

Fusión nuclear: Adopción de metas en materia de seguridad y medio ambiente

El análisis del potencial de la energía de fusión para la explotación segura, fiable y favorable al medio ambiente forma parte de las investigaciones en curso

por
**Franz-Nikolaus
 Flakus, John C.
 Cleveland y
 T.J. Dolan**

Durante algunos decenios se ha considerado que el proceso que energiza el sol -fusión nuclear- sería una solución a los problemas energéticos de la Tierra. Queda por ver si la fusión nuclear logra satisfacer nuestras expectativas, pues los diseñadores de centrales de energía de fusión enfrentan problemas tecnológicos complejos, y aún no se ha construido ninguna central de este tipo. No obstante, se han realizado progresos notables para aprovechar las posibilidades que ofrece la fusión.

Durante decenios, se han venido realizando en diversos países investigaciones en esferas de la fusión nuclear. Entre los esfuerzos figura el JT-60, que ha arrojado resultados significativos para mejorar el confinamiento del plasma; el experimento Tokamak D-IIIID, que ha alcanzado valores no superados de presión del plasma relativos a la presión del campo magnético; y el Reactor Tokamak de Fusión de Ensayo (TFTR), que ha generado 10 millones de watts de energía térmica a partir de la fusión. Se espera que el Joint European Torus (JET) logre condiciones similares, en las que la energía de fusión generada supera la energía de entrada. El reactor termonuclear experimental internacional (ITER), de cuyo diseño se encargan expertos de la Comunidad Europea, Japón, Federación de Rusia y Estados Unidos, deberá resolver problemas pendientes en la esfera de la física, como por ejemplo, la pureza del plasma, las interrupciones, y el sostenimiento de la corriente. (Véase el artículo conexo que comienza en la página 16.)

Existe la confianza de que, con el tiempo, se puedan resolver los problemas de diseño técnico -entre los que figuran los relacionados con los imanes superconductores, los sistemas de vacío, los sistemas criogénicos, los sistemas de calentamiento del plasma, los sistemas de diagnóstico del plasma, y los sistemas de refrigeración de la capa fértil. Otros aspectos importantes del diseño de la central de energía de fusión tienen que ver con la seguridad y el aspecto económico. En el presente artículo se examinan las cuestiones de seguridad del diseño de las centrales de

energía de fusión, así como los esfuerzos que se realizan en las esferas relativas a la seguridad mediante las actividades de cooperación internacional.

Objetivos y criterios relativos a la seguridad

No pueden hacerse pronósticos fiables de la electricidad generada a partir de la energía de fusión hasta que se definan los detalles del diseño de las centrales comerciales de energía de fusión y tampoco se prevé actualmente que este costo sea significativamente menor que los de otras fuentes de energía.

Con todo, en las esferas de la seguridad, la fusión tiene ventajas potenciales respecto de otras fuentes de energía. En casi todos los estudios sobre el diseño de la central de energía de fusión, se hace cada vez mayor hincapié en la seguridad y el medio ambiente, y se han analizado ampliamente los objetivos de seguridad de la fusión. Los objetivos de seguridad y medio ambiente del diseño de centrales de energía de fusión comprenden la protección de los trabajadores contra las radiaciones, los campos electromagnéticos y otros riesgos; la protección del público contra los materiales radiactivos y tóxicos; la protección del medio ambiente contra agentes contaminantes y los desechos; y la protección de los inversionistas contra daños por accidentes.

Proceso de fusión. A temperaturas suficientemente altas, casi la mayoría de los núcleos ligeros experimentan reacciones de fusión y en principio podrían utilizarse como combustible en las centrales de energía de fusión. Sin embargo, las dificultades técnicas aumentan rápidamente con la carga nuclear de los isótopos reaccionantes. Es por esta razón que en la práctica solo se ha propuesto la utilización del deuterio, el tritio y los isótopos de helio, litio y boro.

Es muy probable que la primera generación de las centrales de energía de fusión utilice el combustible deuterio-tritio (DT) porque es el que con más facilidad logra la ignición. El producto principal que interviene en la reacción, el helio 4, no plantea ningún peligro para la salud. La energía principal liberada en un suceso de fusión DT es un neutrón de 14 MeV. Casi todos los materiales se activan en cierta medida mediante el bombardeo energético de neutrones. Las reacciones neutrónicas en los reactores de fusión DT producirán inevitablemente radisótopos. Por tanto, los

El Sr. Flakus es funcionario superior del Departamento de Seguridad Nuclear del OIEA; el Sr. Cleveland es funcionario superior del Departamento de Energía Nuclear del OIEA, y el Sr. Dolan es el Jefe de la Sección de Física de la División de Ciencias Físicas y Químicas del OIEA.

materiales radiactivos principales presentes en el reactor de fusión DT serán el tritio y los materiales estructurales de activación neutrónica que rodean el volumen de la reacción.

Consideraciones relativas a la seguridad. Los estudios específicos sobre la seguridad de las centrales de energía de fusión, que complementan muchos otros estudios sobre seguridad, comprenden los relativos a la seguridad del tritio, la evaluación de las liberaciones de tritio, la seguridad de los productos de activación, la evacuación de desechos radiactivos y los análisis de posibles accidentes y sus consecuencias.

La tasa de liberación de tritio durante la explotación de la central tiene que mantenerse dentro de un nivel de seguridad aceptable. Esta liberación de tritio se modela mediante códigos de computadora que explican la permeabilidad del tritio a través de los materiales presentes en la central eléctrica. Los principales laboratorios de investigación sobre el tritio se encuentran en Alemania, el Canadá, los Estados Unidos, la Federación de Rusia, Italia y el Japón.

La generación de productos de activación neutrónica no constituye un serio problema si se pueden contener y si tienen períodos de semidesintegración cortos. Son un subproducto de la reacción de fusión y no un producto directo de la reacción. Es por ello que el diseñador controla su generación en la capa fértil y la estructura del reactor y puede reducirla al mínimo mediante un diseño conveniente y la selección adecuada de los materiales. Se está analizando ampliamente la utilización de una variedad de materiales de baja activación.

No existe la posibilidad de que se produzca una reacción de fusión de fuga. En realidad, la cuestión es hacer que la reacción de fusión proceda de manera adecuada. Casi todos los problemas de soporte físico (hardware) motivan una parada de la fusión, y en cualquier caso existen límites inherentes debido a la cantidad limitada de combustible de fusión presente y a las características de la reacción de fusión. No obstante, la labor de la seguridad de la fusión se concentra específicamente en el análisis de varios otros posibles accidentes, como los accidentes con magnetos, para los que se realizan "cálculos de consecuencias". Para categorizar los accidentes por grupos de sucesos y clasificar su frecuencia, es necesario contar con datos específicos sobre la fiabilidad de los componentes.

El método utilizado para realizar un análisis general de la seguridad de las centrales de energía de fusión es similar al que se aplica en el diseño de otras instalaciones nucleares grandes. (Véase el recuadro de la página 25). Los resultados de los análisis de la seguridad indican que las centrales de energía de fusión pueden lograr los objetivos de seguridad deseados. Por ejemplo, en el estudio *ESECOM* se compararon la seguridad y los aspectos económicos de muchos diseños de reactores de fusión*. Se analizaron las cuestiones generales de seguridad del ITER y se publicó un proyecto de informe en que se proporcionan los resultados preliminares del análisis de la seguridad del ITER.

Durante más de veinte años se ha venido avanzando en los estudios sobre la seguridad de las cen-

trales de energía de fusión, los cuales se adaptan de forma ininterrumpida a la evolución de los conceptos y requisitos de seguridad radiológica internacionalmente convenidos.

En 1994 el OIEA, conjuntamente con otras cinco organizaciones internacionales, publicó una revisión de las Normas básicas internacionales de seguridad para la protección contra la radiación ionizante y para la seguridad de las fuentes de radiación. En las Normas básicas de seguridad -publicadas conjuntamente con la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), la Organización Internacional del Trabajo (OIT), la Agencia para la Energía Nuclear de la Organización de Cooperación y Desarrollo Económicos (AEN/OCDE), la Organización Panamericana de la Salud (OPS), y la Organización Mundial de la Salud (OMS)- se toman en cuenta las nuevas recomendaciones sobre la protección radiológica de la Comisión Internacional de Protección Radiológica (CIPR). Un aspecto principal del sistema de limitación de dosis es el principio de la "optimización de la protección". La fusión ofrece buenas posibilidades para aplicar satisfactoriamente este principio. La optimización se logra mejor cuando la evaluación de la seguridad ya está integrada a las primeras etapas del diseño de un proyecto.

Como se señaló anteriormente, es muy probable que las primeras centrales de energía de fusión utilicen el ciclo del combustible DT. Una vez que se haya construido la primera central de energía de fusión basada en la reacción DT, se podrá fomentar la utilización de los combustibles avanzados en la explotación de la energía, y con ello reducir el inventario de tritio. Las centrales de energía de fusión posteriores pueden evolucionar hacia combustibles (como el deuterio+3helio) que generen menos neutrones, y por ende, menos radiactividad en los materiales circundantes. Por tanto, durante la evolución hacia ciclos de combustibles avanzados, las ventajas de la fusión en materia de seguridad pueden aumentar con el tiempo. En el futuro se podrán diseñar centrales eléctricas con inventarios de radionucleidos suficientemente bajos, de forma tal que resulten innecesarias la planificación y preparación para casos de emergencia.

Aplicación práctica de la fusión

Se ha calculado que para explotar la energía de fusión se necesita invertir alrededor de 50 000 a 100 000 millones de dólares de los Estados Unidos. Los recursos financieros, estimados en unos 1500 millones de dólares anuales en todo el mundo, limitan el ritmo de avance en las investigaciones sobre la fusión.

Actualmente, se espera que entre los años 2005 y 2010 podrá comenzar la explotación del ITER con cantidades significativas de DT, seguida de la construcción de una central eléctrica de demostración. De esa forma, unos dos decenios después podrá entrar en funcionamiento una central de energía de fusión. Si el reactor de demostración da buenos resultados, es

*Véase "Report of the Senior Committee on Environmental, Safety, and Economic Aspects of Magnetic Fusion Energy" por J.P Holdren, D.H Berwald, R.J. Budnitz, y otros, UCRL-53766 (1989).

decir, si existe suficiente experiencia de funcionamiento que justifique el financiamiento de una central eléctrica comercial, las primeras centrales comerciales de energía de fusión podrían entrar en servicio aproximadamente en el año 2050.

Este calendario estimado podría atrasarse o adelantarse. Podría retrasarse por falta de recursos financieros o dificultades imprevistas con los fenómenos del plasma o la tecnología. Por otra parte, podría adelantarse por un descubrimiento importante en el conocimiento del comportamiento del plasma (como sería quizás, el éxito reciente obtenido con el "modo de cizalladura a la inversa" en que funcionan los Tokamak), por un nuevo invento que mejore el confinamiento del plasma y por un aumento en la asignación de recursos financieros.

Asimismo se analizan tipos de confinamiento del plasma distintos del Tokamak para construir reactores que puedan generar electricidad a más bajo costo. Por ejemplo, en el Japón y Europa se hacen amplios experimentos con los estelaratores. Es evidente que los estudios de seguridad contribuirán en gran medida a lograr de manera permanente que el público confíe en la energía de fusión, la desee y la acepte.

Actividades del OIEA en materia de seguridad de la fusión

Bajo la orientación del Consejo Internacional de Investigaciones sobre la Fusión (CIIF), el OIEA realiza una serie de actividades que promueven la cooperación internacional y ayudan a incrementar las ventajas de seguridad y ambientales de la energía de fusión. Entre ellas figuran el apoyo al proyecto ITER, cuya actividad de diseño técnico ha sobrepasado la etapa intermedia. En el diseño del experimento ITER se tendrá en cuenta el aspecto de la seguridad para garantizar que no haya víctimas durante un accidente importante ocasionado por la liberación de radisótopos. En 1995 el Organismo publicó un estudio sobre la seguridad de los reactores de fusión por inercia.

Muchas actividades del OIEA en materia de seguridad radiológica se relacionan con la seguridad de la fusión. Entre ellas se incluyen cuestiones como las normas de seguridad para la protección radiológica, el transporte seguro de materiales radiactivos y la gestión de desechos radiactivos, las directrices relativas a la manipulación segura del tritio y la limitación de las emisiones de radiactividad en el medio ambiente.

Desde 1973 la seguridad de la fusión ha figurado como un tema especial en el programa de actividades en materia de seguridad del Organismo. A lo largo de los dos últimos decenios, el Organismo ha organizado varias reuniones de comité técnico sobre la seguridad de la fusión, en las que se han analizado los progresos, las necesidades de investigación y los planes futuros. Por lo general, unos 50 expertos provenientes de una docena de Estados Miembros han asistido a estas reuniones que se han celebrado cada tres a cuatro años aproximadamente. En junio de 1993 se publicaron en la *Journal of Fusion Energy* las actas de la última reunión de esta serie, celebrada en 1993 en Toronto,

Principios de seguridad de la fusión

Los principios de seguridad de la fusión ahora comprenden los conceptos siguientes:

- sistemas pasivos y características de seguridad inherentes;
- diseño a prueba de desperfectos;
- fiabilidad (incluida la redundancia de los componentes (bombas, válvulas, etc); diversidad (como dos formas diferentes de suministrar energía de reserva); independencia (si un componente o sistema falla, no provoca la falla del elemento adyacente); sencillez; y vigilancia, a fin de detectar los componentes defectuosos antes de que ocurra un accidente);
- examen de los factores humanos;
- servicios de mantenimiento a distancia;
- cultura de la seguridad en la actitud de los trabajadores;
- garantía de calidad (incluidos los códigos y las normas; la verificación y validación; y el análisis de seguridad);
- controles operacionales (detección de averías, medida correctora automática);
- sistemas de seguridad para disminuir las consecuencias de las averías
- preparación y gestión en situaciones de accidente para preservar la integridad del confinamiento;
- planificación para casos de emergencia con objeto de mitigar los efectos de las emisiones de radiactividad, si fuera necesario.

Canadá. La próxima reunión está programada para octubre de 1996 en el Japón.

Perspectivas y direcciones futuras

Los reactores de fusión tienen grandes posibilidades de lograr una explotación segura y no nociva desde el punto de vista ambiental. Los aspectos de seguridad de las centrales de energía de fusión, diseñadas en papel, aún no se pueden comparar con los de los reactores de potencia de fisión u otras fuentes de energía en explotación. En el caso de la fusión, el grueso del material radiactivo consiste en un producto secundario derivado de la activación neutrónica, lo que posibilita la optimización de la protección mediante el desarrollo y selección de los materiales, o la utilización de combustibles avanzados.

Con el propósito de asegurar que a la larga se aprovechen las posibles ventajas de seguridad y ambientales de la fusión, la ingeniería de la seguridad debe integrarse a los diseños de los reactores de fusión. Ello se está haciendo en el proyecto ITER, aunque el ITER es un reactor de fusión experimental avanzado y no debe considerarse como un prototipo de reactor de energía de fusión.

Análisis de la seguridad de la fusión

Al igual que en los estudios de seguridad de otras instalaciones nucleares grandes, el análisis de los accidentes en las centrales de energía de fusión supone diversas fases.

Cada secuencia de sucesos puede estar representada por un "árbol de sucesos", y cada rama del árbol tiene una probabilidad de aparición asociada. Por ejemplo, si se ordena cerrar una válvula, la probabilidad de que no se haga será finita. En cuanto a los sucesos de pérdida de refrigerante y pérdida de flujo, el aumento de la temperatura en la primera pared y en la capa fértil se debe calcular como funciones de tiempo. Por tanto, se puede estimar la movilización de diversos elementos sobre la base de los datos provenientes de las pruebas de laboratorio.

La cantidad de determinado radisótopo movilizado durante un accidente constituye el "término fuente". A veces la fuente es un aerosol de óxido, la mayoría del cual se metaliza dentro del edificio. En el caso de un accidente grave donde se afecte la contención, podría ocurrir el escape de una fracción de aerosol hacia la atmósfera. Se utilizan códigos de computadora avanzados para elaborar modelos:

- del transporte de neutrones y rayos gamma en la primera pared, la capa fértil y el blindaje;
- de la generación de radisótopos mediante la absorción de neutrones;
- del aumento de la temperatura debido al calor residual y las reacciones químicas ocurridas durante el accidente;
- de la movilización de radisótopos durante el accidente;
- del transporte de aerosoles dentro del edificio de confinamiento (y reacción liberada);
- del transporte de partículas y gases liberados hacia el perímetro del emplazamiento;
- de la dosis de radiación del "individuo sometido a la máxima exposición" en el perímetro del emplazamiento.

A medida que se avance en los estudios sobre la seguridad de la fusión, se requerirá un trabajo cada vez más interdisciplinario. A largo plazo, cabe esperar con confianza que la seguridad se fortalezca a medida que se progrese en el diseño de las centrales de energía de fusión. Hoy siguen vigentes las palabras de C.M. Braams, Presidente del CIIF, hace 20 años en una nota introductoria a una revisión redactada en aquel entonces:

"...aunque las perspectivas para aprovechar las ventajas de la fusión desde el punto de vista ambiental son buenas, es evidente que los reactores de fusión, si llegaran a hacerse realidad, tendrán una repercusión sobre el medio ambiente -incluidos los riesgos radiológicos- cuya magnitud dependerá del progreso de las investigaciones, de la disponibilidad de materiales y de los gastos que la sociedad esté dispuesta a hacer para reducir al mínimo dicha repercusión".

Fases del análisis de accidentes en las centrales de energía de fusión

I. Examen de los posibles riesgos

Entre ellos se incluyen:

- la radiación gamma
- las liberaciones habituales de tritio
- las liberaciones accidentales de material radiactivo provenientes de
 - la estructura
 - el refrigerante
 - los productos corrosivos
 - el polvo
 - el tritio en las paredes, la capa fértil, el refrigerante, el sistema de vacío, el sistema de carga del combustible
- los materiales tóxicos, como el berilio, el vanadio, el plomo
- los campos electromagnéticos
- el vacío
- los fluidos criogénicos
- los gases nitrosos (como N₂, He)
- las reacciones químicas
 - metales líquidos con agua, aire u hormigón
 - superficies calientes con agua o aire
 - generación y explosión del hidrógeno
- la alta tensión
- la maquinaria rotatoria
- el levantamiento de masas pesadas
- proyectiles despedidos por álabes de turbina, arcos de la bobina de electroimán o gases de alta presión.

II. Análisis de las fuentes de energía de que se dispone para "movilizar" materiales radiactivos

Ejemplos de valores previstos:

- calor de desintegración (910) GJ en la primera semana
- reacciones químicas (800) GJ
 - refrigerante
 - agua/aire + componentes calientes cercanos al plasma
- energía almacenada del refrigerante 300 GJ
- energía almacenada de la bobina de electroimán 120 GJ
- energía total de la reacción de fusión 1,5 GJ/segundo
- energía magnética del plasma 1,3 GJ
- energía térmica del plasma 1,2 GJ
- energía térmica de la vasija poca
- vacío poco

III. Análisis de posibles accidentes, tales como:

- sucesos relacionados con el plasma
 - sobrecarga de fusión
 - interrupciones
 - paradas retrasadas
- suceso de pérdida de refrigerante
- suceso de pérdida del flujo
- suceso de pérdida del vacío
- sucesos relacionados con los imanes
- pérdida de criogeno
- sucesos relacionados con centrales de tritio
- sucesos relacionados con el sistema auxiliar