

EL TRITI EN LES CENTRALS NUCLEARS PWR

Drs. Pere Carbonell i Josep Puig (GCTPFNN)

Informe elaborat per encàrrec de l'organització cívico-política Els Verds – Alternativa Verda, Octubre - Novembre 2002.

Índex

A.- PRODUCCIÓ DE TRITI

B.- VIES D'ABOCAMENT DEL TRITI CAP A L'ENTORN,

C.- DISSEMINACIÓ DEL TRITI EN ELS ECOSISTEMES,

D.- DIFERENTS FORMES I DIFERENTS VIES DE PENETRACIÓ DEL TRITI EN ELS ORGANISMES

E.- EFECTES DE LA PARTÍCULA BETA EMESA PEL TRITI

F.- CONCEPTES BÀSICS

PRODUCCIÓ DE TRITI

El Triti és un element radioactiu que emet partícules beta (β). Està present de forma natural a través de l'acció dels raigs còsmics, i provocat de forma artificial per la indústria nuclear o altres activitats bèlico-nuclears. Es tracta d'un radioisòtop de l'hidrogen, essent aquest un component fonamental dels teixits vius. Els raigs còsmics produeixen Triti per la seva reacció sobre l'oxigen i el nitrogen i també pel impacte dels neutrons sobre el Liti. La importància de les emissions de Triti a l'entorn radica essencialment en les explosions nuclears i en les emissions per part de la indústria nuclear. Aquestes fonts representen de llarg la major producció artificial d'aquest radioelement. Les centrals nuclears del tipus d'aigua a pressió (PWR) produeixen Triti en gran quantitat. Aquests reactors d'aigua lleugera a pressió produeixen el Triti a nivell del combustible nuclear, en les barres de control i en l'agent refrigerant i moderador (l'aigua). Això comporta la disseminació de Triti en les ecosistemes i la seva incorporació en els teixits dels organismes vius.

A.- PRODUCCIÓ DE TRITI DURANT EL CICLE NUCLEAR

A.1.- Producció de Triti en les barres del combustible nuclear

El Triti es produeix a conseqüència dels processos de fissió ternària (la ruptura d'un nucli pesant en tres o més productes de fissió, un dels quals pots ser Triti)

Els principals àtoms fissionables generadors de Triti són:

- U-235: amb un rendiment de $8 \cdot 10^{-5}$ àtoms de Triti per fissió
- U-238: amb un rendiment de $1,4 \cdot 10^{-4}$ àtoms de Triti per fissió
- Pu-239: amb un rendiment de $2,3 \cdot 10^{-4}$ àtoms de Triti per fissió
- Pu-241: amb un rendiment de $2,6 \cdot 10^{-4}$ àtoms de Triti per fissió

Tenint en compte la evolució de les quantitats d'aquests isòtops al llarg de la vida del combustible, es pot considerar un rendiment de $1,4 \cdot 10^{-4}$ de mitjana.

Es pot aleshores calcular la quantitat de Triti produït en funció del temps i de la potència tèrmica del reactor, a partir de que la fissió d'un àtom d'Urani allibera una quantitat d'energia de 200 MeV (Megaelectró-Volts), i s'arriba a la xifra de $3,125 \cdot 10^{16}$ fissions/segon per cada MW de potència tèrmica. Si tenim en compte el rendiment, la xifra serà $4,375 \cdot 10^{12}$ àtoms de Triti per segon per cada MW tèrmic. Degut a que el període de semi-desintegració del Triti és de 12,26 anys, la constant de desintegració radioactiva del Triti resulta ser de $0,0565 \text{ anys}^{-1}$.

Es pot calcular també la radioactivitat associada, mesurada en Becquerelis, Bq. Per 1.000 MW elèctrics (2500 MW tèrmics) en resulta una activitat radioactiva de $6,2 \times 10^{14}$ Becquerelis per any, és a dir, de 620 Terabecquerelis (16.740 Ci) per any.

A.2.- Producció de Triti en les barres de control

La transmutació del Bor contingut en les barres de control (controlen el flux de neutrons) produeix Triti per dues vies: per l'activació neutrònica del Bor i del Liti (format a conseqüència d'una reacció

d'activació neutrònica del Bor diferent a la citada abans). Les quantitats de Triti produïdes per aquestes reaccions són però despreciables.

A.3.- Producció de Triti en l'aigua del circuit primari

Com que s'afegeix Bor a l'aigua del circuit primari, per tal que actuï com agent moderador del neutrons ràpids, les reaccions comentades en l'apartat A.2. fan que es produeixi directament Triti en el si del circuit primari de refrigeració. També s'afegeix Liti a l'aigua del primari per compensar els efectes corrosius del Bor. El Liti està enriquit en el seu isòtop 7, per tal de minimitzar la reacció d'activació neutrònica del Liti-6. L'activació neutrònica del Deuteri contingut en l'aigua té una influència menyspreable respecte de les altres fonts.

La principal font de Triti en el circuit primari de refrigeració és el que travessa les beines del combustible, be sigui per difusió, be sigui passant a través de les fissures de les beines. Normalment les fuites solen ser de l'ordre del 5,7%.

La producció de Triti en el circuit primari serà:

- 33,74 TBq (912 Ci) en la difusió del combustible
- 8,51 TBq (230 Ci) per difusió a través de les barres de control (30% de fuites per difusió en beines d'acer inoxidable) (solament en la primera càrrega del combustible)
- 12,02 TBq (325 Ci) per la primera càrrega (11,1 TBq per cada recàrrega) procedent del Bor contingut en l'aigua
- 0,29 TBq (8 Ci) pel Liti-7
- 0,44 TBq (12 Ci) pel Liti-6
- 0,11 TBq (3 Ci) pel Deuteri

Total, 55,2 TBq (1.490 Ci) per la primera càrrega i 45,7 TBq (1.235 Ci) per cadascuna de les següents.

B.- VIES D'ABOCAMENT DE TRITI CAP A L'ENTORN.

B.1.- El combustible

El combustible conté el Triti produït per la fissió i no difós cap a l'aigua del primari. La quantitat produïda és de l'ordre de 407 TBq (10.989 Ci) /any per una central de 2.500 MWtèrmics (12 vegades més que el de l'aigua del primari). Aquest Triti serà alliberat totalment en les fàbriques de reprocessament del combustible gastat.

B.2.- Els efluentes líquids

Per una central funcionant a plena potència al llarg d'11 mesos l'any (1 més d'atur per a la recàrrega anual) es produeixen de l'ordre de 48 TBq (1.296 Ci)/any en l'aigua del primari.

Una part d'aquest Triti serà abocat juntament amb els afluents líquids de la central, doncs

- el circuit primari no és mai totalment estanc. Es poden admetre unes fuites de l'1% diàries en funcionament normal (això no és pas veritat quan el reactor presenta anomalies de funcionament).
- La quantitat d'aigua en el primari és variable, degut a la dilatació de l'aigua pel calor de la fissió, a la dilució del Bor i al desbordament del primari.

C.- DISSEMINACIÓ DEL TRITI EN ELS ECOSISTEMES

Si be la producció i els abocaments de Triti cap als ecosistemes es regeixen per mecanismes relativament simples, la seva disseminació en el si dels ecosistemes és molt complexa i mal coneguda.

El contingut en Triti d'una mostra d'aigua s'expressa per la relació atòmica T/H. Una unitat de Triti (U.T.) correspon a una relació $T/H=10^{-18}$. Les mesures de Triti es fan per comptatge i poden necessitar un preenriquitament de les mostres, sobretot quan es tracta de concentracions inferiors a 100 U.T. Cal dir de passada que la resolució de les mesures és de l'ordre dels continguts màxims admissibles o trobats a l'entorn (per exemple, a la central nuclear de Calvert Cliff, la relació T/H és igual a $33 \cdot 10^{-18}$, o sia 33 U.T.). Això és doncs una primera causa d'error en l'estimació del Triti degut a una central nuclear. Una altra font d'error és la causada per la 'pluja' de Triti deguda a les explosions nuclears i/o al 'vent solar' i raigs còsmics d'alta energia.

C.1.- El Triti dels afluents gasosos

- a) el Triti gasós (HT o T₂), es transforma en aigua tritiada (HTO o bé T₂O) per reacció d'oxidació lenta, sigui a l'atmosfera sigui a l'interior de l'organisme;
- b) abocaments gasosos en forma orgànica: una part del Triti es troba en forma d'hidrocarboni, com ara el metà, i el metà tritiat es transfereix a l'aigua dels vegetals, tot incorporant-se als teixits vegetals i d'ells pot passar als animals;
- c) abocaments en forma de vapor d'aigua: l'absorció de Triti per les fulles dels vegetals exposats varia de 0,37 a 0,44 per relació amb l'aigua de l'atmosfera, en el cas dels animals l'absorció es fa a través de la pell (és insignificant respecte el Triti ingerit en menjar farratge), en canvi, en el cas de bestiar estabulat la inhalació i l'absorció per la pell poden ser no gens menyspreables. Aquest vapor d'aigua es pot condensar i dipositar-se sobre la coberta vegetal i el sòl (la rosada i les precipitacions). Això fa que hi hagi contaminació per via foliar i en el cas de deposicions continuades s'observa un efecte acumulatiu. Si la contaminació es produeix en els aliments dels animals herbívors, hi haurà aleshores contaminació de la llet (una deposició a l'hivern de Triti pot suposar la contaminació de la llet de la primavera que ve). S'ha observat que la concentració de Triti en la matèria grassa de la llet és superior a la concentració de Triti en l'aigua de la llet a partir del 5è dia després de la contaminació.

C.2.- El Triti dels afluents líquids:

- a) abocaments en forma d'aigua tritiada: a1) contaminació de la biocenosi aquàtica: com que en els vegetals aquàtics l'aigua lliure dels teixits té la mateixa concentració que la del medi, després d'una exposició perllongada l'aigua dels teixits tindrà la mateixa concentració de Triti que l'aigua lliure i que l'aigua del medi. Hi ha poques dades per saber que passa en els organismes invertebrats. Els sediments argilosos concentren el Triti, assolint-se concentracions de 2 a 4 vegades més elevades que en la fase aquosa. El jaç del riu esdevé un dipòsit de Triti. a2) utilització de l'aigua per abeurar: el resultat el trobem tant en l'aigua del cos com en les molècules orgàniques per via de síntesi enzimàtica. Si bé el Triti de l'aigua corporal s'elimina ràpidament (no per això deixa de tenir importància l'exposició durant el temps de permanència en el organisme, governat pel seu període biològic), per altra part, l'eliminació del Triti orgànic és molt més lenta. a3) utilització de l'aigua per a irrigació: com que el Triti té un perllongat temps de residència en el sòl, l'absorció d'aigua tritiada per part de les plantes s'allarga durant tot el temps de creixuda.
- b) Abocaments de Triti en forma orgànica als cursos d'aigua: en aquest cas es tracta de contaminació dels ecosistemes aquàtics. En estudis efectuats s'observa que les activitats específiques mesurades en la matèria orgànica de les plantes i els animals dels ecosistemes aquàtics, receptors dels afluents, són molt superiors als de l'aigua del riu.

D.- LES DIFERENTS FORMES I LES DIFERENTS VIES DE PENETRACIÓ DEL TRITI EN ELS ORGANISMES

El Triti pot penetrar dins dels organismes sota diferents formes i per diferents vies. El Triti es pot trobar en forma de gas triti, HT, present a l'atmosfera per l'acció dels raigs còsmics, com subproducte dels assaigs nuclears o com component entre els afluents gasosos abocats per les centrals nuclears o fàbriques de reprocessament del combustible gastat de les centrals nuclears.

El gas Triti s'oxida lentament a l'atmosfera o dins dels organismes tot formant aigua tritiada, HTO, la qual és el principal perill per l'entorn i pels organismes vius. L'aigua tritiada es troba en forma de vapor a l'atmosfera, en elevades concentracions en les zones de producció energètica - nuclear per les emissions de les torres de refrigeració, o en l'aigua dels rius on s'ha hagin abocat afluents líquids de les centrals nuclears.

El Triti pot ser ingerit en forma de HTO o en forma de diversos compostos orgànics com a conseqüència de la contaminació d'aigua de veure, o de diversos constituents de la dieta alimentària (llegums, llet, carn, etc.).

La radiotoxicitat del Triti depèn de la forma físico-química sota la qual s'emet. La fracció de gas triti que passa cap als organismes es relativament baixa, en canvi, el vapor d'aigua tritiada s'absorbeix al 100% i en quantitats equivalents per les vies respiratòries i la pell.

El gas HT és menys tòxic que l'aigua HTO, però es transforma lentament en aigua tritiada en el si de l'atmosfera i dins dels pulmons. La ICRP considera la toxicitat biològica del aigua HTO 25.000 vegades superior a la del gas HT.

L'aigua HTO s'acumula en els líquids del organisme i en resulta una irradiació de la seva major part.

E.- ELS EFECTES DE LA PARTÍCULA BETA (β) EMESA PEL TRITI

E.1.- Efectes bioquímics de les radiacions ionitzants

Els efectes de les radiacions sobre la matèria són les conseqüències d'una transferència d'energia: les radiacions ionitzants transfereixen l'energia a la matèria, ionitzant o excitant les molècules. El resultat de la ionització és la creació d'ions radicals positius i l'alliberament de nombrosos electrons. Hi ha una multiplicació considerable del nombre d'electrons els quals ionitzen o exciten, i que esdevenint menys i menys ràpids, estaran tots en la zona d'influència d'àtoms electropositius. Hi ha doncs la creació de tants ions negatius com ions positius és formen: són els anomenats parelles d'ions.

La manera com l'energia es transfereix depèn de la localització, definida com el recorregut mitjà en un medi donat i de la repartició de la transferència a l'interior de la matèria. Aquesta es caracteritza per la transferència lineal d'energia (TLE) en un medi donat (energia transferida per micrometre recorregut, o per la densitat d'ionització o ionització específica, que es el nombre de parelles d'ions formades per micrometre recorregut).

La ionització específica de les partícules no és pas constant per una radiació donada en un medi donat; en funció de la distància recorreguda, ella augmenta a mesura que el recorregut augmenta, doncs la velocitat minva. El que és constant per a una radiació donada en un medi donat, és el recorregut pel qual la densitat d'ionització és màxima.

El recorregut màxim de les partícules beta del Triti és de 5 mm en l'aire i de 6 micrometres en l'aigua. El recorregut mitjà és de 0,9 micrometres en l'aigua i en els teixits de densitat 1. Entorn del 80% de les partícules beta s'absorbeixen en menys d'un micrometre.

Una partícula beta de Triti d'energia mitjana perd doncs 5,7 keV a l'entorn de 0,9 micrometres en el si de material biològic.

En el cas dels organismes vius, la substància més afectada per una irradiació és l'aigua. Per tant, per comprendre lo essencial dels processos de lesions bioquímiques cal estudiar l'acció directe de la radiació sobre l'aigua i l'acció indirecta sobre les molècules biològiques per mitjà dels radicals lliures, fruit de la radiolisi de l'aigua, la qual provoca l'aparició de nombrosos radicals i la formació de noves molècules. La molècula $H_2 O_2$ (peròxid d'hidrogen) és una de les més freqüents i també de més elevada toxicitat cel·lular a partir d'una concentració crítica.

El Triti, en substituint l'hidrogen, s'incorpora a nombroses molècules orgàniques hidrogenades. El Triti d'aquests compostos està fortament fixat a la molècula. En emetre una partícula beta, el nucli de l'àtom de Triti es transforma en un nucli d'Heli de massa 3. L'àtom resultant és doncs ionitzat, l'adquisició d'una càrrega pot excitar suficientment la molècula portadora i induir la ruptura d'una unió intramolecular. La més coneguda és la ruptura del pont d'hidrogen en l'ADN. A més, el ió Heli rep una energia d'excitació d'11 eV. El canvi de càrrega i aquesta energia poden afectar la molècula en la qual el ió Heli està fixat. A mes, l'Heli inert, abandona probablement la molècula, deixant la càrrega positiva, la qual podrà, aleshores, fixar un radical hidroxil lliure.

De fet, aquestes i altres consideracions similars han dut a proposar a la ICRP que admetés per la radioactivitat del Triti un factor de qualitat de l'ordre de 2, en lloc de 1 com és el cas de la major part de les emissions beta.

Quan se suposa que els efectes genètics deguts al Triti incorporat al DNA són semblants als efectes causats per dosis equivalents a partir d'irradiació externa, s'entra en contradicció amb tècniques de mesura i de interpretació més elaborades que mostren que hi ha alteracions genètiques específiques, conseqüència de l'efecte de la transmutació del Triti en Heli.

F.- CONCEPTES BÀSICS

F.1.- L'Hidrogen i els seus isòtops

L'hidrogen és l'element més simple que existeix (té un protó en el nucli i un electró). En realitat a la hidro-geosfera i a la hidro-biosfera existeix una barreja de dues formes estables d'hidrogen, una

anomenada pròpiament hidrogen, o hidrogen lleuger, i una altre anomenada deuteri, o hidrogen pesat (un protó i un neutró en el nucli). Aquestes són les dues formes estables de l'hidrogen. Però existeix una tercera forma d'hidrogen, un radioisòtop present en petites quantitats en la natura, anomenat triti (un protó i dos neutrons en el nucli) que és inestable i es transmuta en Heli, emetent una partícula Beta (β). El Triti té un període de semi-desintegració de 12,3 anys (Període de semi-desintegració: el temps que tarda una quantitat determinada d'un isòtop radioactiu en quedar reduïda a la meitat). La màxima energia de la partícula (β) del Triti és de 18 keV (kiloeléctroVolt).

F.2.- Unitats

1 Bq = 1 desintegració per segon (1 Curie = $3,7 \cdot 10^{10}$ Bq)

1 TBq = 1 milió de milions de Becquerelis

1 eV = $1,6021 \cdot 10^{-19}$ Jouis

BIBLIOGRAFIA

- AEC Comments on Tritium from the proposed Calvert Cliffs Nuclear Power Plant
- BEIR Committee (The Advisory Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiation): The effects on populations of exposure to low levels of ionizing radiation.
- Bulletin of the Atomic Scientists, Tritium Warning, March, 1984
- Cohen, L.K. and T.J.Kneip, Environmental tritium studies at a PWR power plant. In Tritium, Moghissi, A.A. and M.W.Carter (ed.), Messenger Graphics Publ., 1973
- Commission of the European Communities, European Seminar on the Risks from Tritium Exposure, Mol, Belgium, 22 – 24 Nov. 1982, Report EUR 9065 en., Office of the European Communities, Luxembourg, 1984
- Consejo de Seguridad Nuclear, Informes al Congreso de los Diputados
- Fairlie, I., Tritium: The Overlooked Nuclear Hazard, The Ecologist, Vol. 22, No. 5, September/October 1992
- Gueben, M. et Ph. Beguin, La production de tritium dans les centrales nucléaires, Journal Belge de Radiologie, 58,2, 1975
- Gofman, J.W., Radiation & Human Health: A comprehensive investigation of the evidence relating low-level radiation to cancer and other diseases, Sierra Club Books, San Francisco, 1981
- Graeub, R., L'Effet Petkau: les faibles doses de radioactivité et notre avenir irradié, Editions d'en bas, Lausanne, 1985
- IAEA, Tritium in some Typical Ecosystems, Technical Report Nr. 207, Wien, 1981
- Jouzel, J. et C. Merlivat, Le tritium dans le cycle naturel de l'eau, Bulletin d'Informations Scientifiques et Techniques du C.E.A.
- Kirchmann, R., Transfert dans le cycle bio du tritium des rejets, Journal Belge de Radiologie, 58, 2, 1975
- Kirchmann, R. et al., Colloquium on the Toxicity of Radionuclides, Liège, 19 – 20 Nov. 1982, Société Belge de Radiobiologie
- Schwarz, G. et al., Possible Future Effects on the Population of the Federal Republic of Germany of the Gaseous Radioactive Effluents from Nuclear Facilities, IAEA, Wien, 1975
- UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation) –Reports to the General Assembly
-