

講座

放射性同位元素と土木工学 (III)

—放射性同位元素の土木工学実験における応用—

正員 工学博士 岩井重久*

1. 放射性同位元素の入手法

放射性同位元素(以下 RI と略記)を用いて実験を行う場合、まず使用する RI の種類と量を決定せねばならぬが、土木工学の応用方面では、 α 線を放出する元素を使うことはごくまれである。一般に RI の利用にさいしては放射線の種別選択に慎重な検討を必要とする。 γ 線は透過力大なるために遮蔽された状態でも放射能の測定ができる利点があるが、電離作用が弱いために GM 管の効率が悪く、また外部照射による人体への悪影響も大きい。 β 線はこれとはほぼ逆の利点、欠点を有する。また使用する RI の量は、半減期、廃物、廃水の処理法、および人体許容限度と考え合わせて決定しなければならない。

現在わが国には RI の量産設備がないため、その入手先は諸外国、特に米、英にたよっているが、その管理行政は「総理府科学行政協議会」(STAC)が受持っているから、使用する RI の種類と量が決めれば、次の機関を経由して STAC に輸入申請書を提出する。

- 大学関係……文部省大学学術局研究助成課
 - 建設省関係……計画局総合計画課
 - 農林省関係……農業改良局研究管理課
 - 民間会社関係……工業技術院調整部総務課
 - 運輸省関係……大臣官房企画課
- その他は省略

この際、申請者は RI の性質、取扱法をよく理解し、取扱者に対し十分なる健康管理を行い得、保管施設、測定装置を所有するか、または近く利用可能のこうした設備を有していなければならない。

申請書は図-1に示すとおりであるがその裏面に記載の申請書作成注意も同時に示しておく。この申請書の第3項の口欄に記入する品目番号と、その特性を表-1に示す。

2. GM 計数装置による測定法

(1) 試料の調整

固体の場合：固体試料の放射能を測定する場合には、通常これを直径約 2 cm、深さ 5 mm 位の皿形容器に入れて、測定装置にかける。この場合一回の試料

図-1 放射性同位元素申請書

- (申請書作成注意)
4. 全般的事宜
 - (1) 申請者は必ず審議委員指定の用紙を使用し、複写紙、改訂のもの、各欄内に記入しきれない場合は申請書と別紙の両方を使用することが出来る。(別紙紙は申請書の下に添付する)
 - (2) 欄内の記入は必須である。
 - (3) 同位元素は正誤二重確認すること。又使用目的が二つ以上ある場合でも同一同位元素を使用する場合は一つの申請書に記入する。
 - (4) 質問事項では該当しない項を付す。
 5. 各項注意
 - (1-1) 同位元素が工業的に製造される場合は他の機関と協同して使用される場合はその名称を併記する。
 - (2-1) 申請者は輸入品には製造元の名称を、発射体、研究用等に応じて適切な名称を記入する。氏名は必ず正名又は仮定使用名称を、かつ認可使用者を記入する。
 - (2-2) 放射線取扱の経験年数、内容その他について記入する。無経験の場合は必ず経験のある先輩又は講師であることを記入する。
 - (3-1) 分派交付希望の場合は希望時期、数量を併記する。無希望の場合は使用量で在る段階で輸入希望の場合は「数量不明」と記入する。
 - (4-1) 題目は使用目的を簡明に述べたものを記入する。
 - (a) 既に実施した同位元素による使用の経験がある場合は題目の後に「経験」と記入する。
 - (4-2) 費用に追加して同位元素が必要となる理由も、出来るれば必要最低限の費用の手立ても併記する。大體数量、射線強度、放射線防護の設備を有する場合は詳細な資機材費の提出を求めることのあるから簡明に記入して下さい。
 - (5-1) 測定設備は定規用、測定用の機材に限り測定管、製法器、型尺、測線の種類、性能等が記入する。
 - (5-2) 測定設備には半導、液体、氏名を記入する。
 - (6-1) 使用される種物、量、装置、放射線の種類、輸送法、注意事項について詳細に記入する。
 - (6-2) 保管責任者は必ず筆名で、所属、地位、氏名を記入捺印する。

下に署名する使用者及びその所属する機関の印は、放射性同位元素の取替の場合はこれに捺し、取替(1) 同位元素先鋒隊は同位元素先鋒隊は進行状況について報告書を出さず、取替(2) 申請書に添付してある取替の目的に同位元素を使用しない事、(3) 審議委員の決定した同位元素の他に取替しない事を行う事を併記し、これに申請書とする。

昭和 年 月 日 主任(代表)使用者
 総理府科学技術行政協議会事務局長 岩井重久の長

* 京都大学教授、工学部土木工学教室

表一 放射性同位元素品目番号

元素名	記号	品目番号	備考
臭素	Br ⁸⁰	Br-82-I	I.U.
カルシウム	Ca ⁴⁵	Ca-45-I	I.U.
"	"	Ca-45-P-2	P.H.S.A.
"	"	Ca-45-P-4	P.C.F.
炭素	C ¹⁴	C-14-P-1	P.BaCO ₃
セリウム	Ce ¹⁴¹	Ce-141-I	I.U.
セシウム	Cs ¹³⁴	Cs-134-I	I.U.
コバルト	Co ⁶⁰	Co-60-I	I.U.
"	"	Co-60-P	P.H.S.A.
Fission Product	"	FP-P-1	Mixed fission Product.*
碘素	I ¹³¹	I-131-I	I.U.
"	"	I-131-P	P.C.F.
鉄	Fe ⁵⁵ , Fe ⁵⁹	Fe-5559-I	I.U.
"	Fe ⁵⁵	Fe-55-P	P.E.
鉛	Pb ²¹⁰	P-32-I	I.U.
"	"	P-32-P-1	P.H.S.A.
"	"	P-32-P-2	P.C.F.
カリウム	K ⁴²	K-42-I	I.U.
ナトリウム	Na ²⁴	Na-24-I	I.U.
"	"	Na-24-P	P.H.S.A.
ストロンチウム	Sr ⁸⁹	Sr-89-I	I.U.
"	"	Sr-89-P	P.C.F.
ストロンチウム、 イットリウム 酸	Sr ⁹⁰ Y ⁹⁰	Sr:Y-90-P	P.C.F.
"	硫	S-35-I	I.U.
"	"	S-35-P-1	P.C.F.
"	"	S-35-P-2	P.H.S.A.
イットリウム	Y ⁹⁰	Y-90-I	I.U.
"	"	Y-90-P	P.C.F.
亜鉛	Zn ⁶⁵	Zn-65-I	I.U.
"	"	Zn-65-P-1	P.H.S.A.
"	"	Zn-65-P-2	P.C.F.

註) 備考欄中の記号は

I.U.: Irradiated Unit

P.H.S.A.: Processed, High Specific Activity

P.C.F.: Processed, Carrier Free

の略号で I.U. は所子で製造された粗製品, P.H.S.A. 及び P.C.F. はこれを化学的に処理して純度を高め, P.C.F. は同位元素を全く除いてあるものをいう。Tracer としては普通 I.U. を使用して十分なことが多いが、化学的濃度等が問題になるときは P.H.S.A. さらには P.C.F. が使用しなければならぬ。

* 強硝酸中の崩壊産物

の量があまり多いと、自己吸収が生じて、正確な放射エネルギーを表わさないから 200 mg 以下の試料を測定する。そのために、試料の重量、体積を減らすように種々の操作を加える（たとえば燃焼に対して安定ならば灰化する）。またその放射能があまり強烈ならば、GM 管の寿命を縮めるから、試料を分割するか、あるいはアノードと試料の距離をはなせばよいが、計数結果を比較する場合はこの距離の変化に注意しなければならない。

液体の場合：溶存している RI が 100°C 程度に熱しても気化しない物質であれば、蒸発固乾して測定装置にかける。この場合濃縮にほぼ注意しないと器壁などに放射性物質が付着しやすいから、うすい酸で器壁を洗い洗液を試料に加えねばならない。この方法は濃縮に手間がかかるので、塩化アンモニウム、明パンと塩化バリウムなどの凝集剤を加えて Floc を作り、水

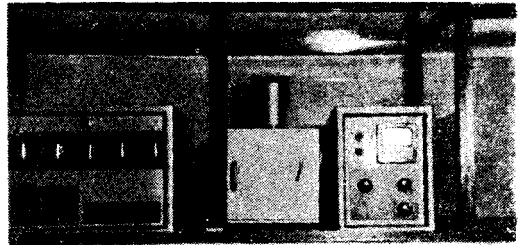
中の放射性物質を吸着させて固形化する方法がある。

加熱すれば気化するような物質は液状のまま放射能を測定する。これには、円筒形容器、シャーレなどに試料水を入れて、外部から放射能をはかる方法と、液浸型 GM 管を容器の中に直接浸ける方法とがある。

(2) 測定 GM 計数装置は、普通、GM 管をおさめた測定台と、これを作動させる高電圧電源部、および GM 管に生じたパルスを計数する部分とよりなる (写真一)。

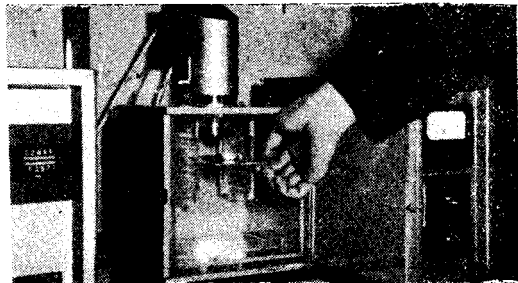
写真一 GM 計数装置

右：電源および高電圧電源部 中央：GM 管および測定台 左：計数部



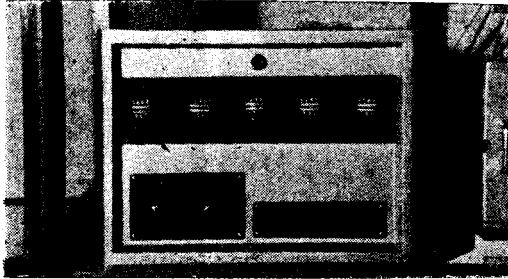
簡易測定ならば Survey Meter などを用いて GM 管の End-window を試料に向け、生ずるパルスの音をレシーバーで聞か、レートメーターの読みをとる。定量的には 10 進法、または 2 進法の計数装置を組合わせた機械を使用する。一般に、測定台には試料皿をのせる板をさし込む数段の棚が設けてあるか、または GM 管を自由に上下できるから、試料と GM 管の End-window との距離を適当に変えることができる (写真二)。

写真二 測定台および試料投入



放射能の計数にあたっては、放射線強度の大小により 1 回の計数時間を調節するが、普通は 1 試料 1 回 10 分間程度とし、これを二、三回繰返す。一例として、A, B, 2 個の試料を計る場合、始めに自然計数、次に A, B、そしてまた自然計数という順に、おのおの 10 分間ずつ計数し、これを 3 回繰返せば、計数実時間 90 分間で全計数を終えることができる。しかし、普通自然計数の誤差は、すべての試料の計数値に影響をおよぼすため、自然計数の回数を増やすことが好ましく、特に試料の放射線強度が弱い場合には、試料 1 個ごと

写真-3 計数部 (10進法5桁の新装置)



に自然計数をはさんだ方がよい。自動試料交換装置 (Automatic Sample Changer) を用いる場合には、この点を考慮して試料を配置しておかねばならない。次に計数結果の整理法を説明すると次のようである。

(3) 測定値の整理 少量の放射性物質であつても、それを構成する原子の数は非常に多い。従つてこれから放出される放射能が、単位時間内にある計数値となることは、全く任意かつまれとなり、その確率は Poisson 分布に従うと考えられる。ゆえにこの計数についての平均値と標準偏差は、それぞれその計数値、およびその平方根となるから、いま x_i, μ_i を自然計数を含めた t_i 分間の測定計数値、およびその真値; x_0, μ_0 を t_0 分間の自然計数の測定値、およびその真値とすると、

$$x_i = \mu_i \pm \sqrt{\mu_i}, \quad \therefore \frac{x_i}{t_i} = \frac{\mu_i}{t_i} \pm \frac{\sqrt{\mu_i}}{t_i}$$

$$x_0 = \mu_0 \pm \sqrt{\mu_0}, \quad \therefore \frac{x_0}{t_0} = \frac{\mu_0}{t_0} \pm \frac{\sqrt{\mu_0}}{t_0}$$

しかるに、崩壊率 Z は、 $x_i/t_i - x_0/t_0$ であるから、誤差伝播の法則により、

$$Z = \left(\frac{\mu_i}{t_i} - \frac{\mu_0}{t_0} \right) \pm \sqrt{\left(\frac{\mu_i}{t_i} \right)^2 + \left(\frac{\mu_0}{t_0} \right)^2} = \bar{Z} \pm r \quad \dots\dots\dots (7)$$

真値 μ_0, μ_i は実際には推定できないから、その代りに近似的に x_i, x_0 を用いて Z を計算する。

次にそれぞれある一定体積の未処理水と処理水とを、いずれも t 分間測定し、自然計数を控除してそれぞれ式 (7) により \bar{Z}_A, \bar{Z}_B が求まつたとする。この処理過程の放射能に対する処理効率 \bar{f} (%) と、その標準偏差 R (%) とは、 $f = (1 - Z_B/Z_A) \times 100$ の一般形において、 $r_A = \sqrt{Z_A/t}, r_B = \sqrt{Z_B/t}$ の関係を誤差伝播の法則に用いると、

$$f = \left\{ \left(1 - \frac{Z_B}{Z_A} \right) \pm \frac{1}{t} \frac{Z_B}{Z_A} \sqrt{\frac{1}{Z_A} + \frac{1}{Z_B}} \right\} \times 100 = \bar{f} \pm R$$

となる。表-2 は、緩速砂濾過法によつている某浄水場の原水と濾過水の放射能測定結果について、以上の計算を例示したものである。

表-2 某浄水場における原水、および濾水の放射能測定結果

(昭和 29 年 5 月 18 日、各試料 2 l につき)
(京大土木工学科衛生工学研究室の測定による)

	(I)		(II)	$\bar{Z}_B/\bar{Z}_A = 0.233$
	自然計数	試料A (原水)	試料B (濾水)	
① 全計数 x	747	618	526	$\sqrt{1/\bar{Z}_A + 1/\bar{Z}_B} = 0.938$
② 計数時間 t	30	20	20	
③ x/t	24.9	30.9	26.3	$\bar{f} = (1 - \bar{Z}_B/\bar{Z}_A) \times 100 = 76.7$
④ $\bar{Z}(\text{cpm}) = (I) - (II)$		6.0	1.4	
⑤ \sqrt{x}	27.3	24.8	22.9	$R = \{1/t \cdot \bar{Z}_B/\bar{Z}_A \sqrt{1/\bar{Z}_A + 1/\bar{Z}_B}\} \times 100 = 0.011$
⑥ \sqrt{x}/t	0.91	1.24	1.15	
⑦ $(\sqrt{x}/t)^2$	0.89	1.55	1.32	除去率 f (%) = $\bar{f} \pm Z = 76.7 \pm 0.01$
⑧ $r^2 = (I) + (II)$		2.44	2.21	
⑨ r (標準偏差)		1.56	1.48	
⑩ 計数結果 ($Z \pm r$) cpm		6.0 ± 1.6	1.4 ± 1.5	
⑪ $1/\bar{Z}$		0.166	0.714	

3. 上下水道への応用

(1) 沈澱池、混和池の静常度 沈澱池、混和池の流入端で一定濃度 C_0 の Tracer Cloud を流入させ、その下流側での拡散度から池の静常度を知らんとする場合、Tracer 自身に自己減衰があれば次の関係がある。

$$\frac{\bar{C}}{C_0} = \left(1 - \frac{kT}{N} \right)^{-N}$$

ただし、 \bar{C} は下流断面の平均濃度、 C_0 は入口濃度、 k は $C = C_0 \exp[-kt]$ における常数、 T は理論的滞留時間である。上式中の N は混合の度合を示す指数で静常度数 (Number of Quiescence) とよばれ、Time-Concentration Curve と上式とからこの N を求めて比較することができる。こうした原理は、生化学的酸素要求量の高い汚水を流入させたような場合にも応用できるわけであるが、例えば Tracer として I^{131} などの RI を用いると、食塩や染料のように大量を要せず、密度流をおこすおそれもなく、また、計数によつて測定しうるために、正確、迅速に解析できるなどの利点がある。これに関しては、H.A. Thomas, Jr. の論文がある。

また、この種の研究では、合田によつて行われた次のような解析法もある。すなわち Tracer Cloud が平均流と同じ速さで動き、かつ x, y 方向に拡散が生ずるならば、拡散の方程式

$$\frac{\partial r}{\partial t} = -kr - u \frac{\partial r}{\partial x} + \epsilon \frac{\partial^2 r}{\partial x^2} - \epsilon \frac{\partial^2 r}{\partial y^2}$$

を適当な境界条件を与えて解けばよく、activity r の原点からの拡がりを知れば稀釈の程度がわかるわけである。一例として上式の右辺第 2, 4 項を除外し、

$$x=0 \text{ で } \frac{\partial r}{\partial x} = 0 \text{ ならば、}$$

$$r = \sum_n A_n \cos \alpha_n x [\exp - (k + \alpha_n^2) t]$$

の形となる*。

(2) 地下水調査 地下水の流速, 流向, 土壌の透水係数などは従来やはり食塩濃度法や Fluorescence 法等によつていたが, Tracer としてやはり RI を用いると便利である。この場合半減期のなるべく短かいものがよい。とくに浅層の地下水であれば, 地質, 吸収度がわかつていけば, 流動深さも推定できるから, 電気探査の代用とすることもできる。これに関連してアースダムなどの漏水経路探査, 漏水量の測定にも応用されている。現在までの資料では, Co^{60} や Sr^{90} を用いたものが多いが最近 Tritium (H^3) なども考慮されているようである。

(3) 分岐管の流量配分 管路網で, ある1つの分岐点をとり, 流入側で RI を Tracer として与えると, Tracer の activity は流量配分率に従つて各分岐管に配分されるから, 管外からの測定で一応流量配分率を知りうるが, 管径, 肉厚が問題である。

(4) その他 凝集, 沈殿などの浄水機構の解明に種々応用方面があり, 例えば凝集沈殿の模型実験で, 放射能を与えた一定粒径の粒子からなる粉末を原水(清澄水)中に feed し, 凝集剤を加えたり, あるいは加えぬ場合につき沈殿上澄水の activity を調べれば, 浄化効率を正確に知ることができ, 従来の蒸発乾固, 秤量にもなる繁雑さと, 不正確さをさけることができよう。いずれにしてもこの種の実験の多くは, Tracer 実験と, 除染実験とを兼ねしめうる点に重要性があり, こうした意味でも実施に際しての環境の安全保障が先決であつて, 公共水に影響をおよぼす実験では特に廃水, 廃物の始末について, 各種許容限界値に関する厳密な検討, 考慮が払われねばならない。

なお以上のほかに, 水質に関する化学, 特に生化学, 生物学上の諸問題についての Tracer としての役割はきわめて大きく, γ 線による滅菌などについても興味ある研究が行われている。

4. その他土木工学の諸問題における応用

RI の応用方面は非常に広いが, 土木工学上の諸問題に対しても逐次応用方面が開拓されつつある。それらは主として RI の Tracer としての特性を応用するものと, RI の放射線の透過力を応用するものであり, おもなものをあげると次のようである。

(1) Tracer としての利用 海岸, 河川における漂砂, 流砂の移動, 摩耗状態調査には, 放射性物質を含有または内包した, 均質のものを用いて追跡を行う

ことができる。一般に他の利用実験に比し多量の RI を要するようであるが, わが国でもすでに北海道沿岸の漂砂移動などに応用されている。また, 土壌間隙水の移動について RI が Tracer 実験に供しうることは前述地下水の問題で触れたが, 土壌中でのイオン交換現象は, RI の種類を適当に選択することにより, 定量的に説明が可能である。なおまた, 浮子や色素, 食塩の代りに RI が開水路, 管路の流速測定に供せられる。その場合の利点は, 使用量が少なくてすむことで, 測定可能な限界は RI の種類によつて変るが, たとえば P^{32} ならば化合物の形式にかかわらず放射性 P の量が 10^{-16} ppm 以上になるように Tracer を使用すればよく, I^{131} なら 10^{-17} ppm, いずれの場合でも $10^{-16} \sim 10^{-11}$ ppm もあれば十分である。

(2) 放射線の透過力を応用するもの 強力な γ 線源 RI を X 線源の代りに用い, 各種材料の非破壊試験が行われている。まず, γ 線オートグラフィ (γ -Ray autography) は, γ 線源を用いた放射線写真により, 橋桁, 水圧鉄管, 鉄道レール, 各種構造物の溶接部等の内部欠陥を発見しようとするものである。次に金属のひずみを測定するには, ガス体の RI を用いこのガスが応力をうけた場所を拡散して通過するところから, ひずみを生じている場所, その程度を知ることができる。なおまた, 積雪計や雨量計に应用される場合がある。すなわち, γ 線源をあらかじめ地上におき, 上方に γ 線を放射させ, 積雪や降雨による γ 線の吸収減少を測り, これを適当な sign に代えて基地におくり, あらかじめ用意された計数量との関係曲線によつてその量を知る方法で, これは井戸やタンクの自記水位計にも応用される。同じ原理を応用した厚み計は他の工業部門で大いに利用されている。

その他の応用方面は現在ますます拡張されつつあるが, 要するに従来の実験で不可能視された点を可能ならしめ, あるいは, 従来の方法よりも容易, 廉価という目安があれば, この種の研究実験は大いに発展させる必要がある。ただその場合, 3. の末尾でのべたごとく, 環境の安全に対する周到な顧慮も欠くと, 思わぬ不幸, 損害を招くおそれが多分にあるから, 防護施設が完全でなかつたり, 公共に危害を及ぼすことを完全に防ぎ得ないならば, 上記のような有意義な実験といえども実行は見合わすべきである。したがつて外部照射に対する防護, あるいは廃水, 廃物や排気の処理の問題は, 何よりも先に検討されねばならない。これはきわめて重要な研究課題であつて, すでに述べた本講座第II講を参照されたい。

* 岩井重久・合田健: “上下水道におけるトレーサーとしての利用について”, 応用物理学会第13回講演会(昭和29年11月)