



04.73.10

TE 30/123

COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA
DEPENDIENTE DE LA PRESIDENCIA DE LA NACION

con esta misma
firma hay otro trabajo
del 1.74.41

GERENCIA DE TECNOLOGIA

ENSAYOS DE IRRADIACION

Oscar Delmo HERRERO

Departamento de Combustibles Nucleares

BUENOS AIRES

- 1973 -

TE 30/123

COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA
DEPENDIENTE DE LA PRESIDENCIA DE LA NACION

GERENCIA DE TECNOLOGIA

ENSAYOS DE IRRADIACION

Oscar Delmo HERRERO

Departamento de Combustibles Nucleares

BUENOS AIRES

- 1973 -

INTRODUCCION

La incorporación a la CNEA de los Ensayos de Irradiación con fines tecnológicos, obedece a la necesidad de conocer el "comportamiento bajo irradiación de los materiales nucleares", tendiente a la adquisición de capacidad para el diseño, especificación y fabricación de elementos combustibles. Así pues, se señalan sumariamente aquí las distintas etapas de un Ensayo de Irradiación, abarcando desde su gestación hasta los exámenes posirradiatorios.

Se exponen las características de los dos géneros de dispositivos experimentales -cápsulas y circuitos- así como como sus diferencias conceptuales y de utilización.

Se hacen consideraciones respecto del cálculo de cápsulas, como así de la interrelación reactor-experimento.

Se da una lista de técnicas de fabricación usadas en la realización de dispositivos.

I. PROGRAMA DE IRRADIACION

Un plan de irradiación puede fundarse en tres razones principales (1):

- 1) desarrollo nacional -o multinacional- de reactores de potencia.
- 2) experiencias básicas o tecnológicas para el desarrollo de elementos combustibles (EC).
- 3) desarrollo de reactores "prototipos" -reactor para pruebas de núcleos, para pruebas de prototipos de EC, o reactor térmico consagrado a ensayos para reactores rápidos.

Como ejemplo se señala el programa de irradiación de Harwell destinado al desarrollo de la tecnología de reactores. Dicho programa fue dividido en tres etapas (13).

1o. "Ensayos de Irradiación a pequeña escala", donde las condiciones del medio tuvieron importancia adjetiva. Fueron esencialmente investigaciones básicas: estudio del daño por radiación y sus efectos sobre las características mecánico-metalúrgicas del combustible.

2o. "Ensayos acelerados", mediante circuitos de irradiación en reactores de ensayos. Este género de experiencias tuvo por finalidad obtener información sobre el

comportamiento de un prototipo de EC de escala aproximada.

3o. Ensayos de combustibles a plena escala, en un reactor de potencia. Estos ensayos son imprescindibles pues sólo mediante ellos pueden ser estudiados las condiciones y efectos del conjunto.

II. UTILIZACION DE REACTORES DE INVESTIGACION

Los reactores de investigación -o ensayo- suministran los flujos para el estudio del comportamiento bajo mediación de los materiales. Dos tipos de reactores son utilizados para tal fin: reactores tipo "tanque" y reactores tipo "piscina". Ambos son de importancia, pero lo que sigue se consagra sólo a los últimos en virtud de estar uno más familiarizado con ellos.

Las ventajas que ofrecen los reactores tipo piscina son las siguientes:

a) accesibilidad para dispositivos. La implantación de éstos puede hacerse sin necesidad de detenerlos, a potencia plena o reducida. Los ensayos preliminares de un dispositivo pueden ser efectuados desde una plataforma libre de radiación y la aproximación al núcleo ser verificada luego.

b) los dispositivos pueden ser desplazados del núcleo sin necesidad de recipientes de Pb. La desactivación puede llevarse a cabo almacenando el dispositivo en la misma piscina.

c) la extracción de las probetas puede hacerse fácilmente aproximando el recipiente de Pb a la superficie.

d) la configuración del núcleo puede ser cambiada fácilmente conforme la necesidad. P.ej. pueden ser creados canales centrales por extracción de elementos combustibles.

e) Los reactores tipo piscina comparados a los tipo tanque o a los de agua pesada, son más simples, en consecuencia operan con mayor seguridad (2).

f) pueden alcanzar densidades de potencia relativamente altas y ofrecen así flujos neutrónicos elevados - 10^{14} n/cm²/seg- tanto térmico como rápido.

g) los precios de construcción y explotación son de los más bajos, en consecuencia los costos de las experiencias no serán altos.

Las desventajas que estos reactores presentan son:

a) núcleo compacto y volumen total reducido. Sólo mediante la eliminación de un EC puede ser incorporado un dispositivo experimental en el núcleo.

b) en caso de accidentes, la comunicación directa entre el núcleo y la sala del reactor constituye un inconveniente.

c) el calentamiento gama es elevado.

III. NORMAS PARA OPERACION DE UN REACTOR EXPERIMENTAL

Para el mejor cumplimiento de Ensayos de Irradiación, los responsables de un reactor experimental deben esforzarse por (14) (1):

a) "aumentar la potencia" y consecuentemente la estabilidad del reactor. Esto es más bien aumento del flujo neutrónico disponible. Flujos más elevados implican tiempos de irradiación menores, más alta actividad específica, mayor sensibilidad de los métodos de análisis por activación. En suma, el aprovechamiento del reactor es mayor pues aumenta el número de experiencias por unidad de tiempo y se reduce el costo por unidad de irradiación. La desventaja que acompaña a un aumento de potencia del reactor, es que la interferencia entre dispositivos experimentales adyacentes también aumenta.

b) "atenuar las variaciones de flujo y el calentamiento gama" en los emplazamientos experimentales, provocados por los movimientos de las barras de control. El flujo neutrónico debe mantenerse constante -en valor absoluto y distribución espacial- en la medida de lo posible. Durante el ciclo de operación de un reactor experimental, el flujo promedio puede variar hasta un 20% o aún más, debido al consumo de combustible. En consecuencia debe existir preocupación por operar a "flujo constante" y no a "potencia constante". En cuanto a las variaciones locales provocadas por la eliminación de un dispositivo experimental, pueden ser absorbidas si, p.ej., a ello le sucede la implantación de una maqueta en el mismo emplazamiento.

c) "mejoramiento de las facilidades experimentales". Los canales de irradiación verticales son más atractivos que los horizontales. Estos últimos muestran más altos gradientes de flujo en las experiencias, mayores dificultades de acceso, y mayores problemas de protección biológica en los sitios de acceso. En dichos canales pueden ser llevadas a cabo experiencias de las categorías 1, 2, 3 y 4, señaladas luego, mientras que las investigaciones con fines tecnológicos se efectúan en los canales verticales.

IV. CATEGORIAS (O CLASES) DE ENSAYOS DE IRRADIACION

IV.1 Espectrometría

Está consagrada al estudio de flujos neutrónicos y gama, sus energía y distribuciones especiales. Se conoce también por "dosimetría". Los niveles y naturaleza de flujos son necesario conocerlos para las distintas experiencias: estudios del daño por radiación, evaluación del quemado, determinación de secciones transversales, cálculo del calentamiento gama, etc.

Las tres técnicas comúnmente empleadas por la dosimetría son: dosimetría química (3), la cámara de ionización (4), y dispositivos calorimétricos (5)(6).

a) Flujos de neutrones térmicos

Puesto que los neutrones en la región de las energías térmicas -energías del orden de 0,0252 eV correspondiente a la velocidad más probable de una distribución maxwelliana a la temperatura ambiente- no tienen todos la misma energía (7), se admite que la repartición de sus velocidades sigue aquella ley (8). En este dominio de energías, el flujo puede ser medido mediante detectores de activación basados en la reacción (n, a) -"absorbedores $1/v$ "- esto es, detectores cuya sección eficaz de absorción neutrónica varía inversamente con la velocidad de los neutrones. Criterios de selección y tipos de monitores de flujo neutrónico pueden ser consultados en las referencias (7)(8).

b) Flujos de neutrones rápidos

Se emplean para ello "detectores de umbral". En ellos, reacciones tipo (n, a) , (n, p) , (n, n') , $(n, 2n)$, (n, f) son inducidas por neutrones dotados de energías superiores a un "valor umbral" para un detector dado. A veces, en experiencias de "daño por radiación", interesa más bien que la dosis de flujo recibida, el daño inducido total. Ciertos materiales exhiben un cambio de alguna propiedad física en función de la dosis de exposición. Son los llamados "detectores de daño". P.ej. grafito cambia sus dimensiones, y con ello la conductibilidad térmica y eléctrica.

c) Flujos gama

Por interacción de la radiación nuclear con la materia, parte de esa energía es absorbida. De ella, una fracción pequeña produce cambios físicos y/o químicos, mientras que el resto se manifiesta como calor. Este fenómeno puede ser captado con calorímetros de distinto tipo (6). Calibraciones eléctricas previas permiten deducir la potencia almacenada de origen gama (9).

IV.2 Producción de radioelementos

Tiende a satisfacer necesidades medicinales e industriales. Entre estas últimas, ofrece un valioso recurso al grupo de los llamados "ensayos no-destructivos".

IV. 3 Activación con fines de análisis (análisis por activación)

Es un método de análisis elemental en el cual varios elementos de una muestra son determinados cuantitativamente por bombardeo con partículas nucleares -generalmente neutrones-, y los cuales forman isótopos radiactivos por reacciones nucleares. Así son identificadas y medidas las diferentes radiactividades inducidas.

IV. 4 Experiencias de tipo biológico

Utilizan dosis neutrónicas relativamente bajas, de características simples y bien definidas. Ejemplo de ello son Argonaut en Petten, BEPO en Harwell (7), Triga en San Diego.

IV. 5 Estudio de fenómenos fundamentales

Comprende aquéllos de naturaleza química y los de naturaleza física. Para los primeros, también las dosis neutrónicas son relativamente bajas. Interesan, por el contrario, altas dosis gama. Algunos de los fenómenos estudiados son: origen de hidrocarburos, cinéticas de procesos industriales, moderadores orgánicos, acción radiolítica, etc.

La física del sólido se interesa particularmente en irradiaciones a bajas temperaturas -"irradiaciones criogénicas". Se realiza a las temperaturas del He, N₂ o H₂ líquidos. Tienen por objeto los ensayos efectuados a estas temperaturas "la congelación" de defectos para estudiar mecanismos del daño por radiación. En efecto, a tan bajas temperaturas son "reprimidos" los fenómenos de difusión.

Entre las propiedades de los materiales susceptibles de modificación por bombardeo con neutrones, se estudian fenómenos como (10): difusión de defectos, creación de vacancias, "efecto Wigner", la incidencia de éstos sobre ciertas propiedades -resistividad, conductibilidad, resistencia a la tracción, resiliencia, aspectos metalográficos, corrosión radiolítica, etc.

IV. 6 Investigaciones tecnológicas o aplicadas

Este campo abarca el estudio de los efectos de las radiaciones sobre los materiales no-fisionables -componentes de la estructura de un reactor, materiales para vainas de EC- y materiales fisionables -combustibles nucleares propiamente dichos (11).

El propósito de este género de investigaciones es ensayar materiales que serán destinados a un reactor en curso de diseño o para ensayar nuevos materiales para un reactor existente y obtener los resultados más pronto de lo que podrían ser obtenidos en el propio reactor (12).

Los ensayos a que debe ser sometido un EC o sus componentes pueden ser

clasificados de la manera más general en dos categorías: ensayos fuera de reactor y ensayos en reactor, más comúnmente conocidos por "ensayos de irradiación". Desde el punto de vista del desarrollo de EC, ambos ensayos constituyen pues un soporte del diseño (15)(16). El presente trabajo ha sido consagrado a éstos últimos. Son objetivos tecnológicos de este género de ensayos conocer (17): cambios dimensionales de combustibles y vainas, efectos de temperatura, liberación de gases de fisión, compatibilidad de materiales, máximo quemado admisible, conductibilidad térmica, el "ratcheting" de las pastillas y la vaina por efecto del ciclado de temperatura, presión de gases de fisión, variables de fabricación -densidad, estequiometría, etc.- Eso, en lo que a materiales fisionables se refiere. En cuanto a los estructurales, es de interés estudiar la modificación de propiedades mecánicas a consecuencia del daño por radiación.

V. DISPOSITIVOS PARA ENSAYOS DE IRRADIACION

A- Cápsulas	no instrumentadas	 en tubos neumáticos en tubos hidráulicos
	instrumentadas	
B- Circuitos de irradiación		
	a gas	
	a líquidos orgánicos	
	a agua	
	a Na, NaK (u otro metal líquido)	

La distinción entre cápsulas y circuitos para ensayos de irradiación se funda en la forma en que el calor es transferido al exterior (18): en las primeras, el calor generado por las probetas fluye a través de las paredes de la cápsula radialmente al medio refrigerante del reactor, predominantemente por conducción; en los segundos, la energía desarrollada es transferida a un circuito propio, a gas o líquido en circulación forzada capaz de evacuar mayores potencias. Se trata pues de un circuito independiente del circuito primario del reactor. Eso permite crear condiciones de ensayo muy variables.

Cabría agregar un género intermedio de cápsulas en las que la evacuación de la potencia liberada en las probetas combustibles se mejora mediante circulación natural-termosifón (12).

Cápsulas y circuitos poseen generalmente geometría cilíndrica, constituidos por paredes concéntricas, y van insertados en una caja de EC (vacía) de MTR. Los esquemas de la hoja siguiente muestran los componentes característicos de uno y otro género de dispositivos. Desde la posición axial hacia afuera pueden señalarse: la probeta (P), el tubo de fuerza (W). Este último determina un recinto de irradiación (R). Luego

viene una zona de transición (Z), seguida del tubo de protección (U). Este es bañado exteriormente por el refrigerante del reactor circulando por el canal de refrigeración (K). Se muestra además, una zona de calefacción (H), de frecuente incorporación en las cápsulas. Ella permite, dentro de ciertos límites, modificar la temperatura de las probetas por energía eléctrica adicional. En los circuitos, la transferencia térmica radial es impedida mediante una buena aislación en la zona Z, mientras que en las cápsulas la resistencia térmica de dicha zona se elige -en naturaleza y espesor- de modo de obtener la deseada temperatura en el recinto de irradiación y con ello en la probeta.

La concepción de uno u otro dispositivo depende principalmente de si se trata de ensayar materiales fisiónables o no. Los primeros constituyen fuentes de calor vigorosas durante irradiación, mientras que los segundos -como asimismo los materiales componentes del propio dispositivo experimental- sufren calentamiento sólo por absorción de radiación gama. En consecuencia, los fenómenos de transferencia térmica son decisivos en el diseño, aunque no menos importante son los aspectos mecánicos -tensiones térmicas, tensiones de servicio, tolerancias-; aspectos neutrónicos -perturbación de flujo, calentamiento gama, absorción neutrónica-; compatibilidad química entre materiales disímiles en contacto; radioquímica -cantidad y tipo de isótopos formados, tiempos de decaimiento, protección biológica, etc.

La más simple información que puede recogerse de ambos dispositivos en servicio, es la temperatura. Para ello van dotados generalmente de termocuplas especiales. Asimismo puede haber otra instrumentación para la medición de diferentes parámetros -presión de gases de fisión, dilataciones. Tanto la incorporación de detectores, como el traslado de la información a través de la región de protección del reactor, representan serias dificultades técnicas.

La parte fuera del reactor de un circuito de ensayos comprende una vasta instalación -intercambiador de calor, circuitos auxiliares, equipo para circulación forzada, controles, alarmas, depuradores, etc.- mientras que una cápsula, tiene un equipamiento fuera del reactor más simple -control y registro de temperaturas, suministro de gas a la barrera térmica (Z), presurización de recintos, o para arrastre de gases de fisión, etc.

Puesto que el circuito permite modificar las condiciones del fluido circulante, este género de dispositivos es más versátil que las cápsulas.

La irradiación en cápsulas -ensayos estáticos- se presta para ensayos sistemáticos de materiales combustibles y de estructura, como planificación previa de la realización de un programa de desarrollo de reactores. Los resultados de estos ensayos serán orientadores para la planificación posterior en circuitos -ensayos dinámicos- y la concepción de un prototipo de prueba.

El circuito, será, pues, preferencial, para una etapa avanzada de un programa concreto de desarrollo de reactore, cuando se pretenda estudiar el comporta-

miento de conjunto -EC y medio refrigerante utilizado. Con todo, el campo de utilización descripto para cápsulas y circuitos, sólo puede alcanzarse en casos límites. En la práctica tiene validez relativa y, en última instancia, la disponibilidad de recursos económicos, técnicos, etc. puede forzar al uso de uno u otro.

Con respecto a los costos (18)(19), la ejecución de un circuito varía entre 150.000 y 3.000.000 de dólares, y puede demandar hasta 3 años desde la planificación hasta la puesta en servicio. El desarrollo de una cápsula de un nuevo tipo puede alcanzar desde 10.000 hasta 800.000 dólares, y requerir lapsos de hasta 1,5 años (19). En cambio Harrington (17), sostiene que se requieren de 2 a 3 años para completar el estudio de una cápsula.

De lo dicho se desprende que la construcción de un circuito se abordará con la idea de que esté listo para los requerimientos de una etapa dada de un programa a largo plazo, o que permita ser modificado, de manera tal que puedan ser realizadas varias series de ensayos bajo diferentes condiciones.

Finalmente, una implicancia igualmente desfavorable de todo ensayo de irradiación, ya sea efectuado en cápsula o en circuito, es que resulta demasiado oneroso para la información que brinda. Si en cambio se toma en consideración cualquier género de ensayo de materiales fuera del reactor, p.ej. un ensayo mecánico, su realización es más simple y menos costosa que si se realiza bajo flujo. Asimismo, puede ser ensayado un mayor número de probetas y obtenerse entonces resultados estadísticos. Para aclarar el concepto: cuando se requiere conocer el comportamiento bajo irradiación de un material dado -combustible o de estructura- es imprescindible someterlo a flujo. Algunas de las variables en estudio deben ser medidas sólo durante la experiencia, p.ej. temperatura o conductibilidad en materiales combustibles, otras en cambio, pueden ser medidas además, mediante técnicas posirradiatorias, p.ej. ensayos mecánicos sobre materiales combustibles o materiales de vainas.

VI. CALCULO DE CAPSULAS

Para poder llevar a cabo un ensayo dado, debe ser previamente seleccionado un tipo de cápsula. Criterios de diseño de cápsulas y sus relaciones recíprocas, son claramente expuestos en la referencia (17). Allí se hace un estudio comparativo de cápsulas dotadas de distintas barreras térmicas (r_2-r_1) -espacios anulares de Na, NaK, acero inoxidable, Zr, con aletas o llenos de gas He.

La ley de Fourier para la conducción calórica en el estado estacionario, aplicada sucesivamente a cada uno de los materiales concéntricos que constituyen una cápsula, permite evaluar la caída térmica:

$$\Delta T = Q \cdot R = (Q) \cdot \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi(\lambda)} \quad (1)$$

- ΔT : diferencia de temperatura a través de la barrera térmica o pared en cuest.
 Q : potencia calórica en ese punto
 r_2 y r_1 : radios externo e interno de la pared
 λ : conductibilidad térmica del medio constitutivo de la pared

La caída de temperatura es pues función, de los tres factores entre paréntesis: potencia calórica, conductibilidad térmica y geometría de la barrera. La aplicación de esa fórmula al cálculo de cápsulas -en el estado estacionario- supone, además, que todo el calor se transfiere radialmente -despreciable en la dirección axial- que la conductibilidad térmica permanece constante, y que las contribuciones al flujo calórico por convección y radiación son insignificantes frente al fenómeno de conducción. Estas dos últimas hipótesis tienen razonable validez para materiales sólidos. En los fluidos, y principalmente en ensayos a altas temperaturas, dichas hipótesis no son válidas.

Si se admite la constancia de Q , la caída de temperatura será solo función de las dos variables restantes de la fórmula (1), de modo que variando las dimensiones de pared para distintos materiales, pueden obtenerse múltiples caídas térmicas.

Durante un ciclo de servicio, Q no puede mantenerse constante a causa de las variaciones de flujo neutrónico. Se recurre entonces con frecuencia a distintos métodos para obtener cierto control Q a voluntad (17) -modificación de los flujos neutrónicos, calefacción adicional, modificación de la conductibilidad térmica de la barrera, modificación de la geometría de la cápsula.-

VII. PARAMETROS DE DISEÑO

VII.1 Del reactor

a) Naturaleza y densidades de flujos

La selección de una posición de irradiación en una facilidad experimental para un dado ensayo, exige un conocimiento cabal de los valores y la naturaleza de los flujos allí existentes. La dosimetría brinda procedimientos para la medición de flujos, los cuales han sido mencionados en el capítulo de las Categorías de Ensayos.

Si se trata de ensayos de materiales fisionables, para poder estimar la potencia generada en la fisión del U-235, es necesario conocer las contribuciones por calentamiento gama en el combustible y en los materiales de la cápsula y, de este modo, descontarlos de la potencia total medida.

b) Condiciones de refrigeración de la cápsula

Pocas veces se cuenta con la posibilidad de modificar el caudal de refrigerante en el canal experimental durante el servicio. Debe tratarse que el flujo calórico por unidad de superficie (q/A) en la pared de la cápsula sea lo más bajo posible.

Bajo ninguna circunstancia debe alcanzarse la ebullición durante servicio en ningún punto del canal -ausencia de puntos calientes- ni menos aún permitirse que se alcance durante el ensayo las condiciones de formación de película permanente de vapor entre la pared y el refrigerante. Estos aspectos son evaluados en las referencias (20) y (21).

Para una dada potencia generada, el flujo cládrico por unidad de superficie (q/A) puede reducirse si se aumenta el diámetro hidráulico del canal, aumenta la velocidad del refrigerante y con ello decrece la resistencia térmica de la interface.

c) Depresión de flujo

Materiales sometidos a una atmósfera neutrónica, absorben neutrones de un modo proporcional al flujo. Cuando un dispositivo experimental es insertado en una posición del núcleo, reemplaza un volumen de moderador, de combustible -o ambos-. Probetas combustibles constituyen fuentes neutrónicas, mientras que los componentes de la cápsula experimental constituyen sumideros de aquéllos. El efecto resultante sobre el flujo original en el emplazamiento, es una perturbación. Este factor debe ser tenido en cuenta en los ensayos de combustibles (22)

Otro fenómeno estrechamente vinculado al anterior, es el cambio de reactividad. Así como el reactor tiene un efecto sobre la probeta -activación, calentamiento, daño por radiación- recíprocamente la probeta ejerce una acción sobre el reactor (23). La inserción, así como la extracción de una probeta en el reactor, perturba el equilibrio entre producción y pérdida de neutrones.

d) Calentamiento nuclear en el emplazamiento

1. Para los materiales no fisionables el calentamiento depende principalmente del espectro gama y neutrónico del reactor. Los reactores moderados por agua liviana producen, a causa de la mayor proporción de neutrones rápidos y de radiación gama, mayor calentamiento en las probetas que los reactores moderados por agua pesada (23). Tres tipos de flujos participan, en general, en el calentamiento de las probetas:

- flujo gama: dispersión y absorción de la radiación gama del núcleo.
- flujo rápido: dispersión elástica e inelástica en los átomos de la muestra, y reacciones de absorción (n, p) , (n, α) $\frac{1}{2}$
- flujo térmico y epitérmico: absorción de los neutrones prontos liberados por captura neutrónica, absorción de radiación beta y gama liberada por los nucleidos activos, absorción de partículas cargadas.

2. Tratándose de materiales fisionables, la potencia calorífica generada en la fisión es $Q = \phi \cdot E_f \cdot N \cdot \sigma_f$ donde:

- ϕ : flujo neutrónico térmico (neut./cm².seg.)
 E_f : energía liberada por fisión en U-235 (=175 MeV)
 N : número de núcleos fisionables en el combustible
 σ_f : sección eficaz macroscópica de fisión

VII. 2

De la probetaa) Material no fisionable

1. Temperatura: la cual puede modificarse mediante calentamiento adicional -eléctrico o nuclear- Asimismo puede variarse el gradiente térmico a través de la muestra.

2. Tensiones: mediante presión de gas o de líquidos.

3. Atmósfera: caso de estudios de compatibilidad química entre un material en contacto con un medio determinado.

4. Material.

b) Material fisionable

1. Tiempo de irradiación: se estima en función del quemado que se pretende alcanzar, usando un valor medio de potencia generada entre el comienzo y el final del ensayo. La falta de constancia de Q , se debe al consumo de núcleos fisionables en la muestra durante la prueba, a la reducción del flujo del reactor, provocada por los productos de fisión -venenos formados-, y al consumo de su propio combustible. Una estimación del quemado, a fin de ser cotejada con aquél valor, puede obtenerse de los datos de temperatura registrados durante la prueba. Asimismo, mediante técnicas posirradiatorias: análisis radioquímico de los productos de fisión formados, y análisis por activación de monitores de flujos alojados en la vecindad de la muestra.

2. Potencia específica $Q = k \cdot \varphi \cdot N$ W/cm³

φ : flujo neutrónico

N : número de núcleos fisionables en el combustible

Si se admite un valor de φ dado en un cierto emplazamiento de un reactor experimental, queda la posibilidad de modificar Q variando el enriquecimiento. Asimismo, si el enriquecimiento ha sido fijado, es posible aumentar $Q = q'/S$, [W/cm.1/cm²] - potencia lineal/unidad de sección- si se reduce la sección de la muestra (24).

3. Gradiente térmico permitido: compatible con el tipo de combustible. Si se comparan tres combustibles de uranio de frecuente utilización (25).

Compuesto	Densidad [gr/cm ³]	cont. de U [cm ³]	cond. térm. [cal/seg.cm. °C]
UO ₂	10,96	9,66	0,014
CU	13,63	12,97	0,080
NU	14,32	13,52	

Se advierte que a igualdad de volúmenes de combustible, será posible generar más potencia con CU y NU que con UO_2 . Asimismo, la mayor conductibilidad del Cu frente a la de UO_2 , determinará menor gradiente térmico en combustibles de diámetro similar. La limitación más seria para cualquier combustible, está dada por la fusión en la zona central.

4. Quemado: en estrecha relación con el parámetro discutido en el punto 1, el quemado está condicionado por la cantidad de productos de fisión gaseosos formados. Estos ejercen una acción mecánica sobre la vaina del combustible, actúan como venenos reduciendo la población neutrónica, y modifican la conductibilidad térmica, y con ello las condiciones de transferencia calórica tanto del combustible como del intervalo combustible-vaina. Asimismo, el tiempo de permanencia de un combustible en servicio está limitado por la dosis admisible de sus componentes, en particular de la envoltura.

5. Composición química: contenido de impurezas (ppm); tipo de combustible: óxidos simples, óxidos mixtos de uranio y plutonio, carburos, nitruros, siliciuros.

6. Densidad: la que puede ser modificada según el procedimiento de fabricación.

7. Gas de llenado.

8. Luz entre pastillas y vaina.

9. Volumen disponible para gases -plenum-

VIII. MEDICION DE PARAMETROS EXPERIMENTALES. INSTRUMENTACION DE CAPSULAS

VIII.1 Temperatura

El desarrollo de termocuplas especiales ha sido un gran aporte a la tecnología nuclear, si se piensa que la información de temperatura es de primera importancia en las experiencias. Con ellas puede obtenerse información directa de zonas de interés, sea de las muestras como de la cápsula experimental.

De un modo indirecto puede ser estimada la temperatura alcanzada en servicio por examen posirradiatorio de muestras fusibles incorporadas al dispositivo. Se trata de aleaciones binarias y terciarias de punto de fusión conocido.

Otros materiales que poseen alguna propiedad muy sensible al flujo neutrónico o a la temperatura son igualmente empleados, p.ej. el cambio dimensional

del carburo de silicio, el crecimiento por envejecimiento en el Nimonic PE16 (27).

Tratándose de muestras combustibles, es también posible estimar la temperatura alcanzada en la zona central, por el crecimiento de grano observado en celda caliente luego del desmantelamiento (28). Naturalmente el margen de incertidumbre en las estimaciones indirectas es mayor que el de la suministrada por termocuplas, pero en éstas deben ser tenidos en cuenta factores como el posicionamiento de la termocupla, el daño por radiación sobre los termoelementos, y el calentamiento adicional debido a radiación gama.

Las termocuplas especiales constan de tres componentes: el termopar, un material aislante, y una funda o vaina exterior. Esta es la que preserva el primero de la acción corrosiva del medio. Los materiales comúnmente en uso son termoelementos de Cromel-Alumel hasta temperaturas de 1000°C; aleaciones Pt-Rh, Pt-Ir, W-Mo, para temperaturas comprendidas entre 1000 y 1800°C, y termoelementos de W-5%Re/W-26%Re alrededor de los 2000°C. Como aislantes: óxidos de magnesio, de aluminio, de torio, de circonio, de berilo, grafito. Como vainas: metales refractarios -niobio, talio, molibdeno, titanio, renio- para las termocuplas de altas temperaturas, y aceros inoxidable para las de Cromel-Alumel.

Hasta la temperatura de fusión del óxido de uranio -2800°C- fue usado un termómetro a gas con bulbo de Re (29). Han sido considerados, asimismo, dispositivos basados en la velocidad del sonido en los metales (29).

VIII. 2 Variaciones dimensionales

Se requieren procedimientos que no sean afectados por los gradientes de temperatura:

a) Esgurrimiento o "creep"

Puede ser medido con calibres neumáticos (30), cuya sensibilidad es de 10^{-4} - 10^{-5} cm. Cuando la muestra sufre elongación, el espacio entre la boquilla de salida del gas y la superficie de incidencia de éste, solidaria a la muestra, disminuye, y el cambio es medido por variación de presiones. La desventaja del método es la variación de densidad que sufre el gas por acción de la temperatura.

Los transductores inductivos están muy generalizados en extensometría (31). Se trata de pequeños transformadores con el secundario formado por dos bobinas conectadas entre sí en serie y en oposición. El núcleo es solidario a la probeta a través de un vástago -éste generalmente construido con aleaciones de reducido coeficiente de dilatación cúbica, p.ej. Invar-. En la posición normal, las f.e.m. de las dos bobinas se cancelan mutuamente. Cuando se produce un desplazamiento se establece un desequilibrio de f.e.m. en el secundario y esa ΔV puede ser registrada en un milivoltímetro.

por desarrollar temperaturas más altas que la de los arcos eléctricos clásicos.

El procedimiento resulta insustituible para ensamblar partes de débiles espesores de pared -espesor máximo de 2 mm-. Se aplica a aceros inoxidables y materiales para altas temperaturas normalmente empleados en las cápsulas. La soldadura por ultrasonido también es apropiada para débiles espesores.

Las soldaduras por fricción y también por incrustación son útiles para uniones bimetálicas. En la primera se logra calentar la zona en cuestión por fricción de las partes. Al cabo de ello se presionan suficientemente entre sí; en la segunda, la incrustación de la parte más dura sobre la más blanda se efectúa en caliente.

IX. 4 Brasing

De gran aplicación para la unión de materiales disímiles, para la unión de débiles espesores, y para la unión de partes con geometría compleja. Su uso en la fabricación de dispositivos para ensayos de irradiación consiste en soldar las vainas de termocuplas y tubos capilares a los tapones. Entre los materiales que se van a unir se deposita una película muy fina -del orden de varios micrones- del material de aporte. Este debe ser una aleación metalúrgicamente compatible con aquéllos, y tener menor punto de fusión que cada uno. Luego es introducido en un horno donde recibe calentamiento adecuado en una atmósfera gaseosa -o en vacío-. El aporte fluye por capilaridad en la junta, o por formación de un eutéctico en la interfase (42). La aleación de aporte debe ser metalúrgicamente compatible con ambos metales base.

IX. 5 Revestimientos superficiales

a) Deposición electrolítica: apta para películas delgadas.

b) Proyección de polvos puestos en fusión al pasar por la llama oxiacetilénica de un soplete. La alta temperatura del plasma y las grandes velocidades de eyección, permite la deposición. El procedimiento puede servir para revestimientos superficiales o para confeccionar piezas masivas.

Las tolerancias de fabricación de componentes son a menudo muy estrechas. Por ejemplo, cuando se trata de mantener una barrera térmica de gas, en servicio, de sólo algunas décimas de milímetro.

X. MONTAJE

La programación de esta etapa debe ser cuidadosamente realizada. Baste pensar en las complicaciones inherentes a esta tecnología, en los costos de fabricación -tanto por la naturaleza de los componentes como por las exigencias de maquinado-

en los aspectos de seguridad, para persuadirse de que todas las prevenciones son necesarias.

Los componentes deben ser almacenados en bolsas de polietileno selladas, previo desengrasado, si han sido contruïdos con anticipación. La manipulación debe hacerse con guantes. Algunos laboratorios poseen áreas estando destinadas la montaje de dispositivos, las cuales se hallan ligeramente presurizadas para impedir la entrada de polvos.

A lo largo de todo el montaje se efectúan ensayos para verificar la confiabilidad de los trabajos, y no se inicia una nueva etapa si los resultados de las pruebas anteriores han sido dudosos.

Si se trata de la fabricación de probetas de uranio natural o ligeramente enriquecido, las precauciones a tomar no van mucho más allá de las que se observan durante el montaje de cápsulas. Cuando se trata en cambio de uranio con más enriquecimiento, y especialmente de plutonio, el armado de probetas debe hacerse en cajas de guantes emplazadas en laboratorios adecuados para las manipulaciones con esos riesgos. Asimismo las precauciones a tomar durante el armado de la cápsula deben ser compatibles con las disposiciones de seguridad contra riesgos nucleares.

XI. ENSAYOS DE RECEPCION

Se practicaron tres tipos de ensayos:

- a- de estanqueidad
- b- de termocuplas y calefactores
- c- dimensionales

a) Cada laboratorio tiene sus límites de aceptación. Generalmente se someten a presión los diferentes recintos y se dejan en esas condiciones durante varias horas, p.ej. una noche.

b) Los hay de cuatro géneros:

- de continuidad: calentando ligeramente la cápsula con ayuda de un secador de cabello, p.ej., a la altura de las probetas y se observa la respuesta de los termopares.
- de aislación.
- de resistencia de línea: se conoce de antemano la resistencia de los conductores de compensación. Se comparan los nuevos valores con aquéllos. Las desviaciones pueden provenir de las soldaduras y conectores.
- de conexiones: calentando del mismo modo que para los ensayos de de continuidad, primero a nivel de las termocuplas, luego a nivel de

las conexiones. Las f.e.m. serán aditivas si las conexiones han sido correctas, y las desviaciones en el aparato de medida del mismo signo.

En estos ensayos son también probados los arrollamientos calefactores. Se miden sus resistencias y se comparan con los valores previos al montaje.

c) Se realizan en la sección de la cápsula. Esto interesa tanto por su emplazamiento en la caja de agua, como por la circulación del refrigerante. En ellas se practican medidas de diámetro en dos puntos situados a 90° entre sí.

XII. CARPETA DEL DISPOSITIVO

Todas las características, así como las observaciones del dispositivo, deben ser consignadas en una carpeta (48). Esto es:

- descripción de la construcción del recinto exterior y del tubo de extensión,
- tipo de soldadura utilizado para éste,
- información referente a las termocuplas -posiciones, designaciones, colores de identificación, circuitos, naturaleza o características de funcionamiento, resistencia,
- si hay calefactores, los diagramas de circuitos, códigos, resistencias (49),
- descripción y resultados de las pruebas realizadas por el responsable de los ensayos de recepción,
- instrucciones para la manipulación durante las etapas previas al ensayo de irradiación, durante el ensayo, la extracción al finalizar la experiencia y para el desmantelamiento en celda.

Este documento resulta asimismo de utilidad futura si deben practicarse pequeños cambios sobre algunas de las partes o de la operación en servicio.

XIII. INFORME DE SEGURIDAD

La introducción de un dispositivo experimental en un reactor de ensayos debe ser previamente autorizada por la Comisión de Seguridad. Esta comisión se interesa por los problemas concretos del experimento de un modo general, y por los nucleares de un modo particular (50). El análisis que realiza dicha comisión se funda en que los principios básicos de Seguridad sean mantenidos, especialmente que el ensayo sea compatible con la operación del reactor. La Comisión de Seguridad analiza el Informe de Seguridad elaborado por el ingeniero a cargo del proyecto. Para su confección, éste consulta a los especialistas en cada disciplina involucrada.

Sobre la composición de la comisión y su metodología de trabajo, hay variantes de laboratorio a laboratorio, y de país a país. P.ej. en KfZ-Karlsruhe además

del personal técnico que integra la comisión, existe un funcionario federal. A través de él el Estado evalúa los riesgos -o vela contra ellos- que implicaría para la población un accidente experimental.

El informe debe contener una mención de la finalidad del ensayo -no incumbe a la comisión discutir la finalidad del ensayo- así como una descripción del dispositivo acompañado de los planos o esquemas aclaratorios. De este modo dicho organismo puede analizar detalles y pormenores, seguir circuitos y examinar si eventualmente algún accidente podría ir acompañado de riesgos para el reactor (51).

Un capítulo será consagrado a la transferencia térmica: producción y evacuación calórica, comportamiento de los materiales a esas temperaturas. En relación a esto, otra parte se ocupará de los cálculos hidrodinámicos: pérdida de carga a través del canal de refrigeración; caudal necesario; margen de seguridad para no alcanzar en ningún punto de la superficie de la cápsula condiciones de ebullición, ni menos aún las de formación de película de vapor (q/A crítico); cálculo del coeficiente de transferencia a través de la interfase pared de la cápsula-medio refrigerante; caída térmica de la interfase.

Consideraciones neutrónicas: en este capítulo se discutirá el cambio de reactividad provocado por la inserción o extracción del dispositivo en el reactor (23) así como cambios posibles en servicio; flujo gama, sus efectos; flujo rápido y daño por radiación en los materiales.

Compatibilidad química entre materiales en contacto. Especial atención debe consagrarse a reacciones especiales, como por ejemplo la reacción entre el Na o NaK con el agua.

Aspectos radioquímicos: gases de fisión, períodos de decaimiento de ciertos isótopos, niveles de actividad, peligros de contaminación, medidas de protección, descomposición radiolítica de fluidos refrigerantes o atmósferas gaseosas, descomposición de sustancias orgánicas, residuos y efluentes activos, etc.

Cálculos mecánicos: tensiones térmicas y totales, para calcular con ellas las tensiones de trabajo. Evaluación del escurrimiento.

Asimismo, lo dicho para los componentes de la cápsula, vale para las probetas sometidas a ensayo. Si se trata de muestras de combustible, no deben omitirse los cálculos correspondientes al enriquecimiento, quemado, cantidad y presión de gases de fisión, tensiones resultantes en la vaina, compatibilidad entre combustible y vaina, temperatura central y periférica de columna combustible, caída de temperatura en el combustible y caída en el intervalo combustible-vaina, caída de temperatura en la vaina.

Suministros de potencia, controles y alarmas: sistemas auxiliares.

Consideraciones acerca de la manipulación del dispositivo -previa, durante, y posterior a la irradiación- como así en casos de anomalías.

XIV. INTRODUCCION DEL DISPOSITIVO EN EL REACTOR

La elección de un emplazamiento ha sido hecha con anterioridad, con la ayuda de cámaras dosimétricas (52), y la utilización de la maqueta neutrónica cuando se trata de un dispositivo prototipo. En consecuencia, es el grupo responsable de la explotación del reactor, a través del equipo de dosimetría, quien conoce adonde existen los valores demandados por el experimentador.

El grupo de operación del reactor asiste a los experimentadores potenciales suministrándoles datos como las dimensiones y características principales del reactor, las configuraciones posibles del núcleo y los valores de flujos neutrónicos y calentamiento gama.

En los reactores tipo piscina moderados por agua liviana, la mayor parte de los dispositivos experimentales son emplazados en la región periférica del núcleo, ya sea en el reflector o entre éste y el núcleo. Esas posiciones exhiben altos flujos térmicos pero flujos rápidos más débiles que aquéllos existentes en las posiciones intermedias. Por otra parte, los flujos de estos reactores son muy sensibles a la disposición del combustible y varían mucho de ciclo a ciclo.

El grupo de operación estará interesado especialmente, en la seguridad del reactor en funcionamiento y, por ello, de la seguridad de las experiencias en curso. Aquí adquiere importancia el efecto de reactividad de la experiencia proyectada. Es decir, así como el reactor causa efectos sobre los materiales que se irradian-activación, calentamiento, daño por radiación- éstos ejercen, recíprocamente, influencia sobre aquél. En consecuencia la introducción -así como la extracción- de la probeta en el reactor, perturba el equilibrio primitivo existente entre producción y absorción de neutrones (23).

El efecto de reactividad puede ser estimado por mediciones de flujo realizado durante operación del reactor a baja potencia, utilizando una maqueta experimental. Asimismo, si se cuenta con una facilidad crítica, el efecto de reactividad puede ser medido sin perturbar la operación del reactor.

El máximo valor de reactividad permisible que ha sido establecido (53) es de 0,5% $\Delta k/k = \rho = \frac{k_{ef} - 1}{k_{ef}}$ medido en p.c.m. Aquí k_{ef} es el "factor de multiplicación neutrónica", derivado de la fórmula de los cuatro factores (54). Es usada también con frecuencia para la reactividad, un valor $\rho^* = \rho/\beta$ medido

en dólares. Aquí la reactividad original ρ está referida a la parte β de neutrones en retardo. Si se llegara a superar el valor de $0,7\% \rho$, será necesario contar con dispositivos de seguridad para evitar cambios súbitos que conduzcan a la pérdida de control de la reacción. Tratándose de experiencias que ejerzan fuerte efecto de reactividad, será necesario detener el reactor antes de proceder a retirarlos del núcleo. En caso contrario podrán ser desplazados reduciendo la potencia solamente.

La experiencia deberá ser dispuesta de modo que tampoco produzca interferencias de tipo mecánico en el reactor: la instalación y eliminación deberá hacerse en tiempo razonable, tanto en operación normal como en caso de fallas.

XV. MANIPULACION Y VIGILANCIA DE LA EXPERIENCIA

Estas funciones son cumplidas por el personal del grupo de operación -o explotación- del reactor. Cuando se trate de un dispositivo experimental que requiera vigilancia especial -p.ej. experiencias con extracción de gases de fisión- personal del grupo experimental interesado en la prueba lo vigila. En estos casos, el experimentador ha sido asistido en la fase de concepción del dispositivo y circuitos. Asimismo, durante las manipulaciones por razones de seguridad.

XVI. FIN DE LA IRRADIACION

Ciertas tareas deben ser ejecutadas por determinados agentes: el movimiento de materiales en las proximidades del núcleo, debe ser ejecutado bajo supervisión del responsable del reactor; el desplazamiento de materiales activos, bajo la supervisión de los agentes de protección contra las radiaciones.

XVII. DECAIMIENTO RADIATIVO

Finalizado el ciclo de irradiación previsto, el dispositivo es alejado del núcleo y depositado en la periferia de la cuba del reactor. El tiempo de almacenaje depende del tipo de ensayo como asimismo de la urgencia o disponibilidad de equipos e instalaciones. Tratándose de ensayos de materiales combustibles, el tiempo requerido para que la actividad de los productos de fisión de menor vida se reduzca considerablemente, es de un mes. Mas allá de ese lapso se considera que el decrecimiento es muy lento.

XVIII. DESMONTAJE O DESMANTELAMIENTO

Es imprescindible la presencia de un agente de seguridad antes y durante estas tareas. Según las características del reactor, del dispositivo experimental y

de la celda adjunta, la extracción de las probetas puede realizarse enteramente en el interior de la celda, o iniciarse en el exterior con ayuda de un recipiente de plomo.

Frecuentemente debe operarse con probetas de materiales fisibles. Estas experiencias emplean, por lo general, metales alcalinos como medios de transferencia térmica, y su manipulación exige tomar precauciones. Dichos metales deben ser neutralizados mediante alcohol antes de la extracción de las probetas. La operación es delicada y el programa de tareas debe ser elaborado en forma conjunta entre el responsable del reactor y el responsable del experimento.

XIX. TRANSPORTE DE COMPONENTES DEL DISPOSITIVO

- a) Probetas
- b) Desechos -partes irre recuperables-

Durante el desmantelamiento se realizan operaciones o cizalla en el interior de la celda. Los componentes estructurales y de instrumentación de los dispositivos deben ser depositados en un recipiente de plomo, el que será luego trasladado al laboratorio de descontaminación y tratamiento de efluentes activos. Allí serán lavados con alcohol, compactados mediante aplicación de cargas, y puestos en cilindros de hormigón formando bloques. Finalmente deben ser almacenados en áreas bajo control.

Los restos líquidos son también trasladados a la misma sección y sometidos a evaporación para reducir el volumen. Cuando el nivel de actividad es aceptable, el concentrado es vertido en un curso de agua próximo.

XX. EXAMENES POSIRRADIATORIOS

Las probetas luego de ser extraídas del dispositivo, son depositadas en recipientes blindados y trasladadas al laboratorio de alta actividad. Generalmente éste está formado por varias celdas dotadas de telemanipuladores, ventanas visoras, cintas transportadoras, instrumentos para mediciones dimensionales, cizallas, perforadoras con recepción de gases de fisión, espectrómetros, equipos para ensayos de materiales, equipos para pulido, etc.

Algunos de los exámenes que pueden ser practicados en celda, además del desmontaje de elementos combustibles y de probetas, son:

- neutrograffas
- metalograftas
- fotograftas
- densidad

- recuperación de gases de fisión y posterior análisis por espectrografía de masa o gama
- metrologías

De los resultados de estos exámenes y de su interpretación surge un informe. Este puede contener o no la información relativa al dispositivo experimental utilizado para la experiencia.

33. CARTIER, I., y MASSON, M., Mesures dimensionnelles sous rayonnement, PI (NT) 461-128, CEA, CEN-G, S. des Piles (Rapport présenté au Colloque Euratom, Cadarache, Francia, 10-11 juin 1971).
34. Techniques Instrumentales Util..., BIST, No. 153-154, Nov.-Déc. 1970, p.165-166.
35. BAUMANN, C., y CARROL, R.M., Experim. on continuous releases of..., Report ORNL-3050.
36. Measurement of Fis. gas in an in-pile loop..., J. of Nucl. Mat. and Tech, 5, (11), 598.
37. NOTLEY, M.J., DES HAIES, R. y MacEWAN, J.R., The fission-product gas pressures..., Trans. Amer. Nucl. Soc., 8, 424, (1965).
38. BRAUNTON, C.B.T. y HOBBS, R.W., Symp. on irradi. exp., H165/498 5, A S, The Hage, 20-22 set. 1965.
39. BOGAIEVSKY, M., y otros, Measure direct de la cond. term. del UO_2 , New Nuclear Mat. including non-met. fuels, vol. I AIEA, V-1965.
40. Therm. Cond. of UO_2 , T.R S., No. 59, AIEA.
41. BELLAMY R.G., BRAUNTON, C.B.T. y PLAIL, O.S., Trends in the exp. req..., AERE, Harwell, HL65/58, 55, comunicación personal.
42. Dispositif d'irradiation..., BIST, No. 153-154, nov.-déc. 1970, pág. 111-117.
43. DANIAULT, J. y otros, Section des ateliers de prototypes a ..., BIST, No. 164, pág. 55-88.
44. WEYMUELLER, C.R., Forming metals with high energies, Metal Progress, october 1966, pag. 256-268.
45. GROS, D., Les irradiations in pile, Octavo Curso Panamericano de Metalurgia, PMM/A-100, CNEA, Gcia. de Tecnología.
46. TALLMAN, Ch.R., Effects of nucl. rad. on ceramic cemented strain-gages and polymide-encapsulated epoxy bonded gases, Los Alamos Scientific Laboratory, Los Alamos, New México, 87544.
47. MILNER, D.R., y APPS, R.L., An introduct. to welding and brazing, Pergamon Press.

48. USAEC Report IDO-17135.
49. USAEC Report IDO-16395.
50. FRITZSCHE, A. F., Die versuchstechnik in prüfreaktoren, Neus Technik 4, (1962), p. 603-620.
51. ALBERS, R. y otros, Organisation und enrichtungen..., Neue Tech. 4, (1969) p. 620-629.
52. CARROL, R. M., In reactor thermal neutron flux..., Nucleonics, Feb. 1962 y Carrol, R. M. and Reagan, P. E., Nucl. Sc. and Eng. 21 (1965) p. 141-146.
53. IAEA, Manual for the operation of research reactors, Viena, 1965.
54. MATTEI, C. Curso de Introducción a la teoría de reactores nucleares, 9o. Curso Panamericano de Metalurgia, 1973, CNEA, p-9.