FUSION

ESTADO ACTUAL DE LA FUSION NUCLEAR POR CONFINAMIENTO INERCIAL

M.ª Celina GONZALEZ, Lorenzo SANCHEZ y Javier SANZ (*)

INTRODUCCION

Es creencia general en el ámbito de la comunidad científica que la investigación en fusión nuclear se encuentra en un período de tránsito entre una fase de investigación básica y una fase ingenieril que conduciría, presumiblemente, a una fase final de comercialización a principios del siglo XXI. Es por ello que, en la actualidad, se están llevando a cabo un gran número de estudios socioeconómicos con vistas a determinar el aspecto que presentaría una sociedad basada en una economía de fusión. Desde el comienzo oficial del programa de investigación a comienzos de la década de los cincuenta, la inversión efectuada en fusión nuclear en todo el mundo supera ya los 13.000 millones de dólares, con una especial contribución por parte de países tales como Estados Unidos, la Unión Soviética, Japón y la Comunidad Económica Europea. Entre los años 1978 y 1983, el gasto realizado se duplicó, tendencia que se sigue manteniendo en la actualidad, mientras que son ya más de 8.000 los científicos e ingenieros que están llevando a cabo investigaciones en este campo, de los cuales, aproximadamente unos 2.500 realizan su trabajo en los Estados Unidos.

En la actualidad existe una gran incertidumbre con relación a la vía óptima de aprovechamiento de la energía de fusión, presentándose dos grandes alternativas: confinamiento magnético y confinamiento inercial. La primera de ellas, de aparición más temprana, hace uso de fuertes campos magnéticos para el confinamiento de las partículas cargadas que componen el plasma, diferenciándose claramente los procedimientos de calentamiento de los del propio confinamiento. Por el contrario, en el confinamiento inercial se hace uso de intensos haces de energía (láseres, haces de iones ligeros o pesados), para provocar la implosión de la zona combustible al utilizar el efecto cohete consecuencia de la ablación de las zonas exteriores de la microbola calentadas por la energía del haz. Las ideas básicas de la fusión por confinamiento inercial fueron expresadas por vez primera por N. Basov (URSS) y J. H. Nuckolls (EUA) a mediados de la década de los sesenta y en los últimos años han experimentado un interés creciente merced al desarrollo de la tecnología de láseres y haces de partículas. En este artículo se revisa el estado actual y las perspectivas de desarrollo, a corto y medio plazo, de los programas de investigación en fusión por confinamiento inercial (FCI) que se están llevando a cabo hoy en día en el mundo.

Los programa de I + D vigentes en la actualidad prevén el siguiente calendario de realizaciones en FCI:

- 1985-1990: Factibilidad científica (ignición con ganancia unidad).
- 1990-1999: Reactores experimentales de disparos aislados (optimación de microbolas).
- 1995-2005: Reactores para ensayos tecnológicos (pruebas de materiales y rendimientos).
- 2000-2015: Centrales comerciales de FCI.

Del balance de potencias de una central comercial de FCI se puede deducir que la viabilidad económica de la generación eléctrica depende fundamentalmente de tres factores:

- Rendimiento del sistema generador del haz de energía. Supone la optimación de la generación del pulso energético así como de su transporte y enfoque sobre el blanco.
- Ganancia del combustible. Implica un diseño eficiente de la microbola bajo la perspectiva tanto de su interación con el haz energético como de la dinámica de implosión, ignición, transporte y quemado.
- Diseño de la cavidad del reactor. Deberá soportar los esfuerzos y la fatiga térmica resultantes de la naturaleza pulsante de las microexplosiones, los efectos del daño neutrónico, y regenerar tritio en cantidad superior a la consumida, así como complir con las funciones convencionales de extracción del calor y blindaje frente al flujo neutrón-gamma.

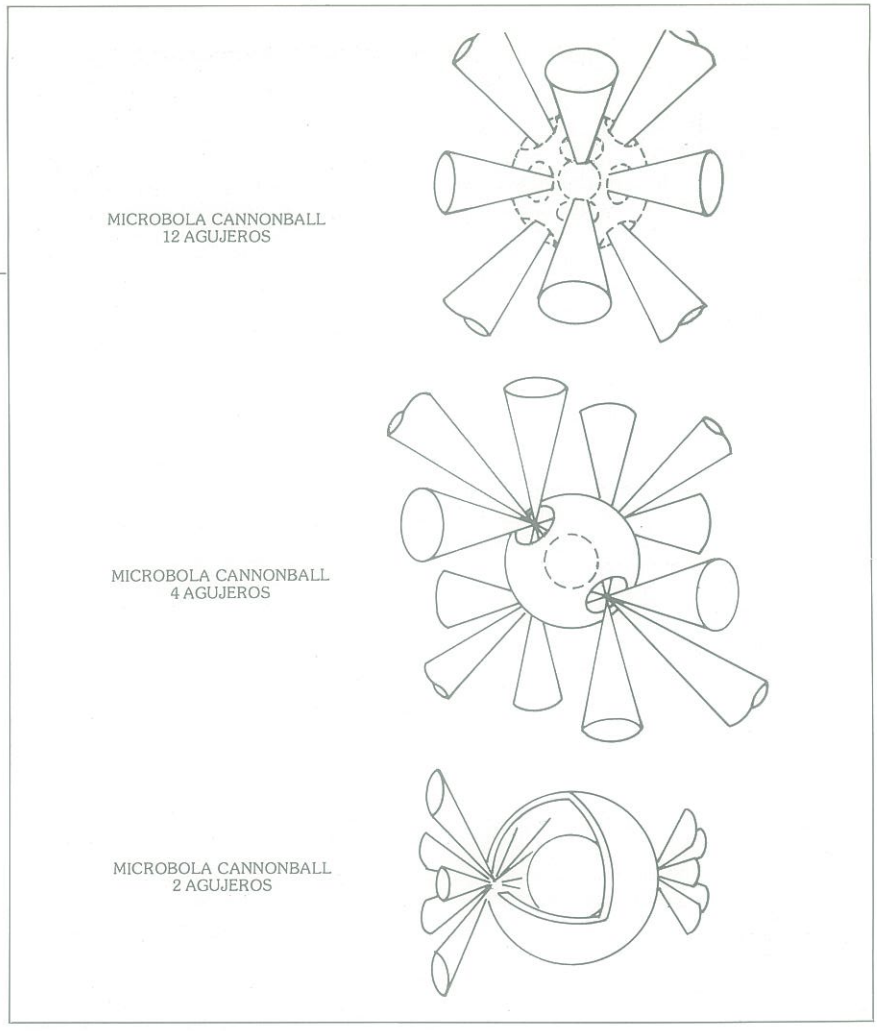
Nos centraremos, por tanto, en el análisis de las tres áreas tecnológicas claves para el desarrollo de la FCI: sistema generador de energía (láseres, haces de iones ligeros y pesados...), microbolas combustibles y cámaras de reacción.

ANALISIS DEL HAZ DE ENERGIA

Los requisitos que ha de cumplir el haz energético para su utilización en FCI se pueden clasificar en tres grandes categorías:

I) Atendiendo a la producción total de energía.
   - Elevada energía total de salida (MJ).

(*) Los autores pertenecen al departamento de Energía Nuclear de la ETSII de la UPM de Madrid.



F I *Diferentes tipos de microbolas «CANNONBALL».*

- Potencias pico del orden de 200 TW.
- Alta eficiencia en la generación de energía en el haz (3 %).
- Elevada tasa de repetición (1-10 Hz).
- Alta fiabilidad en operación repetitiva continua.
- Facilidad de mantenimiento y de sustitución de elementos que afecten a la seguridad.
- Bajos costes de construcción y mantenimiento.
- Larga vida del sistema.

II) Atendiendo al transporte de energía.
- Alta eficiencia (90 %).
- Pequeña divergencia del haz (10^{-5} Rad. cm.).
- Facilidad de control.
- Protección del dispositivo y del elemento focalizante final.

III) Atendiendo a la deposición de energía sobre el blanco.
- Alta eficiencia de la absorción (30 %).
- Desacoplo entre la capa de absorción y la parte interior de la microbola.
- Buena eficiencia hidrodinámica.

Entre los principales problemas del empleo de haces láser se encuentran el diseño de un oscilador que produzca pulsos cortos de radiación de baja energía, la reducción de las pérdidas en la cavidad resonante y el diseño y fabricación de un conjunto oscilador - filtros - amplificador que permita un conformado adecuado del pulso de energía. En la actualidad, el láser de CO_2 se presenta particularmente válido tanto por su eficiencia como por la elevada tasa de repetición, pues soporta niveles de calor que un medio láser de estado sólido probablemente no resistiría. Actualmente, los láseres gaseosos de CO_2 más desarrollados son el HELIOS (LANL) y el LEKKO VIII (ILE, OSAKA), ambos de 10 kj. El láser ANTARES (LANL) de 40 kj/40 TW., actualmente en fase experimental, constituye el mayor láser de CO_2 del mundo y tratará de investigar los problemas asociados al uso de elevadas longitudes de onda y, en particular, el precalentamiento por los electrones supratérmicos originados y el ineficiente acoplamiento de la radiación con la microbola.

Sin embargo, la mayor parte de los láseres de potencia diseñados para la investigación en fusión nuclear son de vidrio de neodimio, que emiten luz infrarroja a una longitud de onda de 1,06 m. Actualmente, el láser más potente del mundo en operación es el GEKKO XII (ILE, OSAKA), con 12 haces y un total de 40 TW y 20 kj. Este láser es parte de un ambicioso proyecto de fusión inercial denominado «Proyecto Kongoh», que comprende además la obtención de una implosión indirecta de alta densidad mediante el empleo de microbolas «Cannonball» y la construcción final de un sistema de 100 kj. de energía que permitiría alcanzar la factibilidad tecnológica a finales de la presente década. Por otra parte, en EUA ha entrado en funcionamiento durante este año el sistema láser NOVA (LLNL) de 100 kj., cuyo objetivo programático principal será alcanzar la ignición de un quemado termonuclear, paso previo crucial a la demostración de la factibilidad tecnológica de la fusión inercial por láser. Sin embargo, las experiencias realizadas en los últimos dos años sobre el sistema láser NOVETTE de 10 TW. demostraron la reducción de la producción de electrones supratérmicos y el posterior precalentamiento del combustible, mediante la conversión de la luz láser de neodimio en armónicos de doble y triple frecuencia, identificando la dispersión Raman estimulada como el mecanismo primario de generación de los electrones supratérmicos. Este proceso, con una eficiencia del orden del 70 %, aumenta la absorción de energía y la conversión de la luz láser incidente en rayos X blandos, mejorándose, por tanto, el proceso de ablación. Es por ello que el NOVA, originalmente concebido como un sistema de 20 haces operando a una frecuencia fundamental de 1,06 m. fue reconvertido, a mediados de 1982, a un sistema más pequeño (10 haces), pero mucho más versátil, al admitir el funcionamiento en el 2.°, 3.° y 4.° armónicos (2 w = 0,53 μm., 3 w = 0,35 μm., 4 w = 0,26 μm.). El coste total de la instalación ha sido de 176 millones de dólares. Las características esperadas de funcionamiento del láser NOVA son:

- Potencia entre 80 y 120 TW. en pulsos de 100 ps. a 1,05 μm.
- Energías entre 80 y 120 kj. en pulsos de 3 ns. a 1,05 μm.
- Energías entre 50 y 80 kj., con conversión en frecuencia al segundo armónico y pulsos de 3 ns.
- Energías entre 40 y 70 kj., con conversión en frecuencia al tercer armónico y pulsos de 3 ns.

El papel de los láseres de cristal dependerá, en el futuro, de la mejora de la eficiencia de la conversión en armónicos que permita, junto a un diseño adecuado de la microbola, obtener elevados valores de absorción de la radiación.

En la actualidad se está dedicando un gran esfuerzo al desarrollo de láseres que operen a longitudes de onda inferiores a 1 μm. haciendo uso de mecanismos distintos de bombeo, tales como el bombeo por haces de electrones, procesos fotolíticos o reacciones químicas. En este sentido, los láseres de excímeros, tales como el de K_rF, presentan un gran interés para su aplicación comercial. En Los Alamos se está llevando a cabo un proyecto de investigación sobre un láser de K_rF, operando a una frecuencia de 0,249 μm., lo que permite una eficiencia de acoplamiento elevada, y se tiene gran esperanza en que avances en la cinética de estos láseres y en el desarrollo de los componentes ópticos conduzcan al diseño y construcción de un haz de energía de este tipo de 4 MJ., alta tasa de repetición (10 Hz), bajo coste (150 dólares/julio) y elevada eficiencia (10 %).

Otra línea importante de investigación es la constituida por los láseres de electrones libres. Constan básicamente de un haz de electrones, un campo de bombeo externo y un campo impuesto de radiación. El campo de bombeo, típicamente un campo magnético periódico y estático, puede ser cualquiera que origine una oscilación transversal de los electrones en movimiento, los cuales deberán tener un carácter fuertemente relativista para producir radiación de corta longitud de onda. Al contrario que en la mayoría de las fuentes de radiación convencionales, la longitud de onda emitida por estos láseres no viene determinada por el tamaño de la estructura; además, al ser el medio láser un campo de bombeo, no se experimentan fenómenos de ruptura («breakdown»), de ahí que, en principio, este tipo de láseres constituya una fuente potencialmente válida para su aplicación en experimentos de fusión.

La gran alternativa al empleo de láseres en fusión por confinamiento inercial la constituyen los sistemas guiados por haces intensos de iones ligeros o pesados. En este caso, los mecanismos de absorción de energía son aquellos de naturaleza colisional entre partículas cargadas, presentando además la ventaja de la no aparición de superficies críticas y, en consecuencia, la posibilidad teórica de obtención de eficiencias del 100 %. Todo esto, unido a la mayor penetración del haz en la microbola, conduciría a eficiencias hidrodinámicas globales del 20 %, frente al 5 % típicas del empleo de láseres.

Para acelerar iones ligeros se han desarrollado diodos de haces pulsados de alta potencia, centrándose en la actualidad en el estudio en la mejora del factor de brillo,

$$B = JV/\theta^2$$

donde J es la densidad de corriente del haz iónico, V es la tensión del diodo y la divergencia del haz. El problema básico de los diodos aceleradores es la divergencia de los iones debido a inestabilidades de filamentación electrónicas producidas en el plasma. Por ello, el canal de transporte ha de tener una sección transversal suficientemente grande para reducir las fugas del diodo. Por otra parte, el transporte del haz dentro de la cavidad ha sido demostrado satisfactoriamente mediante canales de plasma guiados por láser o autogenerados en gases de baja densidad por el propio haz, con rendimientos del 80 % sobre una distancia de varios metros. El sistema PBFA-II (LLNL), con una energía de 3,7 MJ. podría llegar a demostrar la ignición dependiendo de la tecnología de enfoque disponible. Las características de funcionamiento esperadas para 1988 son una intensidad del haz de 5 kA/cm^2 con una divergencia de 14,4 mrad., pretendiéndose conseguir un haz de iones de Li+ de 30 MeV. con una tensión de 32 MV. Asimismo, en Alemania Federal se ha desarrollado en el centro de investigación nuclear de Karlsruhe la instalación experimental «KALIF», con la cual se pretende investigar los procesos de deposición de energía por iones ligeros en plasmas calientes, así como la eficiencia hidrodinámica de la aceleración producida por presiones de ablación y el crecimiento de inestabilidades durante dicho proceso.

La vía de los iones pesados está siendo estudiada en los Estados Unidos y Alemania Federal a partir de la tecnología demostrada de aceleradores de partículas en experimentos en altas energías. En un acelerador de iones pesados, la eficiencia de la conversión eléctrica es superior al 20 % y se han ideado diseños que permitirían la focalización final del haz en el interior del ambiente de la cavidad del reactor mediante el uso de campos electromagnéticos y bobinas blindadas. Por otra parte, el acelerador de iones pesados presenta una capacidad inherente para un funcionamiento altamente repetitivo. El empleo de aceleradores de iones pesados, tanto por radiofrecuencia como de inducción, para experimentos en FCI está limitado por condicionamientos económicos que desaconsejan su uso en tanto no se resuelvan los problemas físicos y tecnológicos presentes en otras áreas.

Finalmente, el empleo de electrones relativistas presenta importantes problemas por su elevada relación carga/masa, lo cual provoca fuertes dispersiones culombianas entre las partículas del haz y en su interacción con la microbola, que prácticamente impiden su correcta focalización.

DISEÑO Y FABRICACION DE BLANCOS

En el diseño de blancos existen aspectos que deben tenerse en cuenta, tales como el comportamiento de la materia en situaciones de elevadas presiones y densidades y los procesos físicos que tienen lugar en ellos: inestabilidades en el plasma producido por la deposición de energía del haz, transporte de electrones supratérmicos, transporte de radiación, obtención de condiciones de ignición para la consecución de una ganancia energética, deposición de energía y comportamiento de los productos de fusión (neutrones, alfas, deuterones, tritones, etc.). Estos puntos y otros no mencionados afectan y condicionan el diseño de blancos. En la actualidad, el análisis se realiza mediante la simulación numérica de los procesos, utilizando códigos de cálculo hidrodinámicos y de transporte, lo cual dará una idea más exacta del comportamiento del plasma en las condiciones elegidas. En este sentido han surgido en el mundo importantes grupos de investigación teórica que posteriormente intentan contrastar y validar sus resultados mediante prácticas experimentales.

Los blancos de fusión se pueden clasificar de diversas maneras, atendiendo a las características del haz de energía (láseres, haces de electrones, iones ligeros o iones pesados) o atendiendo a sus materiales y estructuración.

El objetivo último de todo blanco de fusión es la obtención de una ganancia energética y, por tanto, su posible utilización en los futuros reactores de fusión.

En esta línea se ha tendido a lograr un enfoque perfecto del blanco, un acoplamiento eficiente del sistema haz-blanco, lográndose una absorción de energía máxima y de forma simétrica.

El diseño de estos blancos ha ido evolucionando considerablemente. En un primer paso se utilizaron microbolas macizas muy simples, que constaban únicamente de DT sólido y una capa de un material de elevado número atómico.

El diseño de capa simple (single-shell) introducía un hueco central. Con esto se prentendía obtener las mismas condiciones de densidad y temperatura que con los anteriores, pero con una energía dada desde el exterior mucho menor, ya que se utilizaría la energía cinética producida al cerrarse el hueco para calentar y comprimir el combustible. La influencia de la forma y duración del pulso se tuvo en cuenta mediante el diseño «impulsivo», con el cual se concluyó que no solamente es importante la cantidad de energía suministrada desde el exterior, sino también la forma temporal en que ésta sea dada al sistema. En la actualidad, los diseños son más complejos. En algunos se incorpora un número mayor de capas (double-shell), que evitan algunos fenómenos no recomendables; en otras se hace uso de materiales que presentan propiedades muy específicas, como los diseños non espuma.

En la totalidad de los diseños citados, la energía procedente del haz incide directamente sobre la microbola, denominándose blancos de iluminación directa.

Con el objetivo de utilizar láseres de longitud de onda superior surgieron los blancos de iluminación indirecta. En ellos, el haz incide sobre una superficie o cavidad convirtiéndose la energía absorbida en rayos X, los cuales serán los

que produzcan la evolución de la microbola de fusión. En este sentido hay dos diseños que merecen nuestro especial interés tanto por el avance físico y tecnológico que suponen como por los excelentes resultados que pueden obtenerse. Son los diseños «hohlraum» y «cannonball». En cuanto al primero, hasta este momento permanece como información confidencial, no conociéndose detalles del mismo; se centrará pues el estudio de blancos indirectos en el diseño «cannonball» del Instituto de Ingeniería del Láser de Osaka.

En este diseño, el rayo láser incide en una cavidad de la propia microbola penetrando por unos orificios practicados en la superficie exterior; la interacción de luz láser con la superficie exterior de la cavidad produce radiación X, que da lugar a la implosión (fig. 1).

Se han desarrollado dos tipos dediseños «cannonball»: «cannonball de pequeña cavidad» y «cannonball de gran cavidad». En ambos se logra una buena absorción, una excelente uniformidad de la irradiación, así como una eficiente comprensión suprimiéndose el perjudicial precalentamiento.

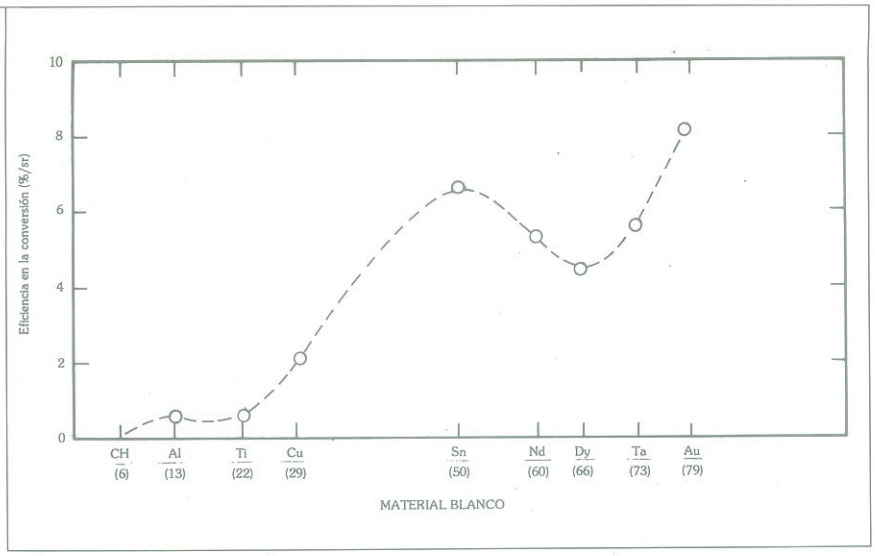
En el diseño «cannonball de pequeña cavidad», la implosión de la microbola es originada por la presión del plasma producido y acumulado en una pequeña cavidad, siendo ésta proporcional directamente a la energía absorbida e inversamente al volumen inicial de cavidad. Se logran temperaturas electrónicas de 1,5 KeV y densidades de 0,6 gr/cm^3. En este tipo de blanco se producen dos compresiones, la primera debida a la ablación del material de empuje, y la segunda mantenida por la presión del plasma de la cavidad. En la «cannonball» de gran cavidad, la luz láser se convierte en rayos X en la superficie de alto Z que existe en la cavidad. Se observa que la eficiencia de conversión de los rayos X aumenta al crecer el número atómico Z.

El diseño más avanzado de «cannonball» es el de doble capa, el cual tiene dos orificios de entrada en la capa exterior. El diámetro de ésta es de 900 µm., siendo la capa media de 600 µm. y la interior de 278 µm. Se consiguen compresiones muy uniformes llegándose a densidades de 8 gr/cm^3 con 2,5 kj. y 100 pseg. de duración del láser.

En otra línea, cabe señalar que en la actualidad se están utilizando blancos diseñados específicamente para una determinado experimento en que se quiere estudiar o poner de manifiesto algún proceso o fenómeno físico muy concreto. Se han irradiado microbolas para estudiar la simetría de la iluminación y las posibles inestabilidades creadas por una iluminación incorrecta, pero es mucho más frecuente el uso de placas y cilindros que permitan el estudio de inestabilidades de todo tipo, ecuaciones de estado, corrientes atómicas, poderes de frenado de diversos materiales, etc.

Se han realizado también estudios de producción de rayos X mediante la cesión de energía con láseres de 0,53 µm. en diferentes blancos. La eficiencia de la conversión, como se ve en la figura 2, aumenta al aumentar Z. En esta misma línea experimental con blancos que constan de dos materiales de diferente densidad (uno de alta Z y alta densidad, como por ejemplo oro, y otro de baja densidad, como espuma de oro), es decir, relaciones del orden de 1/6, usando haces de iones de 1 MJ. y 10^3 w/cm^2 de pulso se logra producir rayos X con una multiplicación de energía de 10. El descubrimiento tiene gran interés, ya que podía producir condiciones de ignición en blancos a partir de haces de no muy elevada energía.

Por último señalar la idea reciente de usar combustible polarizado con el fin de elevar las secciones eficaces de fusión y conseguir, por tanto, ganancias energéticas superiores.



F II *Dependencia de la eficiencia en la conversión de rayos X con el número atómico.*

FABRICACION DE MICROBOLAS

Los métodos y tecnología necesarios para la fabricación de microbolas han ido desarrollándose progresivamente. En la actualidad, su realización no presenta ningún problema que pueda ser considerado crítico en el avance de la fusión por confinamiento inercial, aunque aún deben ser resueltos pequeños problemas como la fabricación de capas con acoplamiento suave de impedancias.

El primer paso en la fabricación de microbolas de fusión se dio con la obtención de blancos de vidrio, en los cuales, la energía del haz se transmitía a toda la masa de la microbola mediante un proceso de transferencia de momento, produciéndose posteriormente la explosión de todo el conjunto.

Existen dos métodos para la fabricación de estas microbolas explosivas: métodos del gel líquido y gel seco. En ambos se forma una capa esférica de gel y posteriormente se difunde a través de ella el DT generado que más tarde se solidifica.

En el método de gel líquido se parte de una solución acuosa del gel, formada con el compuesto químico del vidrio del tamper. Mediante un pulverizador se forma la primera gota, la cual va pasando en un horno vertical por diversas tamperaturas hasta lograr una bola de vidrio hueco en la que se difundirá el DT gaseoso. Este método usa tecnología conocida, pero tiene la desventaja de limitar el uso de los compuestos químicos del vidrio a aquéllos que sean solubles. Esto se soluciona utilizando el método de gel seco, el cual parte de una mezcla homogénea de un compuesto químico del vidrio y de un gas de inflado que se difundirá al exterior consiguiendo una bola de vidrio hueco.

Una vez conseguidos blancos de DT y vidrio se añaden el resto de las capas, por ejemplo, la zona de ablación de plástico. Esto se logra introduciendo los blancos en una atmósfera de un monómero gaseoso; se realiza una descarga de un haz de electrones que disocia e ioniza el monómero produciéndose posteriormente macromoléculas que se depositarán en la superficie del vidrio con un espesor dependiente de la presión y del tiempo de exposición.

CAMARAS DE REACCION Y ENVOLTURAS DE LOS REACTORES FCI

Los requisitos básicos impuestos en el diseño de la vasija de un sistema FCI son: 1) conversión de la energía neutrónica de fusión en calor y que éste sea disipado en un refrigerante que opere a temperaturas consistentes con las propiedades de los materiales y con la necesidad de producir vapor; 2) lograr que la atmósfera de la cavidad sea tal que el haz energético pueda propagarse sin desenfoque hacia el blanco, y 3) que la envoltura pueda reproducir tritio con una razón de reproducción superior a la unidad.

CONSIDERACIONES SOBRE EL CONJUNTO VASIJA-HAZ ENERGETICO

El aspecto más crítico a tener en cuenta en el diseño del reactor es proteger la pared de la cámara de las diversas formas de deposición rápida de energía. Los diversos métodos para proporcionar dicha protección han concluido en diferentes tipos de cámara de reacción: pared seca (que incluye los conceptos de pared desnuda y de pared con recubrimiento renovable), paredes protegidas magnéticamente, cámaras llenas de gas, pared húmeda y pared de metal líquido. Además, ya que ningún concepto de cámara es apropiado para el rango completo de producción de energía y tasas de repetición, ni para todos los haces energéticos, ha sido necesario investigar muchos conceptos diferentes. Un resumen de los regímenes factibles para algunos de estos conceptos se ilustra en la figura 1. Los tipos de cámara pueden ser asociados a los diferentes haces (láseres, iones ligeros, iones pesados) comparando la densidad de fondo de la cámara con las ventanas de propagación para los mismos. La abcisa de la figura 3 corresponde a la presión de fondo (a temperatura *standard*).

La operación de los láseres viene sujeta a presiones de la cámara menores de unos pocos Torr, debido al posible proceso de ionización multifotónica experimentado por el gas y subsiguiente refracción del haz. Los haces de iones ligeros pueden propagarse a través de un canal ionizado creado por un haz láser, manteniéndose la presión del gas de la cavidad en un rango entre 5 a 50 Torr, dependiendo de la composición del mismo. El rango de presiones más probablemente compatible con el uso de iones pesados se sitúa por debajo de 10^{-3} a 10^{-4} Torr. Pero se confía en que exista una ventana entre 10^{-1} y 1 Torr, donde podría ser posible un modo de propagación por efecto «pinch».

La figura 3 supone una estimación de las restricciones físicas al diseño de la cámara, las cuales se establecen a partir de los parámetros de protección de la pared y la necesidad de restablecer las condiciones ambientes de la cavidad. Asumimos como límite superior para el radio de la cámara un valor de 10 m. Las representaciones de los contornos en el mapa de la figura son útiles para clasificar los parámetros de operación de cada tipo de cámara. Realmente no son nítidos y, en algunos casos, no conocidos. Solamente se han explorado regiones limitadas de este espacio paramétrico para cada concepto. Los límites correctos no serán conocidos hasta que no se especifique la microbola a emplear y no se lleven a cabo experimentos. No obstante, el mapa proporciona una perspectiva útil sobre la aplicabilidad y solapamiento de las diferentes cámaras y haces energéticos considerados.

Propiedades deseables en los materiales de recubrimiento para proteger la pared de la cámara incluyen:

- Bajo número Z (erosión por «sputtering» decrece y la penetración de los rayos X aumenta cuando el número atómico decrece).
- Alta conductividad térmica y capacidad calorífica.
- Resistencia a la alta temperatura (para maximizar la transferencia de calor y minimizar la evaporación durante la deposición de energía).
- Bajo costo.
- Facilidad de fabricación.

El grafito parece ser el material que mejor satisface estas propiedades, por lo que ha sido elegido en los estudios de conceptos de pared renovable.

Los límites en cuanto a producción de energía, que se fijan en la figura 3, para cámaras de pared desnuda de metal refractario, acero y carbono son un poco altos. Sin embargo, son resultados típicos a obtener con las microbolas asociadas a haces de iones pesados.

Se podría lograr un comportamiento más eficiente añadiendo gas a la cámara, o bien controlando la trayectoria los iones usando un campo magnético. En el esquema de protección magnética, los iones son deflectados de la pared cilíndrica por un campo magnético solenoidal y dirigidos hacia sumideros diseñados para ser fácil y periódicamente recambiables. En el esquema de protección por gas, la energía de los rayos X e iones es parcialmente absorbida en el gas y rerradiada a la pared durante un período más largo. En todo caso, el flujo de radiación de corto rango que llega a la pared es reducido, permitiendo una mayor producción de energía o menores radios para una superficie de pared dada. Mayores presiones de gas harían que la absorción tuviera lugar en una «bola de fuego» localizada centralmente, lo que originaría una onda de choque. La sobrepresión resultante en la pared se limita por un transitorio de tensión mecánica aceptable. La cámara con gas de llenado tendrá un límite para la tasa de repetición (actualmente desconocido) que será la máxima tasa a la cual el gas muy caliente pueda ser bombeado al exterior entre disparos o por la tasa de inyección de microbolas criogénicas dentro del gas.

Los conceptos que utilizan líquido en su esquema de protección gozan en la actualidad de la mayor aceptación. Una cámara de pared húmeda, en la que el refrigerante líquido fluye a través de una pared porosa puede dar lugar a reactores con mayores producciones de energía que los de pared seca. Los límites de trabajo de la estructura derivan del mecanismo de tensión pulsada debido a las fuerzas de reacción que resultan de una rápida ablación.

Los conceptos que hacen uso de paredes de metal líquido se diseñan para absorber también los neutrones. La máxima producción de energía aceptable para este concepto se limita, aunque a muy alto nivel, por la tensión mecánica pulsante originada por el impacto del gas y del líquido sobre la pared. Para los conceptos de pared húmeda y de pared líquida, el límite inferior de la presión de la cavidad se fija por la presión de vapor de los metales líquidos en el rango de 400 a 500° C, y el límite superior, por la formación de aerosoles, los cuales podrían interferir en la propagación del haz.

Los límites de funcionamiento indudablemente cambiarán a medida que se desarrollen más cálculos detallados y experimentos.

Futuras innovaciones darán lugar a nuevos conceptos que contarán con un espectro de aplicabilidad más amplio. Se cree que la libertad que permite el diseño de la cámara de un reactor FCI proporciona la diversidad requerida para cubrir un amplio margen operacional de producción de energía y tasas de repetición con varios drivers. Las cámaras de gas parecen particularmente apropiadas para iones ligeros e iones pesados cuando el gas sea necesario para formar los canales de propagación y cuando la consecución de eficiencias mayores del driver permitan ganancias y producciones de energía menores. Todos los conceptos, excepto las cámaras llenas de gas, podrían ser apropiados para láseres y haces de iones pesados en el rango de baja presión. Las cámaras de pared de metal líquido parecen ser las que mejor se adaptan a altas producciones de energía y tasas de repetición bajas. Si se pudieran alcanzar ganancias de energía de fusión lo suficientemente altas con láseres para que fueran accesibles producciones menores y tasas de repetición altas, se tendría un abanico muy amplio de posibilidades a la hora de elegir entre los diversos conceptos de cámara.

TENDENCIAS ACTUALES EN EL DISEÑO DE REACTORES CONCEPTUALES FCI

Es a partir de 1970 cuando comienzan a proponerse diseños conceptuales de reactores FCI, basados en el desarrollo de una estrategia adecuada del uso del ambiente de la cavidad, para modificar la evolución temporal, espectro y flujo de energía que llega a la pared de la cámara. No obstante, es a partir de 1977 cuando se han producido los avances más significantes en el área de diseño. La estrategia sigue siendo la misma: controlar el ambiente de la cámara para reducir el pico de flujo incidente en la pared, manteniendo el tamaño de la vasija dentro de los límites económicos. La tarea no es fácil dada la actual tendencia hacia mayores producciones de energía, consecuencia del aumento de la energía del haz necesario para obtener una adecuada ganancia en la microbola. En la tabla 3 se muestra un resumen de los parámetros característicos de diseños posteriores a 1977. Los esfuerzos más importantes en el campo del diseño se han realizado en Japón, República Federal Alemana y Estados Unidos, aunque, hasta la fecha, ningún país ha comenzado el programa

experimental necesario para confirmar los resultados teóricos y el análisis de los problemas térmicos y mecánicos de los reactores FCI, a excepción de algunos experimentos de corrosión de paredes por litio caliente.

Como características más relevantes de las tendencias actuales de la filosofía de diseño cabe considerar las siguientes:

– El uso de capas de metal líquido con suficiente espesor para absorber la energía de los neutrones, rayos X y residuos de la microbola se admite como esquema idóneo para asegurar una vida de la pared igual a la de la planta de potencia y reducir, a la vez, la masa de la estructura activada. El empleo del eutéctico Pb_{83} Li_{17} como refrigerante-reproductor se contempla como alternativa al uso de litio líquido. Muestra mejores características en cuanto a seguridad y absorción neutrónica, aunque supone mayores potencias de bombeo.

– Se han desarrollado dos innovaciones en reactores de FCI a fin de proteger la primera pared y aumentar la tasa de repetición permitida. Por una parte, el uso de tubos porosos, que contienen columnas de metal líquido, retardan el flujo y se protegen por una película líquida exterior. Por otro lado, el empleo de campos magnéticos de 1-10 KGauss retarda el flujo y reduce la velocidad del litio líquido en expansión rápida tras la microexplosión.

– El concepto de pared seca emplea una capa delgada de tántalo (1 mm.) sobre una primera pared de tubos de acero dispuestos en una cámara esférica. El radio de la primera pared y el diseño de la microbola se eligen de tal manera que la superficie de tántalo no alcance el punto de fusión al depositar su energía los rayos X y demás partículas emergentes de la microexplosión.

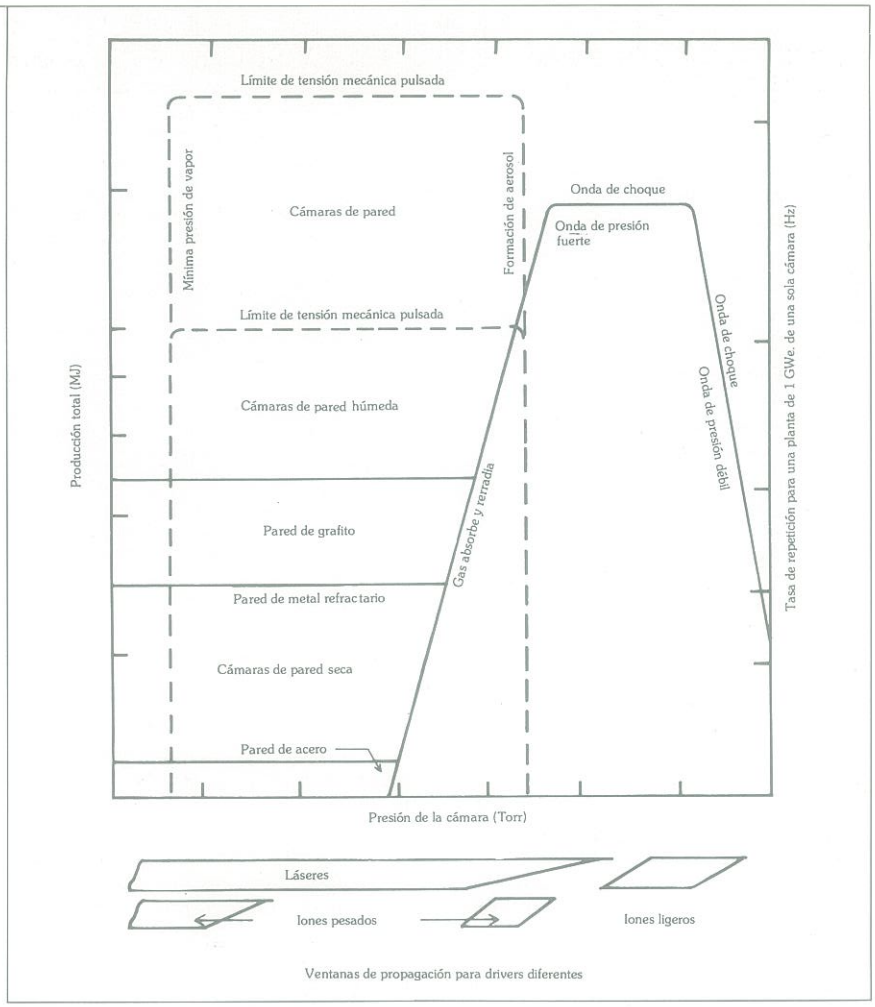
– En muchos de los conceptos de reactor se opera a una presión lo suficientemente baja como para trabajar con iones pesados o láser. La propagación de haces de iones ligeros requiere de cámaras llenas de gas.

– Todos los conceptos de reactor tienen una razón de reproducción de tritio superior a la unidad y suficientemente elevada para dar ganancia neta del material al considerar todos los canales de pérdidas habidos en el ciclo de tratamiento del tritio.

– Un mismo láser o sistema de iones pesados podría alimentar varias cámaras e incluso plantas de potencia, operando a una alta tasa de repetición. Así podría conseguirse una reducción en el coste efectivo del haz de energía. Análogo argumento se puede aplicar a la fábrica de microbolas.

A continuación se dan las características generales de los diseños conceptuales más importantes de reactor FCI. Un análisis detallado de algunos de ellos puede encontrarse en ref. 2.

– El diseño de reactor FCI, SOLASE, utiliza un láser de 1 MJ. de energía y 6,7 % de eficiencia para conseguir la implosión de 20 microbolas por segundo con una ganancia por microbola de 150 y una potencia eléctrica neta de 1.000 MWe. La cámara esférica de 6 m. de radio se llena de gas noble a baja presión para proteger a la primera pared de grafito frente a los productos de la microexplosión. El medio reproductor de tritio y refrigerante está constituido por esferas de Li_2O de un radio de 100 m. La estructura de grafito se reemplaza anualmente, y debido al bajo nivel de actividad su manipulación directa se puede llevar a cabo tan sólo dos semanas después del apagado, facilitando con ello un rápido mantenimiento.



F III *Regímenes de actuación permitidos para el diseño de la cámara y propagación del haz energético.*

– El diseño conceptual HYLIFE utiliza como esquema de protección de la primera pared chorros de litio líquido. Este concepto permite una larga vida de la cavidad a pesar de la alta densidad de potencia neutrónica.

– El diseño SENRI-I desarrollado en ILE (Osaka), utiliza un láser de CO_2 como medio iluminador y un esquema de protección por flujo de litio guiado magneticamente. Las burbujas que se producen en el flujo de litio actúan como amortiguador adicional, reduciendo las tensiones en la primera pared. Los resultados apuntan a la obtención de un reactor de larga vida, libre de mantenimiento. Dicho esquema de protección ha sido también utilizado en el reactor de iones pesados desarrollado por el grupo NTO (Nagoya, Tokio, Osaka) y en el reactor de iones ligeros ROKKO (ILE), en el que además el gas que llena la cámara deberá garantizar un adecuado transporte del haz.

– El esquema de pared seca revestida de tántalo, citado con anterioridad, se utiliza en el reactor conceptual WEC (Westinghouse). Este concepto puede ser también compatible con los requerimientos de transporte de haces de iones pesados.

– En el diseño HIBALL, el esquema de protección de la primera pared empleado, hace uso de un conjunto de tubos de SIC porosos, denominados unidades INPORT (Inhibited Flow – Porous Tube Concept), situados delante de la primera pared. Por ellos fluye el eutéctico $Pb_{83}Li_{17}$ líquido, el cual actúa como refrigerante y reproductor de tritio. En la actualidad se están estudiando la compatibilidad entre el SIC y el $Pb_{83}Li_{17}$.

Muy recientemente (1983-1984) se han empezado a desarrollar nuevos conceptos de reactor dirigidos fundamentalmente a reducir el coste del kW eléctrico producido mediante fusión, bien reduciendo los costes de capital o aumentando la eficiencia de la conversión por medio de la conversión directa

T I

ESTADO ACTUAL Y PERSPECTIVAS FUTURAS DE LOS DIFERENTES TIPOS DE «DRIVER»

Objetivo	Laser	Electrones relativistas	Iones pesados	Iones ligeros
Energía total de salida (MJ)	A	B	B	C
Potencia pico (200 TW)	B	B	C	C
Eficiencia (8 %)	A	B	A	A
Tasa de repetición (1 HZ)	C	C	C	C
Seguridad	B	A	A	A
Transporte Driver-Blanco	B	C	C	B
Protección frente a la radiación	B	C	C	B
Alta eficiencia de absorción (30 %)	B	B	B	B
Desacoplo capa de absorción-nucleo	A	A	A	A
Eficiencia de la compresión	A	A	A	A
Coste inicial de la construcción	C	A	A	C
Costes de mantenimiento	A	A	A	A
Vida útil	C	C	C	A

A = Requisitos satisfechos
B = Buenas perspectivas
C = Depende de futuros desarrollos

o el uso de ciclos de alta temperatura. Entre estos diseños avanzados se pueden destacar tres: CASCADE, PULSE'STAR y SUNBURST, que se analizan a continuación.

– Diseño CASCADE. El diseño de reactor CASCADE consiste en una vasija oval de 16 m. de largo y 5 m. de radio que gira alrededor de su eje horizontal a 30 rpm. Consta de una envoltura interior formado por esferas de Li_2O cerámico que actúa tanto como generador de tritio, como de medio de transferencia de calor y como sistema de protección de la pared de la vasija. Las esferas de Li_2O se inyectan a 800° K y se mantienen contra la pared de la vasija rotante por efecto centrífugo. Tras absorber la energía producida en la fusión, las esferas salen de la cámara a 1200° K, luego pasan por los intercambiadores, y posteriormente se inyectan de nuevo en la cavidad. Características importantes de este concepto son la baja activación y la alta eficiencia del ciclo térmico. En este diseño se permite utilizar tanto láseres como haces de iones como medio driver, alcanzándose 600 MJ. de energía de fusión con una tasa de repetición de 5 Hz. (ver fig. 2).

– Diseñor PULSE'STAR. Es un diseñor de reactor tipo piscina con $Pb_{83}Li_{17}$ como medio refrigerante y reproductor de tritio. La vasija del reactor tiene forma de campana perforada de 11 m. de diámetro, y se halla inmersa en una piscina de 17 m. de diámetro. Una pantalla de 4 m. de radio, en forma de casquete, hecha de metal refractario actúa como primera pared, absorbiendo los rayos X y residuos de la microexplosión. La envoltura situada entre la pantalla protectora y la vasija propiamente dicha está llena (50 % en volumen) de gotas de metal líquido, formadas en la interacción de los neutrones que van siendo absorbidos con los chorros que penetran a través de las perforaciones realizadas en la vasija. La mayor parte de la energía neutrónica se absorbe en este spray denso de Pb-Li. A causa de su diseño compacto, PULSE'STAR se espera tenga un bajo coste de electricidad, siendo, además, su diseño extremadamente seguro.

– Diseño SUNBURST. En este diseño, una esfera de litio líquido de 3 m. de radio, denominada «envoltura compacta», llena en la cámara de reacción, conteniendo en su interior la microbola. Con esta geometría se maximiza la energía cinética que la esfera de litio adquiere en su expansión, la cual se convierte directamente en electricidad por trabajo realizado contra un campo magnético pulsado que llena la cámara de reacción. Sunburst genera 500 MWe con una tasa de repetición de 0,5 Hz. Aproximadamente el 40 % de la energía de fusión se convierte en energía cinética en la envoltura y, al actuar contra el campo magnético, se extrae con una eficiencia del 93 %. La eficiencia media de conversión (directa + térmica) es del 58 %. Aumentando la frecuencia de repetición hasta 1 Hz. Podría reducirse significativamente el coste de la electricidad generada por SUNBURST. El impacto ambiental es mínimo a causa de la baja activación y buena contención del tritio dentro del litio.

T II *Principales experimentos láser en la actualidad*

Pais Lab	Experimento	Número de haces	Potencia salida (TW.)	Energía salida (kj.)	Características
EE. UU.					
LLNL	SHIVA	20	30	10	Nd cristal
(Livermore)	NOVETTE	2	10	10	Nd cristal
	NOVA I	10	100	100	Nd cristal
		10	—	70	Nd cristal (2 w)
		10	—	60	Nd cristal (3 w)
LANL	HELIOS	8	10	10	CO_2
(Los Alamos)	ANTARES	2 × 12	40	40	CO_2
LLE					
(Rochester)	OMEGA X	24	15	4	Nd cristal
URSS					
Lebedev	DELFIN	216	33	10	Nd cristal
	AURORA	20	—	50	Nd cristal
Kurchatov	MISHEN II	4	—	1	Nd cristal
JAPON					
ILE	GEKKO IV	4	2	2	Nd cristal
(Osaka)	GEKKO XII	12	40	20	Nd cristal
	LEKKO VIII	8	10	10	CO_2
REINO UNIDO					
Rutherford	VULCAN	6	6	1,2	Nd cristal
Culham	TROJAN	1	—	2,5	CO_2
FRANCIA					
Limeil	OCTAL	8	2	1	Nd cristal
Ecole Polit.	GRECO	1	0,25	0,25	Nd cristal
ITALIA					
Frascati	CHIMERA	2	0,2	0,2	CO_2
RFA					
Garching	ASTERIX III	1	1,1	0,4	Iodo

AREAS DE TRABAJO ASOCIADAS AL DISEÑO DE UN REACTOR FCI

Estudio de materiales

Son problemas que afectan a la vida de la estructura de la vasija: (a) daño por radiación (hinchamiento, pérdida de ductilidad, etc.), (b) fatiga térmica, (c) desgaste superficial, (d) cargas dinámicas.

Se puede decir que son funciones de respuesta crítica para determinar la vida de la misma, la producción de heterogeneidades gaseosas (He, H) y de desplazamientos atómicos en los materiales de la estructura, así como la fluencia que experimenta el material irradiado a causa de la fatiga térmica. Una consideración a tener en cuenta en la elección de materiales para un reactor FCI es la naturaleza pulsante de la radiación, bien es cierto que la envoltura de metal líquido interior o el gas que pudiera llenar la cavidad podrían resolver en parte esta dificultad.

En el área de los refrigerantes reproductores se tiende a desechar el Li líquido a causa de su alta reactividad. El uso de reproductores sólidos tales como el Li_2O, $LiA10_2$ y el empleo de la aleación $Pb_{83}Li_{17}$ (eutéctico) están en la línea más actual de investigación. Igualmente

T III *Diversos diseños de reactor posteriores a 1977*

Instituto Fecha	Nombre concepto	Producción/ cámara (MJ.)	Rep. (Hz)	Número de cámaras	Potencia de la planta (MW. [th])	Radio cavidad (m.)	Pico en 1.ª pared (MW. m^{-2})	Observaciones driver
ILE-78	SENRI-I	1.000	1	1	1.000	6	2,8	CO_2 láser
LLNL-78	HYLIF (Liq.)	2.700	1	1	2.700	5	900	Láser
Sandia-78	LIFR (gas)	100	10	1	1.000	4	5	LIB
LASL-79	Pared húmeda	150	10	1	1.500	2	30	CO_2
ILE-80	ROKKO I (Líq. gas)	300	1	1	300	2	5	LIB
DKW-80	HIBALL (tubos INPORT)	400	5	4	8.000	7	6,7	HIB RF LINA
NTO-80	Pared líquida	300	10	10	3.000	5	1	HIB RF LINA
WEC-80	Pared seca	350	10	1	4.300	10	3	HIB RF LINA CO_2 láser
LLNL-82	PULSE-STAR (piscina)	600	5	2	7.600	5,5	—	Láser
LLNL-82	CASCADE (esferas Li_2O)	600	5	1	3.000	5	—	Láser HIB
LLNL-82	SUNBURST	1.800	0,5	1	500 MWe.	3	—	Láser

se están estudiando los problemas de interacción plasma-pared así como la física desuperficies. Los progresos sobre materiales de fusión se están realizando en virtud a los programas que se están llevando a cabo en EUA, Japón y la Comunidad Europea. No obstante se hace necesario aumentar la base de datos experimentales que describan el comportamiento de los materiales irradiados como paso clave en el desarrollo de conceptos de reactor factibles.

Manejo de tritio

La tecnología del tritio es un problema común en los dos tipos de fusión. En FCI, la masa total de tritio es muy inferior, siendo no obstante la inyección de tritio a alta presión en la microbola un nuevo problema a resolver en este campo.

Instalaciones de pruebas

Para establecer tanto una amplia base de datos del sistema como una base de datos de los materiales serán necesarios conjuntos experimentales. Estas instalaciones son fundamentales para el diseño de un reactor comercial. Un mejor conocimiento de la física de la implosión, así como la elección del haz de energía óptimo y del diseño adecuado de microbola se podrán obtener a partir de estas instalaciones de pruebas.

Nuevos conceptos de reactor

Se han propuesto hasta la fecha un gran número de diseños conceptuales dirigidos a establecer la viabilidad de una aplicación comercial. Restan por realizar estudios detallados de diseño estructural, tecnología de metal líquido y termodinámica y neutrónica de la vasija del reactor, esperándose la aparición de nuevos conceptos con el desarrollo de una base de datos para el diseño.

CONCLUSION

En el presente artículo se ha analizado el estado actual y las vías de desarrollo de los tres elementos característicos de una central de fusión por confinamiento inercial: El sistema del haz de energía, la microbola combustible y la vasija del reactor. Basándonos por una parte en los diferentes estudios económicos realizados hasta la fecha, y por otra, en los problemas físicos y tecnológicos ya mencionados, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

– En el caso de microbolas de alta ganancia, la principal partida del coste es la constituida por el propio reactor; la influencia del haz de energía se hace tanto más importante cuanto más conservativa es la ganancia, y especialmente, en el caso de tener una única central de fusión alimentada por el haz.
– La presencia de dos o tres reactores que comportan un único haz exterior y una misma fábrica de microbolas permite disminuir el coste total de la electricidad generada.
– A pesar de los grandes avances realizados en la tecnología de los haces de energía parece claro que será necesario alcanzar energías de varios megajulios con duraciones de pulso del orden de nanosegundos para poder evaluar la factibilidad tecnológica de la FCI. Estos requisitos se basan en ganancias energéticas en la microbola superiores a 100 y en admitir la futura disponibilidad de un driver con una eficiencia superior al 10 %.
– El diseño de la vasija de un reactor FCI permite un rango de operación muy amplio (producción de energía y tasas de repetición) para los diferentes tipos de haces exteriores de energía.
– Finalmente se quiere resaltar que el futuro de la fusión por confinamiento inercial dependerá en gran medida de los resultados que se obtengan en la presente década con los experimentos que se realicen en las grandes instalaciones ya construidas o próximas a finalizar su construcción (ANTARES, NOVA, GEKKO XII, ANGARA-V y PBFA-II), encontrándonos, por tanto, en la actualidad, en una fase crucial de la demostración de la fusión como la fuente energética del año 2000.

REFERENCIAS

1. Yonas, G. «Advances in ICF Research» Nuclear Fusion 24, 4, 505 (1984).
2. González, M.C., Sánchez, L., Sanz, J., «Aspectos científicos técnicos, económicos e institucionales de la fusión nuclear». DENIM 026 (1984).
3. Blink, J.A., Mousler, M.J. «Status of Inertial Fusion and prospects for practical power plants» Atomkernenergie, 44, 3 (1984).
4. Aragonés, J.M., Honrubia, J.J., Peña, J.J., «Estado actual de los programas de investigación y desarrollo de la FCI». Ponencia presentada en la IX Reunión Anual de la SNE. Sevilla, diciembre 1983.
5. Proyecto KONGOH. Apuntes de una conferencia pronunciada por C. Yamanaka en el Departamento de Energía Nuclear de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Madrid. Septiembre 1984.
6. Lase Program Annual Report. Lawrence Livermore Nat. Laboratory. Años 1980, 1981, 1982 y 1983.
7. Miller, R.B., «An Introduction to the Physics of intense charged particle beams» Plenum Press.
8. Onteseer, K., and Meyer-ter-Vehn, J. «On Ion Beam Energy Conversion into Soft X-rays». Max Planck-Institut fur Quantenoptik.
9. Yabe, T. «Soft-X-Ray Emission from variable z targets irradiated by a 0,53 m. Wavelegth Laser». Research Report. ILE. Osaka.
10. Yamanaka, C. et al. «Cannoball target Experiment with the Gekko Laser System at ILE Osaka» AIEA-CN-44/B-I-1 (London 1984).
11. Frohlich, R., et al. «Progress in target physics at the nuclear research center Karlsruhe» Institute für Neutronenphysik und Reaktortechnik Kernforschungszentrum. Karlsruhe.
12. Hogan, W.J., «A comparison of three ICF Reactor Desings» 13th Symposium on Fusion Technology, Varese. September 1984.
13. E. Storm. «Progress in Inertial Fusion at LLNL» Sixth Topical Meeting on the Technology of Fusion Energy. San Francisco. March 1985.
14. Proceedings of the Third Topical Meeting on Fusion Reactor Materials. September 1983. Alburquerque.