

# LA PROBLEMÀTICA: ELS RESIDUS QUE GENERA L'ENERGIA NUCLEAR

Pere Carbonell Mitjans

Dr. en Ciències Físiques, Expert en Radiofísica i Cap del Servei de Protecció Radiològica (SPR) pel Consejo de Seguridad Nuclear

## 1.- ELS RESIDUS RADIOACTIUS

En els medis de comunicació sol ser obviada aquesta qüestió. En els comentaris generals de polítics o d'empreses interessades no es comenta el problema més greu que pesa sobre l'energia nuclear: Es a dir, que amb la generació d'energia no s'acaba el cicle nuclear. Doncs aquí s'inicia la llarga marxa pel tractament i deposició dels residus radioactius, un problema pel qual no hi ha solució a la vista i del qual, tot el que s'apunta com una possible solució s'aproxima a ciència i ficció.

### El procés de retractament del combustible irradiat:

Es basa en la separació química de la massa de matèria radioactiva de molt alta activitat i radiotoxicitat de la resta. Aquesta massa representa menys d'un 10 per cent del volum total dels residus. La separació per volums té per objectiu una millor gestió en el magatzematge. Pels residus més radioactius, els tècnics havien previst inicialment una cobertura envoltant de ceràmica, formant una matriu cristal·lina compacta per passar posteriorment a una deposició, ja definitiva, en profunditat. El temps de consistència prevista de la vitrificació s'havia calculat per uns 300.000 anys, període de temps en el que el plutoni-239, element de referència en el procés, per la seva llarga vida mitja i radiotoxicitat, tardaria en perdre la seva activitat radioactiva. Però la destrucció de l'estructura cristal·lina de l'envolta, a causa de la irradiació alfa i de la calor que generen al desintegrarse els diferents elements transurànics, es molt més ràpida del que se suposava. Segons estudis recents, es creu que aquesta protecció de ceràmica pot durar com a màxim uns 1.400 anys (Ian Farnan; Nature, 445, 190-193; Jan.2007).

### El plutoni-239:

Un dels elements transurànics, conegut per la elevada toxicitat radioactiva és el plutoni-239. La seva toxicitat ve derivada de l'alta transferència lineal d'energia (TLE) en el teixit cel·lular, del ordre de 100 KeV /micra (per formar-se una idea la TLE de la radiació gamma del radiocobalt (Co-60) és de 0.3 KeV /micra) i via de penetració i òrgans crítics en el organisme humà. Els òrgans crítics dels isòtops del plutoni (on preferentment es concentra) són el teixit del pulmó i l'esquelet, però també en els ronyons i en el fetge, segons forma de incorporació; fixat en el organisme el plutoni pot irradiar i provocar danys a cèl·lules que, per mitjà del procés de replicació, poden degenerar, formant tumors malignes. Un subproducte del plutoni és l'americi-241, radioactiu, emissor alfa, igualment radiotòxic actua sobre l'organisme en la seva totalitat.

Actualment l'inventari mundial de plutoni és d'unes 2.000 tones, que en gran part provenen de la generació de energia nuclear, però també de projectes i deixalles d'origen bèl·lic. Quan es parla del plutoni-239 s'ha de tenir present que és tracta d'un dels elements més tòxics actualment coneguts: Unes milionèsimes de gram inhalat poden provocar ja la mort. Pel que fa a la resta d'elements productes de la fissió nuclear, tots presenten una elevada radiotoxicitat, alguns d'alta activitat radioactiva, independentment de que tots els productes de fissió són estranys al organisme.

En tots els processos del cicle del urani es genera una extrema contaminació: Radioactiva d'una part amb formació d'àrids; líquids; emissions sòlides i gasoses i/o química amb abocaments incontrolats i dispersió generalitzada. Es genera despesa pública i problemes

ambientals que hipotequen, a causa de la llarga permanència d'alguns d'ells en el medi, present i futur de persones i espècies.

Per solucionar aquesta problemàtica es contempla preferentment la possibilitat de dipositar a gran profunditat el material de molt alta activitat, la qual cosa implica reprocessar o retractar els residus i continuar amb la dispersió de matèria radioactiva associada a la separació dels elements fissibles, l'urani-235 i el plutoni-239 i reutilització d'aquests elements en el cicle nuclear; sense oblidar la possibilitat d'una aplicació belicista atòmica.

Però la discussió, davant l'alt cost de tot el procés, segueix a un altre nivell: Així, depositar en superfície la totalitat del combustible esgotat (sense reprocessar) és una opció encara no desestimada pels tècnics de l'àmbit nuclear, tot i els dubtes que provoca un confinament del combustible en recipients metàl·lics. Arreu del món, la història del magatzematge de residus radioactius en superfície demostra que no existeix garantia pel que fa a l'aparició de fissures en els recipients a causa la generació de calor de les emissions radioactives; del impacte del flux de neutrons, que fragilitza estructures metàl·liques i del elevat gradient de calor en zones locals. Un procediment, que implica una vigilància de la massa total de residus durant centenars de milers d'anys. Un compromís per a milers de generacions ( per més informació veure la tercera comunicació de la sèrie).

#### La mitjana activitat:

També s'estudia la transmutació d'alguns d'aquests radioelements, per intentar reduir els períodes de semidesintegració a nivells acceptables, aspecte que per altre part pressuposa haver dut a terme prèviament la separació química dels elements més tòxics, és a dir, el seu reprocessament. Però, la transmutació és una especulació de la teoria radioactiva, ja que no existeixen indicis d'èxit ni tan sols a nivell de laboratori.

El tractament del material de «mitjana» activitat, que significaria més del 90 % del combustible extret del nucli del reactor, segueix un raonament tècnic basat en el període de semidesintegració del cesi-137 –que és de trenta anys– l'element de fissió més freqüent en el ventall radioactiu dels productes de fissió que es formen per l'acció de neutrons sobre els nuclis del urani-235 durant el procés de generació energètic-nuclear. Però si tenim en compte que aquest volum de la massa de residus s'ha de vigilar fins que la radioactivitat decreixi a nivells d'una dosi equivalent a la del fons natural (supòsit de la hipòtesi de base) , considerada acceptable, el període de control s'allarga fins als aproximadament tres cents anys, si es deixessin de crear a partir d'ara (més informació en la tercera comunicació).

#### La vida útil d'una CN:

Un tema debatut actualment i que genera un nou debat és si les centrals nuclears, calculades per una vida útil d'entre trenta i quaranta anys, poden sobreviure, sense incrementar el risc d'accident o d'emissions radioactives, en les mateixes condicions inicials, vint o trenta anys més. Sense que, per exemple, no s'acabin deteriorant per una simple qüestió de la resistència dels materials, dos elements no reemplaçables en una central nuclear, però tècnicament molt sensibles en quan a la capacitat de retenció de matèria radioactiva: la cuba o recipient del reactor i el recinte de confinament. Un deteriorament d'aquests dos elements provocaria irremeiablement grans fugites de radioactivitat, en forma de líquids i gasos, fent més probable la possibilitat d'accidents de dimensions de caire catastròfic.

Però aquest aspecte, al igual que el de la gestió dels residus radioactius, no han estat comentats de manera objectiva, amb criteris tècnics, insistim que per la seva importància cal analitzar-ho amb rigor científic.

## 2.- SOBRE EL POTENCIAL RADIOTÒXIC I ALTRES QÜESTIONS RELACIONADES

**"Amb el temps els residus radioactius de les centrals nuclears podrien significar per la humanitat un perill equivalent al dels efectes d'una guerra nuclear"**  
C.F.Barnaby; Science Journal 1970

En una publicació anterior fou comentada la generació de residus radioactius com una conseqüència inevitable de la producció d'energia atòmica a partir de la fissió del urani/plutoni. És el que caracteritza aquesta forma de producció d'energia com una opció bruta, generadora de grans quantitats de residus que, per altre part, són altament tòxics pel ser humà.

La proliferació de centrals atòmiques amb la producció continuada d'elements de llarga vida radioactiva, amb complexes formes de radiotoxicitat humana, segons via de contaminació orgànica; cinètiques biològiques i afinitats químiques específiques dels diferents elements etc. ens traslladaria a un sistema social en el que el risc biològic per les generacions presents i futures podria resultar imprevisible i incalculable.

Actualment, i després de més de 50 anys de producció de residus, encara s'especula sobre com s'han de gestionar:

#### La deposició en profunditat:

No es tracta tan de discutir sobre la despesa econòmica derivada d'enfonsar la matèria radioactiva a gran profunditat, sinó d'evitar tota possibilitat de contacte dels residus amb la biosfera (aigües, etc.). Actualment no es pot encara garantir aquest aspecte (R. Bertran; IFB, Göttingen; 27 Nov. 2006 T.U. Braunschweig).

Una garantia implica evitar a molt llarg termini la contaminació dels aqüífers a causa de fissures en els recipients, formades per l'acció de les radiacions sobre les estructures cristal·lines o metàl·liques. Degut al flux del calor que genera el procés radioactiu i la mateixa acció intercristal·lina de les emissions radioactives s'origina un increment local de la pressió que pot provocar l'explosió del recipient amb una massiva dispersió de matèria radioactiva. Accident en els Urals l'any 1957/1958, documentat per Zhores Medwedjew (Z. Medwedjew; 1979). S'exigeix, per tant, una hermeticitat total: Si penetra aigua en un "cementiri" radioactiu es fàcil de imaginar el passatge de radionúclids a la biosfera.....

La no eficiència en la seva gestió pot resultar criminal: Fins l'any 1976 foren abocats aproximadament 70.000 contenidors amb residus de plutoni i cesi a la costa americana del Pacífic (R. Bertran, IFB; Göttingen); aquesta pràctica fou també utilitzada a Europa, abocant (ignorem la quantitat) en les costes atlàntiques i del Cantàbric. Les fuites de matèria radioactiva contaminen, actualment encara i a pesar de la dilució en les masses oceàniques, espècies marítimes.

En el seu procés de desintegració en altres elements inestables, els residus de transuranians, incrementen la intensitat radioactiva, generant nous elements, efecte que es manifesta per una elevada producció de calor, fissures microscòpiques, dilatacions dels materials i, en un extrem, explosions durant el magatzematge (exemple documentat: quan un isòtop del plutoni es transforma per desintegració en americi).

#### Discussió d'alt nivell sobre el "cementiri" difinitiu:

Els models que simulen canvis i alteracions en els medis geoquímics, on es pretén depositar els residus es basen en algorismes matemàtics, conceptuats per arribar a un resultat determinat, d'acord amb la lògica emprada, però que en cap cas són representatius d'una realitat específica.

Per no pogué realitzar una experimentació de llarga durada, la informació utilitzada (input de gran variabilitat) és fonamenta en criteris d'estabilitat relatius a una experimentació temporal, introduïts en models que simulen comportaments i reaccions en les que és desconeixen importants variables, impossibles de quantificar: comportaments diferenciats de

subproductes radioactius; temps de reacció; efectes a causa de la corrosió; explosions locals per formació de hidrogen; reacció del material envoltant (el cas del plutoni amb l'estructura cristal·lina de la matriu de ceràmica) i altres components d'origen geoquímic amb dinàmiques imprevisibles i variables.

En funció del temps components químics diferenciats formen sistemes de reacció multidinàmics en els que alteracions, en principi, no pronosticables, ja que al marge d'una desintegració específica, inherent, es poden formar també altres substàncies d'elevada toxicitat biològica (dioxines, entre altres), (veure Rolf Bertran, IFB-Göttingen; 2007).

Hi manca informació relativa a la formació de gasos, principalment a causa de processos de corrosió i electròlisi amb possible formació de hidrogen, oxigen etc. junt amb altres gasos; àcid sulfúric i mescles inflamables que poden provocar explosions locals, tal com ja s'esmentat. Tots els informes de seguretat sobre un magatzematge dels residus radioactius, considerat com definitiu, representen tan sols una prova més de la inseguretat associada a les deposicions en profunditat: en cap cas existeix garantia de que es pugui descartar tot contacte amb aigües profundes i biosfera.

#### Sobre la producció d'àrids residuals, radioactius, en la mineria d'urani:

Des del punt de vista econòmic, l'urani és un mineral poc abundant: 2 kg d'urani per to. de mineral brut. Per un reactor nuclear de 1000 MWe s'han de remoure del ordre de 150.000 a 200.000 to. de mineral per any. D'aquest mineral residual és lliberem de la sèrie del urani-238 aproximadament 120g de radi-226, amb un període de semidesintegració ( $T_{1/2}$ ) de 1.600 anys, del qual és desprèn el gas radó-222; 110 g de protactini-231;  $T_{1/2} = 32.500$  anys junt amb altres subproductes radioactius de la mateixa sèrie. Un d'ells és el poloni-210;  $T_{1/2} = 138$  dies, (conegut també per la seva radiotoxicitat letal, present en 1 µgram per to. d'urani. S'ha de tenir en compte que un gram d'aquesta substància emet  $1.66 \times 10^{12}$  partícules alfa per segó (radiacions d'elevada eficiència biològica) i que 1 mil·ligram és tan radiotòxic com 13.5 to. d'urani-238; aquest element forma part dels grans tòxics. Al llarg del procés nuclear s'acumulen milions de to. del mineral d'urani, que formen els àrids radioactius, que contaminen rius i materials de construcció (a EE.UU >150 milions de to. de difícil control) amb radi i radó entre altres.

L'urani oxida amb facilitat i és inflamable (d'aquí la aplicació com a míssils antitancs) amb dispersió i contaminació aèria. També el plutoni-239 està dotat de similars característiques. Durant la reacció nuclear es formen 8.7 g. de isòtops de plutoni (239; 240; 241 i 242) per Kg d'urani-238; la formació de productes de fissió, d'elevada radioactivitat, és d'uns 30 g.

#### Sobre la radiotoxicitat dels emissors de partícules alfa i dels productes de fissió:

Així com el radi es fixa en els ossos induint la formació d'osteosarcomas i altres tumors en òrgans que fixen aquest element, els seus descendents, el radó i la sèrie que segueix, és fixa en els alvèols dels pulmons, provocant càncer en aquest òrgan; el poloni, que com els anteriors forma part dels subproductes de radioactivitat alfa de la sèrie del urani natural, dotat d'una activitat específica molt elevada, pot provocar danys vasculars i induir altres efectes retardats com el càncer de ronyó (Casarett, 1968). A través dels àrids generats per la mineria del urani es dispersa matèria radioactiva, formant localment contaminacions d'elevat risc toxicològic que sovint es manifesten en els materials de construcció i en aigües, superficials i profundes.

Altres elements radioactius, resultants de la generació atòmica-nuclear, que considerem problemàtics pel medi són els productes de fissió - isòtops del ceri, cesi, estronci, iode i tecneci, sense oblidar el triti per la immensa activitat de les emissions, als rius i a l'atmosfera i el gasos - els transuranians que es formen a partir del urani-238 per la interacció del flux de neutrons-isòtops del neptuni, plutoni, americi, curie i els elements d'activació neutrònica indirecte-cobalt, ferro i altres.

### **3.- TRACTAMENT PREVIST PELS NO TRANSURANIANES**

La vigilància de la deposició en superfície del material radioactiu anomenat de "mitjana activitat" (simplement per a diferenciar de la elevada activitat dels anteriors), i no menys radiotòxic ( $> 90 \%$ ) del combustible extret del nucli del reactor, segueix un raonament tècnic basat en el període de semidesintegració ( $T_{1/2}$ ) del element de fissió més freqüent en el ventall radioactiu dels productes de fissió del urani-235, el cesi-137 (Cs-137), (un dels més de 200 elements diferents).

**Raonament:** Limitar la vigilància de la deposició dels residus radioactius (mescla de radioelements en els que el Cesi-137;  $T_{1/2} = 30$  anys, apareix com el més freqüent), fins que la radioactivitat d'aquest decaigui a nivells de dosi equivalents al nivell de la dosi del fons ambiental, considerada com admissible (inevitable). Aquest criteri significa controlar/vigilar fins que l'activitat inicial ( $A_I$ ) s'hagi reduït en un factor 1/1000. El temps de vigilància d'aquest material, rigorosament controlada, resultaria ser de 300 anys a partir del moment de l'extracció del "combustible esgotat" del nucli del reactor (veure annex).

#### **Sobre el increment de la radioactivitat ambiental:**

Entre les emissions radioactives generalment no es comenten les emissions de gasos com el cripto-85, gas noble de gran dispersió en l'atmosfera. Es calcula que tan sols amb l'emissió d'aquest gas radioactiu és doblarà la dosi del fons radioactiu natural (que no vol dir innòcua) en tan sols dues generacions. Les emissions de triti (H-3) al medi representen, ara ja, un problema de contaminació de l'aigua dels rius. El triti és un isòtop del hidrogen que, degut a que és de període curt (12 a.) i de baixa energia la seva emissió radioactiva, es sol considerar poc nociva; aquesta qualificació no correspon a la veritat, doncs la toxicitat depèn de la dosi o concentració en l'aigua; però existeix un altre aspecte poc comentat: quan el triti s'incorpora orgànicament. El triti, anomenat a les hores orgànic, incorporat en el ADN, pot substituir al hidrogen i transformar-se en heli per emissió radioactiva d'una partícula, d'aquesta forma queda alterat el "pont de hidrogen" de la molècula ADN, transmutació amb conseqüències biològiques encara poc investigades.

La dispersió dels productes de la fissió nuclear i els d'activació en el sí del reactor serà, si l'opció nuclear prospera, el verí radioactiu que pot anar canviant el nostre sistema social i ambiental. Els últims pels milers d'anys de vida radioactiva i els primers per la quantitat que representen. No hi ha comparació possible entre un verí químic i un de radioactiu: No coneixem cap tòxic químic que a nivell d'un sol àtom pugui provocar els danys cel·lulars, somàtics o genètics, que pot generar un àtom radioactiu al desintegrar-se en el sí d'una cèl·lula.

De fet, per la radioactivitat o per les radiacions en general (igualmente els raigs X) no existeix dintell de seguretat, la mínima dosi pot induir un efecte biològic. La cinètica biològica d'alguns productes de fissió pot donar lloc a concentracions radioactives en òrgans vitals amb respostes ràpides i risc inadmissible. És el cas dels isòtops radioactius del iode en concentrar-se en la glàndula tiroïdes. Especialment eficient a nivell biològic, és el iode-131 amb un període de 8 dies i molt radioactiu, incorporat substitueix el iode estable (de idèntica afinitat química) en la glàndula, provocant càncer. Un dels isòtops d'aquest element, el iode-129 té un període de semidesintegració de 17 milions d'anys, menys radioactiu que el primer, però amb igual afinitat, que pot acumular-se lentament. També és un producte de fissió i verí a llarg termini.

Un altre exemple de cinètica biològica la representa el estronci-90 (Sr-90) amb un període de 28 a. que és fixa en el esquelet i, desintegrar-se, és transforma en itri-90 (Y-90) que és concentra en les gònades. És podrien considerar altres transmutacions dels productes de fissió

com la cesi-137, o la del carboni-14, o la transmutació radioactiva del americi-241 en neptuni-237.

Es tracta de verins radioactius d'elevada complexitat, radioactiva i biològica, que poden formar combinacions amb elements químics, tòxics, com l'arseni, el plom i el cadmi, potenciant la toxicitat química sobre l'organisme a la vegada que combinant efectes, radioactiu i químic.

#### Les emissions radioactives en funcionament normal - sense accidents:

La producció d'energia nuclear en les centrals modernes implica treballar a temperatura i pressió elevades, les estructures més castigades han estat calculades per una vida útil d'entre 30 i 40 anys. Allargar la vida útil 20 o 30 anys més en les mateixes condicions inicials suposa per alguns components apurar els límits de resistència dels materials fins a nivells que poden resultar d'alt risc d'accident o d'emissions radioactives en massa. Al igual que la gestió dels residus radioactius, aquest és un problema fins ara no comentat amb l'objectivitat necessària, tal com requereix la problemàtica que es planteja.

Pel que fa als aspectes relatius al control de qualitat al allargar la vida útil: d'una CN s'ha de tenir en compte que com a mínim dos dels seus components no es poden reemplaçar en cas de fissures, esquerdes etc., que tècnicament no és possible i que durant la vida útil de funcionament permanent estan sotmesos a una càrrega física que supera en molts casos, en zones crítiques i, probablement, en la seva totalitat, els límits de resistència dels materials de construcció a causa dels paràmetres de treball i del impacte constant del flux de neutrons ràpids (20.000 Km per segó) que origina la destrucció cristal·lina dels mateixos.

Un reactor nuclear està format per un complex sistema de recipients en els quals i a causa del perill que implica el verí radioactiu s'exigeix un elevat nivell de hermeticitat, però l'exposició a les condicions de treball, temperatura, irradiació i transformacions d'origen físico-químic, degudes a l'acció de les radiacions ionitzants, el risc de fissures és elevat i incrementa amb els anys de funcionament, matèria radioactiva acumulada (en un any de funcionament permanent una CN moderna acumula una quantitat de matèria radioactiva comparable a la que lliberen unes 4 explosions atòmiques similars a la de Hiroshima) i la inherent dificultat que representen les reparacions en funcionament per l'elevat risc d'exposició.

El resultat és que, a causa d'aquesta complexitat, s'assumeixen fissures i fuites inevitables. En els canals i tancs anomenats de "retardament" s'acumula matèria radioactiva, esperant el moment òptim per evacuar al exterior i reduir la concentració, en diluint per mitjà del transport de l'aigua d'un riu i per les condicions climàtiques de l'atmosfera.

Com més complex és el sistema, i una CN n'es un bon exemple, més elevat és el risc de fissures inevitables, tolerades i, per tant, de fuites, en aquest cas, radioactives (Max Thürkauf; 1973).

#### Conclusió:

Encara que de tothom coneguda la necessitat d'actuar amb la màxima urgència contra la catastròfica situació que s'instal·larà en aquest país i en altres a rel del canvi climàtic, cal insistir en que l'opció nuclear per la producció d'energia no és una solució per evitar, retardar o pal·liar els efectes que comportarà aquest canvi (veure: Nuclear Information and Resource Service; 1998). No tan sols no evitarà, sinó que la problemàtica inherent a aquesta opció, la permanent generació de residus radioactius, realment perillosos a causa de molt elevada radiotoxicitat, junt amb la increïble despesa econòmica que implica la seva gestió, fan d'aquesta opció una alternativa inviable.

En la nostra opinió i en la mesura en la que estem comentant un problema d'amples dimensions socials, econòmiques i ambientals, no desvinculable de la producció d'energia d'origen nuclear, els residus radioactius, pel qual no veiem cap solució a mig o a llarg termini,

resultaria més ètic aplicar el principi de precaució pel interès públic, abans d'avançar en una aventura molt compromesa. Pensem que la despesa econòmica hauria d'anar dirigida a promoure energia alternativa més descentralitzada.

Dues coses, entre altres, ens interessen especialment: L'escalfament global (pel que sembla inevitable, però que cal actuar i de manera urgent per evitar el pitxó), i la radiotoxicitat (amb la política tendenciosa d'algunes organitzacions pro nuclears) que inhibiria la seguretat radiològica de la població, present i futura.

### **Annex I:**

$$A_T / A_I = 0.001 = \exp(-\ln 2(t / t_{1/2})); \exp -(0,693(t / 30)) = 0.001$$

$$-(0.693 (t / 30)) = \ln 0.001$$

$$t = (\ln 0.001) \times 30 / -0.693 = 300 \text{ anys}$$

$$\underline{t = 300 \text{ anys (temps de vigilància)}}$$