

El plutonio fue producido por primera vez en Berkeley, en 1941, por medio de un acelerador de partículas.

¿Reemplazarán los aceleradores a los reproductores?

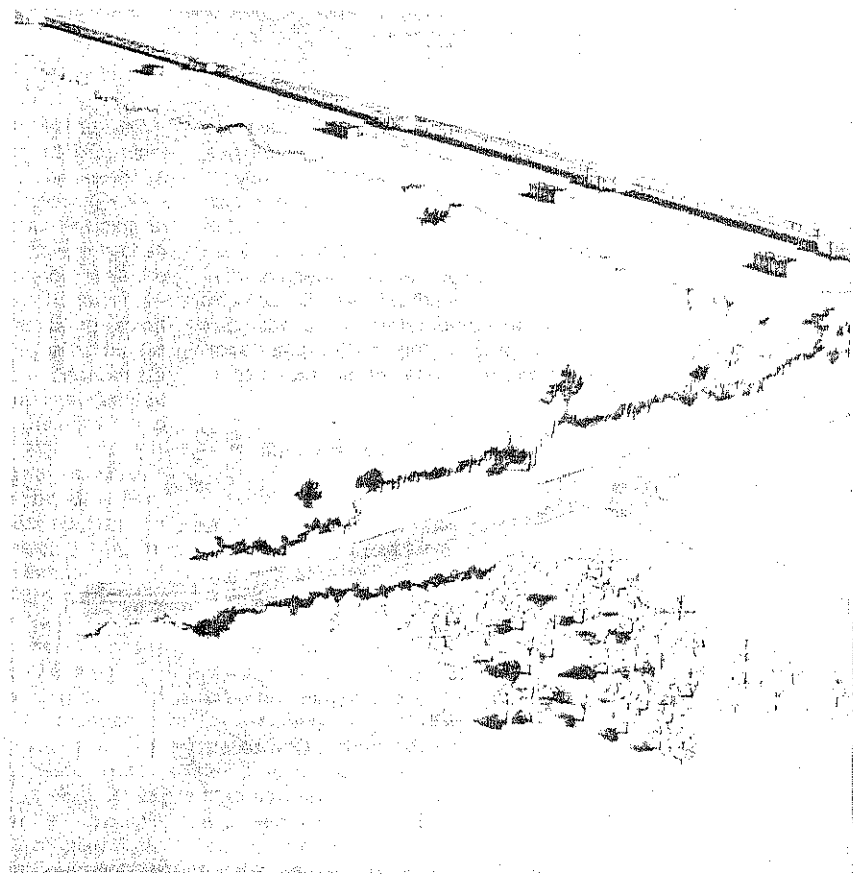
■ El plutonio es un combustible nuclear precioso que no existe en la naturaleza. Es precioso, ya que si se llega a producirlo en grandes cantidades permitirá asegurar el porvenir de la energía nuclear; pero es también valioso porque constituye el alimento predilecto de los arsenales bélicos.

El plutonio 239 se obtiene añadiendo un protón al uranio 238 que existe abundantemente en la naturaleza. Los reactores nucleares convencionales, cuyo combustible actual es el uranio, producen al funcionar una cierta cantidad de plutonio, pero éste no supera el 1 % del uranio 238 inicialmente disponible. Los reproductores que utilizan plutonio como combustible, poseen la particularidad de producir, teóricamente, más plutonio del que consumen. En principio, permiten convertir hasta un 70 % del uranio 238 en plutonio.

Sin embargo, razones técnicas, económicas y sociales parecen hacer de este milagro un acontecimiento improbable o, por lo menos, lejano.⁽¹⁾ En consecuencia, se exploran otros caminos para producir plutonio. Las tecnologías más prometedoras parecen ser actualmente las relacionadas con la utilización de haces de partículas aceleradas. Hoy en día existen en el mundo diversos proyectos, y en Brookhaven, cerca de Nueva York, están actualmente bien definidas las características de una fábrica de plutonio que incluye también un acelerador.

Fábricas de plutonio

La aceleración de partículas es una técnica muy extendida. Por ejemplo, en el tubo de imagen de un aparato de televisión, el haz de electrones que barre la pantalla fluorescente está producido por un acelerador rudimentario. Sin embargo, incluso para los aceleradores más perfeccionados, el principio de la aceleración sigue siendo el mismo: cuando se somete una partícula cargada a la influencia de un campo eléctrico, su energía cinética aumenta proporcionalmente a la tensión eléctrica que produce este campo.



En el caso de un tubo de televisión, esta tensión es del orden de 20 000 voltios, por lo que la energía de los electrones es de 20 000 electrón-voltios (20 KeV). Las energías requeridas para las aplicaciones nucleares de los aceleradores son mucho más elevadas, puesto que ya son necesarios algunos millones de electrón-voltios (MeV) para liberar un neutrón de un núcleo. Sería necesario, por tanto, aplicar una tensión de 100 a 1 000 millones de voltios, lo que no puede conseguirse de una sola vez. Los aceleradores de alta energía comportan, en consecuencia, numerosos recintos de aceleración sucesivos, dispuestos a lo largo de la trayectoria del haz. Las técnicas corrientemente utilizadas producen gradientes de aceleración del orden de 1 a 2 MeV por metro de cavidad aceleradora. En un acelerador lineal, los recintos están simplemente dispuestos uno a continuación de otro, de tal modo que la longitud de un acelerador lineal, de 1 000 MeV, una energía normal para un acelerador actual, es de alrededor de 1 km. En un acelerador circular, las partículas están confinadas por medio de imanes en una trayectoria cerrada, lo que les permite atravesar los recintos aceleradores un gran número de veces y adquirir, a cada paso, un poco más de energía. Este tipo de acelerador puede alcanzar energías más elevadas pero, en general, en detrimento de la intensidad del haz.

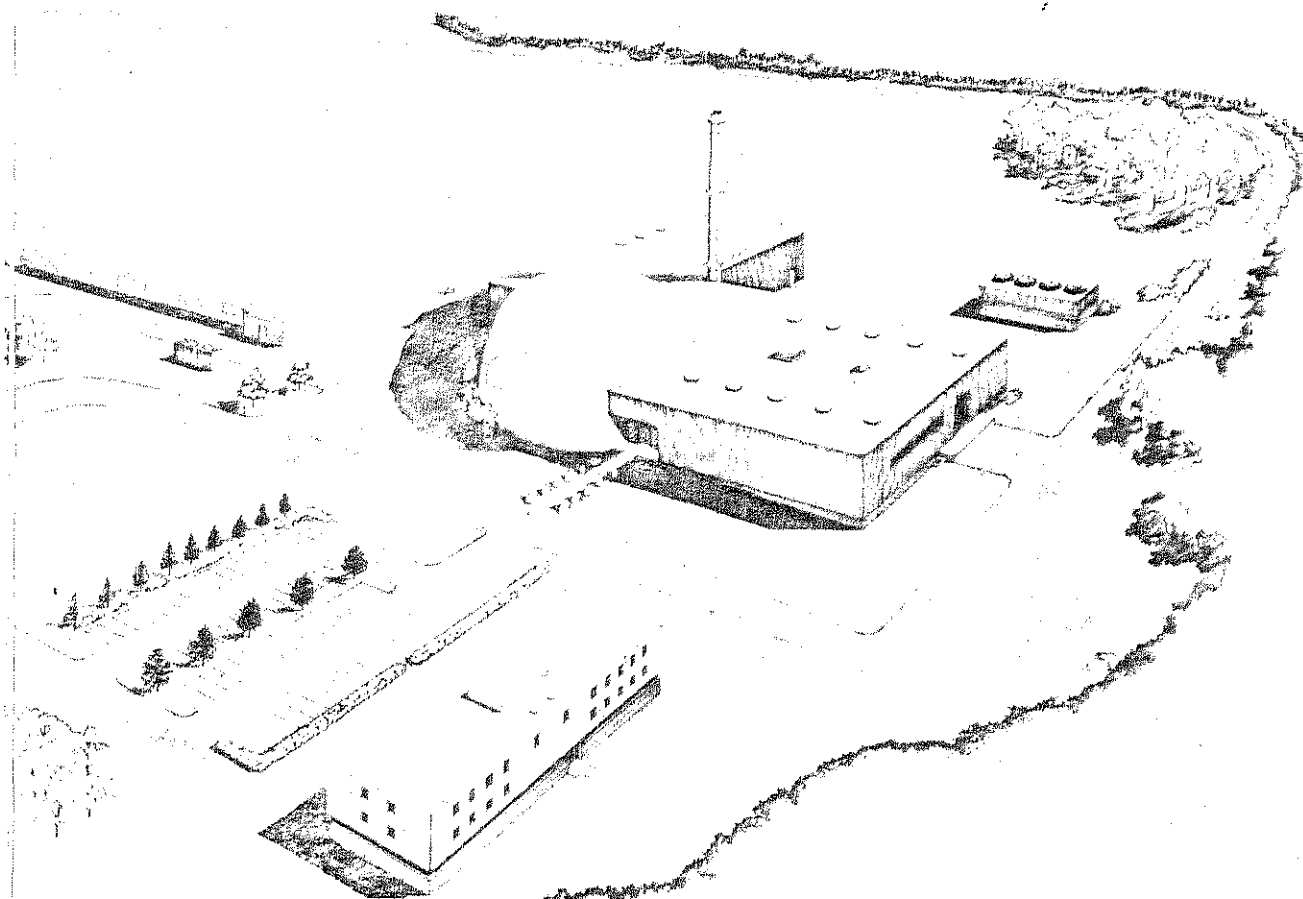
Los aceleradores permiten bombardear la materia con haces de partículas

de alta energía, capaces de interactuar nuclearmente. Un primer encuentro entre un proyectil como éste y un núcleo blanco produce partículas secundarias capaces, a su vez, de bombardear otros núcleos, y así sucesivamente. A cada interacción, un núcleo blanco se rompe o es excitado y se emiten neutrones. Este proceso se llama espalación. Se posee, pues, potencialmente la fuente de neutrones necesaria para la producción de plutonio. A partir de un blanco de uranio natural se obtienen de esta forma alrededor de 100 neutrones por cada protón de 1 000 MeV.⁽²⁾

Una fábrica de producción de plutonio con un acelerador comprende principalmente las tres partes siguientes: un acelerador de protones, un blanco de espalación, en el que se producen los neutrones y, rodeando al blanco, una cubierta de uranio en la que son absorbidos los neutrones. En buena aproximación se puede considerar que, prácticamente, todos los neutrones producidos en el blanco llegan a engendrar núcleos de plutonio. Es, entonces, fácil calcular el balance energético de un sistema como éste. Por una parte, para obtener los neutrones hay que proporcionar energía al acelerador cuyo rendimiento, debe tenerse en cuenta, es por lo menos del 50 %. Teniendo en cuenta este rendimiento puede afirmarse que una energía de aceleración de 1 000 MeV sólo produce efectivamente 50 neutrones. Esto representa, por tanto, un coste energético de 20 MeV por neu-

(1) Consejo de Europa, *Les surrégénérateurs: aspects économiques et sûreté*. Sesión parlamentaria europea, 18 y 19 de diciembre de 1979.

(2) H. Takahashi y otros «Nuclear fuel breeding by using spallation and muon catalysis fusion reactions», *Atomkernenergie*, 36, 195, noviembre 1980.



Boceto que representa el proyecto del acelerador-reproductor del laboratorio de Brookhaven en Estados Unidos. Actualmente es el proyecto más avanzado del mundo. El acelerador lineal de protones, cuya longitud aproximada es de 1 000 m, produce un haz de 300 mA de protones con una energía de 1 000 MeV. El recinto de confinamiento, parecido al de un reactor nuclear, contiene el blanco de espalación. Los neutrones engendrados en el blanco por el haz son absorbidos por una cubierta del uranio a fertilizar, que rodea a éste. La cantidad de plutonio así producido se estima en 2 500 kg al año. (Dibujo extraído del informe PNL 50838.)

trón. Como este neutrón produce un núcleo de plutonio, el coste energético del núcleo de plutonio es de 20 MeV. Pero al «arder» en un reactor este núcleo de plutonio liberará una energía de fisión de alrededor de 200 MeV. Por tanto, el balance energético es muy favorable.

Sin embargo, un balance energético positivo, aunque necesario, no es suficiente para demostrar el interés de un sistema determinado con respecto a los demás. Es necesario, además, comparar su producción efectiva, en condicio-

nes similares, con la de los otros sistemas. Por otra parte, es necesario que el sistema sea realizable y, para ello, el problema principal será la eliminación del calor generado por las reacciones nucleares. Las soluciones utilizadas para eliminar este calor son similares cualquiera que sea el sistema considerado, y consisten en hacer circular un fluido portador del calor. Un reactor reproductor utiliza sodio líquido; ésta es también la solución considerada para ciertos aceleradores-reproductores. La

dificultad de esta eliminación depende, entre otros factores, de la potencia térmica del sistema; los sistemas que serán producidos industrialmente tendrán todos, verosimilmente, potencias térmicas similares, cualquiera que sea su fundamento.

Para comparar las técnicas de reproducción, hemos examinado, por tanto, instalaciones de potencias comparables, tomando como referencia la potencia de los reactores nucleares industriales clásicos: 3 300 MW (th). Entre los reactores de fisión se constata en la tabla adjunta que el reactor de agua pesada es netamente el más interesante —y, por lo tanto, el más peligroso en relación con la proliferación de armas nucleares—. El reproductor, si se tiene en cuenta que la mayor parte del plutonio que produce está destinado a reemplazar el que él mismo consume, no ofrece ningún interés particular en lo que concierne a la cantidad neta de plutonio producida.

En contrapartida, los métodos que utilizan aceleradores de alta energía pueden, en principio, producir de cinco a diez veces más materia fisible que los reactores de igual potencia. Los cálculos ponen de manifiesto que un haz de 300 mA de protones de 1 000 MeV permite fabricar 2 500 kg de plutonio al año,⁽²⁾

	energía disipada por núcleo de plutonio producido (MeV/núcleo)	producción neta de plutonio (kg Pu/año)
reproductor rápido de plutonio	1 300	200
reactor de agua ligera	900	300
reactor de agua pesada	500	500
protones de 1 000 MeV sobre un blanco de uranio natural	130	2 500

Esta tabla permite comparar los reactores con los aceleradores, en la producción de plutonio. La producción ha sido calculada para instalaciones industriales de una potencia térmica total de 3 300 MW (th). Para los métodos clásicos, que utilizan reactores, las cifras corresponden a los rendimientos efectivos, mientras que para los nuevos sistemas, reproductor rápido o acelerador, proceden de estudios detallados de sistemas completos.

Actualmente, no existen verdaderas fábricas de producción de plutonio por medio de un acelerador de partículas pero, sin duda, es tan sólo cuestión de años.

GG

Colección Tecnología y Sociedad

**Algunos de los títulos
publicados
en esta colección:**

**Michel Bosquet
(André Gorz)
Ecología y Libertad**

**William H. Davenport
Una sola cultura
La formación de
tecnólogos-humanistas**

**Duncan Davies/
Tom Banfield/Ray Sheahan
El técnico
en la sociedad**

**Siegfried Giedion
La mecanización
toma el mando**

**M. Kranzberg/
W.H. Davenport (eds.)
Tecnología y Cultura**

**David Morris/Karl Hess
El poder del vecindario.
El nuevo localismo**

**Arnold Pacey
El laberinto del ingenio**

**Langdon Winner
Tecnología autónoma**

Editorial Gustavo Gili, S.A.

(3) G.G. Bartholomew y otros, *Concept de l'accélérateur surrégénérateur*, L'Energie Atomique du Canada Limitée, AECL-6363, octubre 1978.

(4) P. Grand, «The use of high energy accelerators in the nuclear fuel cycle», *Nature*, 693, 19 de abril de 1979; «Les accélérateurs remplaceraient-ils les surrégénérateurs rapides?», *Courrier CERN*, P. 152, mayo 1978.

(5) J.M. Carpenter y otros, «Pulsed spallation neutron sources», *Physics Today*, p. 42, diciembre 1979. Bericht des ad hoc Ausschusses «Mittelflussreaktor» des BMFT, Teil II, *Spallationsneutronquelle*, Bonn 1979; J.P. Blaser, «What accelerators for future nuclear and meson physics», *IEEE Trans. on Nucl. Sci.*, NS-26, 1979; Report on the national workshop on advanced high-energy accelerators in India» 8-11 octubre 1979, Bombay, enero 1980.

(6) A. Gsponer, «Implications des technologies de la fusion et des accélérateurs de particules sur la prolifération verticale et horizontale des armes nucléaires», GIPRI, 41 rue de Zurich, CH-1201 Ginebra, agosto 1980; B. Jasani, en *Nuclear energy and nuclear weapon proliferation*, SIPRI, Taylor and Francis, Londres, 1979.

y que el calor disipado en el blanco, convenientemente recuperado, puede aprovecharse para alimentar eléctricamente al mismo acelerador. Señalemos al respecto que si el interés de un sistema determinado no se mide tan sólo por la cantidad de plutonio producido sino por el conjunto de su producción energética potencial (plutonio, más calor, más electricidad), el acelerador conserva una neta ventaja.

Los materiales irradiados por un acelerador deben ser, evidentemente, recuperados para extraer las sustancias deseadas. Para esta recuperación, los sistemas con acelerador presentan interesantes ventajas. En efecto, la energía disipada en un blanco de espalación o en un reactor proviene principalmente de la ruptura o de la fisión de diversos núcleos. En un acelerador, la energía disipada por núcleo de plutonio producido es de cinco a diez veces inferior a la de un reactor: la contaminación por productos de fisión radiactivos será menor en la misma proporción. Todavía más, la cubierta en la que son absorbidos la mayoría de los neutrones está netamente menos contaminada que el propio blanco. La recuperación queda facilitada en gran medida y, además, el plutonio extraído es de buena calidad militar.

Existen proyectos concretos

Hay un hecho poco conocido: el plutonio fue producido por primera vez en Berkeley en 1941, merced a un acelerador de partículas, prácticamente dos años antes de la entrada en funcionamiento del primer reactor nuclear. Los deuterones acelerados por un ciclotrón chocaban con un blanco de berilio, y los neutrones producidos transformaban el uranio 238 en plutonio. El primer intento de producción de plutonio en grandes cantidades por medio de un acelerador se remonta al inicio de los años 50. Era el proyecto de alto secreto MTA (Material Testing Accelerator), debido a un grupo de Berkeley. Se ensayó con éxito un prototipo del acelerador. Pero el proyecto fue abandonado en 1954 tras el descubrimiento de grandes yacimientos de uranio en el Oeste estadounidense. En efecto, la disponibilidad de este uranio, de fácil extracción, permitía obtener plutonio ventajosamente en un reactor nuclear.

Desde los años 50 la tecnología de los aceleradores se ha desarrollado considerablemente, y ciertos análisis económicos ponen de manifiesto que su utilización para la fabricación de plutonio resulta económicamente competitiva.^(3,4) Existen diversos proyectos concretos en Canadá y Estados Unidos, y sus promotores estiman que la utilización comercial de aceleradores en el campo de la energía nuclear será técni-

camente posible dentro de veinte años.⁽⁴⁾ El estudio más avanzado es el del laboratorio de Brookhaven cerca de Nueva York (fig.). El acelerador propuesto producirá un haz de 300 mA de protones de 1 000 MeV, y tendrá una longitud aproximada de 1 000 m. El blanco de espalación y el material a irradiar estarán contenidos en un recinto de confinamiento, similar al de un reactor nuclear, situado en el extremo del acelerador.

En este sistema se considera la utilización de neutrones de espalación bien para irradiar uranio 238 o torio; el material fisible sería entonces recuperado por extracción o bien se utilizaría para «enriquecer» en plutonio las barras de combustible nuclear que, después de la irradiación, serían transferidas directamente a un reactor para ser utilizadas.⁽⁴⁾

Otros países, como Gran Bretaña, Alemania, Japón, Suiza e incluso la India, construyen o proyectan fuentes intensas de neutrones de espalación para la investigación en física nuclear.⁽⁵⁾ Estas instalaciones permitirán el estudio de la reproducción de plutonio por medio de aceleradores y, en particular, desarrollar el blanco, que es precisamente la parte del sistema que presenta las más importantes dificultades de realización. En lo que concierne al acelerador, en principio, no hay ningún problema, si bien, en el momento actual no existe ningún acelerador en funcionamiento que posea simultáneamente la energía y la intensidad media requeridas. Por ejemplo, el acelerador lineal de 800 MeV de Los Álamos, en Nuevo México, produce un haz de protones de una intensidad media de 0,6 mA. El de 200 MeV que se utiliza para la investigación en Brookhaven acelera paquetes de protones correspondientes a corrientes de 200 mA durante intervalos cuya duración tan sólo está limitada esencialmente por la potencia de la alimentación eléctrica del acelerador.

Es interesante señalar que si el conjunto de las instalaciones nucleares de un país miembro del Tratado de no proliferación están bajo el control de la Agencia Internacional para la Energía Atómica, los aceleradores de partículas constituyen una excepción: no están sometidos a ningún control internacional. Por otra parte, no existe todavía ningún debate sobre el papel de esta tecnología desde el punto de vista de la proliferación. Este riesgo de proliferación, señalado en las publicaciones del SIPRI y del GIPRI,⁽⁶⁾ es sin embargo importante y muy relacionado con las posibles utilizaciones de las técnicas de aceleración, bien sea para fabricar plutonio o para experimentar y perfeccionar las armas nucleares.

André Gsponer.