ISÓTOPO TRAZADOR, TECNOLOGÍA Y APLICACIONES

Erick Grudner Carranza*

Resumen

En el desarrollo subsiguiente del presente artículo, se describen ejemplos que establecen un marco referencial, sobre los procedimientos tecnológicos utilizados para producir trazadores isotópicos artificiales y sus aplicaciones más importantes y urgentes. La ejemplificación considerada permite concluir que la transferencia de esta tecnología es factible.

PALABRAS CLAVE: Isótopo trazador. Partículas subatómicas. Reactores nucleares. Ciclotrón. Métodos químicos de separación. Aislamiento de isótopos. Detectores de señales radiactivas. Tecnología nuclear.

Abstract

In developing this article, examples that establish a reference framework for technological processes used in the production of artificial isotopic tracers and their most important and urgent applications are described. Considered modeling leads to the conclusion that this technology transfer is feasible.

KEYWORDS: Isotope tracer. Subatomic particles. Nuclear reactors. Cyclotron. Chemical separation methods. Isolation of isotopes. Radioactive detectors signals. Nuclear technology.

Resumo

No desenvolvimento deste artigo, exemplos que estabelecem um quadro de referência para processos tecnológicos utilizados na produção de marcadores isotópicos artificiais e suas aplicações mais importantes e urgentes são descritos. Modelagem considerada conduz à conclusão de que essa transferência de tecnologia é viável.

PALAVRAS-CHAVE: Tracer do isótopo. Partículas subatômicas. Reatores nucleares. Ciclotrão. Métodos de separação química. Isolamento de isótopos. Sinais detectores radioativos. A tecnologia nuclear.

Article history: Received 01 october 2015. Style revision 06 october 2015. Accepted 12 october 2015

INTRODUCCIÓN

El término *isótopo,* se utiliza para distinguir en un mismo elemento químico, abundancias relativas, diferenciadas por la cantidad de partículas *neutrones*[1] que tienen en sus núcleos atómicos. Estableciendo por consecuencia, que estas abundancias relativas exteriorizan las mismas propiedades químicas, tienen el mismo *número atómico*[2], y diferente *número másico*[3].

El descubrimiento de los isótopos, tiene un punto de partida muy importante en los estudios de los rayos positivos[4] (Thomson, J.J., 1912), posteriormente el trabajo para detectar y estudiar los isótopos se intensificó con el desarrollo del espectrómetro de masas (Aston, W.F., Dempster, J. A., 1919) (Soddy, F., 1921).

Al presente se tiene evidencias concretas de alrededor 280 isótopos estables (no radiactivos), pertenecientes a la mayoría de los elementos en estado natural, constituidos por una mezcla de dos o más isótopos, que determinan la *masa atómica química* de un elemento a través del promedio de las masas atómicas individuales, o números másicos, de sus isótopos. La excepción corresponde al: berilio, aluminio, fósforo, sodio, escandio, manganeso, cobalto, flúor, arsénico, Itrio, niobio, rutenio, iodo, cesio, praseodimio, terbio, holmio, tulio, bismuto, torio, protactinio, oro. Representados por solo una cantidad de nucleones en la estructura nuclear del elemento. A partir del elemento bismuto (número atómico 83) y en adelante, si la relación entre el número de protones y neutrones no es adecuada para alcanzar la estabilidad nuclear, el *isótopo* se caracteriza como *radiactivo*, es decir, que naturalmente *transmuta* hacia otros elementos y emite además radiaciones de alta energía.

(Rutherford, E., 1919), logró experimentalmente efectuar la *primera reacción nuclear artificial*[5], que cumple con todas las leyes de la radiactividad natural. Cuando por alto impacto de radiaciones alfa[6] sobre el elemento nitrógeno, obtuvo como producto de reacción un isótopo de oxígeno acompañado por una radiación diferente a la aplicada inicialmente, ecuación 1.[7]

$$^{14}_{7}\mathrm{N} + {}^{4}_{2}He \rightarrow (^{18}_{9}F) \rightarrow {}^{17}_{8}\mathrm{O} + {}^{1}_{1}H \qquad \text{Ecuación 1}$$

Reacción que también puede representarse de la forma[8]:

$$^{14}_{7}\mathrm{N} \quad (\alpha, p) \quad {}^{17}_{8}\mathrm{O} \qquad \text{Ecuación 2}$$

(Curie, I., Curie, J., 1934) al impactar con partículas alfa elementos ligeros, descubrieron que éstos presentaban radiactividad y sus actividades seguían la ley exponencial de desintegración, similar a la mostrada por los elementos radiactivos naturales. Uno de lo experimentos consistía en impactar sobre láminas de aluminio partículas alfa.

$$^{27}_{13}\mathrm{Al} + {}^{4}_{2}He \rightarrow \boxed{[^{31}_{15}\mathrm{P}]} \rightarrow {}^{30}_{15}\mathrm{P} + {}^{1}_{0}n$$

$$^{30}_{15}\mathrm{P} \rightarrow {}^{30}_{14}\mathrm{Si} + {}^{0}_{+1}e$$

[1] Partícula sin carga y de masa 1,675 × 10^{-27} kg. Constituyente de todos los núcleos, excepto del hidrógeno. Neutrones libres (que no forman parte de un núcleo atómico), se producen por reacciones nucleares. El neutrón al ser expulsado del núcleo, es inestable, y se desintegra para dar lugar a un protón, un electrón y un neutrino, su vida media promedio es de alrededor 887 segundos (≈ 15 minutos). Pertenece a la familia de partículas nucleares **hadrones**, que interaccionan a través de la fuerza nuclear fuerte. Los hadrones se dividen en: mesones y bariones. **Los bariones** son las partículas más pesadas entre las que se clasifica a los protones, los neutrones e hiperones. Por su momento angular intrínseco o espín pertenece a los **fermiones**, porque según la teoría cuántica, el momento angular de las partículas sólo puede adoptar determinados valores, múltiplos enteros de una determinada constante h o múltiplos semienteros de esa misma constante. Los **fermiones**, entre los que se encuentran los **electrones, los protones y los neutrones**, tienen múltiplos semienteros de h, por ejemplo ± 1/2h o ±3/2h. Los bosones, ejemplo: el mesón, tienen un espín que corresponde a un múltiplo entero de h, como 0 o ± 1. Los fermiones cumplen el principio de exclusión, al contrario de los bosones.

[2] Número de protones en el núcleo atómico.

[3] Suma total de protones y neutrones en el núcleo.

[4] Los experimentos sobre conducción de electricidad en gases a baja presión, originaron el descubrimiento de dos clases de radiaciones: rayos catódicos, procedentes del electrodo negativo de un tubo de descarga, y rayos positivos o rayos canales, procedentes del electrodo positivo.

[5] Las reacciones nucleares son procesos de choque y de conservación de la energía, cantidad de movimiento, momento angular, número de nucleones (protones y neutrones) y de carga.

[6] Las partículas alfa son **núcleos de helio** (2 protones y 2 neutrones confinados en un volumen equivalente a una esfera de 10^{-5} m de radio). Características: partículas muy pesadas, casi 8000 veces más que los electrones y cuatro veces más que el protón. Tienen carga positiva +2, y se desvían por efecto de campos eléctricos y magnéticos. Cuando se los acelera, alcanzan (**c**/20) = 15000 $km.s^{-1}$, ≈ veinteava parte de la velocidad de la luz.

[7] Donde: los sub índices indican **números atómicos** y los exponentes **números másicos**.

[8] La interpretación corresponde a: el elemento nitrógeno por efecto de partículas alfa (*α*), transmuta hacia el Isótopo de oxígeno 17 y emite protones (*p*).

- Durante el impacto alfa, se emiten neutrones que pueden detectarse en una cámara de ionización revestida de boro, el componente inestable: $^{31}_{15}P$ es una etapa intermedia y se desintegra (semivida 2,5 minutos). Produciendo el isótopo radiactivo artificial ($^{30}_{15}P$, *semivida 14,8 horas)* que *emitiendo positrones*[9], finalmente se estabiliza en el isótopo de silicio $^{30}_{14}Si$.

(Fermi, H., y colaboradores 1935) impactando neutrones sobre casi todos los elementos de la tabla periódica, lograron producir una importante cantidad de isótopos radiactivos, validando de esta manera la metodología experimental para producir isótopos radiactivos artificiales.

Este procedimiento de reacción nuclear, reiterado numerosas veces en el transcurso del tiempo ha registrado alrededor de *1200 isótopos radiactivos* [11] con diferentes tipos de radiación emitida y tiempos de inestabilidad o vida media variables, que se obtienen bombardeando con partículas de elevada energía, núcleos y átomos de elementos estables. En la tabla 1, se indican características de las partículas (proyectiles de impacto) utilizados.

Tabla 1
Características de las partículas (proyectiles de impacto)

PARTÍCULA	CARACTERÍSTICAS	SÍMBOLO
Protón libre	Núcleos de hidrógeno, carga positiva, masa :1,00760 (u[10])	$^{1}_{1}H, p$
Neutrón libre	Número atómico 0, número másico 1, no tiene carga, masa 1,00898 u.	$^{1}_{0}n$
Electrón libre	Partícula β Número atómico -1 , número másico 0, tiene carga -1, masa 0,0005488 u.	$^{0}_{1}e, \beta$
Positrón	Antimateria del electrón, número atómico +1 , número másico 0, tiene carga +1, masa 0,0005488 u.	$^{0}_{+1}e$
Partículas alfa	Núcleos de helio, número atómico 2, número másico 4, carga + 2, masa 4,00388 u.	$^{4}_{2}He, \alpha$
Radiación gamma	Fotones de energía *hf*, número atómico y másico 0	γ
Deuterones	Núcleos de deuterio (isótopo natural del hidrógeno), número atómico 1, número másico 2, masa 2,01474 u	$^{2}_{1}H$

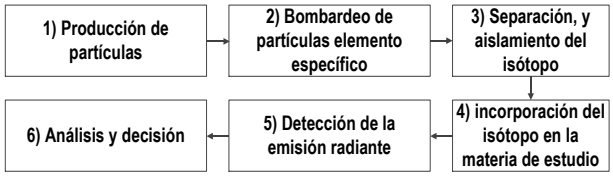
Fuente: Elaboración propia

En los isótopos: tiempos cortos de vida media[11], emisión radiactiva con alta capacidad de penetración e interacción sobre la materia y el mantenimiento de las propiedades químicas de los elementos. Son las causales importantes para su incorporación en diferentes aplicaciones como *trazadores* o señalizadores de la existencia de un agente o de un proceso, que se puede seguir en cantidades grandes o pequeñas, y a nivel molecular o atómico. Midiendo la radiactividad en el caso de los *trazadores radiactivos*, o la abundancia relativa de isótopos estables naturales.

Considerados estos aspectos generales. En el desarrollo subsiguiente del presente artículo, se describen ejemplos que establecen un marco referencial, sobre los procedimientos tecnológicos utilizados para producir *trazadores isotópicos artificiales* y sus aplicaciones más importantes y urgentes.

DESARROLLO

El siguiente esquema establece la secuencia de etapas que se debe seguir para la aplicación de trazadores isotópicos:



Producción de partículas

Ejemplo: PRODUCCIÓN DE NEUTRONES

1) **Reactor nuclear**, fisión espontánea, isótopo más utilizado 252Cf (2,64 años) tasa de neutrones $2x10^{6}\ n.s^{-1}$ por microgramo. La fisión del 253Cf es otra fuente intensa de neutrones de *2,3 MeV*, se utiliza solamente en aplicaciones exclusivas (restricción concesión de licencias).

2) **Activación,** reacción *(α, n)*, la mezcla habitual junta en un contenedor al emisor alfa y el blanco que frecuentemente es berilio:

$$^{4}_{2}He + {}^{9}_{4}\mathrm{Be} \rightarrow {}^{12}_{6}\mathrm{C} + {}^{1}_{0}n,$$ tasa de producción $10^{7}\ n.s^{-1}$.

La fuente más común parte de las reacciones de alfa-berilio producidas en una mezcla de 241Am-Be. El berilio libera un neutrón de aproximadamente *4 MeV* cuando es impactado por una partícula alfa y el americio suministra partículas alfa.

3) **Activación,** reacción *(γ, n),* En un solo recinto se tiene el emisor gamma por ejemplo $^{24}_{11}$Na rodeado por la sustancia de elevada sección eficaz fotonuclear (Be, o deuterio):

$$\gamma + {}^{9}_{4}\mathrm{Be} \rightarrow {}^{8}_{4}\mathrm{Be} + {}^{1}_{0}n \quad Q = -1,67\ MeV \ \textit{(mega electrón voltios)}$$

$$\gamma + {}^{2}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{1}_{1}\mathrm{H} + {}^{1}_{0}n \qquad Q = -2,23\ MeV$$

4) **Aceleración y Bombardeo,** para incrementar la tasa de neutrones de 10^{9} *a* $10^{11}\ n,s^{-1}$ es necesario utilizar aceleradores y bombardeo de blancos (átomos ligeros hidrógeno, deuterio o tritio):

$$^{2}_{1}\mathrm{H} + {}^{2}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{3}_{2}\mathrm{He} + {}^{1}_{0}n \quad Q = -3,26\ MeV$$

$$^{2}_{1}\mathrm{H} + {}^{3}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{1}_{0}n \quad Q = -17,6\ MeV \qquad (\mathrm{eV})^{12}$$

Estas cuatro fuentes, producen neutrones con diferentes tasas de producción y energías, ya sea utilizando solamente reactores, o incrementando la energía cinética de las partículas proyectiles por medio de dispositivos de aceleración.

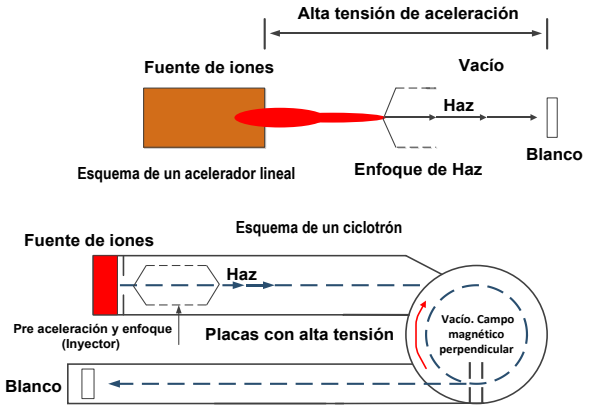
[9] Positrón: partícula elemental de **antimateria** con masa igual a la del electrón y carga eléctrica (+1). (Dirac, P. A. M., 1928) fue el primero en considerar la existencia de la partícula. (Anderson, C., 1932) confirmó experimentalmente su existencia.

[10] Por convención, la unidad de masa atómica (u) es la doceava parte (1/12) de la masa de un átomo de carbono 12, al que se le asigna una masa atómica de 12,000 u.

[11] Ejemplos: isótopos radiactivos artificiales de mayor uso, por sus vidas medias cortas: 131 iodo (8,05 días), 198 oro (2,7 días), 82 bromo (36 horas), tritio (12,2 días), 51cromo (27,8 días), 11 carbono (20,4 minutos), 13 nitrógeno (9,97 minutos), 15 oxígeno (4,07 minutos), 18 flúor (109,7 minutos), 99 tecnecio (6 horas).

[12] Electronvoltio eV, unidad de energía que mide la energía de iones y partículas subatómicas bajo la influencia de grandes aceleraciones, (aceleradores de partículas).
1eV = 1,60207 × 10^{-19} J. Múltiplos: MeV = 10^{6} V, GeV = 10^{9}.
Relación con la masa atómica (mc^{2}) → 1 u = 931 MeV.

Aceleradores de iones: permiten variar la velocidad y energía de *partículas alfa, protones y deuterones*. Los componentes básicos de un acelerador de partículas son: fuente de partículas elementales o iones, tubería al vacío donde las partículas pueden desplazarse libremente, y un sistema para aumentar la velocidad de las partículas. Ver figura 1.

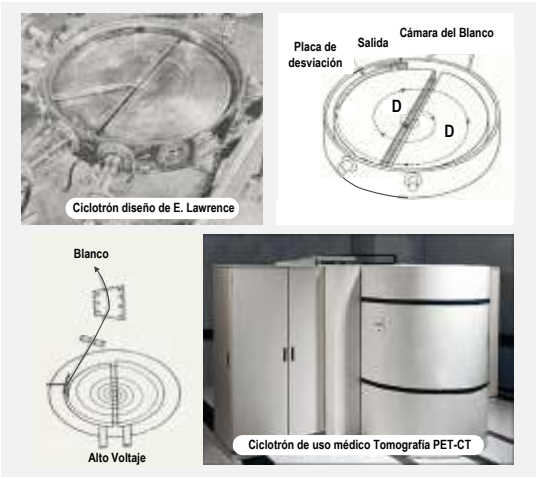


Fuente: Elaboración propia, sobre información [3]

Figura 1: Esquemas simplificados de un acelerador lineal y un ciclotrón

En un acelerador lineal. La fuente proporciona el haz de iones (plasma), un conjunto de *lentes electroestáticas y/o magnéticas* enfocan el haz, que acelerado por alta tensión termina impactando sobre un blanco. En el esquema del *ciclotrón*[13], la variante es la región del campo magnético perpendicular a la trayectoria de las partículas, girando el haz, en cada vuelta los iones se aceleran hasta que, al adquirir la energía deseada, el haz de iones es expulsado e impacta contra el blanco.

Para obtener aceleraciones mayores El dispositivo tiene dos cámaras de vacío huecas, llamadas DES, por semejanza con la letra D. Por medio de un electroimán se crean campos magnéticos fuertes, haciendo que las partículas se desplacen en trayectoria curva. Las partículas cargadas se aceleran cada vez que atraviesan la distancia libre entre las DES. A medida que las partículas acumulan energía, se mueven en espiral hacia el borde externo del acelerador, por donde son expulsadas hacia la cámara del blanco. Ver figura 2.



Fuente: Adaptado de [1], [2], [5]

Figura 2: Disposición que permite obtener aceleraciones mayores.

[13] Con este dispositivo, se alcanzan aceleraciones equivalentes a 40 MeV. Energía suficiente para que el protón pueda penetrar núcleos estables, ser capturado por estos núcleos y generar estructuras inestables que trasmuten hacia otros elementos y emitan radiactividad artificial.

Bombardeo de partículas sobre elementos específicos

La tabla 2, muestra la actividad de varios isótopos producidos para una emisión posterior de positrones (antielectrón). Utilizando un ciclotrón donde las partículas en estado iónico protones y deuterones de diferentes energías, impactan fuertemente sobre los blancos escogidos.

Tabla 2
Actividades de saturación (mCi/μA), Isótopos emisores de positrones mediante diferentes reacciones nucleares

Reacción nuclear	Isótopo	Bombardeo, proyectil utilizado y energía cinética de impacto			
		Protones		Deuterones	
		8*	16*	8*	16*
$^{14}_{7}N$ (p, α) $^{11}_{6}C$	11 Carbono	40	171	-	-
$^{10}_{5}B$ (d, n) $^{11}_{6}C$	11 Carbono	-	-	43	53
$^{15}_{7}N$ (p, n) $^{15}_{7}O$	15 Oxígeno	47	93	-	-
$^{14}_{7}N$ (d, n) $^{15}_{7}O$	15 Oxígeno	-	-	50	72
$^{18}_{8}O$ (p, n) $^{18}_{9}F$	18 Flúor	110	232	-	-
$^{20}_{10}Ne$ (d, α) $^{18}_{9}F$	18 Flúor	-	-	51	69

Referencia: * MeV.
(11 Carbono, vida media 20,4 minutos), (15 Oxígeno, vida media 2,07 minutos), (18 Flúor, 109,7 minutos).

Fuente: [4]

Separación y aislamiento de isótopos

En general, todas las separaciones de isótopos pueden ser efectuadas en una sola fase, por espectrometría de masas. Instrumento que convierte moléculas en iones, y que separa estos iones en función de su proporción de masa y carga.

La separación de los isótopos trazadores, generalmente depende de las propiedades físicas y químicas de éstos:

a) Métodos físicos, aprovecha las variaciones en las propiedades físicas, relacionadas con las diferencias en la masa de los isótopos. Siendo los más frecuentes: *el método de centrifugación, la destilación fraccionada, la difusión térmica, la electrólisis, la difusión gaseosa y la separación electromagnética*.

La separación[14] de enriquecimiento implica una serie de fases. Así, para conseguir una concentración apreciable del isótopo deseado, es necesario volver a separar la fracción enriquecida. Este proceso se realiza normalmente en *cascada* y requiere un gran número de fases. La fracción enriquecida de cualquier fase alimenta la fase siguiente, y la fracción reducida, donde aún se tiene un significativo porcentaje del isótopo deseado, alimenta la fase anterior.

b) Métodos químicos de separación, principalmente aprovechan la diferencia de solubilidad de las sales químicas formadas con los elementos isotópicos, también aprovecha el comportamiento frente a la adsorción, cromatografía[15].

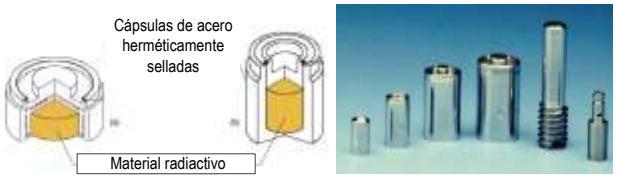
Bajo esta perspectiva, una forma de separación cuando los isótopos producidos tienen vida media muy corta, es la *desintegración en secuencia*, un ejemplo es la cromatografía de elución del par: 99 Mo (obtenido por bombardeo de Mo con deuterones) a 99mTc (vida media 6 horas) sobre una columna de alúmina, donde se adsorbe el 99 molibdato de amonio, y la

[14] Excepto en el método electromagnético de la espectrografía de masas, el procedimiento se efectúa en una sola etapa.

[15] Cromatografía, método para separar sustancias puras de mezclas complejas. depende del principio de adsorción selectiva, sobre materiales adsorbentes.

desintegración radiactiva produce 99mTc, que por elución con suero estéril forma el pertecnetato de sodio $NaTcO_4$. La elución repetida cada 24 horas proporciona un equilibrio útil entre concentración y cantidad de sal radiactiva.

Con relación al aislamiento de isótopos, dependiendo de la naturaleza de la radiación, éstos se encapsulan dentro de estructuras de acero y/o plomo de espesor variable. Aun así, la radiación electromagnética logra atravesar dichas cubiertas con la dosis necesaria para actuar como *fuente radiactiva,* ver figura 3.



Dimensiones: 3 a 12 mm de diámetro por 5 a 15 mm de largo. Actividad típica de las fuentes: 137Cs: 370 **MBq** (10 **mCi**) a 370 **GBq** (10 **Ci**); 60Co: 37 **MBq** (1 **mCi**) a 37 **GBq** (1 **Ci**). **Aplicación: calibración industrial y medición de la densidad del suelo.**

Becquerel (Bq) es la actividad de una fuente radiactiva en la que se desintegra un núcleo por segundo en un instante dado. 1Ci = 3,7 10^{10} Bq. Múltiplos o submúltiplos de estas unidades, como Megabecquerel (**MBq**), Gigabecquerel **(GBq)** o milicurie (**mCi**).

Fuente: [5]

Figura 3: Fuentes gamma de alta energía 137Cs y 60Co

Incorporación del isótopo en la materia de estudio

Los trazadores isotópicos, son incorporados en un determinado sistema para señalar la evolución temporal y/o espacial de determinado proceso químico, físico, biológico o industrial, a través de su detección o medición, ofreciendo posteriormente información sobre el sistema a un observador externo.

Para que un isótopo radiactivo artificial sea utilizado como trazador, se debe considerar los siguientes aspectos:

- La solubilidad, capacidad de absorción y adsorción, etc., deben ser compatibles con las características del sistema en estudio.
- Las radiaciones que emite y su energía también serán las adecuadas. Puede ser emisor α, β, y/o γ según su uso, y podrá atravesar espesores delgados o gruesos de los materiales del sistema. El tipo de detector a emplear será elegido en función de esto.
- La cantidad de trazador a utilizar, así como la protección radiológica y el costo, debe ser evaluados para optimizar el estudio o aplicación.
- Debido la necesidad de no perturbar al sistema en estudio, es necesario que la masa que actúa como trazador sea muy pequeña.

Detección de la emisión radiante

La detección de emisiones radiantes toma en cuenta los efectos que produce sobre la materia. Para este propósito utiliza instrumentos sencillos, complejos e ingeniosos:

Instrumentos de ionización:

Cámara de ionización (Contador Geiger-Müller): Las partículas o radiaciones ionizantes al ingresar en esta cámara, ionizan el gas circundante al sitio de los electrodos, creando una corriente que se registra y amplifica mediante circuitos electrónicos.

Contador de centelleo: Detecta la ionización provocada por partículas cargadas que se desplazan a gran velocidad a través de ciertos sólidos y líquidos (plásticos, sulfuro de cinc, ioduro de sodio, o antraceno) generando destellos de luz visible (luminiscencia). La detección de centelleo mejorada, sitúa el material de centelleo delante de un tubo fotomultiplicador (célula fotoeléctrica), así, los destellos de luz se convierten en pulsos eléctricos que se los convierte, registra y amplifica electrónicamente.

Detectores de trazas:

Cámara de niebla en un campo magnético fuerte: La Cámara se llena con aire desprovisto de polvo y sobre saturado en vapor de agua. En estas condiciones como el exceso de vapor no puede condensarse, cualquier partícula radiactiva que atraviese la cámara, deja una traza, de partículas ionizadas sobre las cuales se condensa el exceso de vapor de agua, visibilizando las trazas positivas y negativas que por efecto del campo magnético se curvan en sentidos opuestos. Midiendo el radio de curvatura de las trazas puede determinarse la velocidad de las partículas, Caracterizando el grosor de las líneas por el peso de las partículas: (α = trazas gruesas y densas. p = trazas menos gruesas, e = trazas muy finas e irregulares).

Cámara de burbujas en campo magnético y baja temperatura: Mantiene hidrógeno líquido con temperatura cercana al punto de ebullición, al reducirse la presión, disminuye el punto de ebullición, pero durante un instante, el líquido no hierve, sólo sí, se introduce alguna perturbación, el ingreso de partículas a la cámara hace la perturbación, por lo tanto a lo largo de la trayectoria dejada por las partículas se forman minúsculas burbujas. Registrando fotográficamente esos instantes, se puede observar el recorrido de las partículas y medir su energía. Las cámaras de última generación (cámaras de proyección temporal) pueden medir tridimensionalmente las trazas incidentes, además cuentan con detectores complementarios para registrar otras partículas.

Cámara de destellos (chispas) computarizada: Debido a la disposición de los electrodos en forma alternada positivos y negativos, cuando se produce la ionización del gas por efecto de las partículas, entre estos electrodos y a lo largo de la trayectoria se producen chispas. El instrumento puede regular la disposición de los electrodos para sólo registrar la presencia de alguna partícula de interés.

Otros tipos de detectores:

En los semiconductores, los pares formados Electrón-hueco por defectos electrónicos, cuando las partículas con carga hacen contacto, aumenta momentáneamente la conducción eléctrica, lo que permite detectar la presencia de la radiación.

Detectores de neutrones: Los neutrones no pueden detectarse con ningún detector, no obstante, se puede detectar su presencia de manera indirecta, a partir de las reacciones nucleares que tienen lugar cuando colisionan con otros núcleos. Los neutrones lentos (térmicos) producen partículas alfa detectables al colisionar con átomos de boro. (Cámara de efecto gamma).

Para impresionar placas fotográficas, es necesario derivar la acción de los neutrones hacia otra radiación. Láminas de cadmio y gadolinio actúan como medio de conversión. Estos elementos capturan intensamente los neutrones, emitiendo radiación gamma que fácilmente puede impresionar la placa, obteniéndose al igual que con los rayos x una imagen. (neutrografía)

Análisis y decisión

Detectada la inestabilidad isotópica (radiación), el sistema químico, físico, biológico o industrial en estudio; proporciona información y datos al observador externo, que generalmente sirven para el diagnóstico, el análisis y la toma de decisiones.

Aplicaciones: El cuadro 1, muestra algunos procesos estudiados aplicando isótopos trazadores en distintas áreas.

Cuadro 1
Procesos estudiados aplicando isótopos trazadores en distintas áreas

Ciencias Básicas: Difusión. Cinética y equilibrio químico. Mecanismos de reacción y transferencia. Cinética electroquímica.

Medicina: Diagnóstico y tratamiento de enfermedades. Estudios metabólicos y/o fisiológicos. Medición de tiempos y volúmenes de circulación de fluidos biológicos.

Hidrología: Dinámica de sedimentos. Estudios de cuencas hídricas subterráneas y de superficie.

Biología: Ciclos metabólicos. Reacciones de intercambio. Estudios de incorporación y traslocación.

Agronomía: Rendimiento de fertilizantes. Erosión de suelos. Mediciones de permeabilidad y humedad de suelos.

Industria petrolera: Interconexión de yacimientos. Perfilaje de pozos. Determinación del volumen y tamaño de los yacimientos. Explotabilidad económica. Dinámica de oleoductos.

Industria en general: Medición de tiempos de proceso. Trazado de movimientos de fluidos. Obstrucción. Interconexión. Pérdidas en tuberías. Corrosión y desgaste. Determinación de volúmenes, masas y caudales.

Procedimientos innovadores de aplicación de trazadores isotópicos

- **Medicina nuclear:** El (*18 F vida media, 1,8 horas*) es un isótopo artificial emisor de positrones (emisor $\beta+$), que puede obtenerse por medio de un ciclotrón a partir de *18 O* bajo la forma química $H_2{}^{18}O$, se ha formalizado su aplicación en la *Tomografía de Emisión de Positrones PET*, para diagnósticos oncológicos, neurológicos y cardiológicos. Su distribución por el organismo permite diagnosticar tumores, perfusión cerebral o cardíaca principalmente.

- **Detección de tejidos oncológicos:** Aproximadamente 80 % de las detecciones se efectúa con el isótopo (*99m Tc vida media 6 horas*), el cual sirve para marcar un fármaco que se fija metabólicamente en un órgano o tejido específico, pudiéndose observar y cuantificar desde el exterior con un neutrograma.

- **Biología:** Ciclos biológicos. El marcado de compuestos metabólicos con tritio, permite el seguimiento de determinados ciclos, ejemplo ciclo de Krebs de la respiración.

- **Estudio de nutrientes vegetales:** Compuestos marcados isotópicamente pueden revelar información sobre la dinámica de fijación de *56 Fe* en agregados de suelos, *32 P* fertilizantes fosforados, *45 Ca, 42 K*, etc.

- **Industria del petróleo:** Perfilaje- relevamiento de la porosidad de las paredes del pozo por radiación gamma (*137 Cs, vida media 5 años, actividad 100 GBq*) con los materiales que conforman las paredes del pozo.

  Por otra parte se introduce al pozo agua que contiene tritio. A lo largo del tiempo se obtienen muestras de los pozos adyacentes, y midiendo la radiactividad por *centello líquido* se establece la conectividad ente los pozos.

- **Industria del cemento:** La determinación del tiempo de transporte en un horno rotatorio, se puede medir utilizando *140 La y 24 Na*, marcando la carga que ingresará al horno con estos dos isótopos en forma de óxido de lantano y carbonato ácido de sodio. Ambos isótopos emiten radiación gamma de alta energía pero distinguible (*140 La 1596 keV, 24Na 1369 keV*). De manera que desde el exterior del horno se obtiene información acerca de las distintas etapas de cocción donde interviene elementos similares al lantano y sodio en la fase fija.

CONCLUSIONES

De acuerdo con el esquema de inicio, el estudio teórico-experimental de los isótopos radiactivos artificiales, en su aplicación de trazadores, implica la conjunción de materia, energía, dispositivos, instrumentos, procedimientos y protocolos de protección que sistemáticamente han desarrollado una tecnología nuclear estrechamente relacionada con la producción de elementos de búsqueda de información, desde el ámbito atómico y devuelta enriquecida en forma de señales que permite el análisis y la toma de decisiones sobre los resultados obtenidos.

La ejemplificación de algunos de los otros procesos de estudio y efectos que producen los trazadores en su interacción con la materia y energía nuclear, sugiere que la transferencia de esta tecnología es factible.

BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

[1] Bromley, A., 1965, Concepto moderno del átomo, Traducción: Bosch, H., Del Llano, M., Departamento de Asuntos Científicos Unión Panamericana − OEA, monografía nº 1, p: 10, Washington − USA,

[2] Olderberg, O, 1966, Introducción a la física atómica y nuclear, Ed. Mc Graw Hill, Tercera edición, p: 282, Madrid – España,

[3] CNEA Comisión Nacional de Energía Atómica, 2010, La tecnología nuclear, producción de radionicleídos, Ed. CNEA, Buenos Aires – Argentina,

[4] Radiación ionizante, Capítulo 2, www.tesisenred.net/bisstream/handle/10803/6602/04Gcr04de11.pdf?...4. Consulta: 23/09/15,

[5] Villanueva-Meyer, D., PET-CT: Principios generales, Galenus 01 www.galenusrevista.com/-Galenus-01.hml, Consulta: 20/09/15,

[6] OIEA Organización Internacional de Energía Atómica, 2009, Colección de seguridad física nuclear del OIEA nº 5, identificación de fuentes y dispositivos radiactivos, ISBN 978-92-0-300209-7, Ed. OIEA, Viena − Austria,

[7] Gennaro, A. R., 2003, 29 Nociones fundamentales de radioisótopos de uso médico, Remington Farmacia Vol. 1, ISBN 950-06-1866-4, Ed. Médica Panamericana, Madrid – España,

[8] Iturbe, G. JL., 2001, Fundamentos de radioquímica, Universidad Autónoma de la ciudad de México, ISBN 968-835-566-6, Toluca – México,

[9] Rothschild, S., 1966, Advances in tracer methodology, Vol.1, Ed. New England Nuclear Corporation, USA,

[10] Ferrer, S. A, 2006, Física nuclear y de partículas, Capítulo 5 medios para detectar radiaciones ionizante, Ed. Universita´s de Valencia, ISBN 13-978-84-370, Valencia – España,

[11] Lederer, C. M., et al, 1978 Table of isotopes, Séptima edición, Ed, John Wiley and Sons, New York – USA.

(*), Químico Industrial, Editor Revista Tecnológica, Facultad de Tecnología – UMSA.