

Integración de sistemas de lechos de bolas en poligeneración incluyendo eliminación de residuos radiactivos

A. Abánades, C. García, L. Fajardo, A. Escrivá,
A. Pérez-Navarro y J. Rosales

En este artículo se describen brevemente los trabajos que se están llevando a cabo por investigadores de la UPM, UPV y el INSTEC de cara a evaluar la viabilidad técnica y económica de la utilización de sistemas nucleares subcríticos de tecnología basada en combustible cerámico tipo TRISO orientados a la transmutación de residuos radiactivos y generación de hidrógeno.

This article briefly describes the work being carried out by researchers at the UPM, UPV and INSTEC towards assessing the technical and economic feasibility of using subcritical nuclear systems technology based on ceramic fuel TRISO type oriented transmutation of radioactive waste and generation of hydrogen.

INTRODUCCIÓN

La sociedad actual se enfrenta a unos de los retos tecnológicos más importantes en la mejora de todos los procesos de obtención y utilización final de energía desde el punto de vista de su sostenibilidad a largo plazo. Esos criterios de mejora van desde el mejor aprovechamiento de la fuente primaria de energía en cada uno de los tipos disponibles, como un mejor rendimiento en las transformaciones necesarias, así como en una minimización de su impacto sobre el medio ambiente. El análisis de cada uno de los procesos energéticos lleva a la reflexión de considerar la sinergia y complementariedad entre ellos llegando a la conclusión de que se pueden lograr avances en cada de los puntos relacionados con la sostenibilidad (rendimiento, impacto, beneficio) a través de la integración de algunos de ellos. De ahí surge el concepto de poligeneración, del que su más conocido ejemplo es la cogeneración, en la que se produce electricidad y calor para su aprovechamiento en algún otro proceso industrial. Añadiendo más aplicaciones se tiene, por ejemplo, la trigeneración, en la que se producen electricidad, calor industrial, y frío para climatización. La integración de aplicaciones energéticas provoca un mejor aprovechamiento del recurso energético primario y un beneficio económico respecto a la generación de cada vector por separado, unido al indudable beneficio

ambiental que se obtienen de la conjunción de las ventajas anteriores.

Entre los posibles vectores que se pueden añadir en un contexto de poligeneración energética se encuentra el hidrógeno. El hidrógeno se contempla como vector energético para sustituir al petróleo y otros combustibles fósiles en un escenario energético sostenible [1]. Dicha sustitución permitiría reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y alcanzar los objetivos del compromiso de Kyoto [2] y además, en el caso de los países sin fuentes propias de combustibles fósiles, reducir su dependencia exterior en el suministro de estas fuentes de energía primaria [3].

No obstante, la generación de hidrógeno necesaria para alcanzar el objetivo de sustituir la aportación de los combustibles fósiles, sobre todo en su aplicación al transporte, requieren el desarrollo de fuentes masivas de energía térmica o de electricidad que han de ser sostenibles o libres de emisiones atmosféricas [4]. En ese contexto, la energía de origen nuclear puede aportar una fuente masiva de energía para una transición hacia una economía basada en la utilización de hidrógeno por sus reducidas emisiones de gases de efecto invernadero, pero debe mejorar en algunos aspectos para lograr una mayor sostenibilidad a largo plazo, como un mejor aprovechamiento del combustible y una menor producción de residuos radiactivos. Todas estas ideas se están teniendo en cuenta en las propuestas de

ALBERTO ABÁDANES,

es doctor ingeniero industrial, especialidad Técnicas Energéticas por la ETSII de Madrid. Profesor Titular Interino del Departamento de Ingeniería Energética y Fluidomecánica de la ETSII de la Universidad Politécnica de Madrid. Trabaja en la transmutación de residuos radiactivos desde el comienzo de su carrera, iniciada en el CERN en el equipo del Premio Nobel prof. Rubia, y en el desarrollo de actividades de I+D en el campo de las aplicaciones termosolares para la generación de electricidad y producción de hidrógeno.

CARLOS RAFAEL GARCÍA,

Trabajó en la inversión de la Central Electronuclear de Juraguá en el período 1981-1983 preparándose como físico calculista de reactores nucleares. Desde el año 1983 trabaja como profesor en el actual Instituto Superior de Tecnología y Ciencias Aplicadas de la Habana. Actualmente es vicedecano docente de la Facultad de Ciencias y Tecnología Nucleares.

LAURA FAJARDO,

es ingeniera en Tecnologías Nucleares y Energéticas por el Instituto Superior de Tecnología y Ciencias Aplicadas (InSTEC). Profesora de Metodos Numericos y Modelacion Computacional en el InSTEC y estudiante de Doctorado en Tecnologías Energéticas del InSTEC en conjunto con la Universidad Politécnica de Valencia (UPV).

ÁNGEL PÉREZ-NAVARRO,

es doctor en Ciencias Físicas por la Universidad Complutense de Madrid. Director del Instituto de Ingeniería de la Energía de la Universidad Politécnica de Valencia, después de una dilatada carrera profesional como director de LAESA (Laboratorio del Amplificador de Energía), vicerrector de Investigación de la Universidad Alfonso X El Sabio, y director de la División de Fusión del CIEMAT.

JESÚS ROSALES,

Es ingeniero en Instalaciones Energéticas y Nucleares (2008). Está cursando los estudios correspondientes al doctorado en tecnologías energéticas en conjunto con la UPV en España.

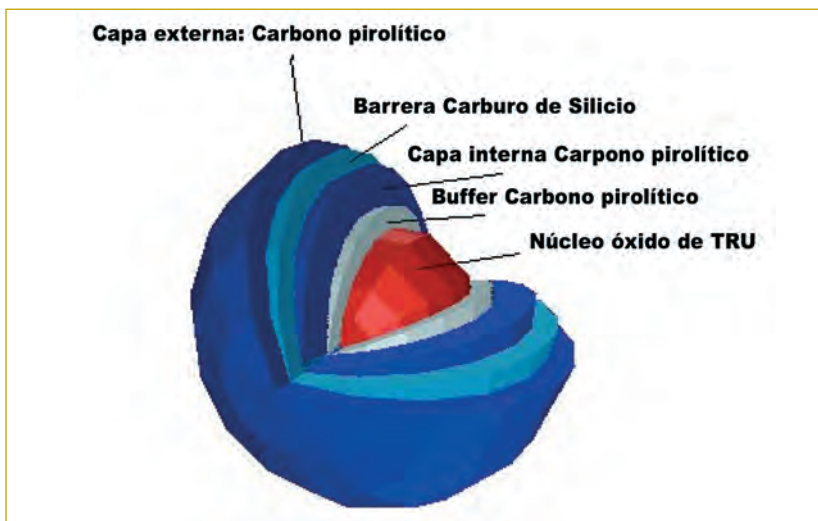


Figura 1: Esquema de particulado TRISO.

desarrollo nuclear a medio y largo plazo en el seno de la Plataforma Tecnológica de Desarrollo Nuclear Sostenible (SNE-TP) [5] y en particular en relación con el desarrollo de reactores de muy alta temperatura en el marco de la Generación IV.

Los sistemas nucleares de alta temperatura que se proponen han de utilizar un diseño de combustible que sea capaz de soportar la operación a las altas temperaturas que se hacen necesarias para procesos como el de producción de hidrógeno. El factor común de todos ellos es la utilización de combustible cerámico basado en el encapsulamiento del combustible nuclear en partículas denominadas TRISO (Figura 1), que se utiliza en prácticamente todos los proyectos como el VHTGR (Very High Temperature Gas Reactor) o el GFR (Gas Fast reactor) en Generación IV [6][7] así como en el PBMR (Pebble Bed Modular Reactor) [8]. Aunque quizá sean éstas las iniciativas más conocidas por el importante participación internacional con la que se desarrollan, existen también otras más regionales de reactores de alta temperatura, algunos adaptados a la generación de hidrógeno, como es el caso del GTHTR japonés [9], o el HTR-PM chino [10].

Algunos de los autores de este artículo llevan trabajando desde hace años en un sistema de la familia de los llamados ADS (Accelerator Driven Systems) basado en un combustible tipo TRISO. Este tipo de sistemas proporciona unas características competitivas para su aplicación en transmutación de residuos radiactivos tal y como lo demuestran conceptos similares que han sido estudiados en diferentes proyectos del programa marco de investigación de la Unión Europea, como es el caso del PDS-XADS [11] o en iniciativas como la de General Atomics en Estados Unidos [12] en las que se proponían sistemas

subcríticos como reactores transmutadores de residuos radiactivos o adaptados a ciclos de combustible abiertos con alto quemado. En esa dirección se movía el estudio de sistemas transmutadores de lecho de bolas que se comenzó a estudiar en la extinta LAESA [13][14], y que se han compilado recientemente [15] para iniciar una colaboración entre la UPM, UPV y el INSTEC cubano, con el objetivo de analizar la viabilidad técnica de su aplicación a escala industrial.

El sistema transmutador de lecho de bolas que se presenta tiene su origen como sistema dedicado para la eliminación de residuos radiactivos, pero que debe evolucionar siguiendo la filosofía de integración para el aprovechamiento de su potencial en otros procesos, como son la generación de electricidad, y de forma más novedosa, en su posible utilización como generador de calor para procesos industriales tales como la producción de hidrógeno, o incluso otros como desalación, o cualquier otro proceso que requiera vapor o calor a alta temperatura.

Este sistema estaría compuesto por un transmutador de lecho de bolas, con su acelerador, fuente de neutrones y núcleo subcrítico, y una serie de instalaciones industriales para el aprovechamiento del calor producido, bien a través de un ciclo termodinámico para electricidad, bien en un ciclo termoquímico para producir hidrógeno, o para cualquier otro proceso industrial que requiera vapor a alta o baja temperatura.

ESQUEMA DE SISTEMA DE POLIGENERACIÓN: ELECTRICIDAD, HIDRÓGENO, CALOR Y COMBUSTIBLE IRRADIADO

Se han propuesto varios sistemas para el tratamiento o reducción de la actividad e inventario del combustible irradiado. La estrategia de desarrollo de estos sistemas debe estar ligada a la concepción

del ciclo de combustible que tenga cada país, de tal forma que la utilización de sistemas de transmutación, ya sea basados en reactores críticos o subcríticos, han de estar integrados en el ciclo de combustible, y sus características finales. En nuestro caso, la estrategia española de ciclo abierto sugiere el estudio de sistemas que tengan como objetivo una eliminación lo más completa posible de residuos radioactivos en un solo paso. El sistema de lecho de bolas está concebido para ello, salvo la etapa de separación y fabricación del combustible cerámico para acondicionar el combustible y posibilitar un alto quemado.

La producción de hidrógeno con calor de origen nuclear es una de las alternativas que se están proponiendo para conseguir el ambicioso objetivo de obtener hidrógeno sin emisiones de gases de efecto invernadero [16]. Algunos de esos proyectos obtienen el hidrógeno mediante electrólisis a alta temperatura [18] o a través de procesos termoquímicos a alta temperatura [17].

Los procesos térmicos de producción de hidrógeno por medios térmicos como el ciclo I-S o la electrólisis a alta temperatura están poco probados a escala industrial, con lo que es probable que una implementación industrial esté sometida a una disponibilidad baja. En ese contexto, es conveniente pensar en la utilización del sistema propuesto junto a otra aplicación industrial que pueda absorber o trabajar de forma complementaria con el ciclo termoquímico, convirtiéndose en un verdadero sistema de poligeneración/polipropósito, con eliminación de residuos, producción de electricidad, producción de hidrógeno y de calor de proceso, en la proporción que sea conveniente de estos tres últimos en función de la optimización del diseño de planta final.

REDUCCIÓN DE INVENTARIO DE RESIDUOS RADIOACTIVOS

Para el cálculo de la neutróica del sistema seleccionado se ha utilizado el código MCNPX versión 2.6e [19] que incorpora un conjunto de nuevas posibilidades para la simulación computacional de transmutadores subcríticos sostenidos por acelerador, ADS. La primera de ellas es la incorporación del módulo LAHET que permite describir la cascada neutrónica producida por el haz de protones y su transporte a altas energías, y de esta forma realizar la simulación integrada de la generación y transporte de protones y neutrones en el blanco de espalación y el ingreso de estos últimos, como fuente de neutrones rápidos, en el núcleo subcrítico del sistema transmutador.

Para el cálculo de la evolución isotópica en el núcleo puede utilizarse la nueva posibilidad de la versión anteriormente

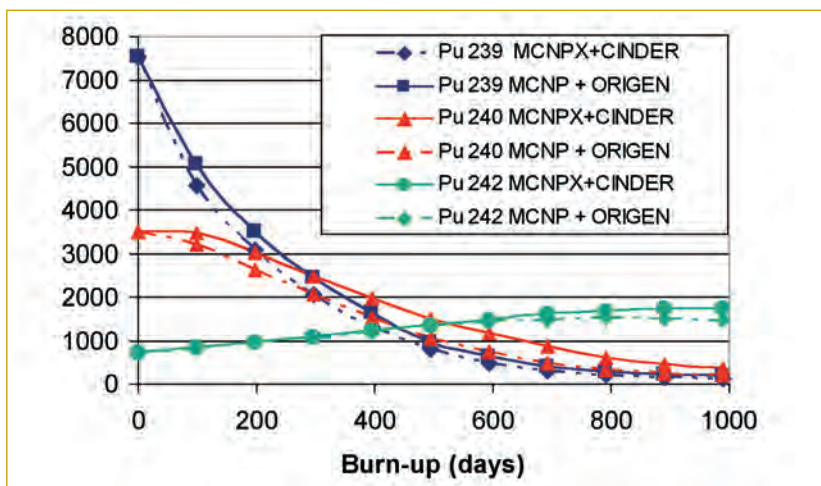


Figura 2: Comparación de modelos de cálculo.

citada de MCNPX que incorpora el código CINDER90 y el MonteBurns. En la actualidad las posibilidades de cálculo de quemado del combustible y de variación de la composición isotópica del código MCNPX están limitadas a problemas de criticidad. Por lo cual en el presente trabajo de modelación los cálculos de quemado se realizaron en el núcleo subcrítico considerando un flujo neutrónico promedio en cada zona material condensado a una velocidad y promediado espacialmente para la distribución de flujo obtenida del problema de autovalores.

El CINDER90 trabaja con una estructura de 63 grupos energéticos, las secciones transversales a 63 grupos se condensan a partir de un espectro genérico, lo cual puede conducir a ciertas discrepancias en el inventario final de isótopos hijos de los productos de fisión. Para evaluar el cálculo con el modelo MCNPX+CINDER 90 descrito, se realizó una comparación interna con los valores obtenidos y publicados en [15] con MCNPX+ORIGEN. El resultado de esa comparación se puede considerar satisfactoria, como lo demuestra la Figura 2 en la que se tiene el parámetro más sensible a los errores de cálculo que se pue-

dan dar en forma de evolución isotópica de los transuránicos más importantes. La composición inicial del combustible utilizado es la descarga de transuránicos de un reactor PWR con 33 MWd/kg U de quemado.

El sistema que se tenía descrito hasta el momento era un prototipo de baja potencia. Para su aplicación industrial a generación de hidrógeno era preciso intentar aumentar la máxima posible la potencia del sistema. Para ello se ha considerado un aumento en la energía del haz de protones, elevándola hasta 1 GeV (originalmente 360 MeV), manteniendo la intensidad máxima en 10 mA, valores que parecen tecnológicamente accesibles en un futuro inmediato, y se han aumentado igualmente las dimensiones del dispositivo, para manteniendo la densidad de potencia promedio alrededor de 7 W/cm³, valor considerado apropiado en diseños anteriores para este tipo de sistemas nucleares de gas. Tratando de mantener las capacidades de transmutación del sistema sin deteriorar los perfiles al aumentar las dimensiones, se consideraron variantes respecto al diseño originado de menor potencia descrito en [15]. La configuración que se ha adoptado por el

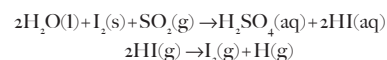
momento para un sistema industrial de este tipo es la descrita en la tabla 1.

El valor del coeficiente de multiplicación mostrado en la tabla 1 se corresponde con el comienzo del primer ciclo con combustible fresco. El aumento de las dimensiones además de modificar la distribución de densidad de potencia y la potencia total también modifica las propiedades multiplicativas del núcleo, es por ello que se ha estudiado la dependencia de las propiedades multiplicativas con el espesor del reflector radial para obtener un diseño que cumpla la condición de seguridad establecida de mantener el valor del coeficiente de multiplicación, aun para la primera carga, por debajo de 0.95.

El análisis neutrónico también nos ha proporcionado un análisis de la radiotoxicidad del combustible irradiado tras su paso por el núcleo del sistema de lecho de bolas. Se observa como se logra reducir la toxicidad a largo plazo en un orden de magnitud, como se observa en la figura 3.

GENERACIÓN DE HIDRÓGENO

El sistema de generación de hidrógeno estaría basado en el ciclo termoquímico I-S, concebido en los años 70 por General Atomic. En este proceso se cuenta con una serie de reacciones básicas, que son:



en donde la descomposición de ácido sulfúrico es la más restrictiva desde el punto de vista térmico, puesto que ha de producirse a una temperatura de unos 870°C, lo que implica alcanzar temperaturas de salida del refrigerante del sistema al que se acople del orden de 950°C, que en nuestro caso es Helio. Atendiendo a los parámetros de diseño de nuestro sistema de lecho de bolas, suponiendo un incremento de temperatura en el núcleo del reactor de 360°C, el gasto másico de refrigerante es de 48000 kg/hora [13,3 kg/s], para una presión de 7.0 MPa. El diagrama de flujo de este proceso se tiene en la figura 4.

El rendimiento de este proceso ha sido evaluada por diferentes autores, estando comprendida entre el 57 [20] y el 51[21] % a escala laboratorio, siendo una buena estimación del rendimiento industrial de este proceso entre el 34 y el 56 % [22]. En nuestro caso hemos asumido un valor intermedio del 44 %, lo que lleva a una producción de 2,68 moles/s (5,4 kg/s), por cada MW térmico nuclear que se utilice en el proceso.

CONCLUSIONES

Se ha presentado en el presente artículo el estado de desarrollo conceptual de un sistema nuclear que tiene como

Parámetro	Valor
Radio interno (cm)	15,5
Radio externo (cm)	125,75
Altura (cm)	293,94
Volumen total (m ³)	14,38
Volumen combustible (m ³)*	10,64
Número de bolas	94092
Keff	0.9203
Potencia nominal	100

(*) Asumiendo una disposición de bolas de combustible al tresbolillo con un empaquetamiento de 0,74

Tabla 1: Configuración del núcleo del lecho de bolas de 100 MWt.

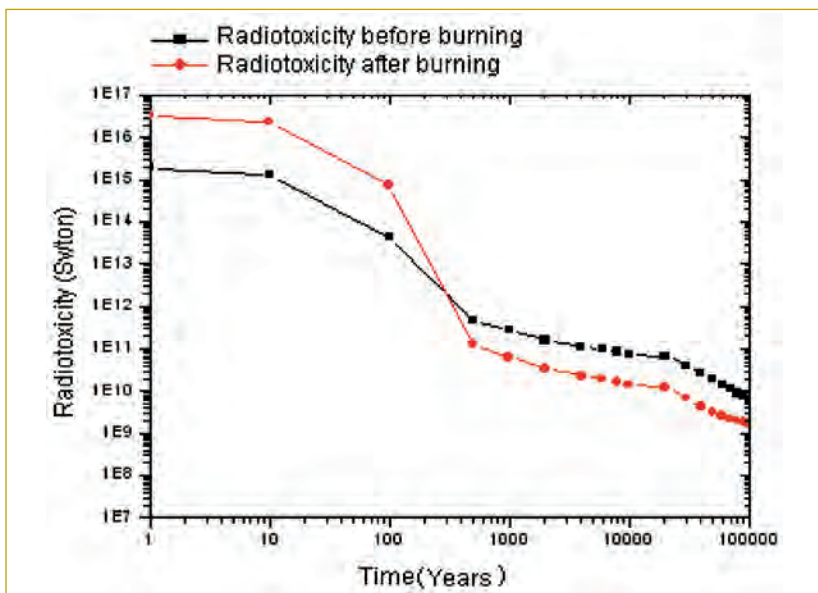


Figura 3: Radiotoxicidad a largo plazo del combustible irradiado tras su paso por el sistema de lecho de bolas.

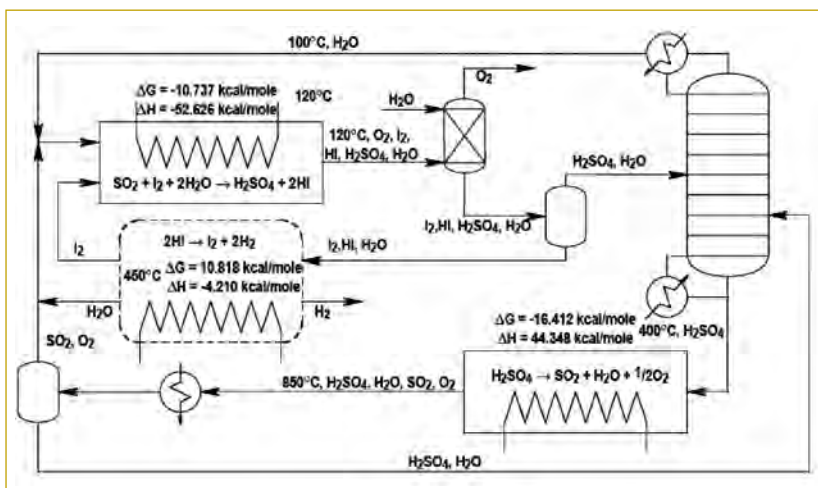


Figura 4: Diagrama de flujo del ciclo I-S.

origen su aplicación a la eliminación de residuos radiactivos, pero que tiene potencial para su integración en procesos de alta temperatura, bien sea para producir electricidad con alto rendimiento, bien para producción de hidrógeno, mediante el acoplamiento de un ciclo termoquímico, bien para cualquier otro proceso industrial. Con este sistema se podría integrar un sistema nuclear con la generación muy reducida de residuos radiactivo, lográndose un mejor aprovechamiento de la energía primaria de origen nuclear.

REFERENCIAS

- [1] S.S. Penner. "Steps toward the hydrogen economy". Energy vol. 31, pp. 33-43, 2006.
- [2] Kyoto protocol web site: http://unfccc.int/kyoto_protocol/items/2830.php
- [3] Commission of the European Communities, "A European Strategy for Sustainable, Competitive and Secure Energy", COM 105, 2006
- [4] A. Midilli, I. Dincer. 'Ket strategies of hydrogen energy systems for sustainability', International Journal of Hydrogen Energy 32 (2007) 511-524
- [5] www.snetp.eu
- [6] Frois, B., 2005. 'Advances in nuclear energy'. Nucl. Phys. A 752, 611c-622c.
- [7] Hejzlar P. Pope M.J., Williams W.C. & Driscoll M.J. 'Gas cooled fast reactor for generation IV service' Progress in Nuclear Energy, 47, 1-4. pp 271-282 (2005)
- [8] Koster, A., Matzner, H.D., Nicholsi, D.R., 2003. PBMR design for the future. Nucl. Eng. Des. 222, 231-245.
- [9] K. Kunitomi, X. Yan, S. Shiozawa, N. Fujimoto. 'GTHTR300C for hydrogen cogeneration'. 2nd International Topical Meeting on High Temperature Reactor Technology, Beijing, China, September 22-24, 2004
- [10] Z. Zhang, Z. Wu, Y. Su, F. Li. 'Design aspects of the Chinese modular high-temperature gas-cooled reactor HTR-PM'. Nuclear Engineering and Design 236 (2006) 485-490.
- [11] Carlucci B., Anzieu P. 'Proposal for a gas-cooled ADS Demonstrator'
- [12] Rodriguez C, and Baxter A: "Transmutation of Nuclear Waste Using Gas-Cooled Reactor Technologies". Invited Paper, ICON 8, Thermal Hydraulics-Part B, April 2-6, 2000, Baltimore, MD USA.
- [13] M.P. Gimeno, A. Abánades, A. Castro, D. Iñiguez, A. Pérez-Navarro. Ponencia 23A-08 en la XXVI Reunión Anual de la S.N.E.. León, 6-X-00. "Análisis del sistema de refrigeración de un transmutador de lecho de bolas"
- [14] D. Iñiguez, A. Abánades, A. Castro, M.P. Gimeno, M. López, A. Pérez-Navarro. Ponencia 9B-09 en la XXVI Reunión Anual de la S.N.E.. León, 5-X-00. "Reducción de la radiactividad a largo plazo mediante un transmutador de lecho de bolas de grafito"
- [15] A. Abánades and A. Pérez-Navarro. "Engineering design studies for the transmutation of nuclear wastes with a gas-cooled pebble-bed ADS". Nuclear Engineering and Design, 237 (2007) 325-333
- [16] K. Verfondern and W. Von Lensa. 'Past and present research in Europe on the production of nuclear Hydrogen with HTGR'. Progress in Nuclear Energy, 47 (2005) 472-483
- [17] E.A. Harvego et al. 'An evaluation of reactor cooling and coupled hydrogen production processes using the modular helium reactor'. Nuclear Engineering and Design 236 (2006) 1481-1489
- [18] V. Utgikar and T. Thiesen. 'Life cycle assessment of high temperature electrolysis for hydrogen production via nuclear energy', International Journal of Hydrogen Energy 31 (2006) 939-944.
- [19] Gregg McKinney et al. "MCNPX 2.6x features (2006-2007)" LA-UR-07-2053. Los Alamos National Laboratory 2007.
- [20] Kasahara S, Kubo S, Hino R, Onuki K, Nomura M, Nakao SI. Flowsheet study of the thermochemical water-splitting iodine-sulfur process for effective hydrogen production. Int. J. Hydrogen Energy 2007;32:489-96
- [21] Goldstein S, Borgard JM, Vitart X. Upper bound and best estimate of the efficiency of the iodine sulphur cycle. Int. J. Hydrogen Energy 2005;30:619-26.
- [22] Ozturk IT, Hammache A, Bilgen E. An improved process for H2SO4 decomposition step of the sulfur-iodine cycle. Energy Conv. Manag. 1995;36(1):11-21. ■