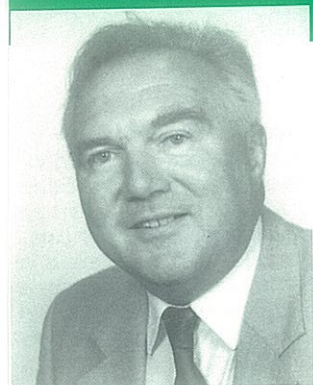




ESTADO DE LA INGENIERIA Y DEL LICENCIAMIENTO

REACTOR MODULAR DE ALTA TEMPERATURA

I. A. WEISBRODT

Isidor A. WEISBRODT (1932) es Ingeniero diplomado por la Universidad Técnica de Karlsruhe, en Mecánica y Tecnología de Procesos. Sus responsabilidades profesionales en Siemens AG/Interatom GmbH se han centrado en la construcción de centrales térmicas convencionales, habiendo sido Jefe de Proyecto del reactor del barco de propulsión atómica "Otto Hahn" y Jefe de Proyecto para el desarrollo y construcción de la primera instalación alemana de enriquecimiento por centrifugación. Actualmente es Jefe de la División de Planificación y Desarrollo de centrales HTR.

INTRODUCCION

El reactor modular de alta temperatura —denominado módulo HTR— de Siemens/Interatom está considerado como el reactor más avanzado de la segunda generación de reactores nucleares.

Con objeto de subrayar el avanzado estado del diseño y del concepto de seguridad de este tipo de reactores, se presenta una breve descripción de su concepción, así como un ejemplo típico de análisis de accidentes para el módulo HTR: el accidente base de diseño y el accidente más allá del diseño concerniente la irrupción o entrada de agua en el núcleo.

ESTADO DE INGENIERIA

Los requisitos de diseño especificados por Siemens/Interatom están listados en la tabla I.

La figura 1 muestra una sección longitudinal a lo largo del módulo HTR con reactor y generador de vapor.

Las principales características son:

- Núcleo vertedor de combustible esférico de 6 cm de diámetro; partículas de combustible recubiertas (TRISO).
- Dirección descendente del refrigerante a lo largo del núcleo.
- Diámetro del núcleo de 3 metros y densidad de potencia de 3 MW/m³.
- Potencia del reactor de 200 MW térmicos.
- Temperatura máxima del refrigeran-

te, aun en caso de accidente más allá del diseño, menor de 1.600 °C (lo que asegura consiguientemente la retención de productos de fisión en las partículas de combustible).

- Coeficiente de temperatura negativo.
- Disposición de barras de control y esferas absorbentes dirigidas por gravedad en los taladros del reflector.
- Vasija de presión de acero ferrítico.
- En caso de fallo completo de los sistemas operacionales de evacuación de calor, ésta se efectúa pasivamente mediante tres pasos redundantes en los refrigeradores superficiales (con conexiones a mangueras) o a la larga mediante calentamiento de los cimientos y del medio ambiente.
- Generador de vapor más bajo.
- Sistema primario consistente en un reactor, un soplante y un generador de vapor.

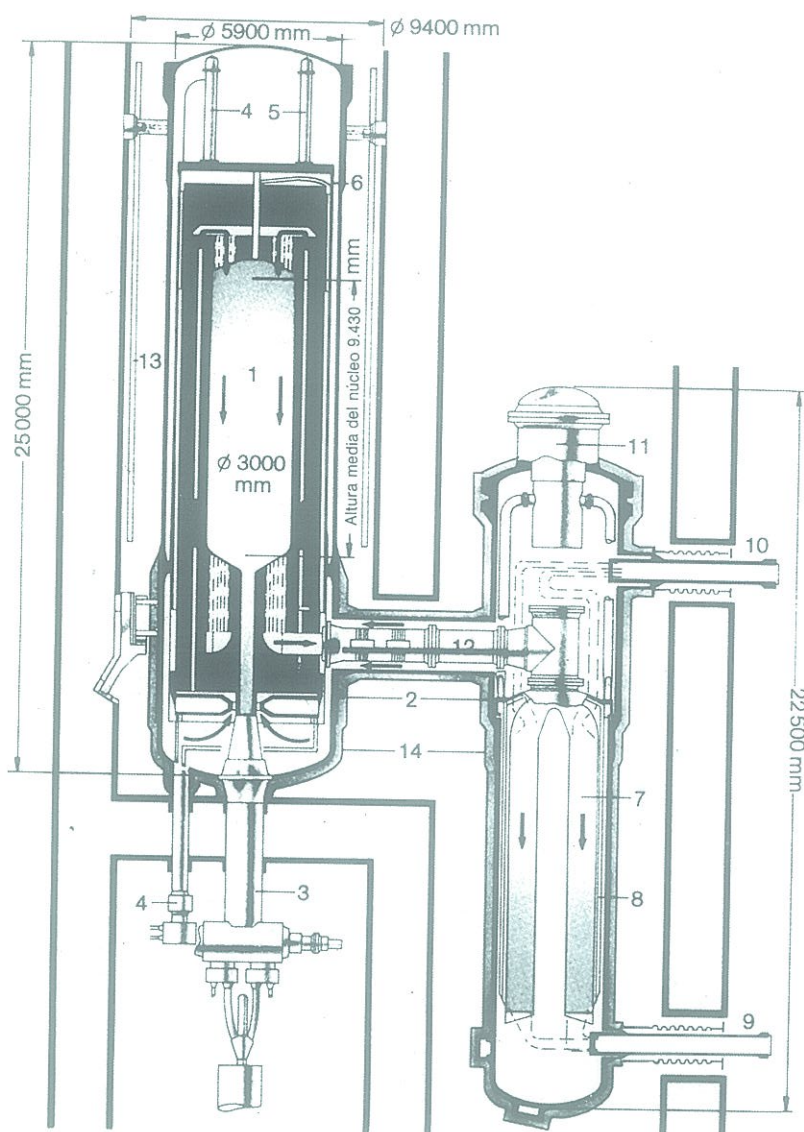
El trabajo de ingeniería en el diseño en detalle ha alcanzado un estado tan avanzado que ya se han elaborado planos en detalle, esquemas funcionales, análisis de tensiones, etc., para los principales componentes y sistemas, tales como la vasija de presión de acero y soportes, los internos de la vasija del reactor, la línea de gas caliente, el generador de vapor e internos, el soplante y trayecto, el manejo de combustible, el diseño de la contención incluyendo ventilación, los sistemas auxiliares del reactor, la instrumentación nuclear y sistema de seguridad, la regulación del reactor, el suministro

T I

Condiciones y criterios de diseño para módulos HTR

- El requisito mínimo y la escala para el diseño HTR es el estado del standard de calidad ya alcanzado, el standard de seguridad y el grado de aprobación de los reactores de agua ligera a presión.
- Solamente tecnología probada (materiales, vasijas, etc.).
- El concepto de seguridad debe ser sencillo y transparente.
- Las pruebas analíticas deben ser a su vez también transparentes y sencillas.
- Extremo alto grado de características de seguridad pasivas, por ejemplo:
 - Limitación de la temperatura máxima del combustible a 1.600 °C para todo tipo de accidentes.
 - Decaimiento pasivo del calor extraído desde el núcleo.
 - Suministros de potencia de emergencia y trenes de refrigeración no relacionados con la seguridad redundantes y diversos.
- Eliminación de cualquier contaminación severa al medio ambiente y de cualquier requisito de evacuación.
- Prevención de la entrada directa de agua.
- Normalización de las unidades. Producción en serie.
- Balance de planta convencional sin requisitos relativos a tareas relacionadas con la seguridad.

FI Circuito primario del módulo HTR



eléctrico de emergencia, etc.

La figura II muestra la sección longitudinal a través de la contención. En lo concerniente a la contención se han efectuado detalladamente los principales análisis de esfuerzos relativos a la concentración de presiones internas, a la caída de aviones, a explosiones de gas exteriores y cercanas, y al plan sísmico, así como el diseño y disposición de sistemas de ventilación, la distribución y disposición del sistema de alivio de presión, la disposición redundante de cables y tuberías, etc.

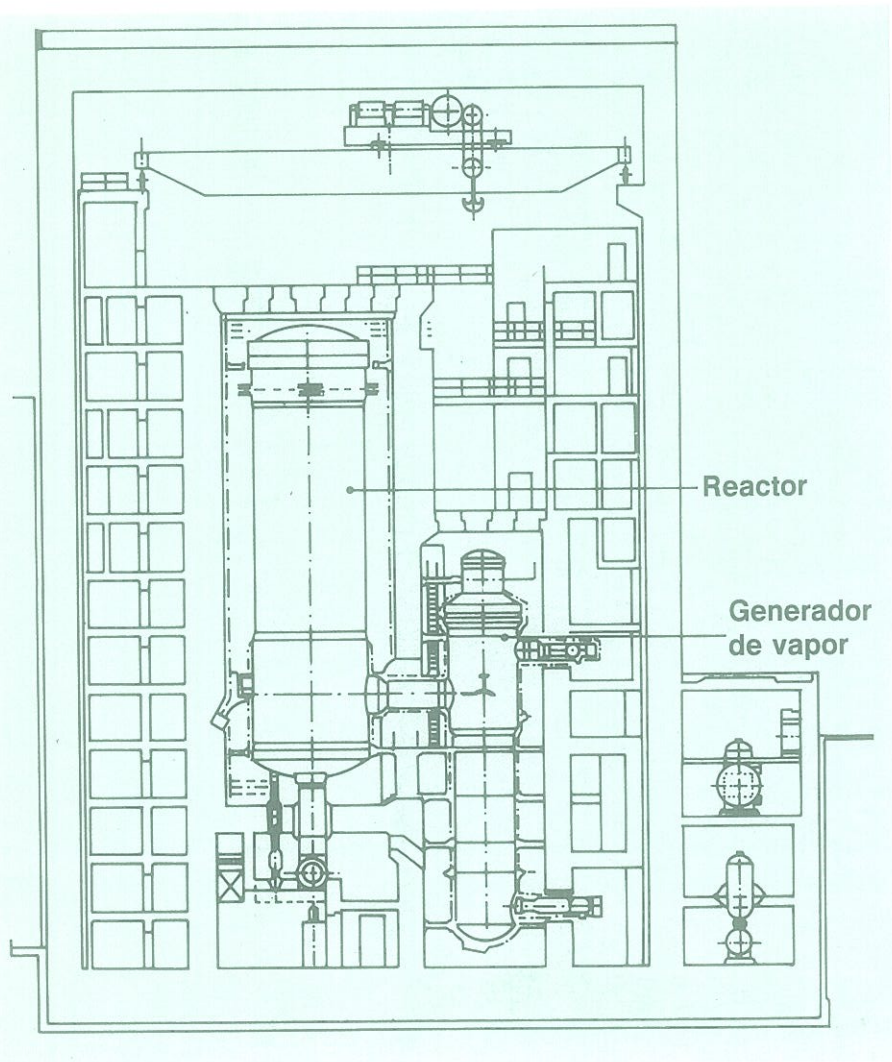
PROCESO DE LICENCIAMIENTO

Aunque en abril de 1986 se presentó una solicitud de licenciamiento del diseño conceptual, solamente en abril de 1987 fue activamente tomada en consideración. La autoridad de licencia nombró en mayo de 1987 a los expertos competentes para diferentes áreas. Los trabajos para el proceso de licencia comenzaron entonces inmediatamente sobre la base del Informe de Seguridad (tres volúmenes) presentado. Especial énfasis en la elaboración del Informe de Seguridad presentado tiene la incorporación de un capítulo aparte que describe en detalle y de forma comprensible el diseño conceptual y sus principales características. Este capítulo debería ser consecuentemente la base para la licencia solicitada del diseño conceptual.

Todos los análisis de seguridad —tanto para accidentes base de diseño como para accidentes más allá del diseño— muestran que la temperatura máxima del combustible en el núcleo nunca excede de 1.600 °C. Por consiguiente, se asegura la retención de los productos de fisión en las partículas de combustible revestidas, siendo extremadamente baja la emisión de productos radiactivos. Debido al lento calentamiento del núcleo se dispone de mucho tiempo para tomar contramedidas a niveles bajos de tasas dosimétricas.

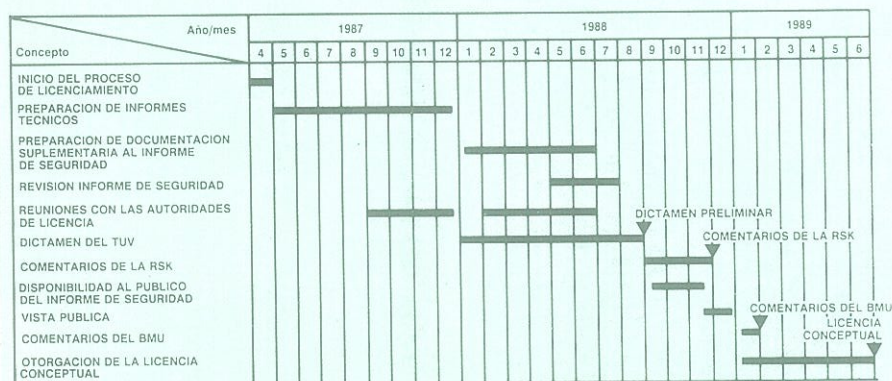
Hasta la fecha se han celebrado numerosas reuniones de trabajo entre Siemens AG-Interatom GmbH por un lado y la autoridad de licenciamiento junto con expertos por el otro. Hacia finales de 1988 se habían presentado unos 250 informes complementarios concernientes a los principales planos en detalle, a los informes de análisis de esfuerzos, a los informes de análisis sísmicos, a la tecnología del combustible, a los códigos de cálculo, a las características de los materiales, etc. En este contexto, el informe complementario más notable es un informe específico especial sobre los accidentes más allá de diseño.

El Informe de Seguridad presentado



F II Sección longitudinal de la contención

F III Calendario para el licenciamiento del concepto de la central de potencia del módulo HTR



hasta ahora fue analizado y revisado en junio de 1988 en función de los resultados del proceso de licenciamiento. La figura III muestra una previsión del calendario y próximos pasos del proceso de licenciamiento. El Informe de

Seguridad revisado fue presentado en septiembre de 1988. A principios de 1989 los expertos presentarán sus dictámenes a la autoridad de licenciamiento. Con posterioridad el Comité del Ministerio Federal para la protec-

ción del Medio Ambiente y la Seguridad Nuclear (BMU) se verá también envuelto en el proceso de licenciamiento. El Informe de Seguridad estará entonces disponible al público y se organizará una vista pública. Con todo ello, la licencia conceptual podría esperarse para mediados o finales de 1989.

ANALISIS DE SEGURIDAD RELATIVO A LA ENTRADA DE AGUA

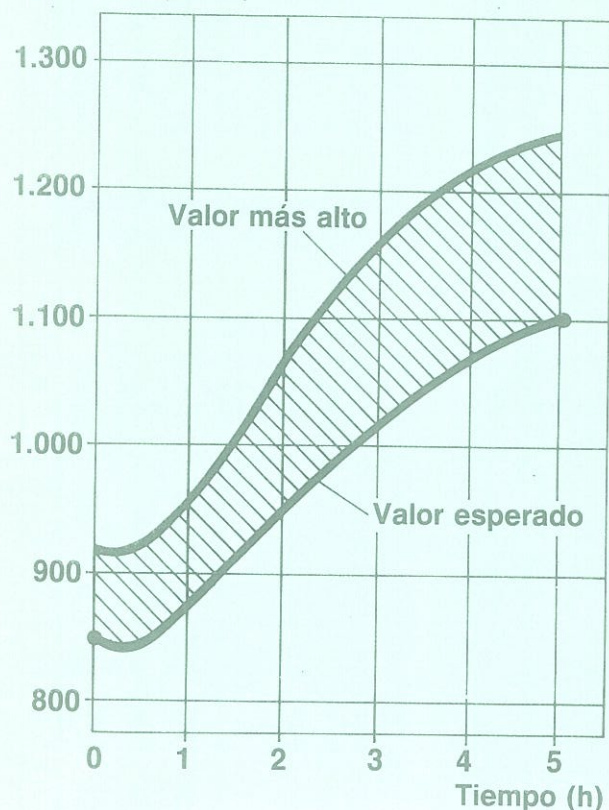
GENERALIDADES

Una entrada importante de agua dentro del circuito primario de un reactor de alta temperatura constituye el mayor riesgo. Existen dos razones para ello: En primer lugar, la incorporación de vapor moderador de neutrones podría propiciar una excursión de potencia. En segundo lugar, el vapor puede reaccionar con las estructuras de grafito caliente y con los elementos combustibles para producir hidrógeno y monóxido de carbono, conjunto denominado gas resultante, que puede encenderse al tomar contacto con aire. En la concepción y diseño se tomaron las siguientes contramedidas intrínsecas:

- Se puede prevenir de forma intrínseca un incremento excesivo de reactividad debido a vapor en el núcleo del reactor, mediante un aumento del cociente de moderación, es decir, mediante reducción del contenido de metales pesados en los elementos combustibles.
- Se previene de forma inherente una entrada directa de agua dentro del núcleo mediante la ubicación separada del reactor y generador de vapor en vasijas separadas con el generador de vapor más bajo y limitando intrínsecamente con ello la formación de gas resultante.

Adicionalmente, el caudal de gas frío, diseñado especialmente en las perforaciones del reflector, previene de forma inmanente de cualquier convección natural en el circuito primario, haciendo imposible a largo plazo que el vapor fluya desde la vasija de presión del generador de vapor hacia el núcleo, impidiendo con ello efectivamente la reacción entre el grafito y el vapor. Finalmente, la limitada capacidad calorífica de las estructuras metálicas en la vasija de presión del generador de vapor significa que solamente una masa de agua limitada puede ser evaporada, limitando así intrínsecamente la máxima masa de gas resultante producida en el módulo HTR y haciéndola independiente de la masa de agua entrante al circuito primario o susceptible de entrar al mismo según los análisis de secuencias de accidentes hipotéticos.

Temperatura (°C)



FIV Ancho de banda de la máxima temperatura de elementos combustibles tras el fallo del sumidero de calor principal

Para entender más claramente las secuencias de accidentes y la naturaleza hipotética de muchas de sus premisas, se estudia la secuencia y los efectos de la entrada de agua máxima creíble, fundamental como accidente base de diseño.

ACCIDENTES BASE DE DISEÑO DE ENTRADA DE AGUA

Se supone como peor accidente base de diseño la ruptura "2F" de la línea de gas caliente en el punto más desfavorable. El accidente se detecta mediante la combinación diversa de sensores en la triple redundancia del sistema de protección del reactor que desencadena las siguientes medidas protectoras:

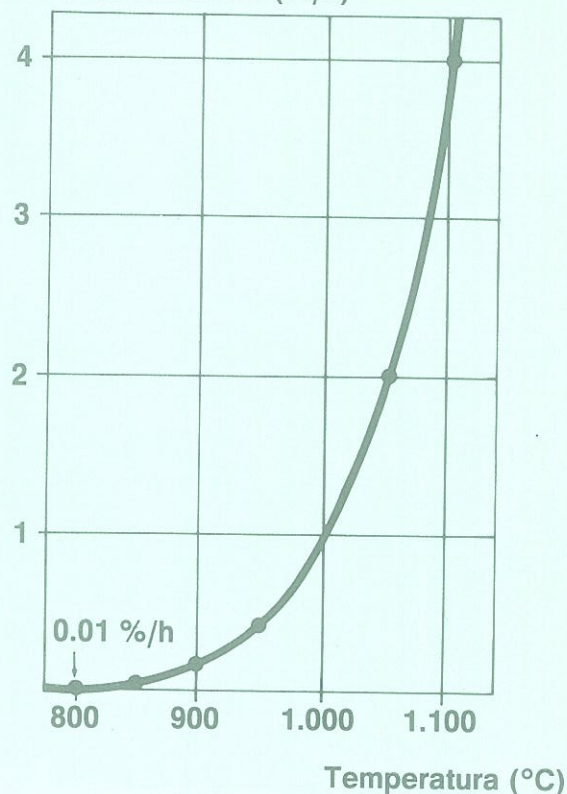
- Inserción de las barras de disparo.
- Desconexión y aislamiento del soplane.
- Aislamiento del generador de vapor en ambos lados.
- Drenaje del generador de vapor a alta velocidad.

El drenaje a alta velocidad del generador de vapor se lleva a cabo en el lado del agua de alimentación vía cuatro trenes duales de válvulas de alivio. Se calcula una entrada máxima de agua de 600 kg para el accidente base de diseño, teniendo en cuenta algunos márgenes de seguridad.

Del análisis de las consecuencias del accidente base de diseño de entrada de agua resulta:

- La figura IV muestra que si el sumidero de calor principal fallase, la temperatura de los elementos combustibles al principio subiría muy lentamente; en efecto, la temperatura máxima permanecería prácticamente constante durante la primera hora, permitiendo el suficiente tiempo para que el agua penetrada pudiera condensar antes que la temperatura y por tanto también la tasa de corrosión pudiera alcanzar algún valor significativo.
- La figura V muestra la tasa de corrosión máxima de los elementos combustibles en vapor como función de la temperatura de los elementos combustibles. A una temperatura de 800 °C, los elementos combustibles se corroen a una tasa aproximadamente de 0,01 %/h. Si se toma una estimación extremadamente conservativa considerando por ejemplo una temperatura constante de 800 °C para todos los 360.000 elementos combustibles esféricos, no más de 7,0 kg de grafito reaccionarían con 11,0 kg de agua durante la primera hora.

Velocidad de corrosión (%/h)



FV Tasa de corrosión de elementos combustibles en vapor como función de la temperatura de los elementos combustibles

- La figura VI demuestra el cambio de presión en el circuito primario a lo largo del tiempo como consecuencia del ingreso de vapor de 600 kg referido. Dado que se supone que el operador del reactor ha conectado el separador de mezcla de emergencia y que el sistema de purificación de gases (incluyendo el sistema de regulación de presión) está en operación, el exceso de presión de aproximadamente tres bares se reduce rápidamente evitando la actuación del sistema de alivio de presión. Solamente se transformarían unos 40 kg de agua y la corrosión máxima de grafito no excedería del 0,3 %.
- La figura VII muestra la secuencia más desfavorable para el accidente base de diseño entrada de agua. Se supone que tanto el sistema de regulación de presión como el separador de mezcla de emergencia están fuera de servicio y que a su vez la hoja del soplane no puede cerrarse. Consecuentemente el agua ingresada se transforma completamente. La corrosión de grafito máxima puede alcanzar un nivel del 40 % antes que desaparecieran conjuntamente las capas de grafito sin combustible de los elementos combustibles. Incluso

entonces, las partículas combustibles en el interior de las zonas de combustible estarían protegidas por sus múltiples cubiertas de pirocarbón y carburo de silicio, asegurando entonces la retención de los productos de fisión.

- Si en ese caso no se toman contramedidas se tendría una evolución como la mostrada en la figura VIII. El perfil de presión general comenzaría en aproximadamente 64 bar debido al agua penetrada en el circuito primario y a la temperatura creciente, e iría aumentando conforme se va produciendo gas resultante y continúa aumentando la temperatura del refrigerante primario. Tras unas tres horas, la válvula de seguridad del sistema de alivio de presión abre al alcanzar los 69 bar, liberando una mezcla de refrigerante primario, gas resultante y vapor, totalizando unos 400 kg dentro del recinto del reactor durante unos treinta minutos. El hidrógeno contabilizaría aproximadamente un 9 % del total liberado. Esta mezcla no puede encenderse, independientemente de la cantidad de aire que se le agregase.

ACCIDENTES HIPOTETICOS DE ENTRADA DE AGUA

Se han investigado los siguientes accidentes hipotéticos:

- Fallo del drenaje redundante a alta velocidad del generador de vapor, liberando su contenido de 6.000 kg de agua (de los cuales 180 kg de vapor) dentro del sistema primario con imposición de fallo en la hoja del soplante:
Se han analizado dos casos:
 - Rotura grande.
 - Rotura pequeña (caso más grave).

Rotura grande

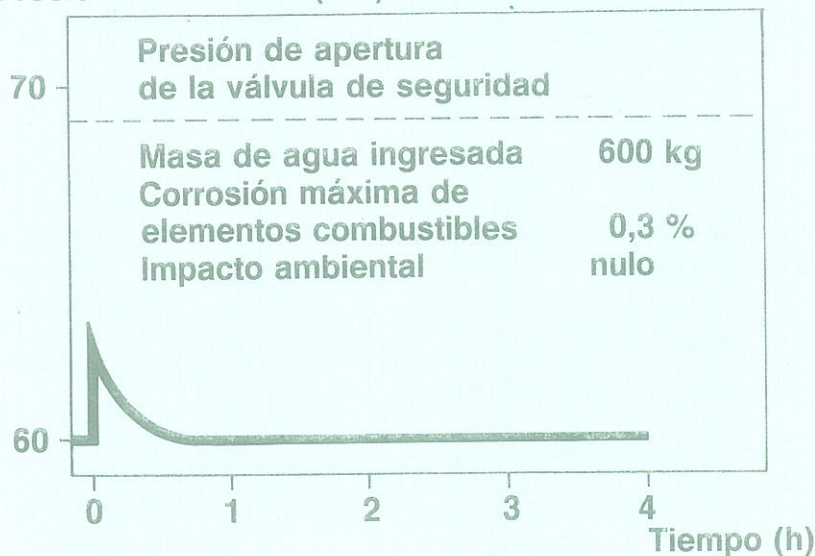
Si se supone una rotura grande, como por ejemplo la rotura múltiple de tubos calientes, la cantidad de vapor generado sería de 410 kg y, por tanto, más pequeña que en el caso del accidente base de diseño con 600 kg de vapor.

Rotura pequeña

Suponiendo una fisura muy pequeña en el calentador, el agua podría filtrarse lentamente dentro del circuito primario y absorber desde las estructuras calientes del generador de vapor la energía necesaria para la evaporación. En este caso sería decisiva la máxima cantidad de energía disponible en las estructuras calientes del generador de vapor.

Suponiendo una presión del sistema 60 bar y una temperatura de saturación correspondiente de 275 °C, se dispondría potencialmente de 3.300 kg de vapor para corroer el núcleo del reactor y el reflector. La entrada de 3.300 kg de vapor dentro del circuito primario

Presión del sistema (bar)



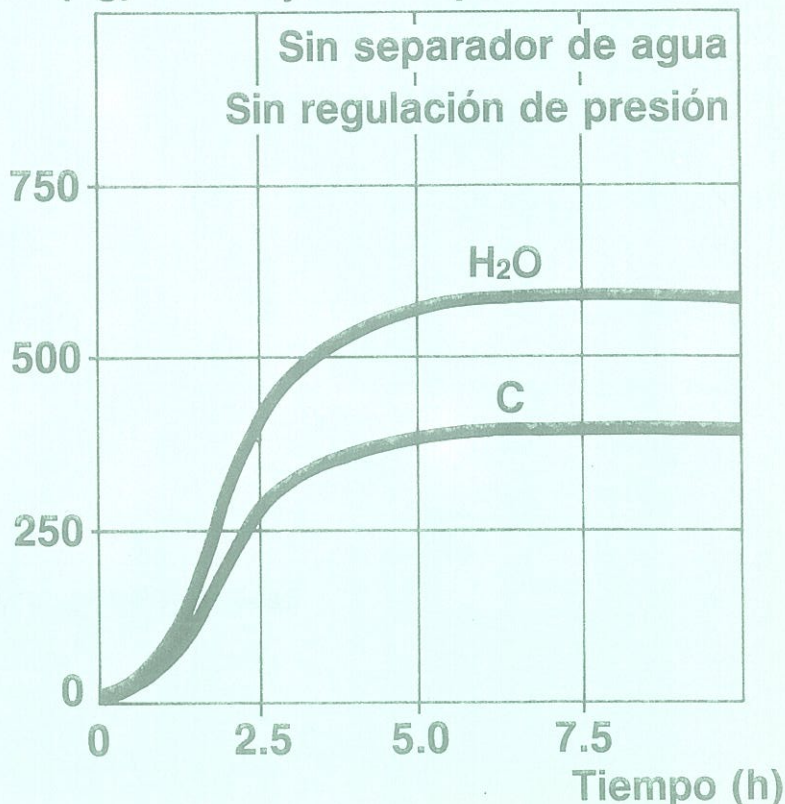
F VI Presión del gas primario como función del tiempo tras una entrada de agua

F VII Masa transferida como función del tiempo en caso de entrada de agua (sin separador de agua y sin regulación de presión)

Masa de agua penetrada 600 kg

Margen de seguridad + 100 K

Masa (kg) Hoja del soplante abierta



elevaría inicialmente la presión del circuito primario en unos 16 bar. Dado que actuarían las válvulas de seguridad, parte de este vapor escaparía consecuentemente hacia el recinto del reactor antes de poder reaccionar químicamente con el grafito. Para poder determinar el riesgo potencial se supone que no se toman contramedidas y que todo el vapor en el circuito primario no aliviado se convierte en gas resultante en un periodo de unas diez horas, lo que provocaría otro aumento de presión de unos 16 bar.

La cantidad máxima de gas resultante producida estaría compuesta de 36 kg de H_2 y 5.133 kg de CO. Al final de la reacción química, este gas resultante y los 2.700 kg de Helio constituirían aproximadamente la atmósfera del sistema primario. La mezcla de gas liberado al recinto del reactor estaría a lo sumo compuesta por 53 kg de H_2 , 733 kg de CO y 385 de Helio.

— Fallo en el aislamiento del generador de vapor con entrada de agua desde el tanque de alimentación.

Se ha elegido deliberadamente un tanque de alimentación con una capacidad máxima aproximada de 90 toneladas para que todo su contenido pueda fluir dentro de la vasija de presión del generador de vapor sin que por ello alcanzase el agua la vasija de presión del reactor a través de la conexión de ambas. Consecuentemente, es imposible que las estructuras calientes de grafito o incluso los elementos combustibles calientes contactasen directamente con el agua.

— Rotura de un tubo del generador de vapor y fallo del aislamiento con entrada de vapor desde módulos HTR colindantes.

Podría ocurrir otra entrada mayor de agua si ni las válvulas de vapor vivo de cierre rápido ni las válvulas compuerta de vapor vivo pudieran finalmente cerrarse tras una rotura de un tubo y un fallo en las válvulas piloto. Grandes cantidades de vapor fluirían hacia el circuito primario desde los módulos vecinos. Las válvu-

las de seguridad han sido designadas de manera que, aun en el caso de que el vapor entrase con una tasa de 25 kg/s durante un largo periodo, lo que presupone que se habrían roto unos 15 tubos, no se alcanzaría todavía la presión de diseño de 77 bar de la vasija de presión. La cantidad máxima de vapor introducida dentro del circuito primario totalizaría entonces unas 16 toneladas. Es virtualmente imposible que se pudiera generar una gran cantidad de gas resultante a lo largo de la secuencia de accidente mencionada, dado que en cuanto cesara la inserción de vapor, el circuito primario sería rápidamente drenado vía la rotura grande postulada en el generador de vapor.

RIESGO POTENCIAL DEBIDO A LA COMBUSTION H_2/CO EN LA CONTENCIÓN COMO CONSECUENCIA DE ENTRADA DE AGUA

Este fenómeno ha sido objeto de intensos estudios internacionales, en particular debido a la explosión de una mezcla de hidrógeno y aire en la contención del reactor de TMI, en donde se incendiaron aproximadamente 370 kg de hidrógeno y la presión alcanzó los 2,9 bar. Los resultados en este campo son actualmente tan bien conocidos que los picos de presión máxima resultantes de una explosión de gas en un volumen se pueden determinar con gran exactitud usando métodos relativamente sencillos.

Si los hechos expuestos anteriormente son empleados en el accidente hipotético concerniente a la rotura pequeña de un tubo de generador de vapor con fallo del sistema de drenaje de alta velocidad del generador de vapor combinado con la pérdida prolongada del enfriador de emergencia resultaría lo siguiente:

Cuando la válvula de seguridad abriese tras varias horas, en el peor caso fluirían 53 kg de H_2 , 733 kg de CO y 385 kg de Helio hacia la contención, que tiene un volumen aproximado de 25.000 m³. Esto correspondería a un equivalente de hidrógeno del 31 %. La mezcla no podría encenderse si estuviera uniformemente distribuida. Sin embargo, suponiendo que el hidrógeno y el aire estuvieran presentes en una proporción 30 % a 70 % se podrían producir localmente algunas explosiones. La sobrepresión máxima posible en la contención se calcula en aproximadamente 0,7 bar, por alcanzar brevemente una presión máxima de 1,7 bar. Dado que la contención está diseñada para resistir la carga de una presión permanente de 1,3 bar, no sufriría ningún daño irreparable como resultado de este corto pico de presión.

F VIII Presión del gas primario como función del tiempo en caso de entrada de agua (sin separador de agua y sin regulación de presión)

