

RESULTADOS DE LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES PARA LA VERIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE SEGURIDAD PASIVOS DEL REACTOR SWR 1000

J. MESETH

INTRODUCCIÓN AL PROBLEMA

Una característica clave del reactor SWR 1000 es que los sistemas activos de seguridad están suplementados o parcialmente reemplazados por sistemas pasivos. Los sistemas pasivos son generalmente de diseño más sencillo, más baratos y más fiables. En particular, no requieren de fuentes externas de energía y en muchos casos tampoco requieren una actuación activa de sistemas de instrumentación y control.

Sin embargo, los sistemas de seguridad pasivos a emplear por primera vez en el reactor SWR 1000 requieren de pruebas experimentales que permitan la obtención de datos fiables para el diseño del reactor. En suma, se debe asegurar que es posible una operación estable de los equipos pasivos durante unos períodos de tiempo requeridos.

Este artículo describe los resultados de las pruebas experimentales llevadas a cabo.

CONDENSADOR DE EMERGENCIA (EC)

El condensador de emergencia asegura una extracción automática del calor de la vasija de presión del reactor tan pronto como el nivel de agua en la vasija cae por debajo de un límite de diseño especificado, sin pérdida de refrigerante en la vasija. No se requiere actuación ya que en las líneas de conexión entre la vasija y el EC no existen válvulas (ésta es una diferencia fundamental entre este sistema y construcciones procedentes de diseño similar).

El EC sustituye al usual sistema activo de inyección de alta presión, que generalmente está construido sobre la base de trenes múltiples.

Se ha probado una parte del haz tubular

del intercambiador de calor del EC en una plataforma de prueba especialmente construida en el Centro de Investigación Jülich de Alemania, según la cual la geometría de los tubos del intercambiador de calor correspondía mayoritariamente con la programada para el SWR 1000.

Este haz tubular se sometió a un extenso programa de pruebas que incluía varias presiones en el lado primario con distintos niveles de agua, combinados con distintas presiones y temperaturas del lado secundario, incluyendo la inundación completa del lado primario (durante recarga).

En la Figura 1 se muestra, a modo de ejemplo, la potencia térmica de cuatro tubos del intercambiador de calor a diferentes presiones del lado primario y distintos niveles de agua en el acumulador que modela la vasija de presión del reactor.

La máxima potencia térmica, es decir, la

potencia nominal de cada tubo del intercambiador de calor, es de aproximadamente 0.8 MW a una presión del lado primario de 70 bar.

El diseño del SWR 1000 requiere 4 Condensadores de Emergencia con una potencia nominal cada uno de 55 MW, lo que significa 70 tubos para el intercambio de calor por cada EC.

Las pruebas demostraron que el arranque y la parada del EC como resultado de los cambios en el nivel de agua de la vasija tienen lugar sin ningún tipo de problemas y la operación estable está garantizada, incluso si la piscina de inundación del núcleo se encuentra a temperatura de saturación (ver /1/).

Incluso durante operación con el lado primario inundado, como durante la recarga, la potencia térmica es suficientemente alta para asegurar que, en el caso de una

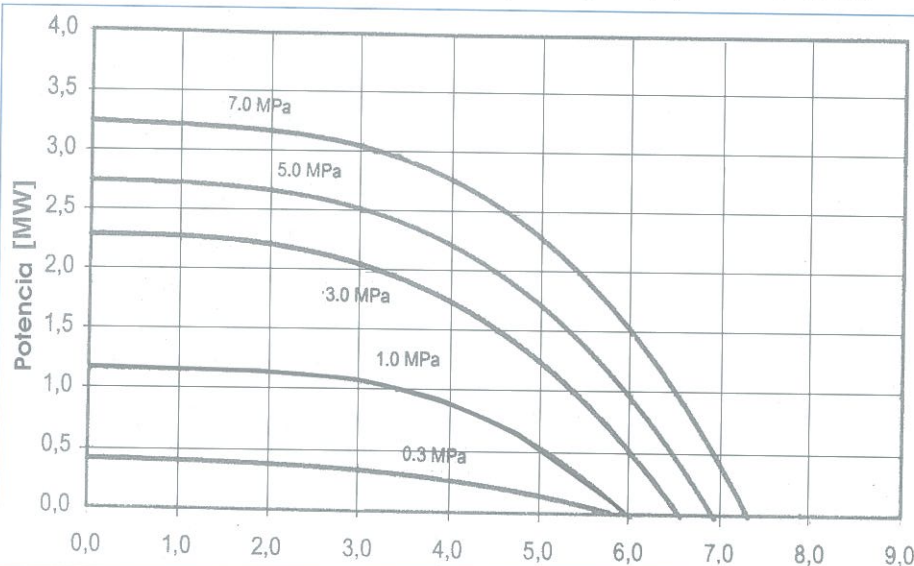


Fig. 1: Potencia térmica para 4 tubos del EC en función de la presión y el nivel de agua de la vasija del reactor

1. Caudal en la dirección normal: Teoría (con rozamiento):	$\xi = 4,3$	Prueba: $\xi = 5,8$
2. Dirección de caudal contraria: Teoría (agua saturada, sin rozamiento):	$\xi = 950$	Prueba: $\xi = 480$
3. Caudal contrario con vapor saturado de 40 bar: Teoría (caudal crítico sin POR): $m = 11,1$ [kg / s]	Prueba (con POR): $m = 1,1$ [kg / s]	

Tabla I: Comparación de las estimaciones teóricas y los resultados de las pruebas experimentales para el reductor pasivo de fugas DN 50

pérdida postulada de refrigeración activa, no sólo el inventario de agua de la vasija del reactor, sello vasija a pozo seco y la piscina de almacenamiento del separador/secador de vapor, sino también el inventario de agua de la piscina de inundación del núcleo, se calienta con el calor residual. Como resultado, los períodos de gracia permitidos por el SWR 1000 antes de la ocurrencia de la evaporación, se doblarían, debido al EC, a aproximadamente 20 horas.

TRANSMISOR DE PULSOS DE PRESIÓN PASIVO (PPPT)

El transmisor de pulsos de presión pasivo es un pequeño intercambiador de calor cuyo lado primario contiene agua del reactor, y cuyo lado secundario está aproximadamente a presión atmosférica durante la operación normal del reactor. Dependiendo de la elevación en que se instale el PPPT dentro del diseño de la planta, el lado primario del cambiador se llena de vapor cuando el nivel de agua de la vasija baja por debajo de un determinado valor asociado. En estas condiciones, la presión y temperatura del lado secundario del intercambiador de calor se incrementarán como consecuencia de la transmisión de calor.

Si se excede en el lado secundario el valor de presión de 6 bar (presión excesiva), se activan unas válvulas piloto, sin que se requiera ninguna fuente externa de energía eléctrica, ni sistema de medida o de I&C.

En el Centro de Investigación Jülich se han probado tres variantes diferentes de PPPT en una prolongación de las pruebas efectuadas al Condensador de Emergencia.

En los PPPT1 y PPPT2 el agua del reactor se dirigió por el lado tubos del cambiador mientras que en el caso del PPPT3 se canalizó a través del lado carcasa. El objetivo principal de las pruebas era el cualificar un PPPT en el que a una presión de 70 bar en el lado de proceso del cambiador se consiguiese un incremento de presión de 6 bar en el lado secundario del cambiador dentro de un período de 20 segundos y que se expulse un volumen de agua de 2 litros del lado secundario en los 20 segundos posteriores.

En la Figura II se muestra que este objetivo se consigue con el PPPT3. Sin embargo, también se muestra que el tiempo de respuesta se incrementa cuando la presión del lado de proceso cae, hasta tal grado que el PPPT no debe considerarse disponible por debajo de 10 bar de presión en el lado de proceso (ver /2/).

Durante las pruebas del PPPT no se han observado inestabilidades de flujo. En contraste con el Condensador de Emergencia, en el caso del PPPT tanto el lado de proceso, como el lado secundario del intercambiador de calor deben diseñarse para una presión de 88 bar, ya que es posible un calentamiento completo del lado secundario a la temperatura del agua del reactor debido, en principio, a la baja capacidad térmica.

REDUCTOR PASIVO DE FUGAS (POR)

El propósito del reductor pasivo de fugas es reducir significativamente el caudal de descarga desde la vasija del reactor en el caso de una rotura postulada en la línea de retorno del Condensador de Emergencia. Se ha desarrollado como un componente simple sin partes en movimiento, pero con una considerable diferencia en la resistencia al flujo, dependiendo de la dirección del mismo.

La Figura III muestra un boceto del objeto a probar, que fue dimensionado para una tobera de DN50. Con caudal circulando por el POR en la dirección de operación normal, se produce un número muy bajo de torbellinos. En el caso de una rotura postulada en la línea de retorno del EC, el flujo a través del POR se produce en la dirección opuesta. Esto genera un intenso número de torbellinos, que, como resultado de que se mantiene constante el momento angular, produce que las velocidades de rotación se incrementen continuamente según se aproxima el fluido al eje de rotación.

A pequeñas distancias del eje de rotación, el valor de la presión disminuye por debajo de la presión de saturación, por lo que solo es posible la descarga de vapor de agua. Esto significa que el agua fluye a través de una pequeña sección transversal en forma de anillo en la tobera del Venturi aunque la componente del flujo en la dirección circunferencial es mayor que la correspondiente a la de la dirección axial.

El caudal, que está perturbado por los efectos considerables de los torbellinos, produce una considerable reducción del flujo de descarga. Con agua fría fluyendo a través del POR, ha sido ya demostrado hace tiempo /3/, que se produce un incremento del valor ξ en la dirección del flujo de la rotura de aproximadamente un factor de 100, mientras que las pruebas con agua subenfriada, agua saturada y vapor saturado se realizaron el año pasado en el banco de pruebas de válvulas, que Siemens posee en Karlstein, Alemania.

En la Tabla I, se comparan los resultados de las pruebas con las predicciones teóricas. Con flujo en la dirección de operación normal, la teoría predecía tener dos Venturis de distintos tamaños, conectados en serie con efectos de rozamiento tenidos

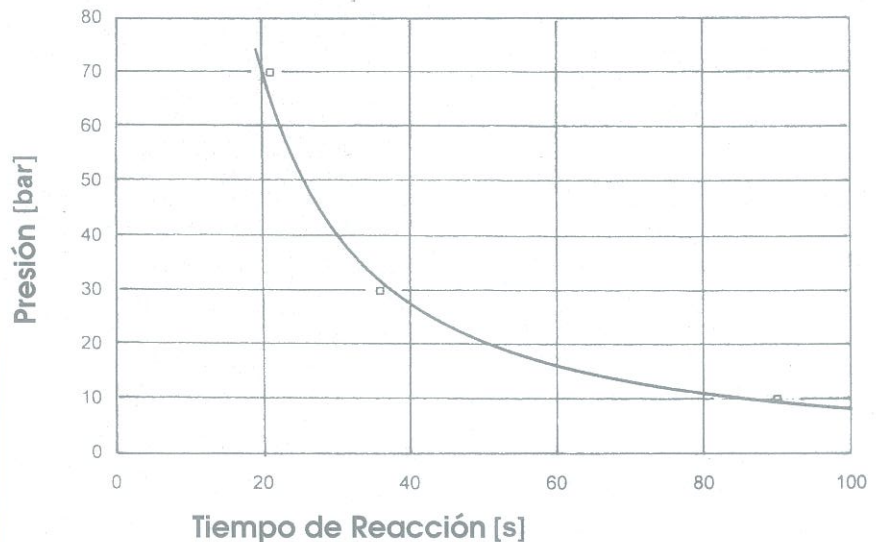


Fig II: Tiempo que tarda en alcanzar una sobrepresión de 6 bar en el lado secundario de PPPT3

en consideración. A $\zeta = 5,8$, el resultado de la prueba fue un valor de ζ solo ligeramente mayor del valor teórico predicho.

Con caudal en la dirección de la rotura, se había postulado teóricamente libre de rozamiento. El valor teórico no se alcanzó en la prueba a $\zeta = 480$. Sin embargo, se hizo evidente que con el módulo teórico, el no tener en cuenta el rozamiento no es tan serio como originalmente se temía.

En resumen, se espera que el efecto del rozamiento se reduzca aún más según se aumenta la anchura nominal del POR, ya que el espesor de la capa límite no se incrementa en relación lineal al incremento del tamaño.

Es de destacar que la resistencia al flujo se incrementa en dos órdenes de magnitud (en el caso de flujo en la dirección de la rotura, comparado con el flujo en dirección de operación normal) para agua subenfriada y agua saturada.

Con descargas de vapor saturado, el parámetro ζ no es un valor adecuado de comparación, debido a la compresibilidad del fluido. Sin embargo, si se compara el caudal de descarga de una tobera DN 50 sin POR para flujo supercrítico de vapor con el correspondiente al de una tobera con POR integrado, se observa una disminución del flujo másico en aproximadamente un factor de 10.

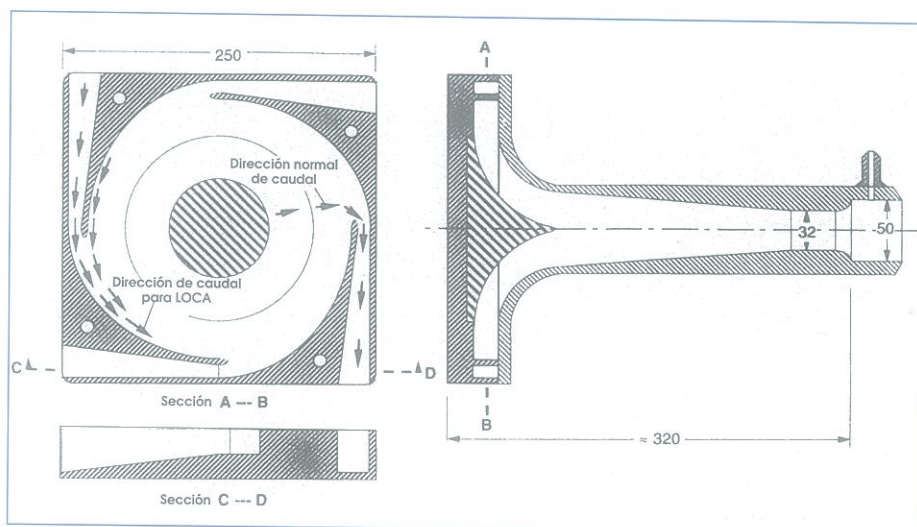
En el diseño del SWR 1000, la utilización del POR no debe restringirse solamente a las líneas de condensado del EC, por ejemplo, también puede usarse en las toberas de agua de alimentación.

La similitud entre los resultados de las pruebas efectuadas con las predicciones de los modelos teóricos simplificados, permite identificar variación de los distintos parámetros tal que se pueda encontrar un compromiso satisfactorio en la fase de diseño entre el requisito de espacio necesario para el POR y la efectividad de la restricción del caudal.

CONDENSADOR DE REFRIGERACIÓN DE LA CONTENCIÓN (CCC)

El condensador de refrigeración de la contención tiene como objetivo permitir la extracción automática del calor residual de la contención en el caso de una fuga postulada de los sistemas activos de enfriamiento. Consta de un haz tubular situado aproximadamente 1 m por encima del nivel de agua de la piscina de inundación del núcleo. El lado de proceso de este intercambiador de calor es por el exterior de los tubos, mientras que el agua procedente de la piscina de almacenamiento del separador/secador de vapor pasa por el interior de los tubos durante operación.

En el momento en que el lado de proceso alcanza una temperatura superior a la del lado de tubos, se produce un calentamiento del agua en el interior de los tu-



F III: Dibujo del reductor pasivo de fugas probado para una tobera DN 50

bos. La circulación natural que se produce se incrementa cuanto mayor es el calentamiento del agua, y en particular las diferencias de densidad (y por tanto la circulación natural) aumentan cuando el agua del lado secundario se evapora parcialmente.

El CCC se probó en la instalación de Prueba PANDA en el Instituto Paul Scherrer en Suiza. Esta instalación de prueba modela el pozo seco y la piscina de supresión de presión del SWR 1000 a una escala en volumen de 1:25, con diferencias en las elevaciones, correspondiendo principalmente al diseño actual.

La Figura IV muestra un esquema de la instalación de prueba con el generador de vapor (es una simulación de la vasija del reactor), la piscina de inundación del núcleo (en la que el CCC está montado), el pozo seco (sin CCC) y los dos tanques inferiores que juntos modelan la piscina de supresión de presión.

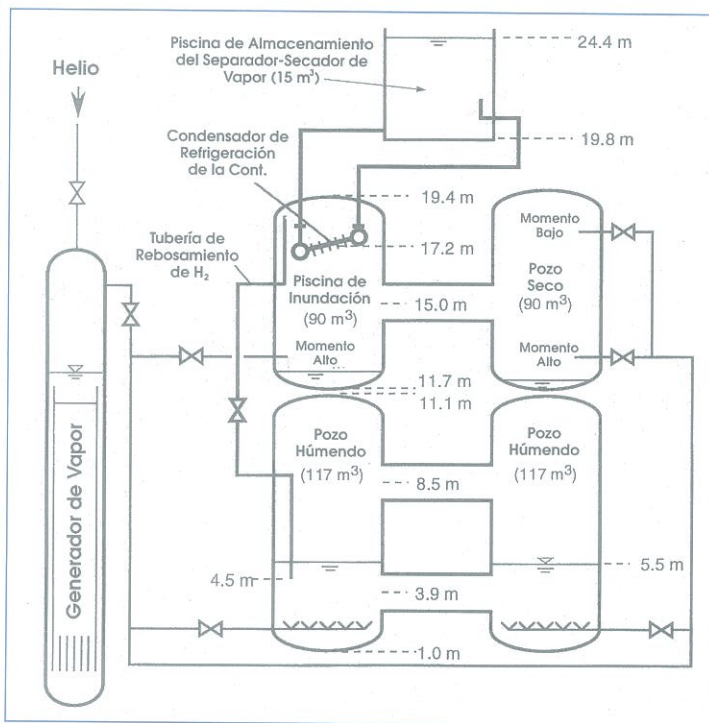
Ha sido posible descargar vapor o a la piscina de inundación del núcleo o bien al pozo seco y en el último caso fue posible seleccionar o mezcla externa con el fluido ambiente (pulso alto) o bajo nivel de mezcla (pulso bajo).

El CCC correspondía plenamente al planificado

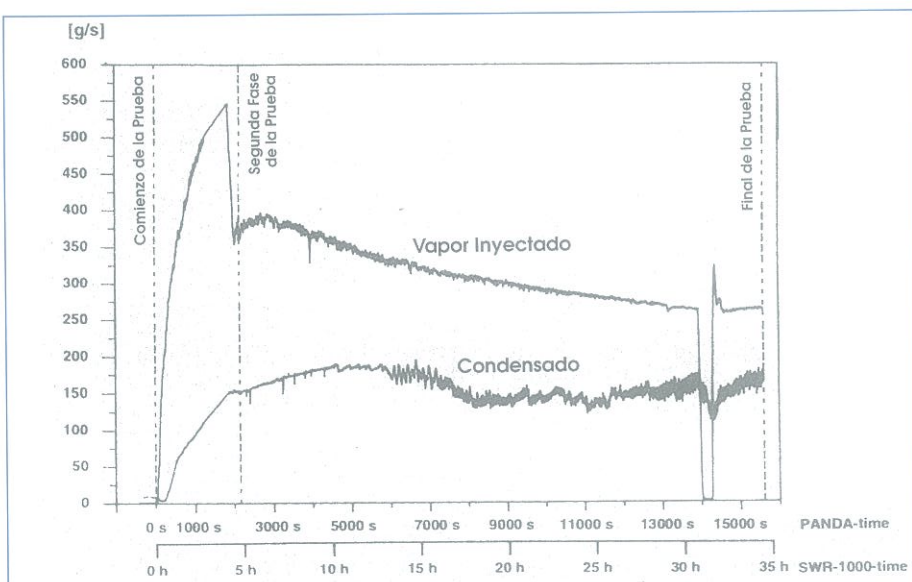
para el SWR 1000 a una escala de 1:25. Sin embargo, en contraste la simulación de la piscina de almacenamiento del separador/secador de vapor fue de nuevo demasiado pequeña, con un factor de reducción de 7.5. Este hecho significa que la piscina del separador/secador se calentará 7.5 veces más deprisa que el tiempo esperado.

Esta desviación se compensó mediante la selección de una escala de tiempo acortada en un factor de 7.5 para la simulación de la secuencia de accidente en la prueba (en los resultados de prueba se hace una distinción entre la escala de tiempos empleada en las pruebas en PANDA y la escala de tiempos del SWR 1000).

La extensa modelización efectuada en la piscina de inundación del núcleo, pozo



F IV: Diagrama esquemático simplificado del banco de pruebas del CCC PANDA



F V: Comparación del flujo másico de vapor inyectado con el flujo de condensado generado en el CCC en la prueba BC1 (sin LOCA)

seco, piscina de supresión de presión y piscina de almacenamiento del separador secador de vapor permitió efectuar una investigación sobre el comportamiento del sistema en distintas situaciones de accidente.

Por ejemplo, se han simulado accidentes con y sin pérdida de refrigerante, con roturas de pequeña y gran sección transversal y roturas situadas en posiciones superiores e inferiores y también con y sin simulación de fusión del núcleo.

El hidrógeno que se produce en el caso de fusión del núcleo como resultado de la reacción zirconio/agua se simuló mediante la inyección de helio en lugar de hidrógeno, por razones de seguridad, pues ambos gases son considerablemente más ligeros que el vapor saturado.

Un detalle importante del diseño del SWR 1000 es la tubería de venteo de hidrógeno, por lo que se descarga una mezcla de vapor y gases no condensables desde la piscina de inundación del núcleo a la piscina de supresión de presión tan pronto como la presión en el pozo seco, o en la piscina de inundación del núcleo, ha alcanzado un determinado valor. A continuación se presentan unos cuantos resultados de pruebas seleccionados:

La Figura V muestra la comparación entre el caudal de vapor inyectado y el caudal de condensado formado en el CC.

En esta prueba solo al comienzo se eliminaba vía el CCC aproximadamente la mitad del calor, pasando a aproximadamente dos tercios hacia el final de la prueba. El vapor restante se dirigió principalmente a la cámara de supresión de presión, desplazando aire de la piscina de inundación del núcleo a la cámara de supresión de presión.

La Figura VI muestra la extensión a que

fue reducida la fracción de gases no condensables en la piscina de inundación del núcleo (en la vecindad del CCC).

Durante esta prueba, inicialmente se estableció flujo monofásico en el lado secundario del CCC; con posterioridad se produjo de manera intermitente evaporación y hacia el final de la prueba la evaporación fue continua. En consecuencia el caudal másico del lado secundario varió en aproximadamente un solo orden de magnitud.

La Figura VII muestra los resultados de una prueba en la que la producción de hidrógeno, consecuencia de un accidente con fusión del núcleo, se simuló mediante la inyección de helio. A continuación del final de la fase de descarga, la presión en la piscina de inundación del núcleo y en el pozo seco, disminuyó inicialmente, ya

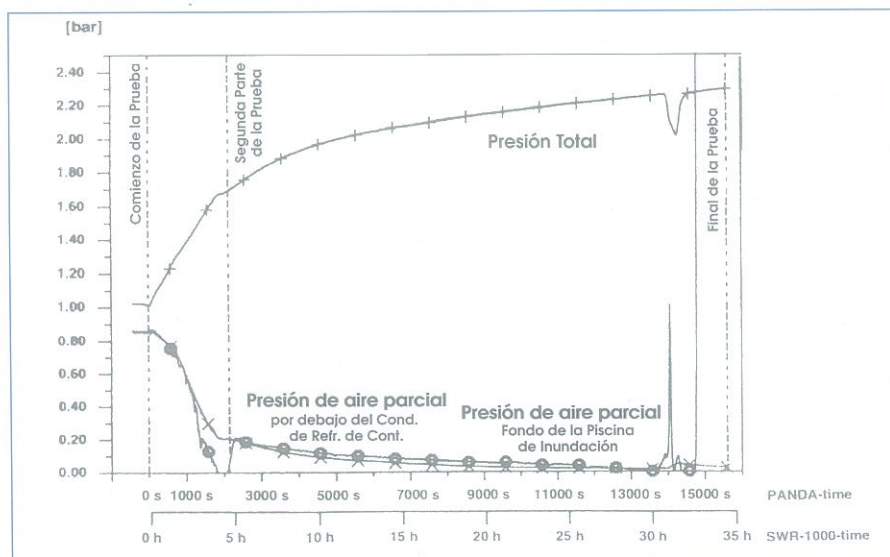
que el CCC estaba condensando más vapor que se descargaba de la fuga simulada. La presión entonces se incrementó de nuevo después que la piscina de inundación del núcleo se calentó hasta la temperatura de saturación. Se postuló que la fusión del núcleo se produciría cinco horas después del comienzo del accidente (tiempo postulado en el SWR 1000).

El helio inyectado en este punto produce un incremento continuo de presión en el pozo seco y en la cámara de supresión de presión (la mayor parte del helio se purga a la cámara de supresión de presión).

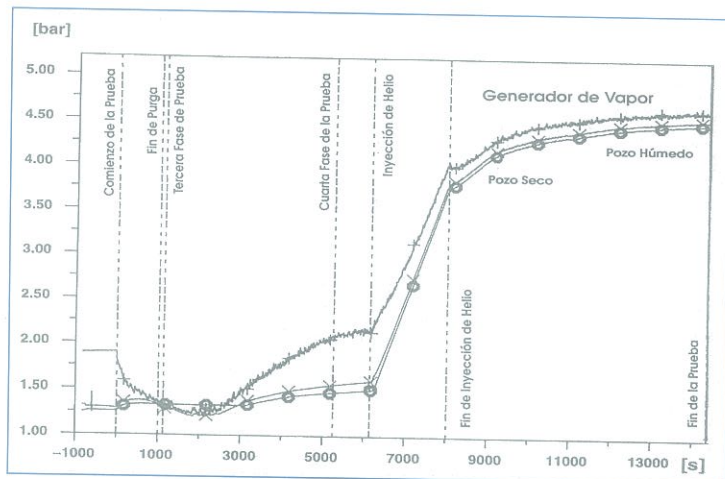
La presión continuó subiendo incluso después de finalizar la inyección de helio, ya que la fracción del helio inicialmente almacenado en el pozo seco pasa posteriormente a la cámara de supresión de presión.

La presión absoluta final estuvo por debajo de 5 bar, aunque la cantidad de helio inyectada correspondía al 90 % del volumen de hidrógeno producido en la reacción zirconio-agua.

Es de destacar que la inyección de helio no produjo inestabilidades en la acumulación de presión ni en la respuesta térmica del CCC. Una razón importante para este hecho puede verse en la Figura VIII, en donde se ha simulado una rotura de tamaño medio, también con fusión del núcleo. A continuación del final de la inyección de helio se formó una capa que producía una clara separación en el área del CCC. El fluido por encima de la capa de separación estaba comparativamente frío y contenía principalmente helio, mientras que el fluido por debajo de la capa de separación se encontraba aproximadamente a la temperatura de saturación, y por lo tanto constaba principalmente de vapor. A las temperaturas



F VI: Reducción de la presión de aire parcial en la piscina de inundación del núcleo en la prueba BC1 (sin LOCA)



FVII: Presión en el generador de vapor, la piscina de inundación del núcleo y la cámara de supresión de presión en la prueba BC4 (sección transversal de fuga de 12 cm², simulación de una fusión del núcleo)

comparativamente altas de la capa inferior, solo hacía falta una parte de la superficie del interintercambiador de calor del CCC para condensar todo el vapor introducido, mientras que la parte restante del CCC no hizo casi ninguna aportación a la condensación debido a la alta fracción de helio en el fluido del lado primario.

La elevación de esta capa de separación es autónoma. Si la introducción de vapor aumenta, aumenta ligeramente la presión estática, la capa de separación se desplaza ligeramente en dirección ascendente, y la potencia térmica del CCC aumenta en consecuencia. De lo contrario, la capa de separación desciende cuando disminuye la introducción de vapor, y la potencia térmica del CCC disminuye cuando una parte cada vez más pequeña de la superficie del interintercambiador de calor está rodeada de vapor saturado. Aquí el espesor de la capa de separación es solo de unos cuantos centímetros.

ningún aumento de presión inadmisible en el pozo seco). También sería posible controlar sin ninguna dificultad la producción de hidrógeno en caso de una fusión hipotética del núcleo.

El único problema que surgió durante las pruebas fue una inestabilidad de caudal en el lado secundario del CCC al comienzo de la evaporación. Sin embargo, se pueden hacer caso omiso de los efectos de esta inestabilidad, si las transiciones entre el flujo monofásico y el bifásico son "suavizadas" lo suficientemente mediante la selección adecuada de las resistencias de flujo en las líneas de alimentación y descarga.

PERSPECTIVAS

Las pruebas realizadas hasta la fecha en los sistemas de seguridad pasivos del reactor SWR 1000 han cumplido con todas las expectativas originales y, en algunos

casos, incluso las han superado. Está programada la realización de pruebas adicionales para el condensador de emergencia y para el transmisor de pulsos de presión pasivo, que previsiblemente aporten otras mejoras de los resultados de las pruebas gracias a los métodos de prueba técnicamente optimizados.

Además, se están preparando pruebas del sistema de inundación pasivo, estando programadas provisionalmente para los meses de Octubre/Noviembre de 1998. También está previsto realizar pruebas relacionadas con la refrigeración de la vasija del reactor desde el exterior, en caso de una fusión postulada del núcleo. Se prevén que estas pruebas experimentales permitan la verificación de la predicción teórica de que, en el SWR 1000, la fusión del núcleo se retendrá totalmente dentro de la vasija del reactor.

REFERENCIAS

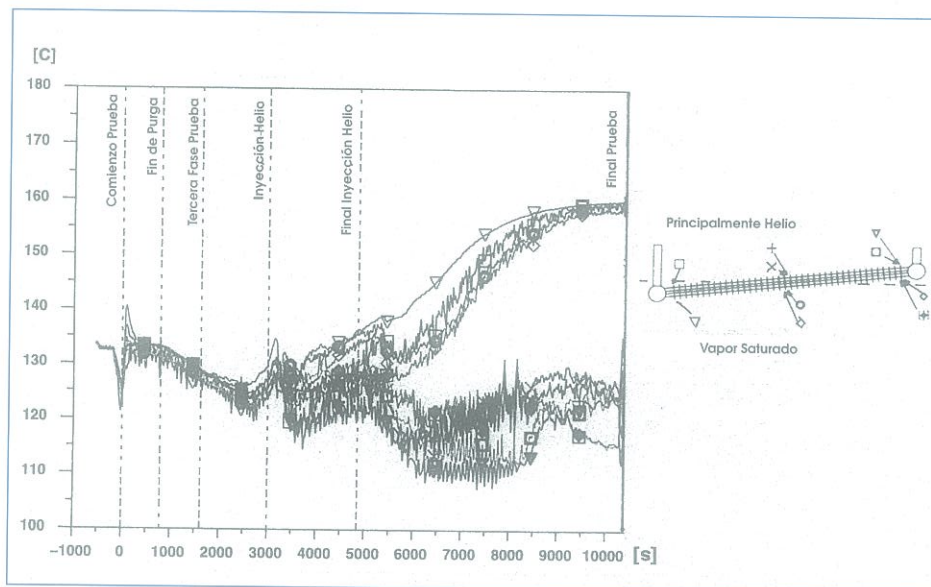
/1/ E. Königstein: Notkondensator für einen Siedewasserreaktor mittlerer Leistung. Versuche zur Ermittlung der Leistung

Abschlussbericht Förderungsvorhaben BMBF 15 NU 0950, Siemens/KWU, Report KWU NS-M/97/0107

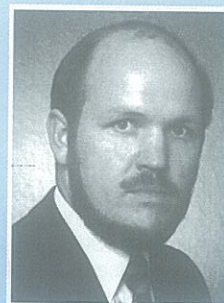
/2/ E. Königstein, J. Meseth: Passiver Impulsgeber für einen Siedewasserreaktor mittlerer Leistung

Abschlussbericht Förderungsvorhaben BMBF 1501035, Siemens/KWU, Report KWU NAPS/98/0004

/3/ J. Meseth: Der Strömungsbergrenzer als passives Element zur Verringerung der Ausflussmassenströme bei Leitungsbruch Jahrestagung Kerntechnik '97



FVIII: Formación de una capa de separación clara en la zona del CCC a la inyección de helio (prueba BC5, sección transversal de fuga de 200 cm², simulación de una fusión del núcleo)



Johann MESETH trabaja en Siemens/KWU desde el año 1978, donde es especialista en Termodinámica y Mecánica de Fluidos con una dilatada experiencia en la planificación de instalaciones de prueba y en la ejecución de pruebas. En relación con el proyecto del reactor avanzado SWR 1000, es responsable del diseño de sistemas pasivos así como de los internos de la vasija de presión del reactor y de la contención.