



## Uso de cerámicos de litio para la producción de energía:

### II) Los reactores de fusión nuclear

**Heriberto Pfeiffer Perea**

*Instituto de Investigaciones en Materiales, Universidad Nacional Autónoma de México  
Circuito exterior s/n, Cd. Universitaria, Del. Coyoacán, CP 04510, México DF, México.*

*Correo electrónico: [pfeiffer@iim.unam.mx](mailto:pfeiffer@iim.unam.mx)*

#### RESUMEN

Este artículo es el segundo trabajo en donde se presenta la aplicación de cerámicos de litio en procesos de producción de energía. En un trabajo previo se mostró la aplicación de cerámicos de litio dentro de las baterías de litio. En este segundo texto se presentan la posible utilización de cerámicos de litio dentro de los reactores de fusión nuclear. En este trabajo se describen los diferentes cerámicos de litio usados para la generación de tritio, mediante una fisión nuclear, sus ventajas y desventajas, así como sus características, propiedades y perspectivas.

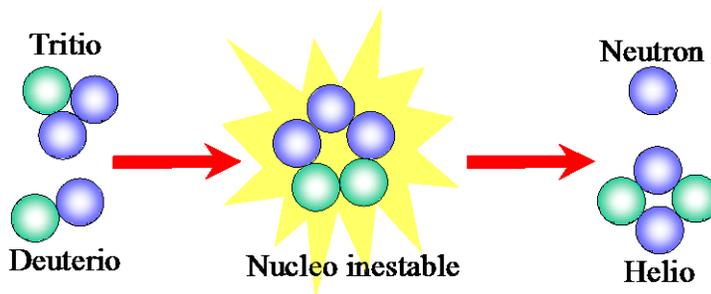
*PALABRAS CLAVE: Cerámicos; Energía nuclear; Litio; Reactores de fusión nuclear*

Los cerámicos de litio son aplicados en muy diferentes campos de la ciencia. Sin embargo, uno de los principales campos de investigación de estos materiales están íntimamente relacionados con la producción de energía nuclear. Algunos cerámicos de litio, tales como, el óxido de litio ( $\text{Li}_2\text{O}$ ), el aluminato de litio ( $\text{LiAlO}_2$ ), los silicatos de litio ( $\text{Li}_2\text{SiO}_3$ ,  $\text{Li}_4\text{SiO}_4$  y  $\text{Li}_2\text{Si}_2\text{O}_5$ ), y los zirconatos de litio ( $\text{Li}_2\text{ZrO}_3$  y  $\text{Li}_8\text{ZrO}_6$ ), se han propuesto como posibles materiales generadores de tritio para el funcionamiento de los reactores de fusión nuclear.

Los reactores de fusión nuclear podrían ser una solución a los problemas de abastecimiento de energía del futuro. Los indicadores actuales muestran que en 40 ó 50 años, el costo de la electricidad ambientalmente limpia, generada a partir de la fusión nuclear, será comparable al costo de la energía producida en los reactores de fisión nuclear o de la electricidad derivada de los combustibles fósiles como el petróleo (D'Haeseleer, 1999). Una de las reacciones más estudiadas para llevarse a cabo dentro de los reactores de fusión nuclear, es la reacción entre un átomo de deuterio ( $^2\text{H}$ ) y un átomo de tritio ( $^3\text{H}$ ) (figura 1). Esta reacción produce una gran



cantidad de energía, 17.59 MeV por cada fusión. Además, esta reacción presenta como ventaja, sobre otras reacciones estudiadas, el hecho de poseer una sección eficaz de fusión más alta a menor temperatura. También, vale la pena mencionar que; la energía producida por una sola reacción nuclear entre un átomo de deuterio y un átomo de tritio, es equivalente a la energía producida mediante el proceso de combustión de cerca de una tonelada de carbón. Además, esta reacción nuclear es la misma reacción que ocurre durante la producción de energía en el sol.



**Figura 1. Reacción de fusión nuclear entre el deuterio y el tritio.**

El deuterio es un isótopo natural de hidrógeno, cuya abundancia en la tierra es de una parte por 6500 partes de hidrógeno. Esta cantidad es suficiente para abastecer los reactores de fusión nuclear durante varios miles de años. Por el contrario, la abundancia del tritio, segundo isótopo del hidrógeno, en la naturaleza es muy baja, aproximadamente una parte por  $10^{20}$  partes de hidrogeno, por ello hay que producirlo de manera artificial.

El tritio es un isótopo radioactivo del hidrógeno, que esta compuesto por un protón y dos neutrones, lo que le da una masa de 3.006 g/mol. El tritio se desintegra por emisión de radiación  $\beta^-_{max}$  con una energía de 0.018619 MeV. Además, este isótopo radiactivo del hidrógeno tiene una vida media de 12.33 años, y al decaer produce un átomo de  $^3\text{He}$ , el cual es un isótopo natural del helio (figura 2).

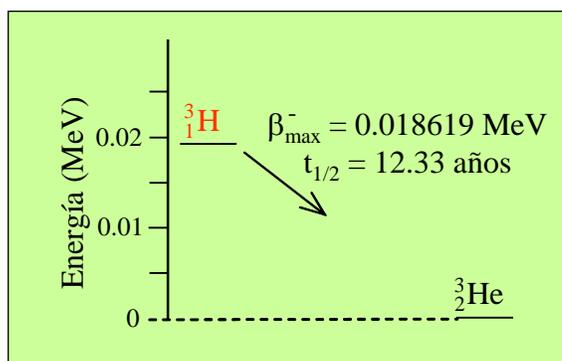


Figura 2. Esquema representativo del decaimiento radiactivo del tritio.

El tritio puede ser producido a partir de la fisión nuclear del litio, tal cual se presenta en las reacciones 1 y 2:



El  ${}^6\text{Li}$  y  ${}^7\text{Li}$  son isótopos naturales del litio, y su abundancia es de 7.4 y 92.6 % en masa respectivamente. Ambas reacciones producen tritio, sin embargo, el  ${}^7\text{Li}$  tiene una sección eficaz de captura de neutrones térmicos,  $n_t$ , muy baja; 0.037 barns, mientras que la misma sección eficaz para el  ${}^6\text{Li}$  es de 953 barns. Resulta entonces razonable pensar que los reactores de fusión nuclear obtengan el tritio a partir de una fuente de litio. Dicha fuente de litio se instalaría dentro del mismo reactor, para aprovechar los neutrones emitidos durante la reacción de fusión nuclear entre el deuterio y el tritio.

Para poder llevar a cabo la reacción de fusión nuclear entre el  ${}^2\text{H}$  y  ${}^3\text{H}$ , los gases se confinan por lo general mediante campos magnéticos, se calientan y se les aplica un campo eléctrico y radiofrecuencias, hasta ionizar las partículas. Como consecuencia, se forma un plasma en el cual se produce la fusión nuclear. Los reactores, entonces, deberán de cumplir con dos condiciones fundamentales para su funcionamiento.

Primero, alcanzar una densidad específica en el plasma de reacción. Se debe calentar a temperaturas del orden de  $10^8 \text{ K}$ , con el objeto de proporcionarle a los átomos suficiente energía cinética, para poder vencer la energía de repulsión coulombica y entonces fusionarse.

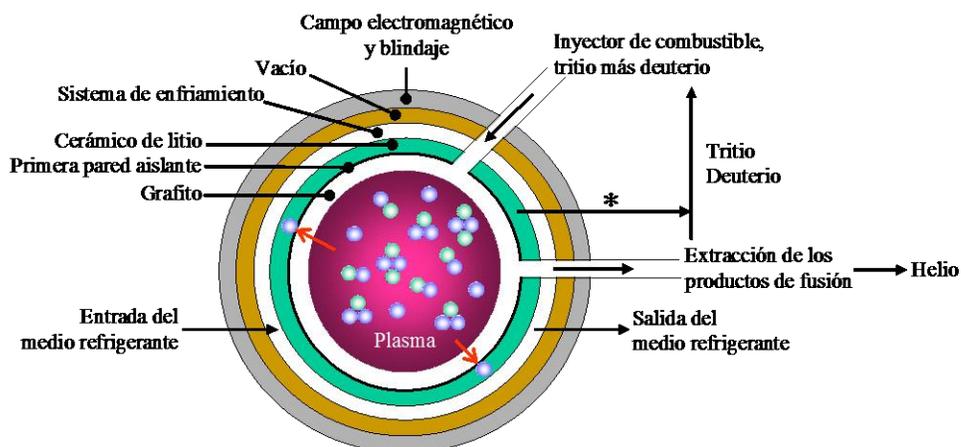
El segundo factor importante que se deberá controlar dentro de un reactor de fusión nuclear, es obviamente el confinamiento del plasma a altas temperaturas durante el tiempo



necesario para que la probabilidad de que las partículas colisionen entre si sea alta. El parámetro de Lawson describe esta situación;  $n\tau \geq 10^{14}$  s/cm<sup>3</sup>. Este parámetro es el producto de la densidad del plasma  $n$ , por el tiempo de confinamiento  $\tau$ . El producto debe ser mayor o cuando menos igual a  $10^{14}$  s/cm<sup>3</sup> para que la energía producida durante la reacción de fusión nuclear en el plasma sea mucho mayor que la energía perdida por radiación térmica y la difusión de las partículas hacia el exterior del plasma.

Uno de los métodos alternativos propuestos actualmente para confinar el plasma, es mediante un sistema inercial. Este sistema consiste en producir el plasma termonuclear utilizando láseres o haces de partículas que se enfoquen sobre esferas microscópicas ( $\approx 1$  mm de diámetro), que contienen el combustible fusible. Este tipo de confinamiento se logra al dirigir diferentes láseres en todas las direcciones alrededor de la esfera. De esta manera, se logra producir plasmas de densidad muy alta a altas temperaturas durante tiempos cortos de aproximadamente  $10^{-10}$  s.

La figura 3 representa la estructura general de un reactor de fusión nuclear. En el núcleo del reactor se encuentra el plasma, que se separa de la primera pared termo-aislante mediante un sistema limitador o divisor a base de grafito. Después, una capa rica en compuestos de litio cubre el núcleo del reactor. Los neutrones, generados por la fusión nuclear en el plasma, difunden hasta esta capa para reaccionar con el litio generando el tritio. Posteriormente, el calor producido por la reacción nuclear se extrae mediante un sistema de refrigeración (este sistema cede el calor en un intercambiador de calor externo que acciona una turbina, produciéndose así corriente eléctrica). Finalmente, el reactor presenta un sistema de vacío y un blindaje electromagnético, cuya función es la de contener las radiaciones emitidas por el plasma, además de aislar térmicamente todo el reactor.





**Figura 3. Esquema de la estructura de un reactor de fusión nuclear. Las flechas rojas indican el proceso de difusión de los neutrones del plasma hacia la zona rica en litio, para reaccionar entre ellos y producir tritio. (\*) indica un sistema de extracción de tritio de los materiales de litio.**

Un reactor de fusión nuclear de 3000 MW necesitará para su funcionamiento 500 g de tritio por hora (Abdou, 1984). Por lo tanto, los materiales cerámicos de litio productores de tritio deberán ser tan eficientes como sea posible. Los primeros estudios sobre materiales generadores de tritio se hicieron entre 1970 y 1979, y se enfocaron al estudio del litio y de sus aleaciones metálicas. Con el tiempo, hubo que descartar este tipo de materiales, debido, en el caso del litio, a su alta reactividad, y en el de las aleaciones metálicas, a que presentan altos índices de corrosión (Bonaf, 1987). A partir de 1980, los estudios se enfocaron hacia ciertos materiales cerámicos de litio, ya que además de producir tritio, estos materiales deben presentar propiedades como estabilidad fisicoquímica a altas temperaturas, compatibilidad con otro tipo de materiales estructurales y una adecuada transferencia de calor (Johnson, 1981; Jonson, 1988; Kummerer, 1991). Estos cerámicos deben ser, además, estables ante la radiación (yang, 1981; Masabumi, 1998). Algunos de los cerámicos más estudiados son el óxido de litio ( $\text{Li}_2\text{O}$ ), el aluminato de litio ( $\text{LiAlO}_2$ ), los silicatos de litio ( $\text{Li}_2\text{SiO}_3$ ,  $\text{Li}_4\text{SiO}_4$  y  $\text{Li}_2\text{Si}_2\text{O}_5$ ) y los zirconatos de litio ( $\text{Li}_2\text{ZrO}_3$  y  $\text{Li}_8\text{ZrO}_6$ ) (Johnson, 1981; Clemmer, 1985; Roux, 1992; Pfeiffer, 1998; Pfeiffer, 2002; Pfeiffer, 2004; Cruz, 2006) En la tabla 1 se presentan algunas de las propiedades de estos materiales.

**Tabla 1**

Propiedades de algunos materiales cerámicos de interés nuclear.

Cerámico	$T_f$ (K)	$\rho_{\text{tot}}$ ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )	$\rho_{\text{Li}}$ ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )	K (W/mK)	Temp. de operación (K)	Solubilidad del tritio
$\text{Li}_2\text{O}$	1706	2.01	0.93	3.4	673-1073	baja
$\text{LiAlO}_2$	1883	2.61	0.27	2.2	723-1473	baja
$\text{Li}_2\text{SiO}_3$	1473	2.53	0.36	1.5	683-1073	Alta
$\text{Li}_4\text{SiO}_4$	1523	2.35	0.54	1.5	583-1223	moderada
$\text{Li}_2\text{ZrO}_3$	1888	4.15	0.33	1.3	673-1673	moderada
$\text{Li}_8\text{ZrO}_6$	1568	2.99	0.68	1.5	623-1253	moderada



$T_f$ , temperatura de fusión;  $\rho_{tot}$ , densidad total;  $\rho_{Li}$ , densidad de litio;  $K$ , conductividad eléctrica, Temp. de operación, intervalo máximo de temperaturas dentro de los cuales los materiales no presentan cambios estructurales.

Se han reportado diversos estudios sobre los materiales cerámicos de interés nuclear. Dentro de estos estudios, los datos experimentales reportados sobre la extracción de tritio varían hasta en seis órdenes de magnitud, debido a factores como la pureza de los materiales, las temperaturas de extracción del tritio, el tamaño del cristal, la morfología del mismo y los problemas de límite de grano entre otros (Ohno, 1985; Johnson, 1999, Pfeiffer, 2000). Por lo tanto, dentro del estudio de los cerámicos de litio de interés nuclear, es necesario realizar un estudio más profundo de los diferentes materiales propuestos.

Al igual que en las baterías de litio, la difusión y extracción del litio, en este caso tritio, son de vital importancia para determinar la eficiencia de un cerámico de litio para producir tritio. Por lo tanto, el estudio de la difusión y de la extracción del tritio en función del tamaño de partícula, así como de diferentes tipos de superficie químicamente modificadas, puede presentar un campo interesante que podría redituarse en mejores rendimientos de extracción de tritio en los cerámicos de litio. Igualmente, es necesario estudiar nuevos materiales que puedan presentar una mayor y más eficiente extracción de tritio.

Así mismo, otro campo interesante de estudio es conocer la estabilidad térmica de los diferentes cerámicos. Por un lado, se debe de estudiar la estabilidad de cada uno de los cerámicos, para establecer el grado de sinterización, así como los parámetros termodinámicos y cinéticos de la descomposición de los materiales a altas temperaturas y bajo el efecto de la radiación. Todos estos factores pueden ser determinantes para seleccionar a un cerámico de litio como una fuente productora de litio. Finalmente, también se debe de estudiar la compatibilidad entre estos cerámicos y los materiales estructurales bajo condiciones severas de temperatura y radiación. Todo esto para tratar de prevenir y evitar daños estructurales dentro de los reactores de fusión nuclear.

## REFERENCIAS

Abdou, M., Hollenberg, G. W. and Johnson, C. E. (1984). Vaporization behavior of lithium oxide: Effect of water vapor in helium carrier gas. *J. Nucl. Mater.* 120: 137-145.



- Bonal, J. P. (1987). Measures post-irradiation des Quantites Residuelles de tritium et d'helium 4 dans l'aluminate de lithium, Commissariat a l'Energie Atomique, France.
- Clemmer, R. G., Finn, P. A., Misra, B., Billone, M. C., Fischer, A. K., Tam, S. W., Johnson, C. E. and Scandora, A. E. (1985). The trio experiment. *J. Nucl. Mater.* 133-134: 171-175.
- Cruz, D., Bulbulian, S., Lima, E. and Pfeiffer, H. (2006). Kinetic analysis of the thermal stability of lithium silicates ( $\text{Li}_4\text{SiO}_4$  and  $\text{Li}_2\text{SiO}_3$ ), *J. Solid State Chem.* 179: 909-916.
- D'Haeseleer, D. (1999). The challenge to keep nuclear fusion alive as a future energy source. *Plasma Phys. Control Fusion* 41: B25-B38.
- Johnson, C. E. and Hollenberg, G. W. (1981). Solid breeder materials. *J. Nucl. Mater.* 103: 547-553.
- Johnson, C. E. Kummerer, K. R. and Roth, E. (1988). Ceramic breeder materials. *J. Nucl. Mater.* 155-157: 188-201.
- Johnson, C. E. (1999). Tritium behavior in lithium ceramics. *J. Nucl. Mater.* 270: 212-220.
- Kummerer, K. R. and Ritzhaupt, K. (1991). Comparative irradiation of different lithium ceramics. *J. Nucl. Mater.* 179-181: 831-834.
- Masabumi, N. and Baba, A. (1998). Tritium inventory in  $\text{Li}_2\text{ZrO}_3$  blanket. *J. Nucl. Mater.* 257: 162-171.
- Ohno, H., Konishi, K., Nagasaki, T., Kurasawa, T., Katsuta, H. and Watanabe, H. (1985). Correlation behavior of lithium and tritium in some solid breeder materials. *J. Nucl. Mater.* 133-134: 181-185.
- Pfeiffer, H., Bosch, P. and Bulbulian, S. (1998). Synthesis of lithium silicates, *J. Nucl. Mater.* 257:309-317.
- Pfeiffer, H., Sánchez-Sánchez, J. and Álvarez, L. J. (2000). Lithium and tritium diffusion in lithium oxide ( $\text{Li}_2\text{O}$ ), a molecular dynamics simulation, *J. Nucl. Mater.* 280: 295-303.
- Pfeiffer, H., Bosch, P. and Bulbulian, S. (2002). Zr-alkoxide chain effect on the sol-gel synthesis of lithium metazirconate,  $\text{Li}_2\text{ZrO}_3$ , *Mater. Chem. Phys.* 78: 558-561.
- Pfeiffer, H. and Knowles, K. M. (2004). Reaction mechanisms and kinetics of the synthesis and decomposition of lithium metazirconate through solid-state reaction, *J. Europ. Ceram. Soc.* 24: 2433-2443.
- Roux, N., Johnson, C. E. and Noda, K. (1992). Properties and performance of tritium breeding ceramics. *J. Nucl. Mater.* 191-194: 15-22.



Yang, L., Medico, R., Baugh, W. and Schultz, K. (1981). Irradiation study of lithium compound samples for tritium breeding application. *J. Nucl. Mater.* 103: 585-589.