマン、きゅうり(「ひかり」)は大和農園製の苗を用いた。

2.2 方 法

1) 栽培法

Fig. 1 に示した塩化ビニール製ポットに水酸化カルシウムであらかじめ pH を約 7 に調整し、元肥として塩化カリウム、尿素を各 10 g および過リン酸石灰 5 g を添加し、一様に混合した高ウラン土壌 (16 メッシュ以下) 30 kg を有孔板および礫 20 kg の上に入れた。ハ

Fig. 1 Schematic view of experimental pot.

ツカダイコンについてはつぎの各系について栽培を行った。すなわち肥料の三大要素である窒素、カリウムおよびリン酸を与えた三要素区、三要素のいずれかの要素の欠乏した肥料区(3系)、いずれかの要素の倍量を添加した三要素区(3系)、無肥料区および対照土壌の三要素区について、また室生土壌30 kgに硝酸ウラン、 $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (ウランとして3 g)(関東化学製試薬特級)を添加した三要素区についても栽培を

行った。灌水は2日に1回2 lずつを行い、栽培期間は約2週間から6週間とし、きゅうり、ピーマンについては約3か月間温室内で栽培を行った。ハツカダイコンについては1973年より3年間にわたって、年2〜3回行った。

2) ウランの分析⁷⁾

野菜については収穫後、根、茎葉(ハツカダイコンについては子葉、上位葉、下位葉)、果実などの部位にそれぞれ分け、450°C以下で灰化後塩酸抽出し、土壌については風乾細土1 gを硝酸-フッ化水素酸混液(3:10)処理後⁸⁾、陰イオン交換法によりウランを単離し、アルファ放射能測定法により定量した。

3. 結果と考察

3.1 ハツカダイコンにおけるウランの分布について

室生地区で採取した高ウラン土壌を用いて実験的に栽培したハツカダイコンについて葉部(子葉、上位葉、下位葉)および根部に分けて、ウランの生物学的吸収比およびウランの分布をTable 1に示した。子葉は収穫時にはほとんど枯れた状態にあり、下位葉および上

Table 1 Distribution of uranium in radish (Cultivation period: 30 days)

Experimental system	Part	Fresh weight (g)	Uranium contents ($\mu\text{g/g}$ ash)	Uranium B.A.R. ($\times 10^{-2}$)*	Uranium distribution (%)	Ash weight (%)
Three elements fertilizer (N, P, K)	Cotyledon	16.6	2.67	2.55	17.5	10.9
	Upper leaves	52.0	1.72	1.70	30.6	28.1
	Lower leaves	72.0	1.25	1.22	21.6	26.7
	Roots	102.0	1.38	1.33	30.3	34.3
Doubled P fertilizer (N, 2P, K)	Cotyledon	1.3	5.21	5.80	28.2	7.6
	Upper leaves	8.0	1.74	1.93	26.4	30.2
	Lower leaves	7.0	0.88	0.99	14.4	28.3
	Roots	12.9	1.48	1.65	31.0	33.9
K deficient fertilizer (N, P, -K)	Cotyledon	21.0	3.02	5.50	15.5	12.2
	Upper leaves	41.6	2.98	5.40	33.7	27.0
	Lower leaves	58.6	2.02	3.70	34.8	40.9
	Roots	42.0	1.91	3.50	16.0	19.9
P deficient fertilizer (N, -P, K)	Cotyledon	1.9	30.8	21.8	46.7	37.0
	Leaves	2.8	21.0	14.7	35.8	43.0
	Roots	2.3	7.52	8.40	17.5	20.0
N deficient fertilizer (-N, P, K)	Cotyledon	0.78	7.18	5.20	25.8	21.0
	Leaves	2.2	2.22	1.94	17.7	50.8
	Roots	3.0	13.8	14.0	56.6	28.2

* Biological absorption ratio = $\frac{\text{Uranium contents in vegetables } (\mu\text{g/g ash})}{\text{Uranium contents in soil } (\mu\text{g/g soil})}$

位葉はそれぞれ、子葉のつぎに出る3枚の葉およびその後には生育する幼葉とした。これらの結果によると各部のウランの生物学的吸収比〔植物各部におけるウラン濃度($\mu\text{g}/\text{灰分 g}$)/栽培土壤中のウラン濃度($\mu\text{g}/\text{乾土 g}$)〕は無窒素肥料区において根部が高く上位葉、子葉が続くが、他の系においては子葉、上位葉、下位葉、根の順に低くなった。子葉をのぞく葉部について上位葉、下位葉それぞれのウラン濃度を比較すると、いずれの系においても上位葉が若干高く、B.S. Prister⁴⁾により、生長をしている組織中のウラン濃度は高いという報告と一致している。成熟した下位葉においては光合成が活発に行われており、その生成した炭水化物などを上位葉および根部に養分として送り、生長を促進している⁹⁾。Table 1 に示した結果によると収穫したハツカダイコンに吸収されたウランの分布は灰分重量の割合にはほぼ一致しているが、無窒素区においては葉部におけるウランの分布は少なく、根部へのウランの分布が高くなっている。三要素区におけるハツカダイコン中のウランの分布は根部および葉部について30.3%および69.7%であった。カリウム、リン酸は細胞の核タンパクや貯蔵養分を作るのに必要な要素で、欠乏すると根の生育が悪くなるが、無カリ区および無リン酸区については収穫されたハツカダイコンの根部の灰分重量の割合が三要素区に比較して小さく、これに比例して根部へのウランの分布も三要素区の約半分となり、葉部への分布が増加した。

H.L. Cannon ら⁹⁾によると植物中でのウランの分布は根部に高いと報告しているが、他に種々な植物および放射性核種について実験を行った植物体内分布の報告^{10)~13)}が広くなされている。今回ハツカダイコンへのウランの分布についてはポット実験における三要素区において葉部が高かったが、栽培土壤中の植物に必要な栄養元素の存在、すなわち肥料成分としての窒素、カリウムおよびリン酸の濃度が植物中に吸収されたウランの分布に影響を与えと思われる。

3.2 植物の生長に伴うウランの吸収について

ハツカダイコンを播種後約2週間目、4週間目および6週間目と3回に分けて収穫し、植物の生長にともなう葉部および根部のウランの生物学的吸収比の変化をFig. 2に示した。栽培期間が長くなるにつれてハツカダイコンの葉部におけるウラン濃度は幾分大きくなる傾向にあり、また根部については減少の傾向にあった。山本ら⁸⁾によると火山灰土、砂質土および沖積土について栽培した白菜の葉におけるウラン濃度は生長

Fig. 2 Variation of uranium absorption in cultivation period of radish.

につれて指数関数的に減少すると報告している。高ウラン土壤に6週間栽培した場合ハツカダイコンは根部のほうが葉部より成長が大きくその生物学的希釈も大きいいため根部のウラン濃度は成長とともに減少し、葉部および根葉などの種類の差はあるが白菜の葉部についても同様であったと思われる。

3.3 施肥条件によるハツカダイコンへのウランの移行について

高ウラン土壤にハツカダイコンを栽培して各肥料系におけるウランの吸収に対する施肥条件の影響をTable 2に示した。栽培期間は約30日間、無肥料区を含む欠乏肥料区におけるハツカダイコンのウランの生物学的吸収比は三要素区で栽培した場合に比べて高く、無リン酸区の場合、三要素区の約7倍を示した。これは肥料要素が欠乏しているためハツカダイコンの生育が悪く、収穫量が少ないため灰分重量あたりのウラン濃度が高くなるのに対して三要素区においては生物学的希釈が生じていることが一因である。欠乏肥料区において実際に栽培ポットあたり収穫したハツカダイコンに移行したウラン量は収穫量が少ないにもかかわらず三要素区の1.5~3倍となっていることから欠乏肥料区で生育したハツカダイコン中のウランの生物学的吸収比は高くなったものと思われる。

3.4 土壤中のウラン濃度とハツカダイコンへのウランの移行について

対照土壤、高ウラン土壤および硝酸ウラニル添加土壤を用いて、三要素区で栽培したハツカダイコンのウラン濃度と土壤中の移動性のウラン濃度の関係をFig. 3に示した。B.S. Prister⁴⁾は1N硝酸溶液で2回抽出された量を、V.V. Kovalsky³⁾は0.2Nのクエン酸、酒石酸、シュウ酸および酢酸混合溶液で抽出される化合物を移動性のウランとしているが、著者らは0.2Nクエン酸により抽出されたウランを移動性のウランとした。

Table 2 Accumulation of uranium in radish (Cultivation period: 30 days)

Experimental system	Part	Number of sample	Fresh weight (g)	Mean of B.A.R. ($\times 10^{-2}$)		Uranium contents ($\mu\text{g}/\text{one pot}$)	
				Part	Whole	Part	Whole
Three elements fertilizer (N, P, K)	Leaves	13	460	1.94	2.24	2.49	4.31
	Roots		180	2.92		1.82	
Doubled K fertilizer (N, P, 2K)	Leaves	2	158	2.85	2.85	3.42	4.29
	Roots		101	2.95		0.87	
Doubled P fertilizer (N, 2P, K)	Leaves	3	16.2	2.02	1.97	3.22	5.39
	Roots		12.9	1.87		2.17	
Doubled N fertilizer (2N, P, K)	Leaves	2	87.5	1.30	1.62	1.06	1.99
	Roots		77.2	2.20		0.93	
K deficient fertilizer (N, P, -K)	Leaves	4	390	3.59	6.55	4.93	13.2
	Roots		107	18.4		8.31	
P deficient fertilizer (N, -P, K)	Leaves	7	80	12.2	14.8	4.64	9.58
	Roots		28	26.8		4.94	
N deficient fertilizer (-N, P, K)	Leaves	7	91	3.33	7.34	1.69	6.47
	Roots		116	16.0		4.78	
Non fertilizer	Leaves	1	60	15.6	49.9	0.83	3.50
	Roots		60	154		2.67

Fig. 3 Absorption of uranium by radish on different levels of uranium in soils.

Fig. 3によると硝酸ウラニルを添加した高ウラン土

壤に栽培したハツカダイコンのウラン濃度は高ウラン土壌に栽培したハツカダイコンに比べて土壌中のウランの量比以上に高かった。これは添加した硝酸ウラニル以外、土壌中の天然ウランの化学形態はわからないが移動性ウラン量比の違いによるのではないかと思われる。そこで化学形態は不明であるが同一種でウラン濃度の異なる室生で採取した高ウラン土壌について栽培したハツカダイコンの葉部のウラン量と土壌中の全ウラン量との関係を Fig. 4 に示した。これによるとハツカダイコンの葉部のウラン量と土壌中の全ウラン量との間に比較的良好な正の相関が見られた。

3.5 野菜の種類によるウランの吸収の相違について

三要素区において高ウラン土壌に3種の野菜、ハツカダイコン、きゅうり、ピーマンを栽培してそれぞれの野菜におけるウランの吸収、濃度および分布などを Table 3 に示した。きゅうり、ピーマンの栽培期間は3か月、ハツカダイコンは約30日について比較したがウランの吸収はピーマンが他の2種に比べて若干高か

Table 3 Distribution of uranium in some vegetables

Vegetable	Part	Fresh weight (g)	Ash weight (%)	U contents ($\mu\text{g/g ash}$)		B.A.R. ($\times 10^{-2}$)		Uranium distribution (%)
				Part	Whole	Part	Whole	
Cucumber	Leaves and stems	285	71.8	0.47	0.46	3.02	2.89	71.1
	Fruits	686	28.2	0.43		2.76		28.9
Radish	Leaves	460	67.8	1.89	2.05	1.94	2.24	62.3
	Roots	180	32.2	2.66		2.92		37.7
Pimiento	Leaves and stems	750	84.9	0.88	0.83	5.21	4.24	82.5
	Fruits	199	15.1	0.55		3.26		17.5

Fig. 4 Correlation between uranium contents in leaves of radish and those in soil.
 r = correlation coefficient

った。またウランの植物体内の分布は収穫した植物の灰分重量の割合に依存していることが認められた。

4. ま と め

奈良県室生地区で採取した高ウラン土壌を用い、ポット法によって温室内で野菜を栽培して土壌中のウランの野菜への移行および分布を検討した。

1) ハツカダイコンにおける部位別のウランの生物学的吸収比は子葉、上位葉において、もっとも高かったが、植物に必須の栄養素である土壌中の窒素、リン酸、カリウムなどの存在量によって影響をうけ、欠乏肥料区において収穫したハツカダイコンのウランの生物学的吸収比は三要素区に比較して高かった。植物体内のウランの分布はその部位の灰分重量の割合にほぼ比例していた。

2) ハツカダイコンにおいては、植物の生長にとも

ない葉部のウラン濃度はむしろ増加し、根部においては減少の傾向が見られた。

3) ハツカダイコンの葉部のウラン濃度と栽培土壌中のウラン濃度との間には正の相関が見られた。

室生地区の高ウラン土壌採取にご尽力いただいた奈良県立大淀高校、前田博先生および栽培実験にご助力いただいた研究生諸氏に感謝いたします。

文 献

- 1) T. Yamamoto, K. Masuda and N. Onishi: *J. Radiat. Res.*, **9**, 92 (1968)
- 2) H. Morishima, T. Koga, H. Kawai, Y. Honda and K. Katsurayama: *ibid.*, 投稿中
- 3) V.V. Kovalsky, I.E. Vorotnitskaya and V. S. Lekarev: Symp. on Radioecological Concentration Process, Stockholm, p.329 (1966)
- 4) B.S. Prister: USSR Report, AEC-Tr-7128, 194 (nd)
- 5) H.L. Cannon and F.J. Kleinhampl: Proc. Intern. Conf. Peaceful Uses Atomic Energy, United Nation, Geneva, **6**, 801 (1956)
- 6) T. Yamamoto and K. Masuda: *J. Radiat. Res.*, **15**, 1 (1974)
- 7) 森嶋彌重, 古賀妙子, 河合廣, 本田嘉秀, 田鳥幸信: 近畿大学原子力研究所年報, **11**, 1 (1974)
- 8) E.L. Geiger: *Health Phys.*, **1**, 405 (1959)
- 9) 山崎伝: 微量要素と多量要素, p. 15, 博友社 (1971)
- 10) N. Yamagata, S. Matsuda and M. Chiba: *J. Radiat. Res.*, **10**, 106 (1969)
- 11) 三井進午, 栗原 淳, 園田 晋, 平山 達, 浜田一

- 芳, 寺川 彰: アイソトープ会議報文集, 第2回, 620 (1958) イソトープ会議報文集, 第4回, 1115 (1960)
12) 天正 清, 葉 可 霖, 米沢茂人, 三井進午: ア 13) 坂口孝司, 葛西善三郎, 奥田 東: アイソトープ会議報文集, 第3回, 884 (1959)

Abstract

Experimental Studies on the Movement of Uranium in the Soil to Vegetables

Hiroshige MORISHIMA, Taeko KOGA, Hiroshi KAWAI,
Yoshihide HONDA* and Kosuke KATSURAYAMA**

Atomic Energy Research Institute, Kinki University, * Department of Nuclear
Reactor Engineering, Faculty of Science and Technology, Kinki University
3-4-1, Kowakae, Higashi-Osaka, Osaka, Japan

** Research Reactor Institute, Kyoto University
Kumatori, Sennan, Osaka, Japan

Studies on the accumulation and distribution of uranium by some vegetables were made under pot cultivation using the sandy soil of high level uranium sampled at Muro village, Nara prefecture.

The following results were obtained;

- 1) *The biological absorption ratios of uranium in cotyledon and upper leaves of radish were higher than the other parts. However, these were influenced by the contents of plant nutrient elements in the soil. The absorption of uranium by radish under the cultivation with deficient fertilizer was higher than that with three elements (N, P, K) fertilizer. The distribution of uranium in radish was nearly proportional to the ratio of ash weight. The distribution of uranium in pimiento and cucumber were also similar to that in radish.*
- 2) *The uranium contents in the leaves of radish increased slightly and those in the roots decreased as growth of the plant.*
- 3) *A positive correlation between the uranium contents in soil and those in the leaves of vegetables was observed under the soil of similar characteristics and different uranium levels.*

(Received July 15, 1976)