

Nuevas tecnologías para una energía nuclear sostenibles y su efecto en la gestión de residuos radiactivos

E.M. González Romero

El probable incremento y distribución geográfica, a nivel mundial, del uso de la energía nuclear para producir electricidad durante al menos un siglo, substituyendo parcialmente a los combustibles fósiles, ha fomentado el desarrollo de tecnologías que aumenten sus sostenibilidad a largo plazo. Éstas incluyen sistemas nucleares de espectro rápido combinados con ciclos cerrados del combustible que combinados pueden contribuir a una significativa reducción de los residuos finales de alta actividad. En particular, la Separación y Transmutación de los actínidos permitirían la reducción de la radiotoxicidad, material fisible y carga térmica de los residuos finales, facilitando su gestión definitiva.

The probable worldwide increase and distribution of nuclear energy for electricity generation, replacing partially fossil fuels, is promoting the development of technologies that foster its long-term sustainability. Fast neutron systems, combined with closed fuel cycles, are the key elements for the sustainability. When combined, they can provide a significant reduction on the final high level wastes of the nuclear generation. In particular, Partitioning and Transmutation of actinides would allow the reduction of the nuclear wastes radiotoxicity, their content in fissile material and the heat load to the repository, easing their final management.



ENRIQUE M. GONZÁLEZ ROMERO, es doctor en Ciencias Físicas por la Universidad Complutense de Madrid. Desde 1980 ha participado en equipos del CIEMAT en múltiples experimentos de física nuclear y de partículas. A partir del año 1993, sus actividades se centran en la investigación del ciclo de combustible nuclear, incluyendo ciclos avanzados del combustible, transmutación, reactores avanzados y ADS, datos nucleares e instrumentación avanzada en reactores experimentales. En la actualidad es el director de la División de Fisión Nuclear del CIEMAT.

PANORAMA INTERNACIONAL HACIA UNA ENERGÍA NUCLEAR SOSTENIBLE

El reciente desarrollo de las economías emergentes ha incrementado la demanda de combustibles fósiles contribuyendo a la elevación progresiva y a la inestabilidad de su precio. Esta situación, combinada con la constatación del calentamiento global del planeta, ha convencido a muchos países de la necesidad de reducir drásticamente la utilización de estos combustibles fósiles en la generación de electricidad. Para substituirlos será necesario recurrir a una combinación de energía nuclear y energías renovables, como fuentes que no producen gases de efecto invernadero, y mientras estas fuentes consigan mantener un coste de generación competitivo. Esta voluntad se observa tanto en países desarrollados y con un parque nuclear ya establecido (Francia, Finlandia, Rusia, EEUU, ...) como en las grandes potencias emergentes (China e India) y muchos países en desarrollo de distinta capacidad económica.

Como consecuencia de estas tendencias es cada vez más frecuente la preparación de planes para la utilización de la energía nuclear (de fisión) en periodos de más de un siglo. Esta escala temporal, la historia de sobreexplotaciones industriales del siglo XX y la visión de una ecología global como reacción a los usos del pasado, ponen de manifiesto la necesidad de incorporar al ciclo del combustible nuclear los componentes necesarios para garantizar sus sostenibilidad a largo plazo.

Esta sostenibilidad exige la disponibilidad de materias primas (combustible); el mantenimiento en todas las tecnologías de la seguridad en la operación y la no proliferación exigidos por la aceptación pública; la competitividad económica con el resto de fuentes energéticas dentro de regulaciones existentes en cada momento, y también la minimización del impacto ambiental (fundamentalmente los residuos radiactivos de vida larga).

En los foros internacionales, se propone combinar varias tecnologías en función del tiempo, para alcanzar estos objetivos. A corto plazo, y mientras no

haya escasez o problemas de suministro de uranio, la competitividad económica y la seguridad favorecerán el predominio de las tecnologías de reactores térmicos similares a los actualmente en operación. La disponibilidad de estos reactores podrá conseguirse por la extensión de vida de los reactores actuales o por la construcción de nuevas unidades de conceptos avanzados como los de las generaciones III y III+ (EPR, AP1000, ABWR,...).

Sin embargo, estos reactores, por sí solos, no pueden considerarse sostenibles a largo plazo, y la optimización de los recursos naturales (Uranio o Torio para los combustibles) y la minimización de los residuos de vida larga, requerirán la utilización, en el futuro, de reactores y/o ADS de espectro neutrónico rápido combinados con un ciclo cerrado, que recicle los combustibles usados. En este reproceso se incluyen tanto los materiales útiles por su contenido energético (U, Pu, Th) como los que contribuyen a un posible impacto en el medio ambiente (actínidos minoritarios), tanto de los futuros sistemas nucleares como de los



Figura 1: Elementos de sostenibilidad y líneas de I+D propuestas por la SNETP [2].

acumulados durante la explotación de los reactores térmicos (que de esta forma alcanzan su sostenibilidad). La fecha de la transición en la predominancia de tecnologías es muy incierta y se discuten fechas entre el 2040 y el 2100.

Aunque estas opciones tecnológicas tienen claras ventajas y es más que probable su viabilidad técnica, no sin importantes retos para mantener los actuales niveles de seguridad y competitividad económica, su posible uso generalizado en un gran número de países despierta dudas sobre las garantías de no proliferación de materiales estratégicos. Por este motivo, tanto las agencias internacionales, OIEA y AEN/OCDE, como algunas de las potencias nucleares, EEUU y Rusia, están evaluando conceptos regionales y globales para un nuevo paradigma del ciclo del combustible nuclear. Dentro de los servicios que podrían compartirse/centralizarse a nivel regional se incluyen operaciones como el enriquecimiento del uranio, el reprocesado de los combustibles usados, su transmutación, e incluso, la gestión y almacenamiento de los residuos finales.

Estos principios de sostenibilidad han sido recogidos por la Plataforma Europea para la Sostenibilidad de la Energía Nuclear, SNETP, en su documento de visión [1] y en su agenda estratégica de investigación [2]. La SNETP resume los principios de la sostenibilidad en la figura 1, donde además de los ya mencionados se incluye la diversificación de usos de la energía nuclear por ejemplo para la producción de combustibles sintéticos o de H₂.

Adicionalmente e independientemente de la decisión política de la continuación o de su reducción, todos los países que utilizan la energía nuclear para ge-

nerar electricidad están haciendo frente a la cuestión de la gestión final de su combustible nuclear gastado y de otros residuos radioactivos de alta actividad, RRAA. El almacenamiento en formaciones geológicas profundas estables ha demostrado ser una solución técnica viable para el combustible gastado o los RRAA ya producidos y futuros. No obstante esta solución no se ha puesto en operación completamente en ningún país, aunque Finlandia, Suecia, Francia y los EE.UU. han aprobado o están cerca de aprobar su construcción e identificado, al menos, un

emplazamiento para la instalación. Sin embargo, la mayoría de los países con energía nuclear todavía no han seleccionado ningún emplazamiento. De hecho, un Eurobarometer especial de 2008 [3] demuestra que más el 70% de la población de la EU27 cree que "no hay manera segura de conseguir librarse de los residuos radioactivos de alta actividad" y solamente el 43% de los 79% que tienen una opinión, ha entendido que "el almacenamiento subterráneo profundo representa la solución más apropiada para la gestión a largo plazo los residuos radioactivos de alta actividad". Finalmente el estudio demuestra que los miedos principales son a "los posibles efectos sobre el medio ambiente y la salud" (el 51%) y "el riesgo de escapes radiactivos mientras que el emplazamiento esté en funcionamiento" (el 30%).

Hasta el momento la mayoría de los países con energía nuclear han definido como su solución de referencia el almacenamiento directo de los combustibles usados, eventualmente después de un cierto almacenamiento interino cerca de superficie de 40-150 años. Sin embargo, las actuales circunstancias hacen reconsiderar a múltiples países esta decisión y evaluar posibles ciclos avanzados del combustible nuclear diseñados para mejorar su sostenibilidad. En particular los ciclos cerrados que incluyen técnicas de Separación y Transmutación, que al reciclar los combustibles usados convierten los residuos de hoy en combustibles de mañana.

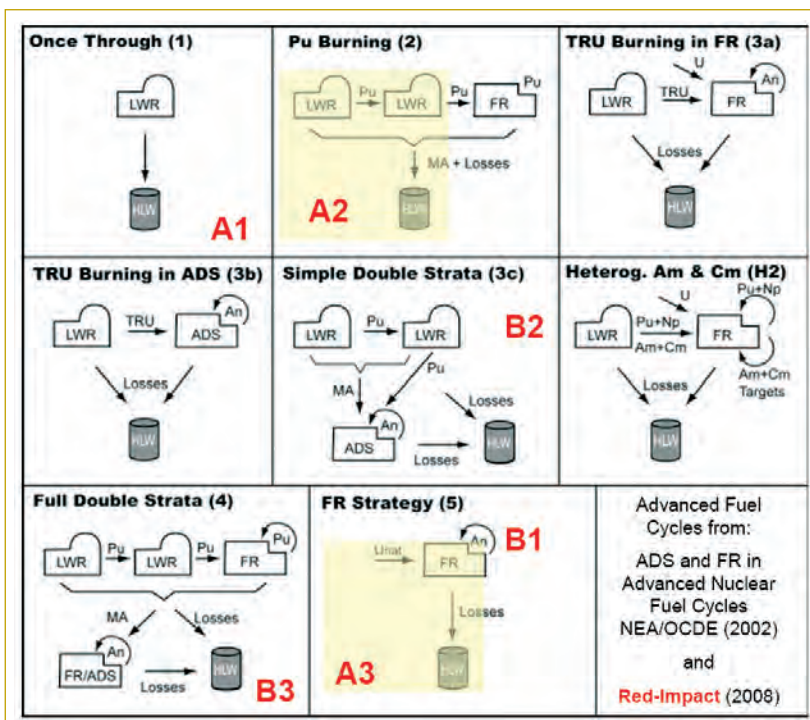


Figura 2: Escenarios avanzados de WPPT/AEN[4] y RED-IMPACT [5].

OPCIONES PARA LOS CICLOS AVANZADOS

Dentro de esta situación general se consideran muchas variantes para los ciclos avanzados en función de las tecnologías desplegadas en cada país y de sus objetivos de crecimiento o reducción de la potencia nuclear instalada a lo largo del tiempo. Llamamos escenario a cada una de las posibles combinaciones de los elementos del ciclo de combustible. La figura 2 muestra un conjunto de escenarios representativo de las principales tendencias en estudio. La figura ha sido preparada por el proyecto europeo PATEROS en base a los ciclos estudiados en el WPPT/AEN (OCDE) [4] y el subconjunto seleccionado por el proyecto europeo RED-IMPACT [5].

Según muestra la figura, RED-IMPACT, después de un inventario completo de las instalaciones del ciclo del combustible nuclear en Europa actuales y previstos, selecciono tres "escenarios industriales", por su viabilidad industrial a muy corto plazo: Reactores de agua ligera, LWR, con almacenamiento directo (A1- caso de referencia), mono-reciclaje de combustible MOX en LWR (A2), y multi-reciclaje de plutonio en reactores rápidos de sodio (A3).

Además, se definieron otros tres "escenarios innovadores" en los que se incluye el multi-reciclaje del plutonio y los actínidos minoritarios (A.M.) y el uso de tecnologías avanzadas de reprocesamiento: Reactores de neutrones rápidos (FR) de Gen IV (B1), Doble Strata simple con LWR y ADS (B2), y, en Doble Strata ampliado con FR, LWR y ADS (B3).

Entre estos escenarios los hay que transmutan todos los elementos transuránicos, TRU, y los que sólo reciclan Pu (2), como en el ciclo cerrado simple. Por otra parte, podemos identificar escenarios que se basan en un solo strata, más o menos complejo, (3a, 3b y 5), donde la transmutación y la generación de electricidad se hace en los mismos reactores, y escenarios en doble strata (3c y 4) cuando la generación de electricidad se realiza en los reactores con combustible limpio y fresco (sólo U y Pu) y hay un pequeño número de sistemas dedicados a la transmutación de los actínidos minoritarios, además del Pu restante. Otro elemento importante es la combinación de los sistemas con espectro de neutrones rápido y térmico, y la selección de reactores críticos o ADS subcríticos para la transmutación de A.M. o TRU. Por último, también se contemplan las opciones para la transmutación de los actínidos minoritarios: "homogénea" dentro de los combustibles de los reactores o "heterogénea" en elementos específicos para su transmutación (H2).

Otro aspecto importante en la evaluación de estos escenarios es el proceso de transición desde la situación actual hasta la situación en equilibrio asintótico. Este proceso puede ser muy lento, extendiéndose varias décadas y las limitaciones durante el proceso, disponibilidad de materiales (Pu, A.M.) para el combustible de arranque de nuevos reactores, la máxima capacidad de reprocesado instalada, la fecha de disponibilidad de las distintas tecnologías (FR, ADS, reprocesado avanzado), o los máximos inventarios de diferentes isótopos en los correspondientes almacenes temporales podrían limitar la viabilidad y los beneficios de estos ciclos avanzados.

Por otra parte, la posibilidad de compartir tecnologías e instalaciones entre países en los escenarios regionales estudiados por la AEN/OCDE [6], podría facilitar la utilización de estas tecnologías avanzadas a países con un parque nuclear modesto, reduciendo el impacto de los costes de construcción de las nuevas infraestructuras al utilizar las de otro país con mayor flota nuclear (sistemas de

reprocesado de combustibles o reactores transmutadores) o compartiéndolas entre varios países de talla reducida (sistemas transmutadores, almacenamientos temporales o geológicos). Adicionalmente las soluciones regionales, introducen una importante flexibilidad en el ciclo y permite reducir drásticamente el tiempo necesario para transmutar/gestionar los residuos de alta actividad de un país en fase de reducción de la potencia nuclear instalada.

Finalmente todos estos estudios indican que con las tecnologías actualmente en consideración, aparecen tres conceptos básicos para el futuro a largo plazo de la energía nuclear.

i) Un gran parque de reactores rápidos, isogeneradores o reproductores, que producen, al menos, tanto material fisil como consumen en forma de Pu (eventualmente ^{233}U) y solo necesitan abastecerse de uranio empobrecido. Se discuten varias tecnologías para este reactor rápido, pero fundamentalmente se hace referencia a los tres conceptos rápidos de Gen IV: refrigerados por Sodio (SFR), aleaciones de Plomo o Gas. De entre estos tres, el SFR está recibiendo mayor prioridad por la experiencia desarrollada internacionalmente en Francia (Phenix y SuperPhenix), Reino Unido (PFR), Alemania (KNK 2), EEUU (EBR II), Rusia (BN600), Japón (Monju) y otros. Además tanto China como India tienen importantes programas para el desarrollo de SFRs. Versiones avanzadas de estos reactores podrían combinar el uso del Pu para producir electricidad, con la transmutación de actínidos minoritarios, aunque la fracción de A.M. en el combustible estaría limitado a unos pocos por ciento, por los parámetros de seguridad de la planta. Francia tiene como objetivo desarrollar un prototipo avanzado de SFR para el 2020, dentro de una Iniciativa Industrial Europea, apoyada por la UE. En este tipo de ciclo, U, Pu y eventualmente los A.M. serían continuamente reciclados. La tecnología de reprocesado más avanzada, particularmente para combustible en forma de óxidos, son las técnicas acuosas, fundamentalmente versiones avanzadas del PUREX. Entre estos procesos avanzados destaca la secuencia DIAMEX-SANEX para poder separar y gestionar los actínidos minoritarios. Por otra parte, COEXTM y GANEX son dos procesos ideados para mejorar la resistencia a la proliferación, el primero manteniendo U y Pu juntos y el segundo manteniendo todos los elementos transuránicos,

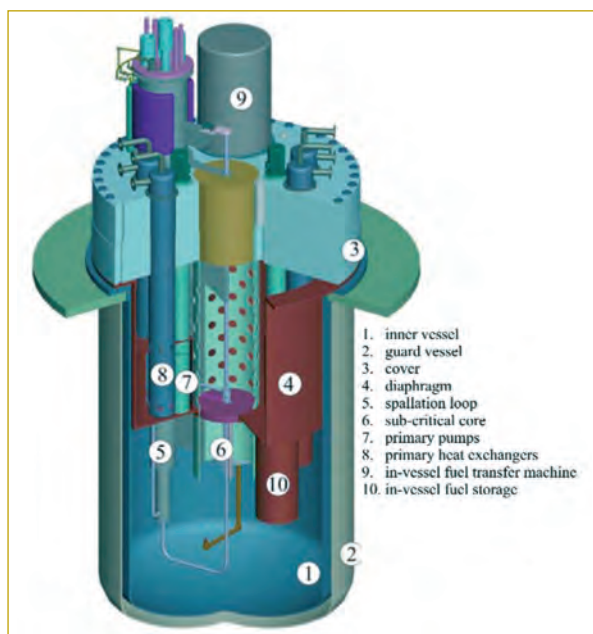


Figura 3: Prototipo Myrrha/XT-ADS [7] de un ADS dedicado a la transmutación de actínidos.

TRU, juntos en la misma corriente. Estos métodos permiten recuperaciones superiores al 99.9% de U y Pu y superiores al 99% del resto de actínidos. Estas mismas tecnologías podrían aplicarse para reutilizar los combustibles de los reactores actuales en los futuros sistemas rápidos. En el caso de combustibles metálicos o en forma de nitruros, se consideran técnicas piro-metalúrgicas para el reproceso.

- 2) Un sistema en Doble Strata, con un primer estrato de reactores dedicados a producir energía, en el que podrían coexistir reactores rápidos reproductores (necesarios) y reactores térmicos (opcionales) con combustibles de U y Pu sin A.M., y un segundo estrato dedicado a la reducción intensiva de los residuos finales (principalmente de los A.M.). Los reactores del primer estrato serían muy parecidos a los reactores actuales o a los rápidos del caso 1, pero usando únicamente uranio y plutonio. Los sistemas subcríticos asistidos por acelerador, ADS [7], figura 3, son el principal candidato para los transmutadores dedicados a la minimización de residuos. Son sistemas nucleares con tecnología de reactor rápido (refrigerados por metal líquido) y acoplados a un acelerador de partículas de alta intensidad. Su subcriticidad ofrece la flexibilidad necesaria para albergar combustibles con muy alto contenido de A.M. (superior al 40%), reduciendo estos isótopos intensivamente.

El reprocesado de los combustibles del primer estrato y de los reactores actuales se realizaría por las técnicas acuosas avanzadas indicadas en el caso 1. El alto contenido en actínidos minoritarios de los combustibles dedicados a la transmutación intensiva, podría generar un calor y nivel de radiólisis incompatibles con estos métodos acuosos. Para estas situaciones se están investigando técnicas piro-metalúrgicas, insensibles a estos fenómenos por desarrollarse en medios de sales fundidas y utilizar métodos electroquímicos o metalúrgicos para la extracción de los actínidos. También en este caso se favorece la extracción conjunta de múltiples actínidos para minimizar el riesgo de proliferación. Aunque menos desarrollados industrialmente que el PUREX, los ensayos de laboratorio demuestran factores de recuperación superiores al 99.9%.

- 3) La eliminación progresiva de la energía nuclear. Aún en este caso, la participación en soluciones regionales de los tipos anteriores (funda-

mentalmente el caso 2) durante el proceso de reducción de potencia instalada, podría permitir minimizar drásticamente los residuos finales, consiguiendo una gran simplificación en su gestión definitiva, con un coste y en un tiempo moderados. Un caso, muy similar y conceptualmente equivalente, correspondería a países que inicien el uso de energía nuclear siguiendo los conceptos de GNEP (Global Nuclear Energy Partnership) [8] o los de alquiler de combustible nuclear, en los que el país suministrador de tecnología y combustible nuclear podría incluir el servicio de reprocesado y gestión definitiva del combustible usado.

OPORTUNIDADES PARA LA GESTIÓN DE LOS RESIDUOS RADIATIVOS

El reciclado de los combustibles nucleares usados los transforma de residuos en bienes útiles reduciendo los

residuos finales. Cuando los combustibles se reciclan de forma continua en el mismo o en varios reactores, este residuo final se limita a los componentes perjudiciales para la fabricación de nuevos combustibles y operación del reactor, los fragmentos de fisión y algunos materiales activados, más las pérdidas en el reprocesado y fabricación. Para los actínidos, estas pérdidas se estiman entre 0.1% y 0.3% del material gestionado por ciclo.

El aprovechamiento del U reprocesado, casi el 99% de la masa de los actínidos en los combustibles usados actuales, permitiría reducir la masa y volumen de los residuos. El reciclado del Plutonio, casi el 90% de los transuránicos, utiliza y elimina la mayor parte del valor energético de los residuos reduciendo drásticamente su interés de proliferación. También reduce en parte la radiotoxicidad y fuente de calor de los residuos. Sin embargo, en su transmutación se generan actínidos minoritarios, en cantidades particular-

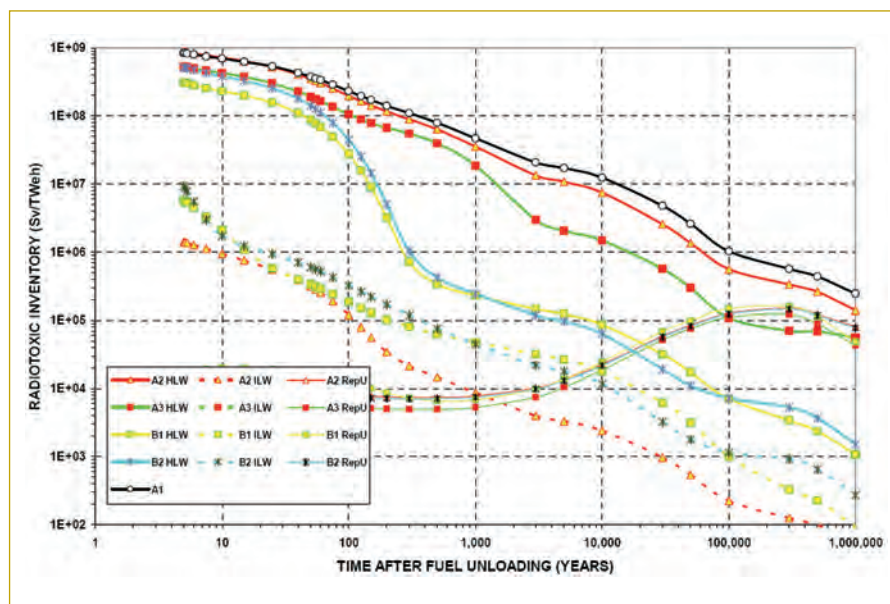


Figura 4: Radiotoxicidad de los residuos finales en los ciclos avanzados estudiados en RED-IMPACT. HLW, ILW y RepU corresponden a los residuos de alta actividad, actividad intermedia y Uranio reprocesado.

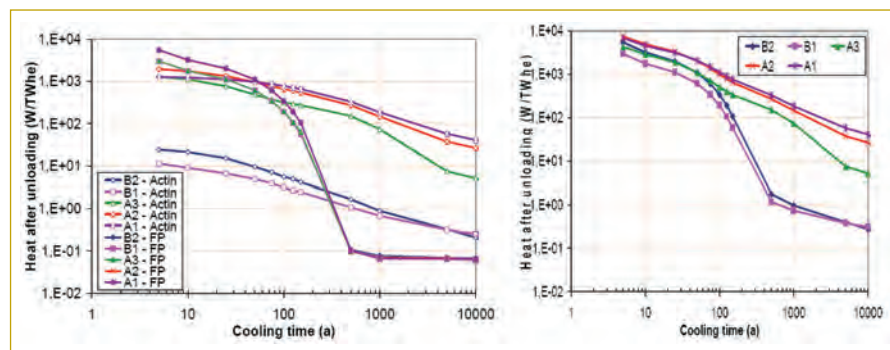


Figura 5: Potencia térmica de los residuos finales en los ciclos de RED-IMPACT.

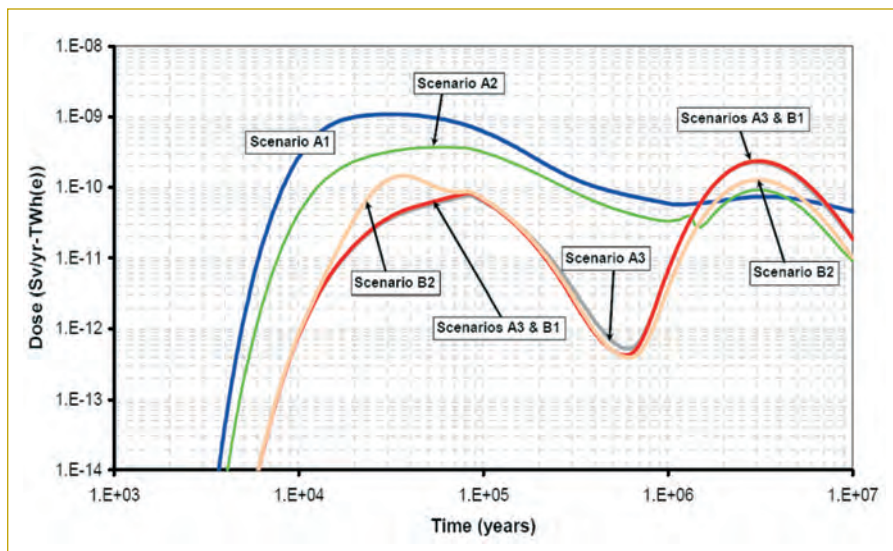


Figura 6: Dosis promedio del grupo crítico en superficie de un AGP en granito a partir de los residuos finales de los ciclos de RED-IMPACT.

mente importantes cuando se transmuta con neutrones térmicos.

El reciclado de los A.M. (adicionalmente al del Pu), permite conseguir reducciones drásticas en la radiotoxicidad y fuente de calor a partir de los 100 años de enfriamiento de los combustibles actuales. Esta fuente de calor es un elemento clave para evaluar la capacidad efectiva del almacén geológico profundo, AGP, de los residuos de alta actividad.

Aunque hay muchos estudios sobre estos efectos, los más completos producidos en la UE, corresponden al proyecto RED-IMPACT. La figura 4 muestra la radiotoxicidad de los residuos finales (de alta actividad – RRAA, y media actividad – RRMA) en los ciclos avanzados estudiados en RED-IMPACT. Se observa que la mayor contribución corresponde en todos los casos a los RRAA, aunque con una contribución significativa del U, si este no se recicla, a partir de los 50000 años. Se observa una reducción modesta en la radiotoxicidad, si solo se recicla el plutonio (A2,A3), que sin embargo alcanza factores de 1/100 respecto al ciclo abierto (A1) a partir de 300 años, si además se reprocesan los actínidos minoritarios (B1,B2). La reducción en radiotoxicidad puede leerse como una reducción en el tiempo característico para la gestión de residuos. Para alcanzar los mismos niveles del ciclo abierto tras un millón de años, se necesitan unos 30000 años si se recicla el Pu y menos de 500 años si se reciclan todos los A.M.

A estas reducciones corresponden valores equivalentes en las masas de los actínidos transuránicos, por lo que la reducción en radiotoxicidad viene

acompañada de reducciones similares en los riesgos de proliferación, y riesgos por los defectos en el comportamiento de las distintas barreras y en el caso de intrusión humana.

La figura 5 ilustra la reducción en la fuente de calor de los residuos finales en los ciclos avanzados de RED-IMPACT. Esta reducción es muy significativa en el periodo entre 100 y 200 años, cuando se reciclan y transmutan el Pu y los actínidos minoritarios. Esto se puede aprovechar para aumentar significativamente la capacidad del AGP de los RRAA finales (para AGPs en formaciones geológicas de arcilla o granito). Este efecto puede multiplicarse, alcanzando mejoras de entre 10 y 50 veces la capacidad original, manteniendo los RRAA entre 150 y 200 años en un almacenamiento temporal, hasta que decaigan radiactivamente las otras fuentes dominantes de calor (^{137}Cs y ^{90}Sr ambos con una vida media de 30 años). El mismo resultado puede conseguirse, separando estos isótopos (^{137}Cs y ^{90}Sr) y manteniéndolos refrigerados y supervisados en un almacén específico durante un periodo de tiempo equivalente, antes de su almacenamiento definitivo en el AGP.

La figura 6 muestra que es posible conseguir estas ventajas en la gestión de los residuos finales sin aumentar la dosis promedio para el grupo crítico en el entorno del AGP. Los resultados de RED-IMPACT para el análisis de comportamiento de AGPs en arcilla y granito muestran dosis en superficie para los residuos de los ciclos avanzados similares o inferiores a los del ciclo abierto.

Finalmente es importante señalar que los ciclos avanzados podrían impli-

car nuevos riesgos las dosis al personal o de proliferación dentro de las nuevas instalaciones del ciclo de combustible. También es necesario minimizar los residuos secundarios (RRMA y RRAA) en las instalaciones de fabricación y reprocesado que podrían reducir los beneficios de estos ciclos. Los amplios programas de I+D en la UE, Japón y EEUU están abordando estas cuestiones y la optimización de los conceptos y tecnologías de los ciclos avanzados para conseguir mejorar la sostenibilidad de la energía nuclear y la gestión de sus residuos, manteniendo unos costes y riesgos aceptables.

REFERENCIAS

- [1] The Sustainable Nuclear Energy Technology Platform. A vision report. SPECIAL REPORT EUR 22842. 2007. www.snetp.eu.
- [2] SNETP Strategic Research Agenda 2009. May 2009. www.snetp.eu
- [3] Attitudes towards radioactive waste (Fieldwork February–March 2008/Publication June 2008). Special Eurobarometer 297 / Wave 69.1 – TNS Opinion & Social. European Commission.
- [4] Accelerator Driven Systems (ADS) and Fast Reactors (FR) in Advanced Nuclear Fuel Cycles – A Comparative Study, OECD/NEA Report (2002). Advanced Nuclear Fuel Cycles and Radioactive Waste Management. NEA 5990, Nuclear Energy Agency, OECD (2006).
- [5] Red-Impact: Impact of Partitioning, Transmutation and Waste Reduction Technologies on the Final Nuclear Waste Disposal. W. von Lenza, R. Nabbi and M. Rossbach (Eds.) (2008). FZ Jülich, Report Vol. 15.
- [6] Nuclear Fuel Cycle Transition Scenario Studies. Status Report. OECD/NEA No. 6194 (2009).
- [7] Description and functional sizing of the Main Components of the Reference Design of the XT-ADS. Deliverable D1.27-D1.28 del IP_EUROTRANS. M. Reale et al. (2008).
- [8] Global Nuclear Energy Partnership: www.gneppartnership.org. ■