

ANTARES: Diseño conceptual del HTR de Areva NP

M. Lecomte

Basándose en su experiencia previa en el diseño del módulo alemán y en su participación en el GT-MHR, Areva NP ha diseñado un concepto de planta HTR original basado en un sistema de conversión de energía de ciclo combinado. Los requisitos clave han sido la minimización de los riesgos tecnológicos, alta eficiencia, fácil mantenimiento y flexibilidad para permitir la adaptación a la cogeneración.

El diseño conceptual se ha completado y documentado. No obstante, el fallo del proceso termoquímico del hidrógeno y falta de un valor significativo del CO_2 no animan al sector de calor para procesos a cambiar al calor nuclear a corto plazo, por lo que el desarrollo está actualmente en compás de espera hasta que surjan las condiciones económicas favorables.

Based on its previous experience in the design of the German module and its participation in the GT-MHR, Areva NP designed an original HTR plant concept based on a combined cycle power conversion system. The key requirements were minimization of technological risks together with high efficiency, easy maintenance and embedded flexibility to adapt to cogeneration.

The conceptual design is completed and documented. However, both the failure of the hydrogen thermochemical process and the lack of a significant CO_2 value do not encourage process heat industry to switch to nuclear heat in the short term so that the development is currently on standby until favorable economic conditions emerge.



M. LECOMTE

es asesor científico del vicepresidente de Investigación e Innovación de Areva NP

INTRODUCCIÓN

Ahora se admite de forma general que existe la tecnología para manejar con seguridad y fiabilidad un HTR a temperatura de salida del núcleo de 850°C . Para aprovechar plenamente esta alta temperatura no basta con un ciclo de vapor, por lo que se ha dedicado un esfuerzo sustancial al ciclo directo Brayton. El ciclo directo resulta atractivo por las características de simplificación y alta eficiencia con que se percibe; no obstante, plantea problemas tecnológicos cuya resolución es cara y requiere mucho tiempo, como ha dejado patente el reciente abandono de esa tecnología por todos los agentes implicados.

Con el fin de llevar a buen término la tecnología HTR con desarrollos limitados, Areva NP decidió acometer el desarrollo de un ciclo combinado indirecto para la producción de electricidad, dotándole al mismo tiempo de la flexibilidad suficiente para adaptarlo a varias clases de planes de cogeneración, que es donde radicaría el valor específico añadido del HTR.

Tras una corta presentación global del concepto de Areva NP, se ofrecerán algunas justificaciones de la elección técnica inicial.

DESCRIPCIÓN GLOBAL DEL CONCEPTO DE LA PLANTA

La fuente de calor nuclear

La fase de diseño conceptual del concepto HTR de Areva NP se completó en diciembre de 2006.

Los principales parámetros de planta se especifican en la tabla 1, mientras que en la figura 1 se presenta el principio de la planta.

La planta nuclear se basa en un concepto modular según el cual el núcleo está dentro de una vasija a presión metálica, cuyo diseño permite la irradiación del calor residual en caso de accidente importante. Este medio pasivo basta por sí mismo para limitar la temperatura del núcleo de combustible a menos de 1600°C para garantizar la integridad de las partículas del combustible. Esta característica es común a todos los HTR modulares y no necesita más explicación, ya que ha sido ampliamente descrita y comprobada en los experimentos de AVR y HTTR.

El núcleo tiene una configuración anular para optimizar el nivel de energía del núcleo y cumplir con el requisito de seguridad pasiva anterior. Con el fin de minimizar la caída de presión del

núcleo y de simplificar la recuperación futura del combustible consumido, ya sea para el almacenarlo o reprocesarlo, se ha mantenido del concepto de núcleo de tipo de bloque hexagonal. Cada bloque se ha cargado con combustibles compactos, compuestos de grafito y micropartículas de combustible según el diseño TRISO. Este concepto se ha implementado y contrastado en varios reactores en el pasado. La división en zonas del núcleo se utiliza para optimizar el funcionamiento durante el ciclo de vida de éste.

Como puede verse en la figura 1, el circuito primario, que contiene los componentes nucleares, se ha reducido y contiene una cantidad mínima de componentes. Esto tiene un efecto favorable tanto en los costes de los componentes como en la reducción de las probabilidades de mantenimiento en un entorno radiológico. También hay que señalar que la presión del circuito primario está limitada a 5,5 MPa, que es sustancialmente inferior a la presión por los sistemas de ciclo directo, que oscila entre los 7 y los 9 MPa, lo que afecta considerablemente al grosor de las paredes de la vasija, a la fabricación de ésta con soldaduras más delgadas y a los costes globales. Se ha

elegido este nivel de presión para que el caudal volumétrico del blower sea similar al de los ventiladores diseñados previamente. En caso de resultar factible el uso de un blower con caudal volumétrico mayor sin efectos negativos, la presión puede ser aún más baja. Lo esencial es que en la actualidad existe una tecnología de vasijas y ventiladores comprobada y, por tanto, se asumen pocos riesgos tecnológicos.

El tipo de blower es de velocidad de giro variable, cuyo caudal puede adaptarse al nivel de potencia del reactor. Esta simple característica evita el control de inventario, una peculiaridad inevitable del concepto de ciclo directo, que resulta muy caro por las necesidades de capacidad y espacio para el almacenamiento del helio, y aumenta notablemente la extensión del circuito primario.

El último componente del bucle primario es el intercambiador de calor intermedio (IHX), que es fundamentalmente el único componente nuevo del diseño.

La unidad de producción de electricidad

Areva NP se ha fijado el objetivo de lograr alto rendimiento y eficiencia minimizando los costes y la demora de los nuevos desarrollos. Areva NP ha desarrollado un concepto de ciclo combinado original. En él se aprecia un potencial de muy alta eficiencia (47% o superior), a la vez que se evita en grado máximo el riesgo tecnológico.

Se ha efectuado una evaluación detallada con el fabricante de equipos para la generación de energía MHI, que ha confirmado la evolución inicial de Framatome-ANP. Una comprobación independiente de EDF, la empresa nacional francesa de energía, también ha confirmado el rendimiento.

Las características más sobresalientes de ese diseño pueden resumirse de la siguiente forma:

Se utiliza un ciclo de gas Brayton para recuperar la energía y convertirla a electricidad en una franja de temperaturas de 800°C a 600°C. En general, el ciclo de gas es sin duda eficiente a alta temperatura, pero, como no incluye un paso de condensación, no es tan eficiente en la franja de temperaturas inferiores. Por ejemplo, a temperaturas que van desde los 120°C hasta la temperatura ambiente, se pierde una cantidad apreciable de calor en el enfriador previo y en los enfriadores intermedios de los ciclos Brayton directos. En el ciclo combinado a que nos referimos, toda la energía del circuito de gas se recupera en el generador de vapor y se transfiere al ciclo de vapor, que la convierte de forma eficiente a las bajas temperatura de condensación del vapor a temperatura ambiente.

Es preciso señalar que la producción neta de energía del circuito de gas es de unos 80 MWe, mientras que el ciclo de

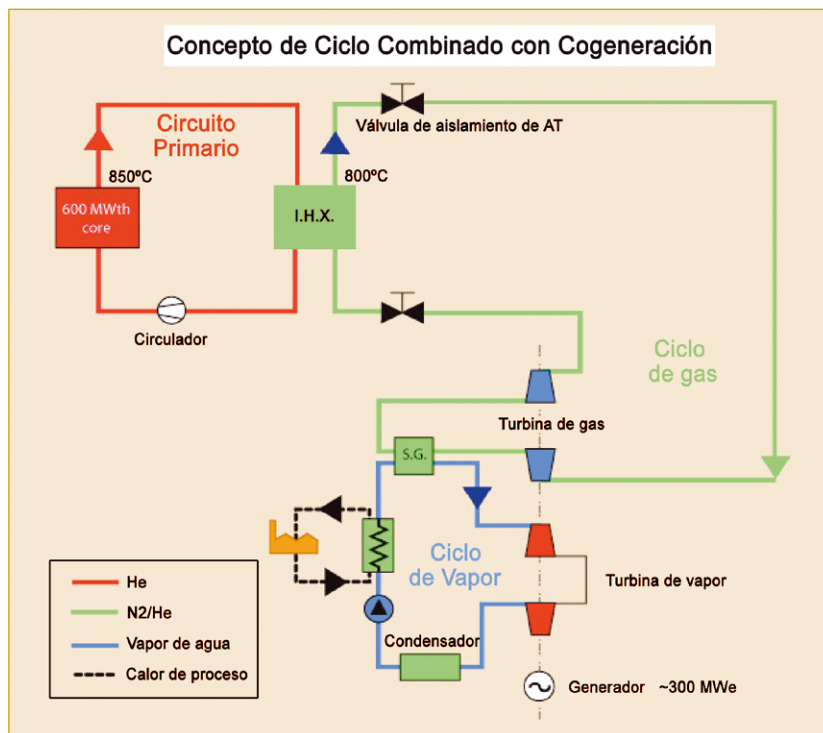


Figura 1.

vapor produce en torno a 200 MWe. Esencialmente, podemos decir que disponemos de un ciclo de vapor con un ciclo de gas superior en lugar de un ciclo combinado convencional que utiliza un ciclo de vapor inferior para producir menos energía.

Para utilizar la tecnología de la turbina de gas convencional y aprovechar el circuito de gas cerrado, podemos seleccionar el gas que se ajuste mejor a nuestros fines, por lo que se elige el nitrógeno, que básicamente tiene propiedades idénticas a las del aire, como vector de gas. Con el fin de mejorar las características de intercambio de calor de gas en el diseño IHX, puede añadirse una cantidad mínima de helio al nitrógeno. Esto apenas afecta al diseño de las turbomáquinas y disminuye el área de transferencia superficial de calor del IHX. Puede demostrarse que la eficiencia del circuito de gas es independiente de la presión absoluta; por tanto, se selecciona una presión de funcionamiento tal que permita que el IHX funcione normalmente con la misma presión en ambos lados. Así se limita considerablemente el factor de uso de carga en este equipo.

En el diseño del compresor se ha tenido en cuenta el hecho de que el gas de entrada al compresor no esté frío, aunque esto no es una novedad, ya que, en un ciclo combinado convencional, el aire se comprime hasta un índice de compresión de 20/1 y en algunas etapas del compresor intermedio se comprime el aire con temperatura de entrada similar a la temperatura de nuestro diseño. La

eficiencia del circuito de gas se ve afectada, aunque de forma inapreciable en lo que respecta a la eficiencia global, ya que este trabajo de compresión se recupera en el vapor generado en el ciclo de vapor. Las turbomáquinas son en realidad una versión simplificada de las utilizadas en los ciclos combinados de aire convencionales. Son más sencillas porque nuestro coeficiente de compresión-expansión es 2 en lugar de 20. Esto significa que nuestra turbina de gas sólo tiene 3 etapas, y nuestro compresor, 8 ó 9 etapas. Al haber menos etapas hay menos posibilidades de pérdidas e ineficiencias. La temperatura máxima de entrada en la turbina es de 800°C, lo que permite el uso de materiales de aleación de alta temperatura convencionales y elimina la necesidad de refrigeración de álabes o discos. En conjunto, el diseño de las turbomáquinas es más sencillo que en los diseños convencionales, lo que supone al menos una fiabilidad equivalente, un descenso de los costes y un mantenimiento más fácil. En comparación con las turbomáquinas de ciclo directo de helio, que necesitan aproximadamente de 30 a 40 etapas de compresión, y de 13 a 15 etapas de expansión, nuestras turbomáquinas son más eficientes por haber menos oportunidades de pérdidas en cada etapa. Además, el nitrógeno es más fácil de comprimir y expandir con menos requisitos de tolerancia de los álabes y discos que el helio. Así se garantiza también el rendimiento durante una vida útil más prolongada por el escaso desgaste que sufren.

Por último, es importante tener en

cuenta que las ineficiencias que afectan al circuito de gas tienen una importancia secundaria porque, por una parte, dicho circuito contribuye en menor grado a la producción global, y por otra, una ineficiencia que tiene como consecuencia la disipación del calor se recupera en el ciclo de vapor. Desde ese punto de vista, el ciclo combinado es más manejable que el ciclo directo, en el que cualquier ineficiencia operativa debida al diseño o al desgaste de las turbomáquinas o del recuperador afecta directamente, a veces de forma notable, a la eficiencia global de la planta.

Un ciclo de vapor moderno de alta eficiencia funciona entre 550°C y la temperatura ambiente en el ciclo inferior. Utiliza vapor sobrecalentado convencional de 12 a 16 MPa para impulsar la turbina de vapor. Este tipo de equipo está muy desarrollado, y es fiable y económico.

Aunque pueda parecer obvio, hay que destacar que todo el sistema de conversión de energía está fuera del circuito nuclear, en una zona no contaminada, y es muy cercano al principio de diseño de los equipos con los que están familiarizadas la mayoría de las empresas de servicios públicos del sector energético del gas natural convencional. Este concepto facilita especialmente el mantenimiento sin necesidad de utillaje o procesos especiales. Su eficacia está ampliamente probada, y la experiencia muestra que puede construirse en un plazo de dos años o menos.

ADAPTACIÓN Y FLEXIBILIDAD PARA INCORPORAR EL FUNCIONAMIENTO DE LA COGENERACIÓN

El concepto de ciclo combinado se caracteriza por un punto de funcionamiento optimizado bien definido. Las desviaciones de ese punto conducen rápidamente a una disminución del rendimiento, y por ello son poco flexibles para adaptarse a los modos de cogeneración, debido a que cambian, a veces de forma drástica, los parámetros de funcionamiento. Cuando el concepto se desvía del punto de funcionamiento normal, su eficiencia desciende, y el funcionamiento puede resultar difícil o es necesario realizar una optimización del diseño. La única excepción digna de mencionar es la extracción calor de nivel bajo del enfriador previo y del enfriador intermedio para aplicaciones como la desalinización o la calefacción urbana, ya que no afecta a la unidad de conversión de energía.

Por otro lado, el ciclo combinado indirecto es bastante flexible para adaptarse a la generación simultánea de electricidad y calor industrial a cualquier nivel entre 800°C y la temperatura ambiente. Creemos que esta característica específica de ANTARES abre nuevos mercados a la energía nuclear.

Si la producción de calor industrial re-

querida es inferior a 550°C, se extrae del circuito de vapor. Esto no supone ninguna novedad, puesto que dichos sistemas ya existen en las plantas convencionales. La extracción se lleva a cabo en distintos puntos de la planta de vapor, en función de la temperatura, presión, calidad del vapor y características del calor industrial. Dicha extracción afecta naturalmente a la producción de electricidad de la planta de vapor, ya que el calor para procesos se extrae en el bucle de vapor normal, generalmente a través del intercambiador de calor. Es importante destacar que los casos de temperatura inferior a 550°C cubren un amplio espectro de necesidades potenciales y que el calor para procesos se extrae del circuito nuclear por medio de al menos tres intercambiadores de calor en serie, mediante los que se establece un aislamiento excelente entre la fuente de calor nuclear y el calor para procesos. Las posibilidades de contaminación del calor para procesos son por tanto muy bajas, lo que puede ser muy importante para algunos de los procesos. El proceso de cogeneración implica una modificación del circuito de vapor para el purgado del vapor, en comparación con una planta

de producción exclusiva de electricidad, pero dichas modificaciones son bien conocidas y no son caras. Sin embargo, no es necesario modificar la fuente de calor nuclear. Nuestro objetivo es mantener la fuente de calor nuclear de la forma más normalizada posible, con los mismos parámetros de funcionamiento para todas las aplicaciones que se utilizarían en el funcionamiento de cogeneración, con el fin de evitar el rediseño y la calificación, caros y tediosos, de componentes específicos.

Si el calor para procesos requeridos oscila entre los 800°C y 550°C, debe extraerse del circuito de gas. Estos usos no son frecuentes y tienen que estudiarse de forma específica. En cualquier caso, tenemos previsto mantener el ciclo de vapor inferior, para que los parámetros de funcionamiento de la fuente de calor industrial no resulten afectados.

Los planes de cogeneración pueden permitir un uso sumamente eficiente del calor nuclear. Por ejemplo, un estudio de extracción de calor a 310°C para producir vapor industrial al 10 MPa (adecuado, por ejemplo, para la inyección en yacimientos de petróleo pesado para permitir la extracción), mientras que se

Potencia del reactor	600 MWt
Temperatura de salida del reactor	850° C
Temperatura de entrada del reactor	355° C
Caudal del refrigerante del circuito primario	240 kg/s
Presión del refrigerante del circuito primario	5,5 MPa
Material de la vasija del reactor	9 Cr – 1 Mo o SA 508
Configuración del núcleo	102 Columnas, 10 bloques de altura
Tipo de partículas de combustible	Recubrimiento SiC Núcleo UCO o UO ₂
Referencia de temperatura máxima del combustible en funcionamiento	1300° C
Referencia de temperatura del combustible pico de accidente	1600° C
Diseño de IHX	Compacto
Carga de calor nominal de IHX	608 MWt
Eficacia de IHX	90 %
Temperatura de entrada del circuito primario de IHX	850° C
Temperatura de salida de IHX	350° C
Fluido secundario	Mezcla nitrógeno / helio
Temperatura de salida del circuito secundario de IHX	800° C
Temperatura de entrada del circuito secundario de IHX	300° C
Caudal de refrigerante del circuito secundario	614 kg/s
Presión del refrigerante del circuito secundario	5,5 MPa

Tabla 2. Parámetros aproximados del diseño de planta.

utiliza la energía restante para producir electricidad, ha demostrado la utilidad del 80% del calor nuclear.

EL IHX

Como ya se ha indicado, el IHX es el único componente realmente nuevo, ya que no existen equipos similares que se ajusten a nuestras especificaciones.

Hay ejemplos de equipos similares, pero con índices de transferencia de calor inferiores. Entre los ejemplos cabe citar el intercambiador de calor HTTR y el IHX de 10 MWth, desarrollado en Alemania en el contexto del programa PNP. Se trata en ambos casos de unidades de intercambiadores de calor de tubo que funcionan hasta los 950°C.

Los intercambiadores de calor de tubo son una opción para nuestra aplicación, ya que la experiencia alemana es una buena referencia inicial. Teniendo en cuenta nuestra necesidad de transferencia de calor de 600 MWth, se está estudiando la posibilidad de utilizar una versión modernizada más compacta que la del diseño original.

En paralelo al diseño del tubo y al aprovechamiento de las grandes mejoras de los intercambiadores de calor de placas de los últimos 20 años, hemos investigado varios diseños de tipo de placas que presentan más posibilidades de obtención de un modelo más compacto que el diseño de tubo.

Los requisitos de nuestro IHX son distintos, aunque son similares en cuanto a dificultad a los de los recuperadores de los diseños de ciclo directo. Aunque necesitamos un funcionamiento a mayor temperatura, que limita nuestras opciones de aleación, el funcionamiento normal se caracteriza por una presión equilibrada, mientras que un recuperador presenta una diferencia de presión en funcionamiento normal de más de 4 MPa, que afecta al factor de uso del recuperador, y que también está sujeto a bruscos estados transitorios durante el funcionamiento normal. En conjunto, tanto el IHX como el recuperador plantean un importante reto de diseño.

UN CONCEPTO CAPAZ DE SATISFACER LA MAYORÍA DE LAS NECESIDADES DE PROCESOS

Como demuestran los estudios de usos del calor industrial realizados por el OIEA, la mayoría están en una franja inferior a los 600°C. Hay dos tipos de excepciones:

- Las temperaturas muy alta necesarias para los procesos de gasificación que necesitan bastante más de 1200°C y que son imposibles de alcanzar con una fuente de calor industrial con una grado de seguridad aceptable y una vida útil industrial.
- La generación de hidrógeno que uti-

liza procesos termoquímicos de alta temperatura (~950°C) o la electrolisis a alta temperatura (~900°C). Estas aplicaciones han sido desde hace mucho tiempo la principal justificación del reactor de muy alta temperatura. Ahora se ha demostrado que el proceso termoquímico no funciona tan bien como se había pronosticado y que su eficiencia es baja (trabajo experimental GA-CEA), por lo que dicha justificación ha perdido su vigencia. En cuanto a la electrolisis a alta temperatura (todavía por demostrar), el circuito de transporte de calor entre el reactor y el electrolizador y su funcionamiento son tan caros que el proceso no resulta competitivo con un transporte a temperatura media y calentamiento del vapor eléctrico local en la entrada del electrolizador.

Por consiguiente, parece que el diseño descrito anteriormente se ajusta a la mayoría de las necesidades industriales razonables.

RETOS

No obstante, siguen planteándose algunos retos, como el desarrollo de un modelo de costes del ciclo de vida que demuestre la competitividad económica del concepto del HTR frente a las tecnologías competidoras. El HTR ofrece varias características positivas nuevas desde los puntos de vista de la seguridad y la eficiencia, pero a costa de una menor densidad de energía del núcleo, hasta 15 veces inferior a la del reactor de agua ligera. En consecuencia, debe superar esta característica inherente del diseño con las simplificaciones adecuadas.

La certificación de un concepto industrial pasivo en tiempos recientes no se ha ajustado al proceso real. Para hacer frente al reto económico, la certificación debe reconocer las características específicas del HTR. En este momento esto no está asegurado. Se espera que la tradición de certificación de agua ligera no afecte a la certificación del HTR, aunque la demostración está por ver.

Todavía existen restos técnicos del diseño de la planta en cuanto a la cualificación del combustible industrial con un alto grado de fiabilidad, ya que toda la seguridad del HTR se basa en las características exclusivas de su combustible, pero los trabajos recientes efectuados en Estados Unidos en el marco de la NGNP muestran resultados esperanzadores.

Por último, el comportamiento del material a largo plazo en el entorno del helio, con inclusión de sus impurezas, y el entorno de nitruración del circuito de gas a altas temperatura requieren una cualificación específica.

¿POR QUÉ RETRASAR LA

INTRODUCCIÓN DEL HTR?

El HTR se justificaría principalmente por su generación de calor para procesos en un modo de cogeneración, pero el sector industrial no está preparado para la introducción de procesos nucleares en los parques industriales. Actualmente, el valor de carbono es todavía demasiado bajo para incentivar la localización de plantas nucleares cerca de los usuarios industriales con el fin de evitar la emisión de carbono. La carga de la ubicación de una planta nuclear en un entorno industrial denso se considera demasiado grande y arriesgada desde el punto de vista económico. Obviamente, todavía no se ha construido una planta de ese tipo en ningún país desarrollado.

Naturalmente, estos problemas medioambientales y sociales pueden evolucionar en los próximos años y ofrecer nuevos incentivos para el montaje de un HTR. Estarán fundamentalmente vinculados a las negociaciones relacionadas con el cambio climático y sus posibles efectos.

La limitación de los recursos económicos y humanos también restringirá naturalmente el número de tecnologías de reactores nucleares que se desarrollarán en el mundo. En ese contexto, el HTR compite con los reactores de conversión alta y el reactor reproductor. Actualmente es difícil predecir cual aparecerá primero en el mercado.

CONCLUSIONES

El concepto de HTR de Areva NP se basa en un diseño de bajo riesgo que utiliza principalmente tecnologías convencionales bien contrastadas.

El sistema de conversión de energía de ciclo combinado original que propone Areva NP ofrece una muy alta eficiencia, al menos pareja a los mejores diseños de ciclo Brayton directo, pero sin necesidad de turbomáquinas de nuevo desarrollo, y con mantenimiento fácil de la unidad de generación de energía en un entorno no contaminado.

El concepto también es lo suficientemente flexible como para utilizar una fuente de calor nuclear estándar para aplicaciones de cogeneración que permite el uso de calor efectivo de hasta el 80%.

El diseño conceptual se ha completado, pero el diseño detallado está en espera, ya que los costes actuales del combustible fósil y los incentivos económicos para eliminar el CO₂ en la producción de calor para procesos y de electricidad no bastan para animar a los usuarios industriales a arriesgarse a optar por una fuente de calor industrial. En caso de producirse una evolución del entorno económico del combustible fósil, con un aumento de los costes o la introducción de un impuesto sustancial por emisión de CO₂ (superior a los 50 dólares por tonelada), ANTARES pasaría a la fase del diseño detallado. ■