

Con motivo de la tercera reunión ordinaria de la Conferencia General del Organismo Internacional de Energía Atómica, el Director General del OIEA organizó en Viena el 22 de septiembre de 1959 un debate público sobre "el porvenir de la energía nuclear". Los tres eminentes hombres de ciencia que participaron en el debate - el Dr. Homi J. Bhabha (India), Sir John Cockcroft (Reino Unido) y el Dr. Bertrand Goldschmidt (Francia) - son miembros del Comité Consultivo Científico del Organismo. El Secretario del Comité, Dr. Henry Seligman, Director General Adjunto del OIEA, actuó de árbitro. La reunión estuvo presidida por el Director General, Sr. Sterling Cole.

El debate comenzó con intervenciones de los tres hombres de ciencia mencionados, en las que éstos pasaron revista a los recientes adelantos técnicos, a las actuales tendencias y a las posibilidades futuras en la esfera nuclear. Después de estas observaciones de carácter general, respondieron a diversas preguntas formuladas por el auditorio.

En el presente número especial del Boletín del OIEA figuran las actas del debate, que comprenden tanto las intervenciones de los científicos como las mencionadas preguntas y respuestas.

DECLARACION DE SIR JOHN COCKCROFT

Durante el período transcurrido desde la Conferencia de Ginebra de 1958 nos hemos dedicado a estudiar el funcionamiento de los primeros prototipos de centrales nucleoelectricas, y a construir las centrales nucleoelectricas comerciales de gran capacidad que han de entrar en funcionamiento a principios del próximo decenio. En cierto modo se ha restringido el campo de desarrollo de reactores, y no han surgido tipos totalmente nuevos. Una de las razones para ello ha sido el comprobar que se requiere mucho tiempo y un enorme esfuerzo de investigación y perfeccionamiento para lograr que un nuevo tipo de reactor llegue con éxito a la fase final de producción y explotación.

La experiencia adquirida con el funcionamiento de los primeros prototipos de centrales nucleoelectricas de Calder Hall, Chapelcross, Shippingport y Marcoule continúa siendo satisfactoria. Hasta este momento se han generado en el Reino Unido más de mil millones de unidades eléctricas en las dos centrales nucleares. Aparte del tiempo necesario para cambiar la carga de combustible -tiempo que se ha ido reduciendo progresivamente de diez a cinco semanas-, los reactores han funcionado durante un 90 por ciento aproximadamente del tiempo teórico. Dado que las futuras centrales nucleares podrán cambiar de elementos combustibles sin interrumpir su funcionamiento, hay muchas probabilidades de que las centrales nucleoelectricas alcancen factores de carga muy elevados si se dispone de las cargas necesarias, lo que parece probable durante algún tiempo en el Reino Unido.

Los principales defectos observados han sido los típicos en estos casos, y no se relacionan con problemas nucleares. Cuando empezó a funcionar la instalación de Calder Hall hubo un escape en una turbina, por haberse atascado una válvula de control. También se produjeron averías en los motores de los ventiladores de circulación en Calder Hall; otras averías en las paletas de una turbina en Shippingport, a causa de un defecto en el sistema de separación de agua, y una fusión parcial en los elementos del reactor de Marcoule.

Los operadores de Shippingport han manifestado que el manejo de esa central es más sencillo que el de las centrales de carbón, y que el funcionamiento puede ser iniciado e interrumpido con más facilidad que en estas últimas. En el Reino Unido hemos comprobado que las centrales pueden pasar de un bajo factor de carga al factor de carga óptimo en media



hora aproximadamente, plazo que depende de los factores térmicos.

La experiencia obtenida ha permitido resolver muchos de los problemas tecnológicos de la energía nuclear. Así, por ejemplo, hemos comprobado que la acumulación de la energía almacenada en el grafito, que podría dar lugar a elevaciones espontáneas de temperatura si se le deja alcanzar un nivel excesivo, puede reducirse considerablemente aumentando la temperatura de trabajo del grafito. Las reacciones químicas entre el grafito y el anhídrido carbónico caliente se produjeron con arreglo a lo previsto y no han originado ningún trastorno. Los experimentos realizados para provocar oscilaciones en el reactor han demostrado que no surgen problemas complicados de control, pero que se requerirán sistemas de control más completos para los grandes reactores del futuro.

El problema de la combustión

El principal problema tecnológico que queda por resolver es el de la combustión. Tenemos que llegar a extraer la máxima cantidad de calor posible del combustible nuclear, dentro de lo que permitan los límites impuestos por la reactividad. No siempre se tiene en cuenta que cuando hablamos de grados de combustión de 3 000 MW dfa por tonelada, con elementos combustibles de uranio metálico, o de 10 000 MW dfa por tonelada con elementos de óxido de uranio, se trata de cifras un tanto arbitrarias, ya que las limitaciones debidas a la reactividad permitirán una combustión de un 50 por ciento más en algunos reactores de uranio natural en los que se emplean moderadores de grafito, mientras que la combustión con elementos de óxido de uranio en reactores con moderador de agua ligera, se halla limitada principalmente por el grado de enriquecimiento.

La combustión real que se obtenga dependerá de la medida en que los especialistas en metalurgia consigan subsanar los daños por irradiación que experimentan los elementos combustibles.

Las repercusiones de las fallas registradas en los elementos combustibles han sido muy reducidas. En el Reino Unido se produjeron unas 27 fallas en cien mil elementos combustibles cuyos grados de combustión llegaron hasta 1 200 MW dfa por tonelada, habiéndose determinado perfectamente sus causas. Los operadores de Shippingport sólo registraron una o dos fallas incipientes de sus elementos combustibles en todo un año de funcionamiento, habiendo llegado a un grado máximo de combustión de 10 000 MW dfa por tonelada, con un promedio de 2 000 MW dfa por tonelada, en el caso del óxido de uranio. No obstante, se están haciendo grandes esfuerzos para aplicar esta experiencia a grados de combustión más elevados, ya que esto parece ser en la actualidad una de las claves del funcionamiento económico de las centrales nucleoelectricas.

Se ha dedicado también bastante atención a la seguridad en las centrales nucleoelectricas. Se reconoce ahora, en gran parte como resultado de la experiencia adquirida a raíz del accidente de Windscale, que los principales riesgos después de un accidente provienen de la fusión de un número limitado de elementos combustibles, seguida de un desprendimiento de yodo radiactivo, estroncio radiactivo y de algunos otros isótopos de menor importancia. Los reactores modernos tienen un grado de confinamiento mucho mayor que el de Windscale, el cual no contaba prácticamente con confinamiento alguno para el yodo radiactivo, de forma que, en el peor de los casos, la proporción que pase a la atmósfera en las centrales modernas será mucho menor. En el caso improbable de que se desprendiera cierta cantidad de yodo radiactivo, su absorción por la hierba obligaría a interrumpir provisionalmente el suministro a los seres humanos de la leche procedente de las granjas próximas, aunque podría darse esta leche como alimento a los animales. Quizás fuera también necesario trasladar a la población dentro de un limitado radio

de un kilómetro poco más o menos, mientras se produjera el desprendimiento de yodo radiactivo. Riesgos de esta clase no serían catastróficos, pero hasta que hayamos adquirido más experiencia, lo mejor es seguir una prudente política de espera para evitar posibles perturbaciones a un gran número de personas.

El número de contratos concluidos para la construcción de centrales nucleoelectricas de tipo corriente ha disminuido ligeramente durante el pasado año. Hasta ahora la Junta de Electricidad ha encargado 1 875 MW y Calder Hall y Chapelcross contribuirán con unos 300 MW; se están haciendo los preparativos necesarios para encargar otras dos centrales nucleoelectricas de gran capacidad. Las cifras globales más recientes del programa de Estados Unidos para 1963 se aproximan a los 1 000 MW. El Euratom tiene previsto para 1966 algo menos de 3 000 MW. Fuera de Europa y de los Estados Unidos sólo el Japón ha indicado hasta ahora su intención de encargar una central nucleoelectrica de gran capacidad.

Depresión en el programa de energía nucleoelectrica

La depresión temporal en el programa de energía nucleoelectrica se debe en parte a que está cambiando el panorama general del abastecimiento de combustibles. Ello se debe al parecer al hecho de que la industria está pasando en gran escala del carbón al petróleo, lo que ha tenido como consecuencia un excedente transitorio de carbón en varios países. Así, en el Reino Unido, el consumo de petróleo ha aumentado en los últimos ocho años en el equivalente de 20 millones de toneladas de carbón por año, en tanto que las necesidades energéticas totales sólo han aumentado en la misma proporción.

Un segundo factor en la situación de Gran Bretaña ha sido el aumento en los costes previstos de la energía nucleoelectrica y una disminución en los costes previstos de las futuras centrales alimentadas con carbón. Según las estimaciones de la Junta de Electricidad del Reino Unido dadas a conocer en la Conferencia de Ginebra celebrada en 1958, el coste de la energía nucleoelectrica en un lugar del Sur de Inglaterra alejado de las minas de carbón sería aproximadamente igual al coste de la energía obtenida en centrales alimentadas con carbón, a saber, 0,6 peniques por unidad, al tipo de interés del 5 por ciento. Debido a una elevación en los tipos de interés y a ciertos aumentos en el precio del grafito y otros componentes, las cifras previstas son ahora de 0,65 - 0,7 peniques para la energía nucleoelectrica, en tanto que el coste calculado de la energía generada en centrales de carbón ha disminuido ligeramente.

La fecha y proporción en que las centrales nucleoelectricas podrán llegar a sostener la competencia dependerá considerablemente de la medida en que se reduzcan los gastos de capital por kilovatio en las centrales nucleoelectricas. En el Reino Unido hemos visto reducciones en los gastos de capital del orden de 30 por ciento en un período de tres años. Es probable que algunos adelantos tecnológicos, como el

trabajo a temperaturas más elevadas, se traduzcan en una reducción del 20 por ciento aproximadamente para 1966, y algunos estiman que otros progresos tecnológicos, como el reactor reproductor rápido, permitan una nueva reducción del 20 por ciento en los costes además de significar una disminución importante en los costes de combustible debido a la reproducción. Sin embargo, a la distancia a que nos encontramos -diez años poco más o menos- la bola de cristal tiende a estar un poco turbia, de modo que las predicciones deben tomarse con cierta reserva.

Sin embargo, existe un factor favorable para los costes de la energía nucleoelectrica que parece razonablemente seguro. Los expertos predicen ahora con confianza que los precios del uranio bajarán de las cifras actuales de 12 dólares por libra a menos de 8 dólares por libra hacia mediados de la década que se inicia en 1960, y esto a su vez podría tener como consecuencia una reducción hasta del 10 por ciento en los costes globales de la energía nucleoelectrica. Existen también algunas posibles ventajas como el aumento del grado de combustión y factores de carga más elevados de lo que se ha previsto.

Un plan temporal

Si combinamos estos factores favorables con el hecho indudable de que la demanda mundial de electricidad sigue aumentando exponencialmente, con un período de duplicación de diez años, tenemos que convenir con el Presidente del Euratom en que el retroceso en la construcción de centrales nucleoelectricas sólo puede ser una fase transitoria.

El desarrollo de la propulsión nuclear de barcos ha dado un paso adelante al poner en servicio la Unión Soviética el rompehielos "Lenin" y esperamos que se ponga en servicio el "Savannah" de los Estados Unidos. Sin embargo, el problema de la propulsión económica de barcos nos parece todavía tan arduo como antes. El coste del equipo de propulsión del "Savannah", según se declaró en Ginebra el año pasado, ascenderá a 15 millones de dólares, mientras que el coste de un equipo normal de propulsión es de unos 5 millones de dólares. Esto refleja la dificultad general de construir pequeños equipos nucleoelectricos que puedan sostener la competencia.

El problema fundamental de la propulsión nuclear de tipo comercial estriba en reducir los gastos de capital. Según nuestros estudios, es ya evidente que esa reducción tendrá que afectar a una amplia gama de componentes de los reactores y que el problema compete en gran medida a la ingeniería tradicional. No son los especialistas en energía atómica quienes han de resolverlo.

La labor del último año en lo que se refiere al aprovechamiento de la energía termonuclear se ha concentrado en el estudio de la física del plasma a temperaturas elevadas más que en el diseño de reactores termonucleares rentables. Es evidente que la clave de la energía termonuclear reside en la posibilidad de impedir que el plasma calentado a elevadas temperaturas pierda energía debido a las inestabilidades y a la emisión de radiaciones que parecen en-

trar en juego cuando nos acercamos a las temperaturas y densidades de plasmas que nos interesan. Se ha observado, por ejemplo, que en un aparato relativamente modesto las radiaciones ultravioleta emitidas por las impurezas representaban una pérdida de energía del orden de los 1 000 MW. Otras pérdidas se deben a desperfectos en el confinamiento magnético, que se traducen en el choque de los electrones con las paredes. Dichas pérdidas se han observado tanto en las máquinas de construcción como en las de espejos magnéticos. Tendremos que profundizar mucho más nuestro conocimiento de las propiedades del plasma si deseamos remediar esas fallas y empezar a diseñar verdaderos reactores termonucleares. Debemos recordar también que las botellas magnéticas del futuro deberán poder resistir presiones plasmáticas de hasta 100 atmósferas y que necesitamos seis pulgadas de acero para soportar esas presiones en los reactores de fisión. Así pues, la obtención de la energía termonuclear plantea serios problemas tecnológicos. Por eso creo que sigue siendo válido mi pronóstico de que hasta dentro de 20 años, por lo menos, no estaremos en condiciones de aprovechar la energía termonuclear.

Radioisótopos

La aplicación de los radioisótopos, subproductos de la energía atómica, continúa desarrollándose a razón de un 20 por ciento anual en el Reino Unido. Un nuevo progreso lo constituye la producción de fuentes de radiocobalto de 100 000 curies de actividad como subproducto del funcionamiento de los reactores. Esas fuentes de elevada intensidad se emplean ya para esterilizar en gran escala instrumentos médicos, vendas quirúrgicas, y pelo de cabra utilizado en la fabricación de alfombras. El Wantage Radiation Laboratory instalará en breve una fuente de 150 000 curies capaz de irradiar dos toneladas de materiales por hora, con una dosis de 2,5 millones de rads, que es letal para todas las bacterias. Tengo entendido que en los Estados Unidos se está construyendo una instalación para una fuente de un millón de curies, destinada a los estudios sobre esterilización de alimentos. Las investigaciones sobre la desinfección de los cereales en gran escala han mostrado que es técnicamente posible instalar en los silos fuentes radiactivas de alta intensidad para destruir los parásitos. Los expertos en desinfección de cereales están estudiando en el Reino Unido los aspectos económicos de esta cuestión. Si se tiene en cuenta que las plagas agrícolas ocasionan la pérdida anual de más de 60 millones de toneladas de cereales, se comprenderá que ésta puede ser en el futuro una importante aplicación de la energía atómica.

Estoy convencido de que los radioisótopos encontrarán muchas más aplicaciones comerciales en gran escala. En el Wantage Radiation Laboratory tenemos plazas disponibles para becarios del Organismo deseosos de estudiar esos problemas. A cada país, teniendo en cuenta su situación particular, le incumbirá determinar el uso que ha de dar, en el plano nacional, a esas nuevas técnicas y herramientas.

DECLARACION DEL DOCTOR HOMI J. BHABHA

Desearía aprovechar esta oportunidad para referirme a los aspectos económicos de la energía nucleoelectrica en los países insuficientemente desarrollados. Un examen detenido de esta cuestión, nos revela que existen interesantes factores cuya importancia no había sido plenamente apreciada hasta el presente, pero al mismo tiempo el problema se vuelve más complejo y variado.

Por una parte, la expresión "insuficientemente desarrollados" -empleo este término para designar las zonas donde la producción per capita es baja- abarca una gama muy amplia, que va desde países cuyo ingreso per capita es de 43 dólares hasta otros donde es cuatro o cinco veces mayor, así como en el caso de los llamados países industrializados el ingreso nacional per capita puede variar entre unos 300 dólares al año y una cantidad seis veces mayor. También varían mucho los países desde el punto de vista de su superficie y población, que oscila entre algunos millones y centenares de millones de habitantes, y en lo que a sus recursos naturales de combustible se refiere. Los países del Oriente Medio, por ejemplo, tienen reservas de petróleo sumamente vastas, mientras que la mayoría de los países del Sudeste de Asia poseen yacimientos petrolíferos muy pobres tanto en valor absoluto como en valor relativo cuando se calculan los recursos per capita. Análogamente, las reservas de carbón de las regiones insuficientemente desarrolladas varían considerablemente de unas a otras.

Resulta así evidente que no pueden hacerse generalizaciones acerca de la posibilidad de aplicar la energía atómica en las regiones insuficientemente desarrolladas sin cometer graves errores del mismo modo que no puede generalizarse en lo referente a la aplicabilidad de la energía atómica en las zonas industrialmente desarrolladas.

Situación de la India

Me ocuparé sobre todo de la situación de la India que hemos estudiado detenidamente, y en la que intervienen diversos factores que refutan todas las generalizaciones que podrían darse por ciertas acerca de las perspectivas de la energía atómica en las regiones insuficientemente desarrolladas.

Al contrario de lo que sucede en China, las reservas de carbón de la India son bastante limitadas. Las reservas comprobadas ascienden a unos 43 000



millones de toneladas, aunque las reservas probables sean quizá tres veces mayores. Esto quiere decir que las reservas indias de carbón per capita representan sólo 1/35 de las que poseen los Estados Unidos. Por otra parte, estas reservas no están uniformemente distribuidas en el país, sino concentradas en cuatro Estados: el 55 por ciento se encuentra en los Estados de Bengala y Bihar, en el extremo nordeste de la India, y alrededor del 25 por ciento en el Estado de Madhya Pradesh. El 80 por ciento de la producción actual procede de Bengala y Bihar, y sólo el 12 por ciento de Madhya Pradesh. Así, grandes zonas de la llanura del Ganges, de la India septentrional y occidental y de la India meridional carecen de carbón. Este se ha de transportar desde una distancia de más de 800 kilómetros que separa estas zonas de las minas. Las centrales térmicas de Bombay y Ahmedabad reciben el carbón de los Estados de Bengala y Bihar, situados a unos 2 400 kilómetros de distancia, mientras que Delhi recibe el carbón de la misma zona, a unos 1 300 kilómetros. Aunque los yacimientos de carbón más próximos se hallaran en plena explotación, el carbón habría de recorrer todavía de 800 a 1 000 kilómetros para llegar a dichos lugares. Esto, naturalmente, hace que el precio del carbón sea dos o tres veces mayor que en la boca de la mina, lo que tiene por consecuencia un incremento correspondiente del coste de la energía producida. Este aspecto del problema es bien conocido y se tiene en cuenta casi todos los cálculos del coste de la energía. Pero no menos importante es la inversión de capital que se requiere para el sistema de transporte del carbón. Generalmente se hace caso omiso de este punto.

Cuando una compañía o grupo privado proyecta construir una central eléctrica sólo se preocupa del capital que habrá de invertir, es decir, del coste de la central de energía. Da por supuesto que alguna otra organización encontrará el dinero para la explotación de nuevas minas que produzcan el carbón necesario, si existe una demanda, y que otro grupo se encargará del transporte y encontrará los fondos necesarios para ampliar las instalaciones ferroviarias. Para un grupo privado, por lo tanto, el mayor coste de las centrales nucleoelectricas, en comparación con las centrales térmicas, es un factor muy importante que conspira en contra de su utilización. Aunque hay grandes empresas en la India que suministran cantidades considerables de energía, la producción futura será cada vez más misión del Estado. Como en el caso de varios países europeos, en la India todos los ferrocarriles son propiedad del Estado. Así, cuando éste proyecta aumentar la producción de energía, ha de pensar no sólo en los capitales que deberá invertir en la construcción de las centrales, sino también en los fondos necesarios para la explotación de nuevas minas y la organización de los medios adicionales necesarios para transportar el carbón. Los ferrocarriles de la India trabajan ya a pleno régimen y cualquier gran instalación de producción de energía en zonas alejadas de las minas de carbón requerirá necesariamente nuevos capitales para financiar la construcción de ferrocarriles. Hemos calculado la cuantía de estas inversiones, suponiendo que el carbón de buena calidad ha de ser transportado hasta una distancia de unos 1 100 kilómetros. Esta inversión resulta ser de unas 450 rupias (aproximadamente $\text{₹} 33$) por kilovatio instalado. Esta cantidad no es despreciable en comparación con el coste del kilovatio suministrado por las centrales térmicas modernas de rendimiento elevado. Representa casi el 50 por ciento de los capitales inmovilizados necesarios para la construcción de una central térmica de pequeñas dimensiones, del tipo que podría instalarse en varias partes de la India. No me detendré en detalles análogos acerca de los capitales requeridos para la explotación de las minas. Baste decir que según nuestros cálculos, el precio de coste nacional total por kilovatio instalado en el caso de una central térmica situada a unos 1 100 kilómetros del yacimiento de carbón más próximo asciende a aproximadamente 1 350 rupias ($\text{₹} 100$) para las centrales de gran capacidad y a casi 1 600 rupias cuando se trata de centrales pequeñas. Esto es equiparable a los gastos de capital (unas 1 700 rupias por kilovatio) correspondientes a las grandes centrales nucleoelectricas que emplean uranio natural como combustible, y es igual o mayor que los de las centrales de capacidad análoga alimentadas con uranio enriquecido.

Coste de la energía

¿Cuál es la situación por lo que se refiere al coste de la energía misma? Este depende tanto del interés que se fije a la inversión del capital como de la depreciación. Varios economistas extranjeros sostienen que como los capitales escasean en los países insuficientemente desarrollados, el interés debe

ser por fuerza muy elevado, y algunos han sugerido un interés tan exorbitante como es el de diez por ciento. La prueba decisiva es, lógicamente, la realidad. Los hechos demuestran que los gobiernos de once Estados de la India obtuvieron en 1958 empréstitos por un total del orden de 500 millones de rupias al 4,25 por ciento de interés, siendo cubierta con creces la suscripción por el público. De modo análogo, el Gobierno de la India consiguió empréstitos por un total de 1 650 millones de rupias, a intereses comprendidos entre el 3,5 y el 4 por ciento, que fueron suscritos íntegramente. Es, pues, evidente que en todos los cálculos que se efectúen en la India, por lo que a los costes locales se refiere, se justifica plenamente fijar el interés en un 4,5 por ciento. Es preciso tener muy en cuenta este factor al determinar los costes relativos de una central nuclear y de una central térmica. Por lo que respecta a la depreciación, puede calcularse por un método directo, suponiendo que la instalación durara 20 años, en cuyo caso conviene amortizar anualmente un cinco por ciento del coste inicial o puede adoptarse un método de amortización corriente admitiendo que el capital ya ingresado en el fondo produce un interés compuesto del 4,5 por ciento. Sobre esta base, habría que reservar el 3,29 por ciento anual para la depreciación. Puede verse fácilmente que en estas condiciones, y costando el combustible 300 000 rupias por tonelada (algo más de $\text{₹} 20 000$), el precio de coste de la energía nucleoelectrica resulta de unos 3,5 céntimos de rupia (alrededor de 7 milésimas de dólar) por kilovatio, en comparación con 3,6 céntimos de rupia para la electricidad de origen térmico. En las condiciones que reinan actualmente en la India el coste de ambos tipos de energía es, pues, muy parecido.

¿Cuál es la situación en lo que se refiere a la energía hidroeléctrica? Las lluvias en la India son estacionales, es decir, que llueve copiosamente durante tres meses del año, mientras que durante los nueve meses restantes las precipitaciones son muy escasas en la mayor parte del país. El aprovechamiento de la energía hidroeléctrica requiere, pues, la construcción de grandes embalses que puedan almacenar agua suficiente para suministrar energía durante todo el año. Esto significa cuantiosas inversiones para la construcción de los embalses. Tomando varios proyectos hidroeléctricos típicos, comprobamos que el coste promedio alcanza a unas 1 800 rupias por kilovatio instalado. Esta inversión de capital es tan elevada como la que se requiere para las centrales nucleoelectricas. Pero la inversión ha de hacerse principalmente en obras de ingeniería civil. El coste de los turboalternadores representa una parte relativamente pequeña de la misma. Por esta razón, es mejor prever una mayor capacidad de producción de electricidad, para no tener que funcionar al 100 por ciento ni siquiera al 80 por ciento del factor de carga durante todo el año. Este es un nuevo aspecto que se destaca claramente si se estudian las cifras correspondientes a algunos de nuestros proyectos hidroeléctricos. Por ejemplo, la potencia instalada de la central de Kenya es de 240 MW, pero

como consecuencia de la escasez de agua sólo asciende a 180 MW con un factor de carga del 80 por ciento. Aunque el coste nominal de este proyecto es de aproximadamente 1 380 rupias por kilovatio, el coste efectivo con un factor de carga de 80 por ciento sería, en números redondos, de 1 700 rupias. Existen otros proyectos hidroeléctricos en la India en los que el coste efectivo por kilovatio se eleva hasta 2 200 e incluso a 2 800 rupias, lo que representa casi un 60 por ciento más que en el caso de las centrales nucleoelectricas. Por lo tanto, la instalación de esas centrales requerirá en cualquier caso una inversión muy grande de capital, que muchas veces resulta equiparable al coste de las centrales nucleoelectricas, si no es mayor.

El carácter estacional de las precipitaciones obliga a combinar la energía hidroeléctrica con la energía térmica. Esta necesidad se expone elocuentemente en el siguiente pasaje de un reciente informe preparado para el Gobierno del Estado de Madrás: "Este análisis revela que si bien la potencia instalada de la red de suministro ascendió a 256 000 kW en 1956, la potencia efectiva en términos de energía disponible fue muy inferior, ya que sólo alcanzó a 143 000 kW. En años de sequía muy aguda -y en los últimos tiempos hemos sufrido toda una serie de períodos de sequía- o cuando se retrasa el monzón del sudoeste, las reservas hidráulicas de los embalses quedan prácticamente agotadas, lo que obliga a reducir drásticamente la producción de electricidad. Ha habido restricciones, en 1953, 1956, 1957, y la de 1958 llegó a ser del 75 por ciento durante el mes de junio, pudiendo decirse que paralizó todas las industrias de la zona alimentada por las centrales hidroeléctricas."

Un camino necesario

Con todo esto no quiero demostrar que la energía nucleoelectrica resulte hoy en determinadas partes

de la India más barata que la energía de origen térmico o hidroeléctrico. Lo único que quiero probar es que las inversiones de capital que requiere la ejecución de proyectos nucleoelectricos son perfectamente comparables con las que nos hemos visto obligados a hacer para los proyectos hidroeléctricos, y que no son mucho más elevadas que las inversiones nacionales necesarias para construir centrales térmicas en lugares situados a gran distancia de los yacimientos carboníferos. Teniendo en cuenta las limitadas reservas de carbón y de energía hidroeléctrica del país, que apenas permitirán la expansión que cabe esperar en los 10 ó 20 años próximos, es evidente que debemos lanzarnos resueltamente por el camino de la energía nucleoelectrica para que de aquí a 15 años ésta cubra una parte importante de esa expansión. Me permitiré mencionar a este respecto que hemos resuelto construir nuestra primera central nucleoelectrica con una potencia instalada de unos 250 MW, y que ya han comenzado los trabajos preliminares.

Quizá la situación sea radicalmente diferente en otros países insuficientemente desarrollados. El ejemplo que acabo de citar a propósito de mi país tiende a mostrar que cada problema debe ser estudiado según sus propias características, en vez de concluir, sin más ni más, que la energía nucleoelectrica no puede resultar económica hoy en día para los países insuficientemente desarrollados. Estimo que una de las tareas del Organismo consiste en estudiar con detalle la situación energética de las diversas regiones insuficientemente desarrolladas, para determinar la importancia de las centrales nucleoelectricas que se necesitarían y para comparar sus aspectos económicos. Es muy posible que, a la larga, este estudio resulte fructuoso no sólo para las regiones estudiadas, sino también para los países que habrán de suministrar las centrales nucleoelectricas, al menos durante los próximos 20 años.

DECLARACION DEL PROFESOR BERTRAND GOLDSCHMIDT

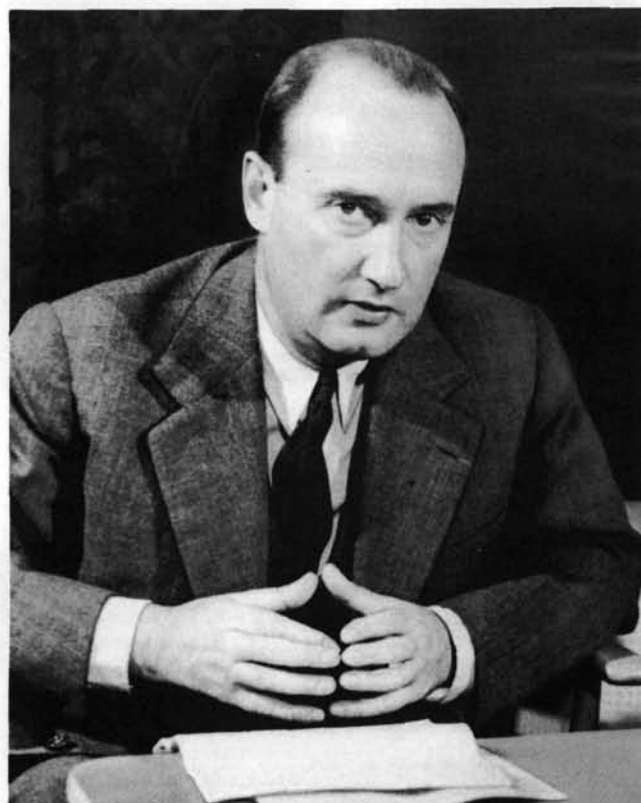
Al tomar la palabra después de dos físicos, quisiera exponer el punto de vista del químico mostrando, por una parte, la importancia del papel que desempeñan la química y la metalurgia en el desarrollo de la energía atómica y, por otra, la creciente influencia que han de ejercer en la industria, y en particular en la industria química del futuro, las radiaciones y los radioelementos producidos en los reactores nucleares.

En esas dos esferas no se han producido cambios importantes desde la Conferencia que se celebró en Ginebra hace un año; por lo tanto, en vez de exponer hechos nuevos, trataré más bien de esbozar las líneas generales de evolución.

La industria de los materiales nucleares

Comencemos por la obtención de los materiales nucleares necesarios para la construcción de centrales nucleoelectricas, y, entre éstos, del más indispensable: el uranio. En quince años se ha desarrollado y perfeccionado una considerable industria minera y metalúrgica del uranio, que consume cerca del cuatro por ciento de la producción mundial de ácido sulfúrico, y cuya importancia, desde el punto de vista del volumen de operaciones, es análoga este año a la del aluminio. Gracias a esta industria y al descenso que ha originado en el precio del uranio, el suministro de este material a las centrales nucleoelectricas durante los próximos veinte años no planteará problema alguno, y el coste del combustible nuclear sólo representará una pequeña parte del precio de la electricidad producida.

Esos resultados sólo han sido posibles gracias a la aplicación industrial -por primera vez en la industria química mineral- de nuevos métodos de extracción, ya sea mediante disolventes orgánicos, ya sea mediante resinas orgánicas de intercambio iónico, métodos éstos que no dejarán de utilizarse para la extracción de otros metales a partir de sus correspondientes minerales pobres. En efecto, gracias a estos procedimientos especialmente selectivos, es posible hoy extraer uranio de minerales ampliamente distribuidos en la naturaleza con un contenido del uno por mil, e incluso inferior, a precios sólo cuatro o cinco veces más elevados que los de antes de la guerra, cuando se utilizaban minerales raros y excepcionales cuya ley era varios centenares de veces más elevada que la de los utilizados en la actualidad.



Hoy podemos considerar que otras importantes industrias de materiales nucleares, tales como las del grafito, zirconio, uranio y torio metálicos nuclearmente puros, han alcanzado ya un nivel técnico muy elevado. En lo que respecta a la eliminación de los elementos que absorben fácilmente los neutrones, se logra un grado de pureza nunca alcanzado en la industria; en muchos casos, la purificación mediante disolventes orgánicos constituye uno de los métodos más eficaces.

La separación isotópica

Más originales aún y de un tipo hasta ahora desconocido, son las plantas de separación isotópica, que podríamos denominar instalaciones físico-químicas, en las que se repiten, a veces a inmensa escala, centenares y centenares de miles de operaciones sucesivas de separación de especies de átomos que en la naturaleza aparecían hasta ahora como gemelos inseparables; tales son los dos isótopos del hidrógeno, cuya separación es necesaria para la

producción de agua pesada, y los dos isótopos del uranio, en cuya separación se basa la producción de uranio enriquecido en el isótopo 235. En cada caso fue preciso allanar dificultades considerables, y a pesar del secreto que se mantiene en esa esfera, las soluciones técnicas que se han encontrado serán de una utilidad creciente en otras ramas de la industria. La ciencia y la técnica industrial de la separación de isótopos tienen apenas veinte años de existencia, lo que permite esperar nuevos progresos; si son de importancia podrán afectar considerablemente los métodos futuros, así como la economía de la energía nuclear. Esta economía dependerá principalmente, en un futuro inmediato, de los progresos que se realicen en lo que respecta a la resistencia de los elementos combustibles a la acción de las radiaciones. La finalidad que se persigue es poder alcanzar temperaturas cada vez más elevadas en los combustibles y, por consiguiente, en los fluidos de refrigeración que transmiten la energía a las turbinas eléctricas, así como un grado de combustión cada vez más alto, antes de que unas deformaciones excesivas exijan retirar el combustible del reactor. El uranio metálico puro, como el plutonio puro, soporta mal los ciclos térmicos y el efecto de las radiaciones, que le hacen sufrir deformaciones graves; pero algunas de sus aleaciones con otros metales, lo mismo que sus óxidos, ofrecen una resistencia mucho mayor a esos efectos.

En los laboratorios atómicos del mundo entero se estudian centenares de aleaciones de uranio y plutonio y una serie de materiales cerámicos que se obtienen por sinterización, es decir, calentando a muy altas temperaturas y sometiendo a presión mezclas de diversos óxidos metálicos o mezclas de óxidos con distintos metales. Estos estudios son largos, complicados y costosos, y deben culminar en experimentos en los reactores de ensayo de materiales, cuyo número, limitado en la actualidad, aumentará sobre todo en Europa con la próxima entrada en servicio de nuevas instalaciones. En Francia confiamos en que el uranio aleado con pequeñas cantidades de molibdeno o de cromo soporte una irradiación de hasta 3 000 MW día por tonelada; aleaciones similares se obtienen seguramente en otros laboratorios que, con demasiada frecuencia, guardan silencio sobre esta cuestión cuya importancia industrial es evidente.

Será de la mayor utilidad que el Organismo desempeñara una función coordinadora en esta esfera, pero desgraciadamente no se conoce otro medio eficaz de coordinar investigaciones que el de asegurarse un derecho de fiscalización financiándolas y, como ustedes saben, nuestro Organismo dispone de medios escasos. Tal vez haya una función que desempeñar: la de hacer todo lo posible para que se comuniquen y publiquen los programas en esta materia, así como informaciones sobre los ensayos infructuosos, que son los más frecuentes.

Por último, quisiera citar un ejemplo concreto de la importancia y dificultad de los problemas metalúrgicos. Tanto en el Reino Unido como en Francia

se prosiguen las investigaciones con reactores de uranio natural refrigerados por gas a presión. En este aspecto se prevén en los respectivos países dos prototipos de características avanzadas, a saber el A. G. R. (Advanced Gas Cooled Reactor) con moderador de grafito, en el Reino Unido, y, en Francia, el reactor EL-4, cuarto de la serie con moderador de agua pesada. En los dos sistemas, la elevación que se trata de obtener en la temperatura del gas refrigerante exige revestir el combustible nuclear con berilio, metal cuyo punto de fusión es mucho más alto que el del magnesio utilizado hasta la fecha.

La metalurgia del berilio se encuentra en sus fases iniciales y el coste de este metal es muy elevado (del orden de 150 dólares por kilogramo) en parte a causa del peligro que suponen los polvos formados durante la elaboración, que provocan una enfermedad comparable a la tuberculosis galopante. A pesar de todo, el éxito de esos dos reactores depende en cierta medida de la posibilidad de elaborar y soldar estos tubos, así como de la resistencia que ofrezcan a la acción de las radiaciones.

Un resultado satisfactorio significaría un aumento de la demanda de berilio. El aprovisionamiento de este metal, que hoy se obtiene fácilmente a partir de minerales ricos aunque bastante raros, podría en tal caso imponer la necesidad de buscar minerales más pobres pero abundantes, el perfeccionamiento simultáneo de su química extractiva y la creación de una nueva industria química.

La química desempeñará sin duda un papel importante en ciertos tipos de reactores del futuro; en unos, por la presencia de moderadores y de fluidos refrigerantes orgánicos, que consisten generalmente en hidrocarburos de elevado punto de ebullición resistentes a las radiaciones; en cambio, en los reactores llamados homogéneos, el combustible nuclear estaría en forma de sal disuelta y los productos de fisión podrían eliminarse de la solución por circulación a través de una instalación adecuada. La realización de este tipo de reactor verdaderamente químico y muy prometedor parece aún lejana a causa de los problemas de corrosión que originan las radiaciones, que todavía no se han podido resolver.

Radiaciones y subproductos radiactivos

Pero dejemos este primer aspecto de nuestra disertación para pasar al de la utilización industrial de los subproductos radiactivos y de las radiaciones emitidas por la reacción en cadena del uranio.

A menudo se pierde de vista que la fisión del uranio no sólo representa el descubrimiento de una fuente de energía cuya concentración es más de dos millones de veces superior a la del carbón; constituye también el descubrimiento de un medio de obtener transmutaciones a una escala que la fantasía más audaz de los alquimistas medievales no habría osado soñar jamás.

La producción, por transmutación del uranio en las grandes centrales nucleoelectricas del futuro, de

decenas y aun de centenares de kilogramos de un elemento nuevo que no existe en la tierra, el plutonio, representa sin duda una realización asombrosa.

Cabe afirmar que el plutonio será el combustible más adecuado para los reactores reproductores del futuro, que permitirán transformar en energía una fracción mucho mayor del uranio disponible en la tierra. La separación del plutonio, del uranio y de los productos de fisión radiactivos de los elementos combustibles irradiados, ha exigido la construcción de auténticas plantas de alquimia, totalmente reguladas a distancia en razón del peligro que suponen las intensas radiaciones, y cuya concepción y buen funcionamiento continuo representan verdaderas proezas de la tecnología moderna. También en este caso, la extracción por disolventes orgánicos es el procedimiento de elección, que tal vez se remplazará en algunos casos por la extracción selectiva mediante sales o metales fundidos, procedimiento llamado pirometalurgia, cuya aplicación bajo la acción de las radiaciones planteará problemas industriales completamente nuevos.

Además, gracias a la química pueden evacuarse los efluentes químicos de tales plantas de manera que sus concentraciones de sustancias radiactivas sean inofensivas para la salud, puesto que su magnitud no excede de la que hasta hace pocos años constituía el orgullo de numerosas marcas de aguas minerales. Los problemas, en general de orden químico, que plantea la evacuación de los desechos radiactivos, cobran una importancia siempre creciente por la sensibilidad agudizada de la opinión pública ante todo lo que se relaciona con la radiactividad del medio ambiente. El Organismo tiene una función de considerable importancia que desempeñar en la elaboración de normas internacionales que contribuyan a facilitar el desarrollo de la energía atómica, tranquilizando al público sobre su empleo. El grupo de expertos y la conferencia que se organizarán para estudiar ese problema constituyen medidas preliminares de gran interés en este sentido.

Además de plutonio, los reactores suministran cantidades considerables de subproductos radiactivos formados directamente por fisión del combustible nuclear o por transmutación de los elementos expuestos a los neutrones. De esta forma se han podido reconstituir isótopos radiactivos de todos los elementos conocidos y de las especies nucleares que debieron existir cuando se formó la tierra y desaparecieron después a causa de su inestabilidad.

Utilización industrial de las fuentes de radiaciones de elevada intensidad

No tengo el propósito de referirme a las múltiples aplicaciones de los radioisótopos en la ciencia, la medicina y la industria, sino más bien a la utilización industrial de las fuentes de radiaciones de elevada intensidad, campo tecnológico lleno de promesas que comienza a desarrollarse ahora. La conferencia que el Organismo acaba de organizar en Varsovia ha demostrado el interés de esta esfera de

actividad, y procuraré dar rápidamente una idea de la misma, refiriéndome sobre todo a las aplicaciones de los radioisótopos en la industria química.

Los reactores constituyen las fuentes de radiaciones más intensas. Un reactor de 100 000 kW térmicos equivale, en intensidad de radiación, a varios centenares de toneladas de radio, mientras que en los 50 años que siguieron a su descubrimiento sólo pudieron aislarse 2 ó 3 kilogramos de ese elemento, que a partir de un gramo es peligroso manejar. Estas cifras demuestran la revolución que se está cumpliendo y que se refleja también en los precios: un gramo de radio cuesta en la actualidad unos miles de dólares, mientras que una cantidad equivalente de radiocobalto o de radiocesio sólo vale pocos dólares.

Se están efectuando ensayos sobre la utilización de la energía cinética de los productos de fisión para iniciar reacciones químicas, especialmente en la fase gaseosa, como la formación de óxidos de nitrógeno y la obtención de ácido nítrico, partiendo del nitrógeno y del oxígeno, o la oxidación de sustancias orgánicas. Si estos ensayos tienen éxito, quizá un día se construyan reactores nucleares destinados exclusivamente a las síntesis químicas. Existe, por tanto, la posibilidad de utilizar en la industria química un factor nuevo: la ionización por irradiación, además de los factores corrientes -temperatura y presión-, y de esta forma aparece una nueva rama de la química industrial: la de los efectos químicos de las radiaciones.

Por el momento, las fuentes de radiaciones de elevada intensidad que se utilizan consisten en circuitos de metales fundidos irradiados en el reactor y que emiten radiaciones gamma penetrantes (como la mezcla de galio y de indio en el reactor soviético IRT), instalaciones que utilizan el flujo de radiaciones penetrantes emitido por los elementos combustibles irradiados durante su "enfriamiento", o bien fuentes de cobalto-60 obtenido por irradiación del cobalto por neutrones y fuentes de cesio-137, producto de fisión de largo período de semidesintegración y que se puede aislar de la mezcla con relativa facilidad.

En el centro atómico francés de Saclay disponemos de una casamata que puede contener gran parte de los elementos combustibles del reactor EL-3 de 15 000 kW; parte de esta casamata está concebida como cámara frigorífica, lo que permite efectuar importantes ensayos de conservación de los alimentos por irradiación.

Por último, cuando basta con una dosis y una intensidad de radiación relativamente bajas y no son necesarias radiaciones penetrantes, se pueden utilizar fuentes de rayos beta constituidas por varios productos de fisión de período largo, como el estroncio radiactivo, que de esta forma presta valiosos servicios, desmintiendo la mala reputación que ha adquirido en la opinión pública. Estas fuentes ya se utilizan en la industria para irradiar materiales plásticos y modificar así su estructura y propiedades, y

para la copolimerización de injerto, es decir, la combinación de dos clases diferentes de moléculas activadas bajo el efecto de las radiaciones.

En los Estados Unidos se produce ya comercialmente polietileno irradiado que puede utilizarse como aislador eléctrico de elevada resistencia térmica.

En otra esfera, pueden citarse los primeros trabajos para tratar de reducir, por irradiación, la temperatura de craqueo de los hidrocarburos. También se ha tratado de mejorar la acción de los catalizadores con ayuda de las radiaciones, pero esas aplicaciones requieren aún muchos perfeccionamientos, pues la mayor parte de los efectos observados desaparecen por calentamiento a las temperaturas exigidas por la mayoría de los tratamientos industriales.

Estas aplicaciones químicas de las fuentes de radiaciones de elevada intensidad sólo constituyen un sector de una industria más amplia que comienza a adquirir considerable importancia en los siguientes campos: esterilización de productos farmacéuticos, conservación de alimentos, esterilización de los in-

sectos para exterminarlos, mejoramiento de las especies vegetales por inducción de mutaciones, y mejoramiento de las vacunas por destrucción de los microbios y virus.

Nuevas tecnologías

Comienza a vislumbrarse de esta forma una serie de tecnologías nuevas cuyo perfeccionamiento y aplicación requieren medios menos costosos y que cada vez podrán utilizarse con mayor facilidad, permitiendo así que un creciente número de países participe en estas actividades, especialmente los que aún no podían producir energía nucleoelectrónica. El Organismo habrá de desempeñar aquí un papel importante, facilitando asistencia técnica a aquellos países que deseen emprender estas actividades. El volumen del trabajo aumentará constantemente en el futuro y representará, paralelamente a la producción creciente de energía nucleoelectrónica, una rama de la industria que adquirirá sin duda gran importancia y en la que, como hemos tratado de exponer, la química y su industria desempeñarán un papel muy destacado.

PREGUNTAS Y RESPUESTAS

Pregunta formulada a Sir John Cockcroft:

Habla usted de los isótopos como subproductos de la energía atómica. Esto es sin duda correcto cuando se trata de los productos de fisión, pero a mi juicio no es tan cierto en el caso de los isótopos obtenidos por irradiación neutrónica. Teniendo en cuenta el papel tan destacado que los isótopos han desempeñado en la investigación biológica y bioquímica en los diez años últimos ¿cree usted que puede considerárseles todavía como subproductos de la energía atómica?

Respuesta:

En realidad es una cuestión de palabras. Al llamarlos subproductos pensaba especialmente en los que se obtienen en reactores contruidos con otros fines. En este sentido constituyen efectivamente subproductos de los reactores generadores de energía o de los reactores destinados al ensayo de materiales. No trato de disminuir la importancia de los isótopos. Por el contrario, he pensado con frecuencia que su utilización en la biología y en la bioquímica representa una de las aplicaciones más importantes de la energía atómica.

Pregunta formulada al Dr. Bhabha:

¿Hay alguna indicación de que la investigación pura se oriente por nuevos caminos y que ello origine grandes cambios en la ciencia y la tecnología nucleares?

Respuesta:

Creo que se debe responder afirmativamente a esta pregunta. Nuestros conocimientos actuales son solamente una pequeña parte de los que aún se deberán adquirir. Como usted sabe, no hemos logrado transformar directamente la energía nuclear en electricidad. Es posible que se acaben por resolver algunos aspectos fundamentales de este problema, lo que permitiría obtener directamente electricidad en vez de seguir el método actual, que en el fondo es una nueva manera de generar vapor.

Sir John Cockcroft añadió: Sobre esta cuestión de la obtención directa de electricidad quisiera agregar que, a mi juicio, si conseguimos construir un reactor de fusión en el que haya un gas muy caliente y conductor de la electricidad, bastará