

紹介

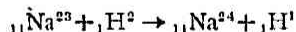
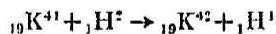
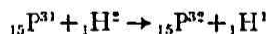
土壤肥料學に於ける人工放射性元素の應用

森 田 修 二*

人工放射性元素は本來の物理學の領域から進展して應用科學の諸方面に於ても盛に用ひられ、殊に指示物質 (indicator) 或は追跡手 (tracer) として生物體內に於ける各種成分の移行の模様を研究する方面に活用されてゐる。土壤學肥料學の分野に於ても漸く此の研究 방법이應用され 1936 年に先づ丁抹に於て Hevesy 等が行つたが、1939 年頃より米國に於てはサイクロトロンを使用して作つた強大な放射能を有する人工放射性元素を使用して種々の興味ある研究が行はれ始めて來た。

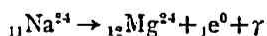
此處に述べる肥料學は主として肥料養分の植物體內に於ける移動の模様を取扱ふのであつて或は植物生理學に近い意味のものである。植物體內に於ける礦物成分の移行を指示元素を用ひて研究する場合には從來は例へば Pb の如き植物體中には存せざる指示元素を使用して行はれたのである。此の Pb の如きは寧ろ有害なものであるが人工放射性元素の發見により正常に生理的に意義のある元素が用ひられる様になり、從つて植物養分の立場に深い根底を置く事が出来るのである。且少量の指示元素を用ひて少量の試料中に而も短時間に檢出する事が出来る利點がある。更らに具體的に述べると次の如き問題の研究に應用する事が出来る。即ち植物體內に於ける無機成分の分布、吸收の割合、移動の徑路等であつて土壤に就ても同様の事柄の研究に利用される。

此の目的の爲に通常用ひられる元素は P, K, Na 等である。本文に於て述べる放射性元素は Ra 及び Be による中性子を用ひたものもあるが多くはサイクロトロンに依り重陽子を衝突して得たものであつて、其の反様式は次の如くである。



即ち A (H^2 , H^1) B なる反應で質量數は 1 だけ増加するが原子番號は變らない。

次に之等の人工放射性元素が崩壊する時は質量數は不變で原子番號は 1 増加し β 線或は γ 線を放出して次の如き式で表される。



之等の半減期は P の場合は 14.3 日、K の場合は 12.4 時、Na は 14.8 時で何れも實驗上取扱に適當な時間である。

* 京都帝國大學農學部。

実験に用ふるに際しては先づ直接此等の諸元素に重陽子を衝撃する。即ち P は赤燐に、K 及び Na は夫々金属 K, Na に衝撃を行ふ。斯くして得られた人工放射性元素を含む之等の元素は夫々 K_2HPO_4 , Na_2HPO_4 , KNO_3 , $NaCl$ 等植物體が攝取し得る形態となし水耕溶液中に添加して実験を行ふのである。

放射能を測定するには多くの場合、Geiger-Müller の計数管を用ひる。併し場合によつては驗電器を用ひ又寫眞作用を利用して Contact Radiograph に依つて結果を更らに適確に知る事も出来る。計数管を使用する際には Neher-Harper の高速度 Geiger 計数装置回路に依り直立式録數器を併用する方法¹⁾²⁾が實用されてゐる。

測定に際しては試料を乾燥粉細してセロファン製容器に入れ計数装置に裝填する。又灰化して行ふ事もあり或は新鮮植物體を用ひても實驗されてゐる。更らに溶液の場合では計数管を硝子管で包被し液中へ挿入して測定する方法もある。驗電器の場合も同様である。寫眞作用に依る時は新鮮葉を寫眞乾板上に載せ一定時間露出して現像する。果實等に就て行ふ時は之れを 2~4 mm の適当な厚さに切斷してパラフィン紙で包み實驗する。此の場合斯かる程度の厚さは最早像の鮮明度、強さには影響を與へず之れに影響を及ぼすのは厚さ 0.5 mm 迄の部分に含まれてゐる物質の放射能であると云ふ報告がある。

植物の生長過程に於ける P 原子の置換

植物が生長して行く過程に於て植物體内の一部分にある栄養元素 P が他の部分に移行するものであるか、又移行するとせば如何なる徑路をとるものであるかと云ふ問題に就て Hevesy, Linderström-Lang, Olsen 等³⁾⁴⁾は研究した。此の研究に用ひた ^{32}P は數 mg の P を溶かした CS_2 に數百ミリキューリーの Rn と Be から生ずる中性子を衝撃して得られた。此の時の核反應は $^{32}_{16}S + ^1_0n \rightarrow ^{32}_{15}P + ^1_1H$ である。 CS_2 を蒸發し P を酸化して磷酸曹達として培養液に加へた。

先づ玉蜀黍の幼植物體に就て實驗を行つた。最下葉にある P 原子を考へる。生長が進むに従つて第二葉が現れるが之れに就て次の問題が起る。第一葉は第二葉を作る爲に自分の P の一部を供給するか、全部を供給するか、或は第二葉の P は土壤或は培養液から來るものであるか。之れに関する實驗として先づ通常の培養液で生育させ次に放射性 P を含む液に移して培養した結果は第 1 表の如く、2 週間乃至 3 週間を経過すると放射性 P/全 P は略々一定となる。3 週間後葉中の P の 79% は後の培養液に由來した放射性を有するものであつて、21% は

第 1 表 玉蜀黍に於ける放射性 P の移行

實 験 日 数		灰 分	全 P	放射性 P	放射性 P / 全 P
		mg	mg	mg	
3.8	{ 莖葉	53.8	2.05	0.806	0.395
		32.9	1.12	0.358	0.318
7.0	{ 莖葉	44.0	1.39	0.878	0.630
		33.0	1.16	0.528	0.445
13.8	{ 莖葉	136.5	5.74	4.21	0.733
		52.9	1.95	1.31	0.672
21.0	{ 莖 第一葉 第二葉	157.9	5.45	4.31	0.791
		34.3	0.903	0.64	0.709
		197.3	7.17	5.01	0.698

之れ以前に植物體內にあつたものである。第一葉、第二葉では放射性 P は夫々 71%, 70% である。3 週間後の第一葉の全 P 及び放射性 P は 2 週間後に比して著しく少いが兩者の比率は 2 週間、3 週間後の各葉に於て殆ど同一である。此の事實から葉の P 原子は可動状態にあり植物の生育中に葉の間で P 原子の連続的交換作用が行はれる事を知る。

同様な事柄を更らに日向葵の幼植物體に就ても實驗し、P 原子の大部分は葉の一部には止らず移動する事を知るのである。斯くの如く植物體中に於て P 原子は多くは無機の磷酸鹽として存在し、植物體の種々の循環作用によつて各所へ運び行かれる。如何なる程度に有機的に結合した P が其の場所に止つてゐるか云ふ點に就ては今後研究すべき問題である。

更らに切斷した葉を用ひて實驗すると一旦吸収された放射性 P は培養液中の通常の P とは置換しないが、切斷された葉を放射性 P の溶液に浸すと如何なる場合に於ても若干の放射性 P は葉の中に見出される、即ち斯様な葉は溶媒のみならず溶質をも吸収するものである。

又發芽した種子によつて吸収された放射性 P は部分によつて分布は一樣で無く玉蜀黍では内胚乳の部分には全然見出されず、豌豆では小根葉の部分に多く子葉には少い。

荳科植物の P 吸収に関する實驗

1. 根よりの吸収

Biddulph⁵⁾ は荳科植物 (Phaseolus 屬? var. Red Mexican) を用ひて種々の實驗を行つた。先づ豫備實驗として此の幼植物を豫め P 缺除溶液で育成し第 3 互生葉が開かんとする位 3.5 $\mu\text{C}/\text{cc}$. 量の放射性 P を有する液中に種々の時間浸して後根を水洗し、植物體の各部分を乾燥粉碎して計數管で測定した。

第 2 表 放射性 P の吸収と處理時間

處理時間	48 時間	24 時間	2 時間
試料の量	4 mg	10 mg	10 mg
根	數/分 2,364	數/分 1,968	數/分 1,092
胚 軸	}	741	}
莖		468	
對 生 葉	1,104	504	144
第 1 互 生 葉	1,934	888	204
第 2 互 生 葉	2,124	1,380	240
第 3 互 生 葉	2,364		216
自然放電	36		

其の結果は第 2 表の如く放射性 P は先づ根に最も多く蓄積されその次は先端部に多く見出される。2 時間半處理したものにも既に著しく集積され 48 時間處理のものは甚だしく多い。

又計數管を葉や莖の上を移動させて直接放射性 P の検出を行ふ事も出来る。之れに依ると 1 時間に 10 cm の割合で移動して行く事が判る。尚 2 時間半處理した植物の生葉の直徑 7.5

* μC はマイクロキュリー単位を表はす。即ち 1 g のラヂウムが 1 秒間に壊れる數 3.70×10^{10} の 10 萬分の 1 である。

第3表 新鮮葉中の放射性Pの分布

		数/分
對 生 葉		10
第1互生葉		
先 端 葉		46
側 葉		54
第2互生葉		
先 端 葉		20
側 葉		62
第3互生葉		
先 端 葉		38
側 葉		33

mmの面積に就き測定を行つた結果は第3表の如くであつて、何れにしても放射性Pは可成りの量が根の生活細胞に蓄積されて後始めて木質部を通り時間が経過すれば漸次生活力の最も旺盛な先端部へ移動して行くのである。此の點に關して更に詳細に次の研究を行つた。

發芽した莖を第5互生葉が開く迄水耕栽培し次の組成の培養液中に第一の植物體は1時間、第二は2時間、第三は4時間浸して後植物體を水洗乾燥粉碎して測定した。更に根の部分は Soxhlet 抽出器でエーテル可溶部分を抽出し、後熱水可溶部分を浸出して此等の部分に就ても計數の測定

を行つた。其の結果は第4表に示す通りである。

培養液の組成

Na_2HPO_4 .0075 M (放射性 P を含む) KCl .0020 M

$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$.0020 M MgSO_4 .0010 M

放射性 P は $0.76 \mu\text{c/cc}$ の割合で含まれて居る。

第4表 放射性 P の分布と處理時間及び方法

	處 理 時 間								
	1 時 間			2 時 間			4 時 間		
	組織	エーテル可溶	熱水可溶	組織	エーテル可溶	熱水可溶	組織	エーテル可溶	熱水可溶
根	8.3	0	2.7	25.3	0.07	5.7	33.5	0.15	10.5
胚 軸、莖	0.0			1.1			0.0		
對 生 葉	0.0			0.0			0.9		
第1互生葉	0.0			0.0			0.5		
第2 "	0.0			0.0			0.8		
第3 "	0.0			0.0			0.8		
第4 "	0.0			0.0			1.2		
第5 "	0.0			0.0			1.3		
培 養 液	11.8			11.0			10.4		

但し數字は 數/分/mg を表す。

P の吸収、移動は速に行はれ、放射性 P は基部から 1m ある先端の葉には 4 時間後に見出される。先づ多量の P が根に蓄積されて、2 時間の後根全體の P が溶液中の P の濃度の 2 倍に達して始めて上部への移動が行はれ始める。4 時間後に於ては根には著しく多いが地上部に就ては前の豫備實驗と同様先端部に多く見出される。

根の熱水可溶部分は木質部を通つて動き易い部分である。これは 1 時間後にも若干見出されるが、4 時間を経ると溶液中の濃度と等しくなり、此の状態になれば上部へ盛に P の移動するのが見られるのは興味のある事實である。此の動きは蒸散作用に支配されるのであつて、葉面殊に先端の葉面より水が蒸發すると此處で蓄積されるのである。4 時間後エーテル可溶部分

に少量の放射性 P が見出されるのは注目すべき事柄である。新らしく吸はれた P 原子が既に phosphatide 中に化學的に結合してゐる P 原子と置換すると云ふ如き證據は無く、又本實驗に於て phospholipin の合成が行はれるとも考へられ無い。併しエーテル可溶性 P は時間と共に増して行くのである。

2. 葉よりの移行

斯くして放射性 P は培養液から吸収されると葉に蓄積される事を知つたのであるが、更に今度は葉へ之れを與へた時に其の場所に止つてゐるか他の器管へ移行するかを調べる爲に、葉から植物體の各部分への移動の模様を研究した。

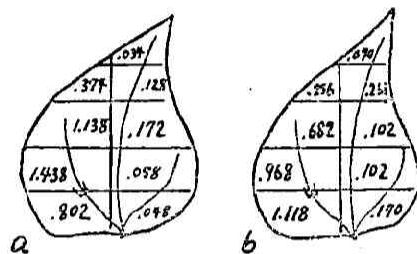
前記と同じ豆科植物を用ひ先づ次の培養液で育成する。

Ca(NO ₃) ₂ .0025 M	KH ₂ PO ₄ .0025 M
MgSO ₄ .0012 M	Fe ⁺⁺⁺ -tartarate .03 g/L
CuCl ₂ 1 ppm	H ₃ BO ₃ .5 ppm
MnCl ₂ 1.0 ppm	ZnCl ₂ .5 ppm

實驗の時期は植物の第9葉が小開し第10葉が開いてゐない時である。第2葉の先端の葉に放射性 P を導入したのであるが其の方法は次の様である。

葉の側脈を切断して水に浸し次に Na₂HPO₄ 溶液中に浸す。此の液は Na₂HPO₄ を 1 cc に就き 15 γ の割合で含み更に 36 μc/cc の P³² を含有する。5分間後水の入った 特別の容器に移し實驗中此の狀態に保つ。後乾燥灰化して測定する。此の計數値より組織中の PO₄ 量を計算するのである。

豫備實驗 先づ葉から他の部分への移動に就て豫備的の實驗を行つた。葉に放射性 P を導入して直ちに切断して葉の各部分に於ける分布を調べたのが第1圖 a で4時間後に切断して測定したのが第1圖 b である。即ち加へた放射性 P は容易に同一葉面内で移行し、又4時間後には實驗に用ひた葉以外の部分へも若干量が移行する事を知るのである。



加へた全 P*O₄ 4.192 γ 残存 P*O₄ 3.740 γ
 移行 P*O₄ .232 γ 加へた全 P*O₄ 4.002 γ

a は加へた直後、b は4時間後に於ける磷酸鹽の分布狀態を示す。

第1圖 葉中に於ける磷酸鹽の分布。

* P*O₄ は放射性を含む磷酸イオンを表す。

第5表 加入した磷酸鹽に對する移行した磷酸鹽の關係

移行時間	加へた量	移行した量	上部への移行	下部への移行	全體の移行
	c/m	c/m	%	%	%
4	4,066	316	4.4	3.4	7.8
4	5,486	386	5.8	1.3	7.1
4	6,452	492	5.0	2.6	7.6
8	2,683	438	10.9	5.4	16.3
8	7,338	1,126	9.8	5.6	15.4
8	12,792	1,812	10.9	3.3	14.2

此の方法では實驗の各回毎に同一量の P を導入する事は不可能である。それ故に加へた量に對する移行した量の比を求めた。種々の量の磷酸鹽を加へ4時間及び8時間後に於ける測定結果は第5表に示す如くである。用ひた量從つて移行した量が違つても百分率を求めると

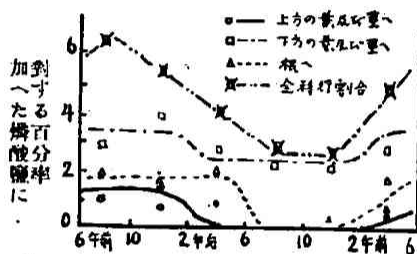
略々一定した値を得るのである。4時間後には放射性 P は植物體の殆ど各部分に見出される。8時間後に於ける各部分の分布状態を示すと第6表の様である。即ち上部に多く移行し次いで根に多い。

次に斯くの如くして加へた磷酸鹽の移行に對して組織中に存在する P の影響を調べる爲に、豫め植物體を2週間 P 缺除液で培養し後上記の如き處理を行ひ、4時間及び8時間後に測定を行つた。其の結果 P 缺除植物は充分に P の供給を受けた對照の植物よりも移行が少い。P 缺除植物では4及び8時間後に加へた P の3.8%及び11.1%が移行したのに対して對照の植物では夫々7.8%及び16.3%が移行する、即ち P 缺除植物の組織は磷酸鹽の移動するのを妨げるのである。

第6表 加へた葉から移行した $P^{32}O_4$ の8時間後に於ける分布

	加へた PO_4 に対する百分率
上部の葉(第3, 第4葉及び芽)	4.7
上部の莖	4.4
第2互生葉	1.8
第1互生葉(處理した葉)	1.3
對生葉	1.4
下部の莖	0.6
根	2.4
移行した全 PO_4	16.5

$P^{32}O_4$ とは前記の如く放射性 P を含む
磷イオンを表す。



第2圖 葉から移行する磷酸鹽の日變化

磷酸鹽移行の日變化 此の様に葉より加へた磷酸鹽は植物體の各部分に移行する事を知るのであるが、更に此の移行が1日を通じて如何に變化するかと云ふ事を調べる爲に次の實驗を行つた。

第2互生葉の小葉を上記の如く處理して放射性 P を含む Na_2HPO_4 溶液に浸す。4時間後取り測定を行ふと同時に又次の植物體に就て同様の實驗を行ふ。斯くして午前6時から開始して1晝夜を通じて實驗を行つた。其の結果は第2圖に示す通りである。此の場合4時間なる處理時間は相當の量の磷酸鹽が移行し而も再分布の少い適當な時間である。

磷酸鹽は大部分は口中に移動し夜間は少い。葉柄を通過して移行する方向は主に下方へ動く*。根へ動く量は午後になると最大となり夕方には移行した全磷酸鹽の40%が根に集まるが夜になると移動が止る。下方への移行は午前10時頃に最大となり、午後10時頃に最小となる。上方への移行は正午頃に最大となり午後から夜に於ては著しく少くなる。此の移行は必ずしも光に直接に支配されるものではなく午前2時から6時の間に於ても既に始まる事が見られるのである。故に光以外に蒸發、糖類の新陳代謝等が關係するものと考へられる。

以上の如くにして葉より下方へ移り根に集つた P は蒸發作用に伴つて木質部を通り再び上部に上昇し植物體內を循環するものと考へられる。

* 此の傾向は前の豫備實驗とは反するが之れに對しては何等説明が加へられてゐない。

根に依り吸収された養分の上方及び側方移行

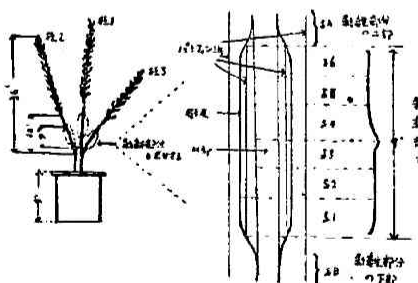
養分元素が根に吸収された後上方及び側方への移動の徑路を Stout, Hoagland 等⁵⁾は人工放射性元素を用ひて研究した。

木質部は養分上昇の徑路である。一方韌皮部にも養分の礦物鹽類が見出されるのであつて、然らば韌皮部は木質部と共に養分の上昇を司るのであるか或は木質部から水平移動によつて移つて來たものであるかを定める爲に次の如き方法に依つて實驗を行つた。

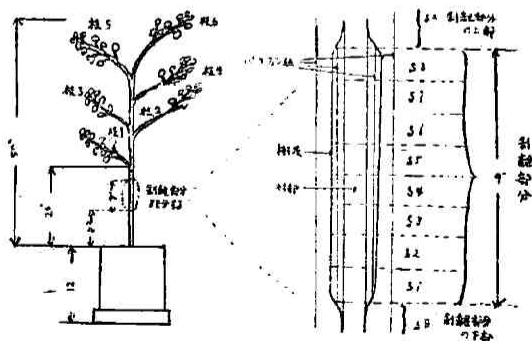
用ひた植物はゼラニウム、柳であり挿芽より育成した。培養液は $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$.005 M, KNO_3 .005 M, KH_2PO_4 .001 M, MgSO_4 .002 M で之れに適當に放射性元素を含む鹽類を添加した。

柳に於ける K の移行 柳 (*Salix lasiandra*) の幼枝を完全溶液中で挿芽をして育成する。枝は3本仕立とし實驗の始めに先づ第3圖の如く枝1及び2に9"の細條を切り靜かに皮を剥ぐ。パラフィン紙を皮と材部との間に挿入し更らに全體の剥いだ部分を外部からパラフィン紙で包む。枝3は剥皮を行は無いが併し前と同様に外部をパラフィン紙で被覆する。斯くして1時間半後枝2は樹皮と材部との間のパラフィン紙を除去し樹皮を材部にテープで縛り着け外部を蠟引紙で包む。次に放射性 K を含む中性 KNO_3 を溶液に加へ K に就て 5 mg. eq./L とする。之れを3時間日光に當て2時間直射光を妨り第3圖の左の如く切斷して乾燥灰化し放射性 K を測定した結果は第7表に示す如くである。

5時間後可成りの量の放射性は剥皮を行つた枝の各部分に見出される。樹皮が材部と接觸して居る所 (SA, SB) では放射性 K の濃度は樹皮は材部よりも却て大きい。枝2.の樹皮へは枝3.の樹皮へと同様に放射性 K は容易に入り材部/樹皮の比率は各部分略々等しい。之れは剥皮操作に依り柳の生理作用が殆ど障害を受け無かつた事を示す。枝1.の分析測定結果は樹皮の SA は S2, S3 の少くも150倍の放射性 K を有す。同様に SB は S2, S3 の250倍以上も多い。更らに剥皮部分の材部の濃度は樹皮よりも大であつて殊に S2, S3 に於ては300倍以上に達する。



第3圖 柳の樹皮剥離及び樹皮、材部の區分方法



第4圖 ゼラニウムの樹皮剥離及び樹皮、材部の區分方法

ゼラニウムに於ける P の移行 ゼラニウム (*Geranium zonale*) を豫め砂耕培養し實驗の時には約50"伸び6本の枝を出してゐた。第4圖の如く根から8"の所で9"の剥皮部分を作り柳の場合と同様の操作を行ひ放射性 P を含む KH_2PO_4 として 1 mg. eq./L を含む溶液を加へ6時間後に切り取り圖の如く各部分に切斷し放射性 P の測定を行つた。其の結果は第8表に示す如くである。

第 7 表 柳の剥皮部の 5 時間後に於ける K の分布 (放射能より計算せる値)

		枝 1			枝 2			枝 3		
		吸収実験 1 時間前に剥皮			1 時間前に剥皮, 吸収実験直前に樹皮を元の状態に復す			無 處 理		
		樹皮 ppm	材部 ppm	材部 ppm / 樹皮 ppm	樹皮 ppm	材部 ppm	材部 ppm / 樹皮 ppm	樹皮 ppm	材部 ppm	材部 ppm / 樹皮 ppm
剥皮上部	S A	53	47	0.831	78	52	0.67	64	56	0.88
剥皮部分	S 6	1.6	119	10.3	145	92	0.64	87	69	0.79
	S 5	.9	122	140	155	113	0.73			
	S 4	.7	112	160	130	89	0.68			
	S 3	<.3	93	<300—	132	91	0.69			
	S 2	<.3	108	<300—	133	80	0.60			
	S 1	20	113	5.6	133	107	0.77			
剥皮下部	S B	84	58	0.69	137	73	0.53	74	67	0.91

第 8 表 ゼラニウムの剥皮部の 6 時間後に於ける P の分布 (放射能より計算せる PO_4)

		各部分の PO_4 γ 数				各部分の PO_4 ppm (新鮮物重量)			
		樹皮	材部	葉軸	葉	樹皮	材部	葉軸	葉
枝 6		137	470	191	532	12	16	44	33
枝 5		202	360	200	790	14	24	57	62
枝 4		151	290	55	280	16	27	37	37
枝 3		41	62	26	94	13	17	50	49
枝 2		175	326	86	354	18	33	48	52
枝 1		128	286	57	117	15	32	16	19
剥皮上部	S A	270	860	?	?	16	37	?	?
剥皮部分	S 8	9.0	112	?	?	4.5	44	?	?
	S 7	.5	120	?	?	.28	44	?	?
	S 6	.6	132	?	?	.3	49	?	?
	S 5	.8	138	?	?	.4	51	?	?
	S 4	<.3	147	?	?	<.16	54	?	?
	S 3	<.5	137	?	?	<.25	56	?	?
	S 2	<.3	152	?	?	<.16	58	?	?
	S 1	11.1	131	?	?	6.0	41	?	?
剥皮下部	S B	316	442	?	?	24	41	?	?

6 時間後に於て放射性 P は樹皮 S2—S4 の以外の部分には可成りの量が含まれてゐる。剥皮部の上部 SA に於ける樹皮の放射性 P の濃度は S2—S4 の樹皮に於けるよりも少くも 100 倍大である。同様に剥皮部の下部 SB の濃度は S2—S4 の濃度よりも 100 倍以上大きい。又 S2, S4 の材部の濃度は樹皮部の濃度よりも少くも 300 倍以上大である。

尚ゼラニウムに就て放射性 Na を用ひて同様な実験を行つても上記の如き傾向を更に顯著に知り得たのである。

以上の実験から察知出来る様に放射性元素は剥皮した部分の樹皮を通つては徐々にしか移行しないのであつて、実験した如き短時間では剥皮部の中央部分では殆ど見出されない。然る

に材部には可成り多量が見出されるのである。一方樹皮と材部とが接觸してゐる箇所では樹皮の部分にも多量の此等元素が見出される。斯くの如く無機養分は根より吸収されて木質部を通り上方へ動くと同時に又絶えず周囲の組織へ移行し、此の側方的の移動で移つて行く量は樹皮中を通つて縦に動く量よりも遙かに大である。

生育各時期のトマト果實に依る放射性 P の吸収

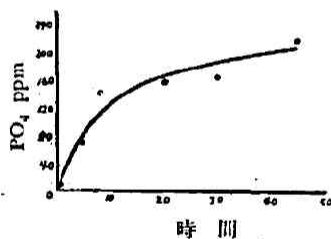
Arnon, Stout, Sipos 等¹⁰⁾は培養液に加へた放射性 P がトマトの葉や果實中に如何なる分布をし、又熟度の異つた果實によつて吸収割合が如何に變るかと云ふ實驗を行つた。

供試トマトは豫め水耕培養を行ひ、放射性 P を Na_2HPO_4 として含む培養液中に適當時間浸し、葉、果實等を乾燥灰化して放射性 P を測定し之れより PO_4 の量を求めた。一方新鮮物に就き寫眞作用を利用して Contact Radiograph を行つた。

豫備實驗 先づ P^*O_4 の吸収に對する時間的關係を調べる爲にトマトの全葉中の P^*O_4 と時間との關係を求めた所第5圖の如くであつて之れより吸収は最初の10時間に大部分が行はれる事を知る。又 Radiograph に依ると P^*O_4 は葉の至る所に存在するが1枚の葉に於ても導管部に最も多い。

次に植物體の各部分に就き調べると葉中の量は莖中の量よりも常に多く又上部は下部よりも多くて、 P^*O_4 は木質部を通つて上部に著しく運び集められる事を知る。

第9表 トマトに依る P^*O_4 の吸収 (其の一)
乾物量に就ての PO_4 ppm



第5圖 トマトの葉による
 PO_4 の吸収

	吸 收 時 間	
	24 時 間	48 時 間
葉	395	338
未 熟 果		
小 (<5 g)	203	467
中 (5-30 g)	55.1	192
大 (>30 g)	26.4	49.9
熟 果		
各種の大きさを通じて	5.9	108

P 缺除後に吸収された P^*O_4 の移動 豫備實驗では植物體は常に完全溶液中で培養され P の供給には制限を受けなかつたのである。次には P 供給が制限されても如何なる程度に P の吸収能力が維持されて行くかと云ふ問題を研究した。此の爲に植物を3日間 P 缺除溶液で培養した後 18.5 ppm の P^*O_4 を加へては24時間、一は48時間後各部分の分析を行つた。その結果は第9表に示す。即ち24時間後に P^*O_4 は全葉及び全果實中に見出される。果實の大きさと吸収量とは一定の關係があり果實が小さい程、換言すれば未熟な程吸収される量が多い。48時間後では各果實中の P^*O_4 は更に増してゐるが葉では却て減少する。此の様に果實が蓄積して行く能力は葉よりも遙かに大である。完熟した果實も枝に附いてゐる限りは P^*O_4 を吸ひ續けて行く。

P^*O_4 の供給量と吸収、分布 次に培養液中に加へる P を多量及び少量にした場合に果實、葉に於ける吸収分布が如何に影響されるかと云ふ實驗を行つた。完全培養液で育成した植物

を一定期間 P 缺除液で培養した後、 P^*O_4 を一は制限供給として 2.3 ppm の少量、一は自由供給として 192.3 ppm の多量を加へ 2 日及び 7 日の後植物體各部分に就き分析測定を行つた。之れを第 10 表に示す。果實の P^*O_4 の吸収は日と共に増し幼果には多く熟果には少い。又豫期された如く多量供給したものの方が少量供給のものよりも著しく多く集積される。葉の吸収は供給多量の場合は少量の場合に比して日と共に多く蓄積されて行く。然るに供給少量の時は日数が増すと却て蓄積が減少して行く結果となる。之れは前の豫め P 缺除液で栽培した場合と同様の結果である。

第 10 表 トマトに依る P^*O_4 の吸収 (其の二)
乾物量に就ての PO_4 ppm

	P^*O_4 の制限供給 (2.3 ppm)		P^*O_4 の自由供給 (192.3 ppm)	
	吸 收 期 間 2日	吸 收 期 間 7日	吸 收 期 間 2日	吸 收 期 間 7日
葉				
果實を附せる枝より下部	212	153	2,132	10,266
上部	259	163	2,767	12,430
未熟果				
小 >5g	212	341	1,297	13,117
中 5~30g	132	161	799	6,521
大 >30g	63	80	404	3,107

何れにしても幼果は著しく P^*O_4 を吸収し熟度が増す程此の吸収程度が減少して行く。之れは Radiograph に依つても明瞭に見られる。更に幼果の種子は P^*O_4 の吸収が大きい。熟果の種子では此の吸収は小さい。此の事は種子の無機成分の吸収は熟度に關係があり、或る時期になると此の吸収が止る事を示す。P の供給と葉及び果實間の分布には興味のある關係があり、此の供給が制限されると P は葉から移動して生長果或は熟果へさへも動いて行く。之れに反して供給が多量にあると葉及び果實に逐次集積される。

粘土粒子に依る根の接觸的減出作用

粘土粒子の懸濁液に植物の根を浸すと陽イオンが根から懸濁液中へ移動する現象がある。之れを接觸的減出作用 (Contact Depletion) と云ふ。之れが果して専ら粘土粒子に起因するものであるか否かを確める爲に Jenny, Overstreet 及び Ayers 等¹⁰⁾は放射性元素を用ひて實驗した。

實驗方法は大麥を 3 週間水耕培養しその根を放射性元素を含む溶液に浸す。2 時間後には可成りの量の此の元素が根に吸収されてゐる。次に 1 分間水洗して供試溶液中に浸し溶液中の放射性元素の量を測定する。

放射性 K を用ひた實驗 金屬 K より人工放射性 K を作り之を KNO_3 として大麥に吸収させた。先づ蒸留水に浸した時に放射性 K が此の中へ移行して行くや否やを調べた所第 11 表の如く殆ど認め得ない。次に電解質溶液を用ひて實驗すると、 $NaCl$ では出て來ぬ。 $MgCl_2$ 、 $CaCl_2$ 、 $SiCl_2$ 、 $BaCl_2$ では顯著には出て來ない。然るに K-鹽類の溶液では可成り移行して出る。ペントナイト及び Yolo 粘土では著しく移行する、殊に Na-系のものは K-系よりも著しい。2 價の陽イオンで飽和した粘土にも此の移行が見られ殊に Mg-粘土では顯著である。

第 11 表 放射性 K の根よりの移行

	数/分 (25 cc. 中)		数/分
H ₂ O	なし	MgCl ₂	3.3±4.1
NaCl	なし	CaCl ₂	11.3±3.7
KCl	314±69	SrCl ₂	13.5±4.6
Na-Yolo 粘土*	606±93	BaCl ₂	2.8±3.5
K-Yolo 粘土	374±60	Ba-Yolo 粘土	45.2±4.8
		Sr-Yolo 粘土	68.4±6.3
		Mg-Yolo 粘土	10.9±6.4
		Ca-Yolo 粘土	66.3±3.8

* Na で飽和した Yolo 粘土の意。他も之れに同じ。

放射性 Na を用ひた實驗 金属 Na より人工放射性 Na を作り NaCl として大麥に吸収させた。之れを種々の鹽類の溶液及び粘土懸濁液に浸し放射性 Na の移行を調べた。其の結果は第 12 表の如くで放射性 K との違は Na は水の中へも移行して行く事である。又電解質溶液よりも粘土懸濁液中に多く移り出る事は K の場合と同様である。

第 12 表 放射性 Na の根よりの移行

	数/分		数/分
H ₂ O	106±4.4	NaHCO ₃	78±6.5
NaCl	102±7.2	Na-ベントナイト	147±8.4

放射性 Br を用ひた實驗 一般に粘土粒子が Cl, Br, NO₃ 等の陰イオンを吸収する力は弱い。それ故に大麥の根に攝取された之等陰イオンが粘土粒子に依り取出される事は豫期出来ない。之れを確める爲にエチルブロマイドに中性子を衝突して得た放射性 Br から KBr を作り、此の溶液に大麥の根を浸して放射性 Br を吸収させ、次に種々の鹽類溶液及び粘土懸濁液中に移して之等の液中へ移り出て来る放射性 Br を測定した。其の結果は第 13 表に示す通りで、粘土懸濁液の計數値は溶液のそれよりも少く、粘土粒子はかゝる陰イオンを吸収せず根より外部への移行には關與せぬ事を示すものである。之れに對して比較に實驗した Fe(OH)₃ ゾルでは水の 2 倍以上の計數値を示し、之れはかゝる陽電氣性ゾルは陰イオンを吸収すると云ふ膠質學的事實より考へても當然の事柄である。

第 13 表 放射性 Br の移行

	数/分		数/分
H ₂ O	15.6±2.1	Na-Yolo 粘土	19.6±2.3
NaCl	27.5±2.5	K-Yolo 粘土	17.4±2.1
KCl	29.9±2.4	Mg-Yolo 粘土	5.5±1.9
MgCl ₂	10.0±3.7	Ca-Yolo 粘土	6.9±1.9
CaCl ₂	88.6±3.5	Fe(OH) ₃	37.2±2.5

膜を用ひる實驗 以上の如く接觸的減出が起るならば若し半透膜の如きものを用ひて二つの系を隔てたならばかゝる現象は起らないであらうと考へられる。故に次の實驗を行つた。放

放射性 K を含む大麥を蒸留水を入れた數箇の容器に移し、各容器には半透膜の底を有するフラスコを挿入し各フラスコに夫々次の液を入れる。

フラスコ 1.	H ₂ O	フラスコ 2.	KCl
フラスコ 3.	KHCO ₃	フラスコ 4.	K-Yolo 粘土

12 時間後フラスコ内即ち半透膜によつて根と隔たれた部分の液を用ひて計數の測定を行つた。その結果は第 14 表に示す。此の様に粘土懸濁液は膜があると殆ど移出には關係せぬが、上記の如く膜が無いと之れが著しく行はれる。故に粘土粒子により根から陽イオンが除かれる爲には接觸が必要である事が判る。

第 14 表 K 移行に對する半透膜の影響

	膜 有 り 數/分	膜 無 し 數/分
H ₂ O	0.6±1.97	2.5±4.3
KCl	16.1±1.36	60.8±5.9
KHCO ₃	49.1±9.54	58.8±6.1
K-Yolo 粘土	6.8±1.77	76.4±5.8

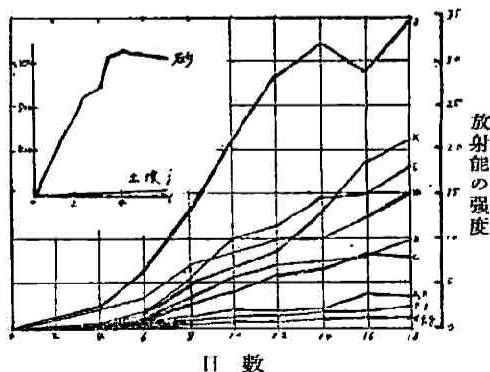
斯くの如く K 共の他の陽イオンは植物の根に吸収されるが一方 K-粘土、KCl 等は反對に根から陽イオンを除く作用をも行ふのであつて、吸収と減出との割合は 10:1 と云ふ實驗結果も得られてゐる。要するに植物によるイオンの吸収は一方的に行はれるものでは無く根の中へ入るものと根から出るものと兩方あり、後者は根が膠質粘土と接する時に顯著に現れるのである。

土壤の P 固定作用に関する研究

土壤に磷酸或は加里肥料を施用した場合に加へた之等養分の中で土壤と固く結合して植物に不可吸態となる部分が可成り多い。之れを土壤の之等養分に對する固定作用 (Fixation) と云ふ。此の問題に關して放射性元素を用ひて行つた研究がある。

Ballard, Dean 等¹¹⁾は砂及び各種の土壤に加へた放射性 P をトマト及び Sudan glass に吸収させて固定作用を検討した。

砂及び土壤に加へた放射性 P のトマトに依る吸収割合。放射性 P を砂及び各種の土壤に加へ之れにトマトの幼苗を移植し放射性 P の吸収を 2 日毎に測定した。此の場合は Lauritsen の驗電器を用ひた。其の結果は第 6 圖に示す如くであつて土壤の種類により放射性 P の吸収には著しい相違がある。土壤 j, k, i, m, b, c は他の土壤よりもトマトに對しては P の供給が容易である。比較の爲に砂耕と土壤とに就て行つた實驗を對照して見ると圖の如く砂耕よりの P の吸収は土壤の

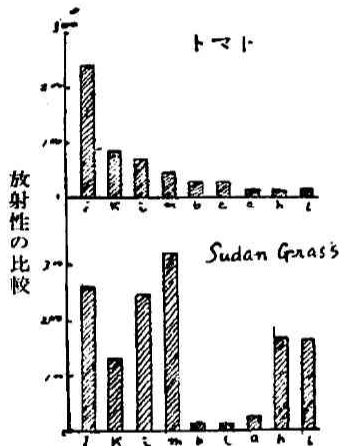


第 6 圖 各種土壤よりトマトが吸収した P 量

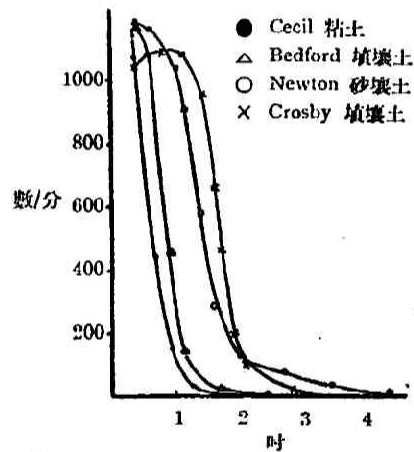
場合に比して著しく速かに容易に行はれる。

更らに灰分に就て精確な測定を行ふと砂耕の場合ではトマトにより加へた放射性 P の60%以上が6日間に吸収されるが、土壤では固定力の最も弱い土壤 j に於ても10日間に1%以下、19日間では2.75%が吸収されるに過ぎず、最も不良な土壤では僅か0.03%がトマトにより利用されるのである。

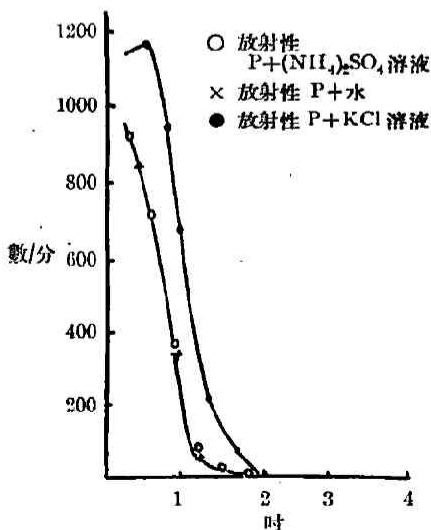
トマトと Sudan glass の放射性 P 吸収の比較 Sudan glass に就ても同様な實驗を行ひ此の結果とトマトに就て行つた結果とを比較すると第7圖の様である。土壤 e, g, f, d で栽培した植物は餘りに少量で圖の尺度では表はせない。此の様に或る土壤は Sudan glass に對しては容易に P を供給するがトマトに對しては然らず、種々の土壤に就ての固定力を考察する時は對照とすべき植物が重要な因子となる。



第7圖 トマト及び Sudan glass が各種土壤より吸収する P 量



第8圖 土壤の深さと P 固定作用



第9圖 P 固定に對する鹽類の影響

次に Henderson, Jones 等¹²⁾は土壤に放射性 P を含む $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 溶液を加へ放射性 P の垂直的移行を計數管を用ひて調べた。

土壤を圓柱狀容器に入れて之れに $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 溶液を加へ、更らに蒸留水を注ぎ全液量を2.5"の降水量に相當する様にする。此の土壤柱に沿ふて計數管を移動して放射能を測定するのであるが、計數管は鉛で遮蔽し幅 3/8" の開口を作つて置く。此の様にして測定した結果は第8圖に示す如くである。即ち加へた P は下層迄は及ばず表面より2"迄の所に止つてゐる。加へた P の95%を固定する層の深さは Cecil 粘土1", Bedford 填壤土1 1/4", Newton 砂壤土1 1/8", Crosby 填壤土1 1/8"であり50%を固定する層の深さは夫々 3/8", 1/2", 3/4", 5/8"である。此の様に加へた可溶性磷

酸鹽は根の利用し得る程度の深さには達しないのである。

次に放射性 P を加へた試料に更らに KCl 及び $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ を加へ、P 固定に對する此等の鹽類の影響を調べた。先づ第一の實驗と同様に放射性 P を含む溶液で處理したものを三通り作る。此の溶液が吸収された後一は蒸溜水、一は KCl 溶液、残りの一は $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 溶液を加へて放射性 P の移動を調べた。其の結果は第 9 圖に示す如く $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ を加へても水の場合と同様であつて P 固定作用には影響は無いが、KCl の場合では P が少しく下方へ移動して行く事實が見られるのである。

放射性 K を用ひて同様な實驗を行ひ KCl として 600 lb/acre に相當する量を用ひ 2.5" の降水量に相當するだけの水を添加した處矢張り P の場合と同様な結果を示し加へた KCl の 95% は 156" 以内の所に止つてゐる事が判つた。

以上人工放射性元素を用ひて行つた土壤學、肥料學或は植物生理學に於ける主なる研究結果を紹介したのである。此の方面の研究は未だその緒に就いた許りであつて此の研究方法を應用して幾多の系統的な研究成績を挙げると云ふ状態迄には到達してゐない。將來原子核物理學の實驗部門に於ける技術の進歩發達と共に斯學に於ても數多くの興味のある新しい事實が発見される事と思ふ。我國の主要作物である稻、麥に應用すれば之等の生理機能の根本が解明され、時局下緊急の要請である食糧増産に寄與する事渺からざるものありと信する次第である。

参 考 文 献

- 1) Neher, H. W. and Harper, W. W., *Phys. Rev.*, 49, 940 (1936).
- 2) Gingrich, N. S., Evans, R. D. and Edgerton, H. E., *R. S. I.*, 7, 450 (1936).
- 3) Hevesy, G., Linderstrøm-Lang, K. and Olsen, C., *Nature*, 137, 66 (1936).
- 4) Hevesy, G., Linderstrøm-Lang, K. and Olsen, C., *Nature*, 139 149 (1937).
- 5) Biddulph, O., *Science N. S.*, 89, 393 (1939).
- 6) Biddulph, O., *Plant Physiol.*, 15, 131 (1940).
- 7) Biddulph, O., *Am. Jour. Bot.*, 28, 348 (1941).
- 8) Stout, P. R. and Hoagland, D. R., *Am. Jour. Bot.*, 26, 320 (1939).
- 9) Arnon, D. I., Stout, P. R. and Sipos, F., *Am. Jour. Bot.*, 27, 791 (1940).
- 10) Jenny, H., Overstreet, R. and Ayers, A. D., *Soil Sci.*, 48, 9 (1939).
- 11) Ballard, S. S. and Dean, L. A., *Soil Sci.*, 52, 173 (1941).
- 12) Henderson, W. J. and Jones, U. S., *Soil Sci.*, 51, 283 (1941).

Application of artificial radioactive elements in
agricultural chemistry.