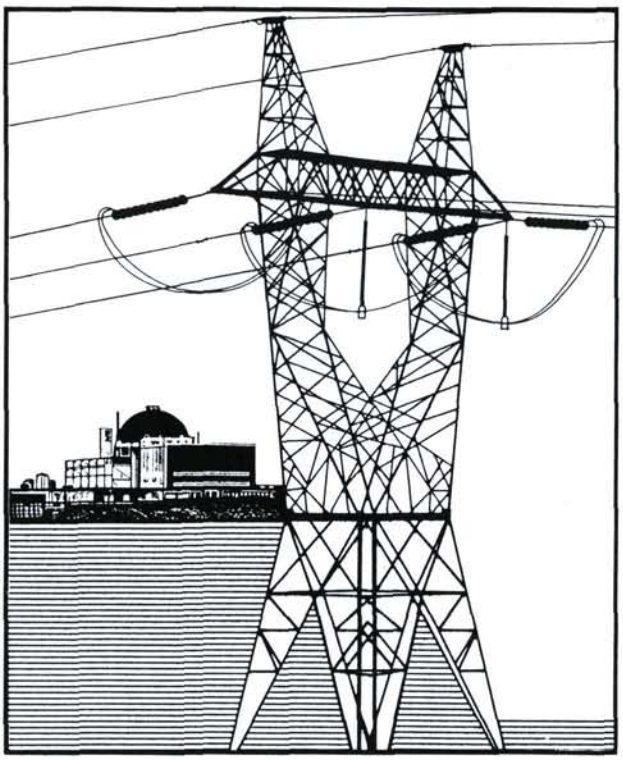
A la Conferencia Internacional del OIEA sobre el comportamiento y la seguridad de la energía nucleoeléctrica, celebrada en Viena del 28 de septiembre al 2 de octubre, asistieron expertos de unos países. Con ocasión de esta reunión, la Unión Soviética celebró el 30 de septiembre una conferencia de prensa, relativa a diversos aspectos de su programa nucleoeléctrico, en la que participaron los funcionarios soviéticos siguientes (de izquierda a derecha): Sr. N. Lukonin, Sr. A. Petrosyants, Sr. V. Malyshev, Sr. A. Abagyan y Sr. L. Ilyin
(Foto: Katholitzky, para el OIEA).



Comportamiento y seguridad de la energía nucleoeléctrica

Aspectos destacados de la conferencia internacional del OIEA

por L.L. Bennett, J. Fischer y A. Nechaev

Los esfuerzos nacionales e internacionales para mejorar el comportamiento y la seguridad de las centrales nucleoeléctricas figuraron entre los diversos aspectos técnicos y económicos que se abordaron en la Conferencia Internacional del OIEA sobre el comportamiento y la seguridad de la energía nucleoeléctrica, que concluyó en Viena a principios de octubre de 1987*.

En el discurso con que inauguró la Conferencia, el Director General del OIEA, Dr. Hans Blix, señaló que ésta era la última de una serie de reuniones que habían constituido hitos en el desarrollo de la energía nucleoeléctrica. Entre las anteriores se cuentan las cuatro Conferencias de Ginebra (de las cuales, las dos últimas tenían programas a cargo del OIEA), la Conferencia de Salzburgo sobre la energía nucleoeléctrica y su ciclo del combustible, celebrada en 1977, y la Conferencia de Viena sobre la experiencia adquirida en la esfera nucleoeléctrica, celebrada en 1982. Cada una de ellas constituyó una etapa importante en el desarrollo de la energía nucleoeléctrica y permitió hacer una síntesis de los conocimientos colectivos al reunir información procedente de numerosos países. Esta última conferencia resultó igualmente oportuna e importante, ya que ofreció un valioso panorama de las experiencias y datos más recientes acerca de las metas y objetivos de los países que cuentan con programas de energía nucleoeléctrica, así como información sobre las reevaluaciones, a veces penosas, de estos programas que se realizaron en algunos países el año anterior.

Desarrollo de la energía nucleoeléctrica

Necesidades energéticas y de energía nucleoeléctrica

En sus palabras de resumen durante la sesión de clausura, el Sr. W. Kenneth Davis, consultor del Grupo Bechtel Inc. y ex Subsecretario del Departamento de Energía de los Estados Unidos, expresó su convicción de que la energía (incluida la eléctrica) es uno de los *requisitos* fundamentales del crecimiento económico y el progreso social, y no una mera *consecuencia* de ese crecimiento.

A juicio del Sr. Davis, la necesidad de energía nucleoeléctrica está claramente relacionada con la necesidad de energía eléctrica y con la disponibilidad de opciones para generarla. Por lo general, la necesidad de energía eléctrica está relacionada con las necesidades energéticas totales, pero, como quedó demostrado en muchos de los documentos que se presentaron en la conferencia, no depende de ellas directamente. La tasa de crecimiento de la demanda de electricidad suele exceder ampliamente a la tasa de crecimiento de la demanda energética, y es por eso que en casi todos los países va en aumento la proporción de energía primaria que se utiliza para generar electricidad. La tasa de crecimiento de la demanda de energía y de electricidad en relación con el crecimiento económico es mucho más alta en los países en desarrollo que en los países desarrollados. Ello provoca serios problemas financieros cuando el costo de

El Sr. Bennett es jefe de la Sección de Estudios Económicos de la División de Energía Nucleoeléctrica del Organismo. El Sr. Fischer es funcionario de la División de Seguridad Nuclear. El Sr. Nechaev es jefe de la Sección de Materiales Nucleares y de Tecnología del Ciclo del Combustible, de la División del Ciclo del Combustible Nuclear.

* La conferencia se celebró en Viena del 28 de septiemre al 2 de octubre de 1987, con la asistencia de unos 500 participantes procedentes de 40 países y 12 organizaciones internacionales. Se presentaron y debatieron cerca de 200 documentos de 26 países y seis organizaciones internacionales. Los documentos pueden obtenerse dirigiéndose al OIEA.

la energía es elevado. El Profesor H.J. Laue respaldó estos criterios en el documento que presentó en nombre de la Conferencia Mundial de la Energía.

En un documento presentado por el OIEA se comunicó que para finales del siglo se espera que la capacidad de generación de energía nucleoeléctrica de los países en desarrollo se duplique con creces, como resultado de la adición de una capacidad de energía nucleoeléctrica de aproximadamente 40 gigavatios eléctricos (GW(e)). Se espera que en ese mismo período, la capacidad de energía nucleoeléctrica instalada en los países desarrollados aumente en el 65%, lo que representaría un aumento de 170 GW(e). Por lo tanto, el 25% de toda la nueva capacidad de energía nucleoeléctrica que se ponga en explotación hasta el año 2000 corresponderá a los países en desarrollo.

A pesar de este logro, es probable que la proporción de la capacidad nuclear mundial instalada en los países en desarrollo se mantenga a niveles modestos en el futuro previsible. En consecuencia, la mayor parte de las necesidades de electricidad de los países en desarrollo hasta el año 2000 se satisfarán con fuentes térmicas e hidroeléctricas convencionales.

Aspectos económicos y rendimiento

El crecimiento futuro de la capacidad de energía nucleoeléctrica está muy vinculado a los aspectos económicos de este tipo de energía, en comparación con otras opciones. En muchos países el desarrollo hidráulico no resulta económico ni viable; el petróleo y el gas resultan caros para la producción eléctrica, y las posibilidades de obtener ventajas económicas significativas con el uso de otras fuentes como la solar o la eólica son mínimas. Por ello, las únicas opciones suelen ser el carbón o la energía nuclear, y muchos países poseen carbón o tienen la posibilidad de importarlo, pero no siempre a precios ventajosos. Los trabajos presentados por la India y China recogen los resultados de estudios que demuestran que la inversión total que se necesita para ampliar en gran escala la generación de electricidad en centrales de carbón es elevada si se compara con una ampliación similar en centrales nucleoeléctricas.

A tenor de los trabajos presentados, parece que existe el consenso general de que las centrales nucleoeléctricas, construidas y explotadas como proyectos bien administrados, seguirán compitiendo ventajosamente con el carbón en el caso de grandes centrales eléctricas en la mayoría de las regiones del mundo, salvo en aquellas donde se puede obtener el carbón localmente a precios ventajosos y a largo plazo. Un argumento sólido formulado en este sentido fue que, una vez construidas las centrales nucleoeléctricas, el costo de generación de electricidad se mantiene estable sin que lo afecte mucho la inflación.

Sostenido historial de excelencia

En sus palabras inaugurales, el Dr. Blix dijo lo siguiente: "Creo que debemos dar por sentado que sólo un sostenido historial de excelencia en el comportamiento y la explotación de las centrales nucleoeléctricas en condiciones de seguridad a nivel mundial nos ayudará a vencer los temores que provoca en la población el desconocimiento del fenómeno de la radiación, y que se han exacerbado con los accidentes ocurridos. No bastará con explicar que toda actividad industrial —incluida la producción de energía— entraña algún riesgo. Debemos aceptar que las normas de seguridad para las centrales nucleoeléctricas tendrán que ser más rigurosas que para cualquier otra industria. Este es un hecho reconocido por la industria nucleoeléctrica en todas partes del mundo, y constituye la base de los programas de las autoridades industriales y estatales".

"Afortunadamente", añadió, "la seguridad y el buen rendimiento económico marchan juntos. Existe un incentivo económico para lograr el funcionamiento fiable e ininterrumpido de las centrales nucleoeléctricas."

El Dr. Blix destacó también las mejoras alcanzadas en el funcionamiento a partir de la Conferencia sobre la energía nucleoeléctrica y su ciclo del combustible, celebrada en 1977. En aquel momento, el factor de disponibilidad de energía promedio en las 137 unidades de reactores nucleares de potencia, notificado al Sistema de Información sobre Reactores de Potencia (SIRP) del OIEA, era sólo de 64,7%. En 1982, al celebrarse la siguiente conferencia de importancia, el número de unidades de reactores nucleares había ascendido a 200 pero el factor de disponibilidad promedio se mantenía en un 65%, cifra que provocó inquietud. En 1986 —año sobre el que disponemos de los datos completos más recientes— esa cifra había ascendido a 70,4% para las 288 unidades de reactores nucleares de potencia que figuraban en las listas del SIRP. Aún más significativo es el hecho de que el 55% de estas unidades nucleoeléctricas se explotan con una disponibilidad de energía de 75% o más. En realidad, desde 1984 alrededor del 40% de las unidades están notificando sostenidamente una disponibilidad superior a 80%.

Estos datos demuestran claramente que las conferencias y otras actividades de carácter internacional permiten extraer enseñanzas al mejorar el intercambio de información y poner de relieve los niveles de funcionamiento que pueden lograrse.

Metas para los años noventa

Reducción de los costos. Se informó que el "costo estricto" —es decir, sin actualizar— puede reducirse en el 35% mediante la normalización en gran escala de las centrales. También se pueden hacer economías reduciendo los gastos relacionados con el tiempo, mediante el acortamiento de los períodos de construcción.

Además de la reconocida tendencia que se observa en la industria de Francia, en otros países también se perciben claros indicios hacia la normalización, como es el caso del concepto "convoy" en la República Federal de Alemania (RFA) y el futuro programa de normalización incluido en el Programa de Reactores Avanzados de Agua Ligera del Departamento de Energía (DOE) y el Instituto de Invetigaciones de Energía Eléctrica de los Estados Unidos.

De acuerdo con el concepto "convoy" el número de horas-hombre en trabajo de ingeniería que se necesitaría para una central comenzada a principios de los años ochenta sería un 38% menor que el de una central comenzada a finales de los años setenta y que no estuviera normalizada. La aplicación de la normalización a todos los componentes de las centrales, salvo a los específicos del emplazamiento, permitirá disponer del 70% de todos

los documentos de ingeniería una vez terminado el diseño teórico, y terminar el 90% de las actividades de ingeniería antes de iniciar la construcción. De este modo las compañías eléctricas tienen mayor confianza en las estimaciones de costos y calendarios y mayor seguridad para cumplir los objetivos económicos de las centrales. Asimismo, las mayores posibilidades de premontaje y prefabricación de las estructuras de ingeniería civil, así como la computadorización de los procedimientos de gestión del proyecto y de control de los trabajos coadyuvan a reducir al mínimo los costos y a acortar los plazos de construcción.

Mejoras en el comportamiento de la explotación. Uno de los objetivos fundamentales de la industria nuclear es obtener un ciclo de explotación más largo que permita aumentar la disponibilidad de las centrales, y es por ello que se trabaja en el perfeccionamiento de los diseños de núcleos para alargar el tiempo de permanencia intranuclear de los conjuntos comubustibles. (Las conclusiones de la conferencia sobre el ciclo del combustible nuclear que aparecen en la sección siguiente contienen más información sobre el tema.)

Con relación a la disponibilidad de las centrales, las paradas planificadas por recarga, mantenimiento y reparación representan alrededor del 70% de la no disponibilidad total de los reactores de agua ligera (LWR); de ahí la importanci de acortar estos períodos. Hasta el presente, la reducción del total de paros planificados de las centrales ha sido buena, ya que se ha reducido la duración promedio de 70 días en 1982 a 41 días en la actualidad. Con todo, la gestión de paradas puede mejorar mucho más.

Con miras a utilizar el tiempo de interrupción del servicio programado de forma más eficaz, la industria nucleoeléctrica busca los medios de eliminar de la ruta crítica algunas de las actividades relacionadas con interrupciones para que se puedan realizar actividades simultáneas. Por ejemplo, el uso de tapones especiales en las tuberías de la vasija de presión permite liberar los lazos con el reactor lleno de agua y, por tanto, probar e inspeccionar simultáneamente la vasija de presión, las bombas primarias y los generadores de vapor. Asimismo, el uso de manipuladores especiales y la creación de nuevos equipos de servicio, ayudan a reducir el tiempo necesario para estas actividades y la exposición a la radiación del personal de mantenimiento.

Estabilización del proceso de concesión de licencias. La solución de los aspectos institucionales que entrañan las actividades de normalización y el establecimiento de un régimen de reglamentación definitivo son metas importantes de la industria nuclear para los años noventa. El objetivo es lograr que el proceso de concesión de licencias para las centrales nuclear sea estable y ofrezca seguridad, y eliminar así el carácter indefinido del actual proceso. En algunos países existen prácticas de reglamentación inciertas que todavía constituyen, a juicio de los inversionistas, un riesgo demasiado elevado y que podrían desalentar las inversiones de las compañías de electricidad en nuevas centrales nucleares, independientemente de su seguridad, fiabilidad o rendimiento económico. En los Estados Unidos se están proponiendo cambios que permitirían combinar en una sola etapa la concesión de licencias de construcción y explotación, la aprobación del diseño preliminar y final de la central, y una licencia certificada del diseño de la central que serviría de referencia por un período de 10 años. De este modo, a mediados de los años noventa una empresa eléctrica podría escoger un diseño certificado de central y combinarlo con un emplazamiento aprobado de antemano para obtener una licencia combinada de construcción y explotación en un período de examen reglamentario relativamente corto.

Seguridad de la energía nucleoeléctrica

Prácticamente todos los países que cuentan con centrales nucleoeléctricas han analizado cuidadosamente el accidente de Chernobil en relación con la seguridad de sus propias centrales nucleoeléctricas, y han llegado a la conclusión de que el accidente ocurrido en el reactor RBMK de Chernobil no sucedería en reactores de potencia de otro tipo. No obstante, en más de 70 documentos presentados en la Conferencias se abordaron los aspectos de la seguridad nuclear y, en particular, los inherentes a los reactores RBMK.

Accidentes graves

Los documentos presentados por la Unión Soviética sobre las medidas adoptadas a raíz del accidente de Chernobil y los efectos de éste sobre la salud, despertaron gran interés. (*Véase el artículo sobre el tema que aparece en este número.*) En estos documentos se actualizaron los datos disponibles durante la reunión del OIEA de examen postaccidente, celebra en 1986. Se informó acerca del enterramiento de la Unidad 4 de Chernobil y se señalo que durante ese primer año no se había presentado ningún problema al respecto. Los datos acerca de las reducciones de temperatura y del nivel de fuga de material radiactivo demostraron claramente que las condiciones se habían estabilizado.

Los especialistas en materia de seguridad se interesaron especialmente en el tratamiento dado al problema del control de la reactividad, que es típico de los RBMK. Según los documentos soviéticos, el gobierno ha modificado ligeramente sus intenciones (expresadas durante la Reunión de examen postaccidente del OIEA, celebrada en 1986) en cuanto al reajuste de los sistemas de paradas y control de la central. Se ha aumentado la velocidad de inserción de las barras (en un factor de 1,7 aproximadamente). También se han introducido cambios en la cantidad y la ubicación de las barras, en los extractores del agua del núcleo y en la capacidad de vigilancia, y se estudian nuevas modificaciones. Otro cambio importante es la introducción gradual de combustible enriquecido al 2,4% en todos los RBMK, a la vez que se deja un número mayor de barras de control en el núcleo para reducir el coeficiente de reactividad por huecos. Como resultado de todas las medidas adoptadas, el coeficiente por huecos sigue siendo positivo y habrá alguna repercusión económica, pero las condiciones de seguridad han mejorado notablemente. Durante ese debate se presentó un documento canadiense en que se abordaban ampliamente los cambios introducidos hace tiempo en el reactor Candu para su explotación en condiciones de seguridad, aun en el supuesto de accidentes que entrañen el rápido crecimiento del coeficiente por huecos.

En varios documentos se trató sobre la situación radiológica tras el accidente de Chernobil. La URSS co-

municó el resultado de las mediciones y evaluaciones de la precipitación radiactiva ocasionada por el accidente.

Cabe citar un valor a manera de ilustración: la dosis comprometida colectiva prevista para la población soviética en los próximos 50 años como consecuencia del accidente de Chernobil será inferior a 330 000 sievert-hombre. En términos generales, esto representa aproximadamente el 2% de la exposición natural de fondo en ese mismo período. (*Véase el artículo sobre el mismo tema que aparece en este número.*)

En otros documentos se examinaron las consecuencias de la radiación para el sector agroindustrial de la URSS y los efectos de Chernobil en el medio ambiente de Europa occidental, particularmente en los países de la Comunidad Europea (CE). En ese documento se estimó en unos 80 000 sievert-hombre el compromiso de dosis para la población de la Comunidad Europea. Además, se estimó como consecuencia del accidente de Chernobil una dosis efectiva media por persona de unos cientos de microsievert durante el primer año en los países más afectados.

Si bien no se considera necesario modificar las características de seguridad de los reactores de agua a presión (PWR) o los reactores de agua en ebullición (BWR) como consecuencia inmediata de Chernobil, en el último año se ha prestado mayor atención al examen de los accidentes graves, hecho que se pudo comprobar en muchos de los trabajos. En la exposición presentada en nombre del Grupo Internacional Asesor en Seguridad Nuclear (GIASN) del OIEA se llegó a la conclusión de que, entre otras cosas, la gestión de accidentes es el camino más seguro hacia la reducción de riesgos, y que otra meta importante debe ser la de proteger la función de contención. Las actividades relacionadas con estos dos aspectos comenzaron antes del accidente de Chernobil, pero quizás no sea pura coincidencia el que, a raíz del accidente, en algunos países se haya decidido formalizar la concesión de licencias relativas a la ventilación de los sistemas de contención.

Si bien no se realizó un examen completo de todos los países que cuentan con centrales nucleares, al parecer las hipótesis sobre accidentes, los criterios de aceptación y las modificaciones necesarias en el sistema de contención no se aceptan unánimemente; de ahí que existan diferentes enfoques. Como ejemplo de un nuevo criterio de aceptación, Suecia e Italia han planteado el concepto de la utilización futura del terreno después de un accidente, lo que ha dado lugar a que se establezca un índice de escape máximo del 0,1% para el cesio y el yodo en el inventario del núcleo. Actualmente se estudian diferentes maneras de controlar la ventilación de los sistemas de contención, y al parecer existe una fuerte tendencia a introducir algún tipo de sistema de contención con ventilación en los reactores de agua ligera (LWR). Gradualmente se está descartando o modificando la definición clásica del accidente tipo.

Evaluación de la seguridad

Se prestó gran atención a diferentes aspectos de los objetivos de seguridad sobre la base de métodos probabilistas. Además de los métodos cuantitativos para mejorar la precisión del análisis probabilista, quedan por aclarar y armonizar algunas cuestiones terminológicas y conceptuales fundamentales. Los documentos arrojaron alguna luz sobre los problemas, pero no sobre la manera de solucionarlos. La cuestión de cómo deben combinarse y limitarse los parámetros pertinentes para riesgos individuales y sociales (colectivos), —tales como la mortalidad, los efectos de una dosis baja, el uso de la tierra y la pérdida de capital—, aún es objeto de intensos debates, y es probable que transucrran muchos años antes de que se formule un enfoque internacional medianamente uniforme. Durante algún tiempo, las decisiones (sobre el accidente tipo) se seguirán tomando sobre la base de criterios técnicos deterministas (que incluyen algunos criterios probabilistas), apoyados por análisis probabilistas cuantitativos. En un documento de carácter general se adoptó una posición más optimista, al menos en relación con un uso más regular de los criterios probabilistas de riesgo en los sistemas de seguridad. Se analizaron, además, otras ventajas de los análisis probabilistas de la seguridad (APS); por ejemplo, la posibilidad de evaluar las incertidumbres que provocan las variaciones estadísticas del comportamiento de los elementos materiales, lo que no sería posible con un método determinista.

Uno de los aspectos que se examinan en el marco de los objetivos de seguridad es la comparación de riesgos. En uno de los documentos se abordaron los métodos de seguridad en las industrias peligrosas no nucleares, y se señaló que casi siempre los accidentes de gran envergadura tienen repercusiones políticas debido a la distribución desigual de los beneficios y los riesgos entre los diferentes grupos de personas. De ahí que la entidad que concede la licencia tenga la obligación de justificar sus normas ante la población a fin de mantener la confianza de ésta. El autor expresó claramente su criterio de que "es un gran error suponer que se puede educar al público en general en los aspectos del riesgo". lo que, a su vez, exige un gran esfuerzo por parte de la industria y las entidades reglamentadoras para informar a la población adecuadamente. Otro obstáculo es el hecho de que la seguridad no es una cantidad fácil de medir, y que riesgos que son numéricamente iguales quizás no tengan la misma significación para las diferentes industrias. En el Reino Unido, la encuesta pública sobre el reactor Sizewell-B ha reafirmado la conclusión de que, para la población, no basta que las centrales sean seguras sino que es preciso demostrárselo. En algunos otros documentos se trataron aspectos relacionados con la información pública y se señaló que la disponibilidad permanente de información fáctica y objetiva es un requisito para esclarecer los riesgos que entraña la energía nucleoeléctrica. No obstante, como esta información llega a la población por conducto de los medios de difusión, no siempre se transmite de la misma forma.

Los métodos probabilistas para el análisis de la seguridad son, en principio, la forma establecida de ayudar a quienes deben tomar las decisiones en materia de seguridad. Su uso está generalizado, especialmente para detectar los puntos débiles durante la etapa de diseño y garantizar una estrategia de defensa bien equilibrada. Las incertidumbres en los resultados finales dificultan su uso como cifras absolutas. Se llevan a cabo investigaciones minuciosas en dos esferas principales, y los cálculos de referencia revelan algunas diferencias sutiles en la metodología y sus efectos sobre los resultados finales. Resulta difícil enmarcar en un modelo los errores humanos y los fallos que tienen una causa común; su trata-

miento exige experiencia, el análisis sistemático de cada situación y mayor estudio. Uno de los métodos que se estudia es el análisis sistemático amplio de la experiencia real de explotación, lo cual debe permitir que se conozca mejor el comportamiento de los explotadores en diferentes condiciones y tal vez haría posible el ajuste de parámetros en ecuaciones modelo. Existen sistemas nacionales e internacionales de retroinformación de datos operacionales que tienen objetivos en parte diferentes, a saber, reunir un amplio volumen de información para evaluarla estadísticamente, o reunir y evaluar un número determinado de notificaciones de incidentes a fin de extraer lecciones beneficiosas. El Sistema de Notificación de Incidentes (IRS) del OIEA y la Agencia para la Energía Nuclear de la Organización de Cooperación y Desarrollo Económicos (AEN/OCDE) hacen hincapié en este último objetivo. En uno de los documentos se hizo referencia este tema y se abordaron concretamente las enseñanzas que pueden extraerse de las degradaciones no relacionadas con sucesos importantes. Por ejemplo, el fallo del suministro eléctrico al sistema de instrumentación y control en Bugey-5 en 1984 puso de manifiesto el problema del pronóstico de determinados sucesos y proporcionó retroinformación sobre cómo evitar que se repitiera un caso similar. Los organismos internacionales, como la Comisión de las Comunidades Europeas (CCE), podrían servir de conducto para la retroinformación operacional y su empleo en la elaboración de modelos en los análisis probabilistas, y también de marco para reunir a los científicos a fin de que investiguen estos problemas en un esfuerzo mancomunado.

La evaluación de la seguridad presenta otro problema que no se limita sólo a los métodos probabilistas: es imposible presentar pruebas matemáticas concluyentes de que se han tomado en cuenta todas las secuencias de hechos que pudieran dar lugar a condiciones de accidente. La mayoría de los autores subrayan la necesidad de combinar con prudencia los métodos probabilistas y los deterministas. El enfoque determinista —que tiende a ver la central desde un punto de vista "atomístico" ("el todo es la suma de las partes")— debe equilibrarse con el uso de métodos probabilistas, que proporcionan un punto de vista más sintético ("el todo es más que la suma de las partes").

Tecnología de seguridad

Paralelamente a estas investigaciones fundamentales y teóricas sobre la seguridad de las centrales nucleoeléctricas consideradas como una compleja maquinaria, se acometen amplios estudios acerca de cuestiones específicas relativas al diseño y la explotación de las centrales.

Aunque generalmente se reconoce que la producción de energía nucleoeléctrica ha alcanzado su pleno desarrollo, también se reconoce que una de las características de esta etapa es el problema del envejecimiento de las centrales. En los últimos años esta esfera ha recibido una atención creciente y su importancia aumentará en el decenio de 1990. (*Véase el artículo sobre el tema que aparece en esta edición.*)

El factor humano es el que ha atraído mayor atención, como consecuencia de los accidentes ocurridos en Three Mile Island y Chernobil. El análisis, la elaboración de modelos y el aprovechamiento de la experiencia de explotación son una parte del proceso. La otra se refiere al control y la instrumentación, los medios computadorizados de ayuda al operador, los sistemas de información perfeccionados, la capacitación y los procedimientos operacionales. Esta esfera —abordada ampliamente en la conferencia del OIEA sobre la interfaz hombre-máquina en la industria nuclear (Tokio, febrero de 1988), está cobrando importancia.

En un debate celebrado por un grupo de expertos sobre el tema "la seguridad operacional en el decenio de 1990", se plantearon varias cuestiones interesantes y se expresó el criterio de que las centrales futuras no cambiarán el concepto de seguridad de una manera revolucionaria, sino que gradualmente se dará mayor atención al desarrollo de características pasivas o inherentemente seguras que se introducirán en las centrales en explotación, en la medida que se estime razonable. Como ejemplos de tendencias notables se señalaron los adelantos actuales en los medios de apoyo al operador, el mejoramiento de la interfaz hombre-máquina, los controles automatizados y la capacitación de los operadores.

Cooperación internacional

En la sesión plenaria sobre cooperación internacional, la URSS reiteró su interés en la cooperación internacional complementada con legislación y acuerdos internacionales en la esfera de la seguirdad nuclear. Se señaló también que uno de los hechos más significativos del año anterior fue el rápido acuerdo respecto de la *Convención sobre la pronta notificación de accidentes nucleares* y la *Convención sobre asistencia en caso de accidente nuclear o emergencia radiológica.* Se observó además que en diversos países se encuentran funcionando o están en proceso de elaboración sistemas nacionales de alerta temprana que emplean la vigilancia electrónica en línea. Aunque no incluyan la vigilancia en línea, los acuerdos bilaterales para el intercambio de información, como el vigente entre la República Socialista Checoslovaca y Austria, pueden considerarse como ejemplos dignos de imitar. En la esfera de la seguridad operacional, se consideró que el Sistema de Notificación de Incidentes (IRS) del OIEA es un vínculo internacional muy importante y que gradualmente debe ser capaz de aumentar la confianza y el nivel de franqueza en el intercambio de información.

Ciclo de combustible nuclear

Teniendo en cuenta que el ciclo del combustible nuclear es parte inseparable del comportamiento y la seguridad de la energía nucleoeléctrica, es lógico que alrededor de la tercera parte de los trabajos presentados durante la conferencia abordaran temas de esta esfera. No obstante, como señaló el Sr. P. Jelinek-Fink en sus palabras de resumen, los trabajos presentados resultaron muy interesantes pero no aportaron ningún enfoque fundamentalmente nuevo. Este hecho es consecuencia natural del avanzado desarrollo industrial del ciclo del combustible nuclear.

Parte inicial del ciclo del combustible nuclear

Los estudios conjuntos del OIEA y la AEN/OCDE indican claramente que la actual situación favorable de

la industria del uranio puede calificarse de "metaestable". Si bien las cantidades conocidas de recursos de uranio comprendidos en la categoría de bajo costo son suficientes para satisfacer la demanda de uranio esperada hasta el año 2000, las minas y las plantas de tratamiento del uranio en explotación y previstas de los países MEAC, no parecen ser suficientes para responder a las necesidades de la producción a partir del decenio de 1990 aproximadamente. (La sigla MEAC significa todo el Mundo, Excluida el Area con economía de planificación Centralizada.) Este déficit en la oferta (que equivale aproximadamente al total de las existencias actuales de uranio) aumentará marcadamente a partir de 1990 y es posible que para el año 2000 llegue a más de 26 000 toneladas anuales de uranio, o sea, el 44% de la demanda anual. Teniendo en cuenta sólo los suministros procedentes de los centros de producción existentes y previstos, el déficit acumulativo ascendería a más de 130 000 toneladas de uranio para al año 2000. Por lo tanto, cabe llegar a la conclusión de que entre 1990 y 1995 es preciso construir y poner en funcionamiento nuevos centros de producción. Según lo estimado, las inversiones de capital necesarias para construir esas minas y plantas de tratamiento ascenderían a unos 1200 millones de dólares de los Estados Unidos en 1995 y a 1800 millones de dólares en el año 2000. Una inversión de tal magnitud sólo se realizaría ante la perspectiva de un rendimiento razonable del capital invertido, y eso se lograría únicamente aumentando los precios del uranio. No obstante, se prevé que el aumento proyectado de los precios del uranio quede compensado en parte con la disminución de los costos de enriquecimiento y una mejor gestión del combustible en los reactores.

En el mundo existen cuatro proveedores principales de servicios de enriquecimiento, a saber, el Departamento de Energía (DOE) de los Estados Unidos, Eurodif, Techsnabexport —todos los cuales utilizan la tecnología de la difusión gaseosa— y Urenco, que utiliza el proceso por centrifugado para la separación de isótopos. Según el OIEA y la AEN/OCDE, las necesidades anuales de enriquecimiento de los países MEAC pueden aumentar de unos 24 millones de unidades de trabajo de separación en 1985, a alrededor de 38 millones en 1985 y de 46 millones en el año 2000. La capacidad actual de enriquemiento es más que suficiente para satisfacer la demanda hasta 1995, y se espera que por lo menos durante los próximos cinco años no habrá dificultades con los servicios de enriquecimiento, habida cuenta de los planes de Urenco para ampliar su capacidad de enriquecimiento y la capacidad adicional interna prevista en el Brasil, el Japón, Sudáfrica y algunos otros países.

Por tanto, ahora la seguridad de la oferta no constituye un problema ni lo será hasta fines del presente siglo. En la actualidad la cuestión es cómo la industria abastecedora resolverá el problema que plantea un mercado en el que existe fuerte competencia debido al exceso de capacidad. En cuanto a la situación después del 2000, lo importante es tener presente la necesidad de crear condiciones para sustituir algunas de las actuales plantas de difusión gaseosa. La opinión generalizada es que la difusión gaseosa no se puede considerar como una tecnología básica para la industria de enriquecimiento del futuro. Esto significa que en el decenio de 1990 hay que realizar, hasta culminarlo, un intenso trabajo de investigación y desarrollo sobre métodos sustitutivos para la separación de isótopos del uranio.

Los trabajos presentados por los principales abastecedores reflejaron muy claramente las dos tendencias que predominan en la actividad de enriquecimiento en el plano mundial: 1) la esperanza de alcanzar por diversos medios una posición estable en el mercado de servicios de enriquecimiento; y 2) el desarrollo de tecnologías avanzadas que permitan producir uranio enriquecido de manera más económica y satisfacer adecuadamente necesidades cada vez mayores y en constante evolución, como la del enriquecimiento de uranio reelaborado.

En cuanto a la tecnología de enriquecimiento avanzada, la aplicación del método de separación isotópica de vapores atómicos por láser (AVLIS) recibe la mayor atención en los Estados Unidos de América, Francia, el Japón, los Países Bajos, el Reino Unido y la República Federal de Alemania (RFA). Aunque resulta difícil predecir con exactitud cuándo y en qué países se aplicará dicho método, la activa labor de investigación y desarrollo permite prever que las nuevas tecnologías de enriquecimiento tendrán una influencia positiva en la situación de la parte inicial del ciclo del combustible nuclear, y podría cambiar las posiciones de los principales abastecedores en el mercado mundial de servicios de enriquecimiento del uranio.

Diseño, comportamiento y utilización del combustible para reactores

Pese a la experiencia positiva adquirida con el combustible de óxido de uranio en la explotación de centrales nucleoeléctricas con reactores de agua, y a los resultados satisfactorios que se obtienen con los planes actuales de utilización del combustible, prosigue la labor de investigación y desarrollo encaminada a mejorar el diseño, el comportamiento, la fiabilidad y la utilización del combustible para reactores. El objetivo es aumentar la competitividad de la energía nuclear.

El aumento del factor de capacidad de una central nuclear de 1000 MV(e) del 70% al 75% podría, en principio, ahorrar cinco millones de dólares de los EE.UU. anualmente si esta producción adicional sustituyera a la generación de electricidad mediante basada en el petróleo. Para lograr los mismos niveles de ahorro con cualquiera de los componentes del combustible nuclear, sería necesario reducir sus costos de la manera siguiente: los del uranio en el 40%, los de enriquecimiento en el 35% o los de fabricación en el 75%.

Las evaluaciones presentadas durante la conferencia indican que los planes para la gestión avanzada del combustible (incluido el aumento del quemado, los patrones de carga de poca fuga, la reconstitución del conjunto combustible, etc.) pueden reducir en un 20% el consumo de uranio en los reactores de agua ligera, y en un 10–14% las necesidades de enriquecimiento. La utilización de uranio ligeramente enriquecido en los reactores de agua pesada (Candu) puede reducir los costos totales del ciclo del combustible en un 25–50% en relación con el combustible de uranio natural. Por tanto, cabe deducir que la esfera de la tecnología y la utilización del combustible para reactores ofrece aún muchas posibilidades para elevar la competitividad económica de la energía nucleoeléctrica respecto de las fuentes tradicionales de energía.

Al examinar las principales tendencias en el majoramiento del combustible para reactores, es preciso mencionar también otras actividades importantes como la explotación en régimen de seguimiento de carga, la ampliación de la duración del ciclo del combustible y el aumento de la relación agua-combustible (con cambio del retículo). Se indicó que estaba del todo justificado cambiar el ciclo de recarga del combustible de dos a tres años. Existen mejoras del diseño del combustible que dependen de mejoras técnicas ulteriores en esferas afines.

Otra tendencia estable que se oberva en varios países de Europa, el Japón y la Argentina es el desarrollo del reciclado del plutonio en reactores térmicos. Aunque es necesario realizar más investigaciones, la tecnología de la mezcla de óxidos (MOX), según se informó, ya tiene el nivel de desarrollo adecuado para utilizarla a escala industrial. En Europa se ha establecido la capacidad de comercialización mediante la empresa mixta Commox, creada por Cogéma y Belgonucléaire con el respaldo de la empresa proyectista Fragema, y las plantas manufactureras de Belgonucléaire (Dessel, 35 toneladas al año en 1988), CEA (Cadarache, 15 toneladas al año en 1989) y Cogéma (fábrica Melox en Marcoule, 100 toneladas al año en 1995). Los programas de investigación y desarrollo están encaminados a determinar las posibilidades reales que existen para introducir el uso del combustible MOX en el ciclo del combustible de los reactores LWR.

Parte final del ciclo del combustible nuclear

La comunidad nuclear centra su atención en la parte final del ciclo del combustible nuclear, no sólo por su repercusión sobre las necesidades de uranio (la reelaboración y el reciclado pueden reducir las necesidades de uranio natural hasta en un 40%), sino también porque persisten serios problemas políticos, ambientales, socioeconómicos y técnicos. Es imposible encontrar soluciones sencillas que sean aceptables para todos los países. Sin embargo, en la actualidad hay razones para afirmar que la reelaboración es una tecnología establecida, en tanto que la evacuación del combustible irradiado aún no está comprobada. En Europa y en el Japón existe ya una experiencia considerable en la fabricación, el transporte y la irradiación del combustible MOX y en el reenriquecimiento y la utilización del uranio en reactores térmicos. En otras palabras, el ciclo cerrado del combustible nuclear es una realidad objetiva y en los próximos años aumentará significativamente el alcance de la reelaboración y el reciclado de las sustancias fisionables.

Países como China, Francia, el Japón, el Reino Unido, la RFA y la URSS se han comprometido a seguir reelaborando el combustible irradiado o a iniciar el proceso en cuanto dispongan de las instalaciones necesarias. Estos países se proponen además utilizar el combustible MOX en los reactores térmicos y, posteriormente, en los reactores reproductores rápidos. El aspecto económico parece ser un importante factor que obra a favor de la reelaboración en dichos países, especialmente si se tiene en cuenta las grandes inversiones realizadas (por ejemplo, 50 000 millones de francos en Francia). Estos países consideran también que la separación de los desechos de alta actividad (DAA) de todo el combustible irradiado representa una ventaja para la evacuación de desechos.

Otros países, como Canadá, España, los Estados Unidos de América y Suecia, almacenan a largo plazo el combustible irradiado como un paso necesario antes de su evacuación directa en formaciones geológicas profundas. En los Estados Unidos de América, este almacenamiento es responsabilidad de las empresas eléctricas (hasta que el Departamento de Energía (DOE) de los Estados Unidos lo acepta después de la puesta en servicio de lugares destinados al almacenamiento, bajo vigilancia, de desechos con posibilidades de recuperación). Por lo tanto, siguen existiendo dos vertientes principales en la parte final del ciclo del combustible nuclear, pero se observa una clara tendencia a la armonización de las posiciones. Aquellos países que, como los Estados Unidos de América, solían defender resueltamente la utilización del combustible en una sola etapa, siguen hoy una política más flexible que en principio no excluye la posibilidad de aceptar en el futuro la estrategia de reelaboración.

En muchos países se han adoptado ya decisiones de principios en relación con la gestión de desechos, por lo que el decenio de 1990 debe ser un período de demostración y puesta en práctica. Como demuestran los datos presentados por diversos países (Estados Unidos de América, Francia y la RFA), se han acumulado muchos años de experiencia en la gestión de desechos radiactivos y existe la tecnología necesaria para poner en práctica los planes y políticas nacionales.

Los Estados Unidos de América tienen un programa bien definido y estipulado por la ley sobre la política de los desechos nucleares de 1982 (en su forma enmendada), la cual enuncia los objetivos concretos de la evacuación del combustible irradiado y los DAA. Se prevé que para el año 2000 en los Estados Unidos se habrán acumulado cerca de 40 000 toneladas de uranio en combustible irradiado provenientes de más de 100 centrales nucleoeléctricas. La antedicha ley dispone que durante el decenio de 1990 se realice la caracterización, la selección, y el diseño del emplazamiento, y se comience a construir el primer repositorio. En los países que han adoptado la opción de la reelaboración, se han definido también importantes objetivos. Francia se propone poner en servicio en breve dos instalaciones de vitrificación de desechos para DAA en el complejo de La Hague. Cada instalación podrá producir 90 kilogramos por hora de una matriz de desecho —vidrio de borosilicato que es suficiente para solidificar la producción de DAA de las plantas de reelaboración de La Hague. En la RFA se prevé iniciar en el decenio de 1990 la reelaboración a escala comercial del combustible irradiado. Los DAA provenientes de operactiones de reelaboración se vitrificarán tomando como base la tecnología comprobada en la planta de vitrificación Pamela, ubicada en Mol (Bélgica).

El establecimiento de criterios, la elaboración de una metodología para el comportamiento seguro, y la labor de investigación de emplazamientos son actividades fundamentales para la mejor selección, caracterización y construcción de repositorios geológicos destinados a la evacuación definitiva de desechos radiactivos. En los últimos 10 años se ha realizado en este sentido una labor

considerable que continuará en los años noventa. Sin embargo, en los países que están estudiando la posibilidad de la evacuación geológica de los DAA se reconoce ya la necesidad de establecer una interfaz entre los aspectos técnicos por una parte, y por la otra la comprensión y aceptación del público así como lo relativo a la adopción de decisiones. El problema real del decenio de 1990 en la esfera de la evaluación de desechos será lograr la integración satisfactoria de las actividades técnicas tecnológicas en un proceso que responda al interés institucional y público.

Al referirse al tratamiento y la evacuación de los desechos radiactivos de actividad baja e intermedia, el Sr. Jelinek-Fink señaló con acierto en sus palabras de resumen que a todas luces esta tecnología se considera como una actividad corriente, de modo que muchos países no presentaron a la conferencia ningún informe al respecto. Añadió que las actividades complementarias de investigación y desarrollo de esas técnicas sólo tienen por objeto mejorarlas y hacer más económica su aplicación, y que, sin embargo, en la mayoría de los países aún no se han resuelto definitivamente los problemas de la estrategia de evacuación de esos desechos, los criterios para la selección de los lugares de evacuación y la concesión de licencias para los emplazamientos seleccionados.

En la URSS el desecho tratado se almacena provisionalmente en el emplazamiento hasta que se instalen repositorios centrales o regionales. Se considera que las barreras geológicas son las mejores para contener la liberación de radiactividad. En Checoslovaquia, la evacuación definitiva se realizará en repositorios regionales a poca profundidad en bidones de 200 litros. Se están realizando levantamientos geológicos para confirmar las posibilidades de la evacuación subterránea. En los Estados Unidos se están utilizando tres lugares de enterramiento. Debido a obligaciones jurídicas previstas en la ley sobre la política de los desechos radiactivos de baja actividad (1980) y en su versión enmendada de 1985, cada Estado se encarga de evacuar los desechos generados dentro de sus fronteras. En la actualidad no parece probable que se pueda cumplir la meta fijada para 1990 en relación con la concesión de licencias para construir nuevas instalaciones de enterramiento. En la RFA, los desechos de baja actividad se almacenaron en la mina de sal de Asse hasta 1978. Desde entonces, se han producido y almacenado en los emplazamientos un total de alrededor de 25 000 bidones de desecho acondicionado, y se prevén otros 5000 bidones anuales. Se espera que en 1992 comience a funcionar el emplazamiento para evacuación definitiva situado en Konrad (antigua mina de hierro) si el procedimiento de concesión de licencias continúa marchando satisfactoriamente. La Comunidad Europea se concentra principalmente en el fomento de las actividades de investigación y desarrollo relativas al tratamiento de desechos y la garantía de calidad, la protección radiológica y la protección ambiental. En el futuro se propone promover el establecimiento de un "mercado internacional" para el tratamiento y almacenamiento de desechos radiactivos, con miras a establecer especificaciones comparables y fiables para el tratamiento, el transporte y la evacuación de desechos, y lograr un functionamiento más económico de los repositorios definitivos.

Descontaminación y clausura

Desde el punto de vista sistemático, aún no está bien definido el lugar que ocupa la clausura de las instalaciones nucleares en el plan general de la energía nucleoeléctrica y su ciclo del combustible. Sin embargo, no hay dudas de que éste es un aspecto esencial y muy importante de las actividades de la industria nuclear. La clausura de las instalaciones nucleares, que se realiza en tres etapas, produce materiales y equipo de desecho que no pueden utilizarse de nuevo. Se ha estimado que en los próximos 25 años sólo en los países de la OCDE se originarán tres millones de metros cúbicos de desechos radiactivos como resultado de la clausura de centrales nucleoeléctricas, ya que en esos países se clausurará aproximadamente el equivalente de 200 reactores de 1000 MW(e) cada uno durante el período 1996–2010 (un promedio de 14 reactores al año). Se espera que la clausura de instalaciones del ciclo del combustible nuclear distintas de los reactores aporte menos del 4% del total de los desechos provenientes de las clausuras.

Como se subrayó en la conferencia, la clausura requiere una planificación cuidosa, estimación de los costos y financiación. Los costos de la clausura de un PWR y de un BWR de 1100 MW(e) ascienden a 220 millones y 264 millones de dólares de los Estados Unidos, respectivamente. Al mismo tiempo, los problemas financieros no deben opacar los relacionados con los riesgos para la salud. Es necesario elaborar y establecer criterios equilibrados sobre la clausura, y en algunos países se están realizando estudios pertinentes. De conformidad con el criterio sobre clausura nuclear del Japón, se ha recomendado un régimen de preservación de 5 a 10 años antes de proceder al desmantelamiento total. El desarrollo de la tecnología de desmantelamiento total que precisan los reactores más grandes es uno de los principales objectivos de los programas que acomete el Instituto Japonés de investigación de la Energía Atómica (JAERI). Reviste importancia especial el establecimiento de un sistema computadorizado de adquisición de datos para apoyar la planificación futura de las clausuras. En las acividades de investigación y desarrollo de la Comunidad Europea se hace hincapié en los proyectos de clausura industrial en gran escala. En el Reino Unido se dieron a conocer los progresos alcanzados en la clausura del reactor de Windscale, donde se presta especial atención al desarrollo de máquinas y manipuladores especiales de desmontaje operados a distancia. La URSS presentó dos trabajos sobre el sepultamiento de la Unidad 4 de Chernobil, que contienen varias innovaciones técnicas del equipo y las prácticas de descontaminación particularmente adecuadas para el uso a largo plazo en terrenos altamente radiactivos. La singular experiencia adquirida en Chernobil debe contribuir a la adopción de medidas técnicas y de planificación con vistas a la futura planificación en casos de emergencia.

En resumen, las actividades de descontaminación y clausura marchan sin tropiezos, en condiciones de seguridad y de manera económica. Con todo, esta esfera de la tecnología nuclear aún no ha alcanzado plena madurez industrial, por lo que cabe esperar que los años noventa y los subsiguientes sean testigos del desarrollo activo de los conceptos técnicos, económicos y políticos pertinentes.