

Dosis colectivas legadas en la industria nucleoeléctrica y su aplicación en la estimación de las tasas de dosis futuras en la población

Por

DAVID CANCIO

Comisión Nacional de Energía Atómica - (Argentina)
(durante 1978 colaborador del Departamento Seguridad Nuclear. J.E.N.)

S E P A R A T A

"ENERGIA NUCLEAR"

Núm. 117 - Enero-Febrero 1979
Depósito legal: M. 1.672 - 1958

DOSIS COLECTIVAS LEGADAS EN LA INDUSTRIA NUCLEOELECTRICA Y SU APLICACION EN LA ESTIMACION DE LAS TASAS DE DOSIS FUTURAS EN LA POBLACION

Por DAVID CANCIO
Comisión Nacional de Energía Atómica - (Argentina)
(durante 1978 colaborador del
Departamento Seguridad Nuclear. J.E.N.)

Resumen:

En el informe se analizan las dosis colectivas legadas en todo el cuerpo producidas por las distintas etapas del ciclo de combustible nuclear. Se incluye la irradiación del público y de las personas profesionalmente expuestas basadas en la experiencia operativa internacional.

Las evaluaciones muestran que resulta predominante la contribución debida a la exposición profesional y que las dosis colectivas legadas en la población general son fundamentalmente originadas por los radionucleidos de dispersión global y en particular el carbono-14.

Se presentan también estimaciones de las máximas tasas de dosis que se alcanzarán en el futuro, haciendo proyecciones sobre la potencia nuclear instalada y se analiza el caso particular de España. Los resultados de las estimaciones evidencian que la expansión de los programas nucleares conducirán en el futuro a tasas medias de exposición en la población relativamente pequeñas.

1. INTRODUCCION

La Comisión Internacional de Protección Radiológica ha definido el "detrimento" para cuantificar el daño en una población expuesta a radiaciones (1). Este detrimento, para una cierta práctica con radiaciones resulta ser proporcional a la dosis colectiva legada (*) producida por la misma. Por tanto, la evaluación del detrimento relativo debido a dos fuentes de radiación puede efectuarse comparando las dosis colectivas legadas que producen cada una de ellas.

(*) En inglés "collective dose commitment". En español no existe un término oficialmente aceptado y se ha propuesto "dosis colectiva legada" aunque en algunas traducciones de documentos de organismos internacionales se utiliza la terminología "dosis colectiva comprometida". En este trabajo se usará el término "legada".

Las dosis colectivas legadas debidas a una determinada práctica, además de permitir evaluar detrimentos relativos, resultan también de utilidad para estimar las tasas de dosis medias que se alcanzarían en el futuro debidas a la ejecución continua de dicha práctica. Esta última aplicación se intenta exponer en el presente informe con respecto a la industria nucleoelectrónica. Los datos básicos referentes a las dosis colectivas legadas están fundamentados casi totalmente en el último informe producido por el Comité Científico de Naciones Unidas para el Estudio de los Efectos de las Radiaciones Atómicas (2). Este Comité efectuó sus estimaciones expresando los resultados como dosis absorbidas (rads) y en el presente informe se han considerado exclusivamente las dosis absorbidas en todo el cuerpo.

Con posterioridad a las recomendaciones de la Comisión Internacional de Protección Radiológica se ha propuesto la "dosis equivalente efectiva" como denominación para la suma ponderada de las dosis equivalentes en los distintos órganos utilizadas por dicha Comisión en su sistema de limitación de dosis. Desde el punto de vista de estos nuevos conceptos las evaluaciones aquí realizadas son incompletas ya que sólo se consideraron las dosis en todo el cuerpo en lugar de las dosis efectivas. No obstante, en principio, los resultados no diferirán significativamente ya que la irradiación de todo el cuerpo es preponderante en el ciclo de combustible nuclear.

En la revisión de las dosis producidas por la industria nucleoelectrónica es necesario tener en cuenta que las do-

sis individuales están limitadas por las regulaciones nacionales tanto en lo que se refiere a las personas profesionalmente expuestas como a los miembros del público. La filosofía actual de la protección radiológica también incluye como principios básicos evitar cualquier exposición innecesaria y mantener las dosis tan bajas como resulte razonablemente posible. La consecuencia de esas precauciones es que la exposición de los individuos a los valores máximos permitidos sólo ocurre rara vez y las dosis medias en cada grupo de personas expuestas es muy inferior al valor límite que les corresponde según se trate de trabajadores o miembros del público.

2. ALGUNOS CONCEPTOS BÁSICOS

La exposición de poblaciones debido a prácticas con radiaciones puede producirse a tasas de dosis que varían en el tiempo. Resulta conveniente en esos casos definir una *tasa de dosis colectiva* $\dot{S}(t)$ como el producto ponderado de la tasa de dosis producida por la fuente considerada y el número de individuos de una población especificada (3).

$$\dot{S}(t) = \int_0^\infty \dot{H}(t) N(\dot{H}, t) d\dot{H}$$

donde:

$N(\dot{H}, t)$, es el espectro de población en tasa de dosis al tiempo t y $N(\dot{H}, t) d\dot{H}$ es el número de individuos que reciben a tiempo t una tasa de dosis equivalente en un órgano o tejido dado en el rango $\dot{H}(t)$ a $\dot{H}(t) + d\dot{H}$.

En muchos casos la exposición de la población se produce a lo largo de un considerable período de tiempo posterior al suceso que la originó. Para medir la exposición total de la población causada por una fuente dada se utiliza la dosis colectiva legada (o comprometida).

La *dosis colectiva legada* S_K^c debida a un suceso dado, decisión, operación o práctica finita K , se define como la integral temporal infinita de la tasa de dosis colectiva $\dot{S}_K(t)$ cau-

sada por ese suceso, decisión, operación o práctica (4).

$$S_K^c = \int_0^\infty \dot{S}_K(t) dt$$

También resulta de utilidad definir una dosis media individual en la población expuesta relacionada con la exposición total a lo largo del tiempo que resulta de un suceso dado, operación o práctica finita (2). Esta cantidad es la *dosis legada* H_K^c .

$$H_K^c = \int_0^\infty \dot{H}_K(t) dt$$

donde:

$\dot{H}_K(t)$, es la tasa de dosis media individual o tasa de dosis *per caput* y viene dada por el cociente de la tasa de dosis colectiva debido a la práctica K y el número de personas de la población al tiempo t .

$$\dot{H}_K(t) = \frac{\dot{S}_K(t)}{N(t)}$$

Si la población permanece constante en el tiempo, resulta:

$$S_K^c = H_K^c \cdot N$$

Vale decir que la dosis colectiva legada debida a una práctica finita K es igual al producto de la dosis legada y el número de personas de la población considerada.

Una de las aplicaciones de gran interés de la dosis legada es en la evaluación de las exposiciones futuras debidas a prácticas continuas. En este caso puede considerarse a la práctica continua que causa exposición a radiación como una secuencia de sucesos, cada uno de los cuales produce exposición en la población en un período de tiempo, el cual puede exceder la duración del suceso. La dosis legada y la dosis colectiva legada son generalmente proporcionales a la magnitud del suceso que los origina. Así por ejemplo, si el suceso considerado es la liberación de un radionucleido al medio ambiente, la dosis legada y la dosis colectiva legada son proporcionales a la actividad liberada, suponiendo que permanecen razonablemente constantes todos los demás factores.

Si se define para un tipo de práctica una función $\dot{H}_1(t)$ que da la tasa de dosis *per caput* por unidad de práctica (por ejemplo por curio liberado), la *dosis legada por unidad de práctica* H_1^c puede definirse como:

$$H_1^c = \int_0^\infty \dot{H}_1(t) dt$$

y la *dosis colectiva legada por unidad de práctica* S_1^c sería: $S_1^c = H_1^c \cdot N$ para el caso simplificado en que el tamaño de la población permanece constante.

La dosis legada por unidad de práctica H_1^c puede ser utilizada para predicciones de la tasa de dosis promedio (dosis *per caput*) en el futuro para el caso de una práctica repetida a una tasa R (unidad de práctica por unidad de tiempo). Así por ejemplo para el caso de la energía nuclear puede utilizarse la dosis legada por unidad de energía eléctrica generada (MW(e) · año), para predecir la tasa de dosis *per caput* en el futuro para una producción dada por unidad de tiempo (R sería igual a la cantidad de MW(e) · año, por año).

En el caso entonces de una práctica continua, la tasa de dosis promedio (*per caput*) resultante se incrementará y eventualmente alcanzará un valor de equilibrio $\bar{D}_\infty$ el cual viene dado (2) por:

$$\bar{D}_\infty = R H_1^c = \frac{R}{N} S_1^c$$

donde R es la tasa de la práctica (unidades de práctica por unidad de tiempo).

El cociente R/N es la tasa de práctica por persona (*per caput*) como, por ejemplo, la capacidad instalada nuclear por persona y resulta posible hacer proyecciones sobre la misma y en consecuencia predecir la tasa de dosis media individual que se alcanzará en el futuro. Sin embargo para exposiciones que se recibirían sobre un período de tiempo muy largo, como sería el caso de las exposiciones debidas a la liberación de ^{14}C , no resulta realista suponer que las prácticas continuarán durante el tiempo requerido para que la tasa de dosis media alcance el valor de equilibrio. En esos casos se ha demostrado (2) que

las tasas de dosis máximas per caput $\bar{D}_{\text{máx}}$ que pueden alcanzarse en el futuro pueden aproximarse por:

$$\bar{D}_{\text{máx.}} = \frac{R}{N} S_1^*$$

donde S_1^* , llamada *dosis colectiva legada incompleta*, es la integral temporal de la tasa de dosis colectiva causada por una unidad de práctica $\dot{S}_1(t)$ durante un tiempo τ igual al tiempo de duración de la práctica.

$$S_1^* = \int_0^\tau \dot{S}_1(t) dt$$

Para la industria nuclear, la duración de la práctica (producción de energía nucleoelectrónica) ha sido estimada en unos 500 años para evaluación de dosis legada en el ciclo de combustible (2).

3. DOSIS COLECTIVAS LEGADAS EN LA INDUSTRIA NUCLEOELECTRICA

La producción de energía nucleoelectrónica comprende una serie de operaciones que incluyen la extracción y tratamiento del mineral de uranio, fabricación de elementos combustibles (incluyendo el enriquecimiento en el isótopo uranio-235), explotación de los reactores de potencia, almacenamiento de combustible una vez utilizado, reelaboración de los mismos, transporte de los materiales entre las diversas instalaciones y disposición final de los residuos radiactivos. Si bien la casi totalidad del material radiactivo asociado a la industria nuclear se encuentra presente en los elementos combustibles o en fracciones separadas de los mismos durante la reelaboración, en todas las operaciones se producen algunas liberaciones de radionucleidos al medio ambiente.

El Comité Científico de las Naciones Unidas para los Efectos de las Radiaciones Atómicas (UNSCEAR) se ocupó de evaluar las dosis colectivas legadas debidas a la eliminación de material radiactivo en todas las operaciones de la industria nuclear (2). Como cada operación está relacionada con la capacidad nuclear,

ha expresado las estimaciones en dosis colectivas legadas por unidad de energía generada (por MW(e) · año).

Las dosis colectivas en la población son producidas por la liberación ambiental del material radiactivo, que no sólo tiene interés para las poblaciones locales o regionales, sino que también algunos radionucleidos, por sus largas vidas medias y por su rápida dispersión, pueden distribuirse en todo el mundo y producir dosis globales. Finalmente otro componente de la dosis colectiva está constituido por los grupos profesionalmente expuestos.

3.1. Dosis colectivas legadas a todo el cuerpo producidas por la liberación al ambiente de material radiactivo

3.1.1. Radionucleidos de distribución mundial

Se incluyen aquí aquellos radionucleidos que, además de tener una larga vida media, presentan como característica un tiempo de dispersión relativamente corto, lo cual lleva a una amplia distribución cuando son liberados al ambiente. El mayor interés lo constituyen el ^{85}Kr , ^3H y ^{14}C para la irradiación de todo el cuerpo de las poblaciones.

De acuerdo con las evaluaciones de UNSCEAR la generación del ^{85}Kr resulta ser de 400 Ci/MW(e) · año y prácticamente la totalidad del mismo (> 99 por 100) se liberaría en las plantas de reelaboración, lo cual se confirmó con la experiencia operativa de las instalaciones en funcionamiento. Como se trata de un gas noble, la liberación a la atmósfera lleva a una concentración uniforme sobre todo el globo, según se desprende de las mediciones efectuadas en diferentes latitudes (2). La dosis colectiva legada se estimó en alrededor de 0,16 rad.hombre/MW(e) · año.

El ^3H en forma de agua tritiada se dispersa ampliamente en las aguas. Las dosis colectivas legadas pueden evaluarse a partir de las relaciones obtenidas para el ^3H liberado en las explosiones nucleares o por medio de modelos de dispersión hemisférico.

De acuerdo con ello, UNSCEAR utilizó un valor de 3×10^{-3} rad.hombre/Ci, el cual, combinado con una liberación de 16 Ci/MW(e) · año para la planta de reelaboración, conducen a una estimación de 5×10^{-2} rad.hombre/MW(e) · año. Este valor, teniendo en cuenta las liberaciones de los reactores, se vería incrementado en un 20 por 100 para el caso de los reactores de agua ligera a presión (PWR).

La estimación de las dosis colectivas legadas debidas al ^{14}C puede hacerse suponiendo que la distribución ambiental sigue a la del ^{14}C natural. Como se indicó en la discusión de los conceptos básicos, no es conveniente estimar las dosis colectivas legadas ya que la generación nucleoelectrónica no continuará suficiente tiempo como para que el ^{14}C alcance la situación de equilibrio en el ambiente. Para este caso resulta más realista la estimación de la dosis legada incompleta suponiendo que la producción de energía por la fisión nuclear tendrá lugar durante 500 años. Con la estimación de una liberación combinada de reactores de agua ligera y plantas de reelaboración de unos 0,02 Ci/MW(e) · año resulta una dosis colectiva legada incompleta de 2 rad.hombre/MW(e) · año (2).

3.1.2. Contribuciones locales y regionales a la dosis colectiva legada

Para este tipo de contribuciones resulta necesario considerar por separado cada etapa del ciclo de combustible. Resulta claro que las dosis colectivas locales y regionales dependerán de las características locales tales como distribución de población, meteorología, hidrología, producción y consumo de alimentos, etc. Por estos motivos no se pueden establecer generalizaciones válidas y solamente pueden mencionarse algunos valores típicos y ejemplos representativos basados en la experiencia operativa o modelos de cálculo. Para alguna etapa del ciclo de combustible esta experiencia puede ser solamente de un país determinado.

La extracción y el tratamiento del mineral de uranio, habitualmente se efectúa en zonas de baja densidad de

población. Un valor típico de la dosis colectiva legada en todo el cuerpo debida a estas operaciones fue evaluada en el orden de 10^{-4} rad.hombre/MW(e) · año (4).

La fabricación de los elementos combustibles también contribuyen poco a las dosis colectivas legadas. Basada en algunos modelos de cálculo la misma resulta ser del orden de 10^{-4} rad.hombre/MW(e) · año (4).

La contribución local y regional debida a los radionucleidos eliminados al ambiente durante la operación de los reactores es debida principalmente a los gases nobles y tritio descargados a la atmósfera y a una serie de radionucleidos presentes en los efluentes líquidos.

Para reactores de tipo PWR, la dosis colectiva legada en todo el cuerpo, correspondiente a eliminaciones promedio basadas en la experiencia operativa y generalizaciones en cuanto a las características ambientales llevan a una estimación del orden de 2×10^{-2} rad./hombre/MW(e) · año (2).

La contribución de las plantas de reelaboración a las dosis colectivas legadas es debida fundamentalmente a nucleidos de distribución global. La contribución local y regional a las dosis colectivas legadas resultan ser del orden de 3×10^{-2} rad.hombre/MW(e) · año (2).

La contribución debida al almacenamiento actual de los residuos radiactivos resulta ser muy pequeña en comparación con otras etapas del ciclo de combustible.

El transporte de combustible y residuos radiactivos hacia y desde los reactores de agua ligera fue evaluado en 4×10^{-3} rad.hombre/MW(e) · año en los Estados Unidos (2).

Los laboratorios de investigación afectados a desarrollos en el ciclo de combustible nuclear también presentan una contribución muy pequeña a la exposición del público comparado con otras operaciones.

En la siguiente tabla se resumen las estimaciones de las dosis colectivas legadas en todo el cuerpo debidas a la liberación de nucleidos en las distintas etapas del ciclo de combustible con utilización de reactores del tipo PWR.

RESUMEN DE LAS DOSIS COLECTIVAS LEGADAS (EN TODO EL CUERPO) AL PUBLICO, DEBIDAS A LA LIBERACION DE NUCLEIDOS EN LA INDUSTRIA NUCLEOELECTRICA

Contribución global	rad.hombre/MW(e).año
^{85}Kr (reelaboración)	0,16
^3H (reactores tipo PWR y reelaboración)	0,06
^{14}C (reactores de agua ligera y reelaboración)	2
Contribución local y regional	
Extracción y tratamiento de uranio	0,0001
Fabricación de elementos combustibles	0,0001
Reactores tipo PWR	0,02
Reelaboración	0,03
Transporte	0,004
TOTAL	2,3

3.2. Dosis colectivas legadas a todo el cuerpo debidas a la irradiación profesional

La contribución de la exposición profesional representa una fracción muy importante de las dosis colectivas en el ciclo de combustible nuclear.

En la minería del uranio, UNSCEAR ha estimado una dosis colectiva legada a todo el cuerpo de 0,05 rad.hombre/MW(e) · año mientras que el tratamiento y fabricación de elementos combustible representa 0,15 rad.hombre/MW(e) · año.

Para los reactores de agua ligera, existe una importante experiencia operativa y, a pesar de las variaciones observadas en diferentes años, aún en un mismo reactor, una estimación razonable resultó ser de 1 rad.hombre/MW(e) · año.

La reelaboración de los elementos combustibles puede representar contribuciones importantes a las dosis colectivas ocupacionales. Con base solamente en la experiencia del Reino Unido puede considerarse un valor de 1,2 rad.hombre/MW(e) · año, aunque este valor representa la experiencia histórica con el combustible tipo Magnox y probablemente no se ajuste a otros combustibles y futuras plantas de reelaboración (2).

Con respecto a la contribución del transporte se evaluó, para combustible de reactores de agua ligera, en 3×10^{-3} rad.hombre/MW(e) · año la dosis colectiva legada debida al transporte de combustible y desechos sólidos.

Si se considera el ciclo de combustible en su conjunto también debe tenerse en cuenta una contribución debida a la investigación y desarrollo a él asociada.

Resulta difícil de identificar qué porción de la investigación está directamente asociada a la producción eléctrica nuclear. Si se considera que todas las dosis ocupacionales recibidas en organismos tales como el ERDA en Estados Unidos y UKAEA en el Reino Unido están relacionados con los desarrollos de la industria nuclear resulta una estimación media de 1,4 rad.hombre/MW(e) · año. Esta cifra puede ser una sobreestimación ya que aunque fuera correcta puede esperarse, con la madurez de la industria, que la contribución relativa de la investigación y desarrollo a las dosis colectivas legadas sea menor (2).

En la siguiente tabla se resumen las estimaciones de las dosis colectivas legadas debidas a la irradiación profesional de todo el cuerpo en el ciclo de combustible con utilización de reactores de agua ligera.

RESUMEN DE LAS DOSIS COLECTIVAS LEGADAS DEBIDAS A LA IRRADIACION PROFESIONAL DE TODO EL CUERPO EN EL CICLO DE COMBUSTIBLE

Etapa del ciclo	rad.hombre/MW(e).año
Minería, tratamiento y fabricación de elementos combustibles	0,2
Funcionamiento de reactores de agua ligera	1
Reelaboración de elementos combustibles	1,2
Transportes	0,003
Investigación y desarrollo asociado al ciclo de combustible	1,4
TOTAL	3,8

4. DISCUSION SOBRE LAS ESTIMACIONES DE LAS DOSIS COLECTIVAS LEGADAS

En la presentación de las estimaciones realizadas por UNSCEAR se ha hecho notar que en algunos casos o bien existe escasa información o la misma se refiere a una experiencia limitada. Esta característica hace que los resultados deban considerarse con cierta precaución, en particular en lo que se refiere a algunas dosis colectivas debidas a la irradiación profesional.

De cualquier modo, representan un estudio completo y de gran valor para el análisis de las implicaciones de la industria nuclear, con la tecnología utilizada hasta el momento.

En lo que respecta a la liberación de nucleidos en el ciclo de combustible, predomina ampliamente la contribución a la dosis colectiva debida a los nucleidos de distribución mundial y en particular al ^{14}C . Esta característica hace que puedan establecerse generalizaciones que hacen a las dosis colectivas legadas prácticamente independientes del emplazamiento de los reactores y de otras plantas del ciclo de combustible. En efecto, según la ubicación variarían fundamentalmente las dosis colectivas legadas locales o regionales que tienen un peso relativo pequeño con relación a

las dosis colectivas globales debidas al ^{14}C . Asimismo, también resulta pequeña la diferencia entre reactores de tipo de agua a presión (PWR) y ebullición (BWR) por lo cual podría utilizarse una única evaluación para todo el ciclo de combustible con utilización de reactores de agua ligera. Las dosis colectivas legadas debidas a la irradiación profesional prácticamente duplican a las originadas por la exposición de las poblaciones.

Las contribuciones más importantes son debidas a la reelaboración y a la investigación y desarrollo asociado al ciclo de combustible. A este respecto debe recordarse que pueden tratarse de sobreestimaciones, ya que la reelaboración está basada solamente en la experiencia del Reino Unido y que la investigación relacionada con la producción nucleoelectrica ha sido tomada con un criterio que maximiza la estimación; además de que puede esperarse que su contribución relativa disminuya con la madurez de la misma industria.

Otra contribución importante es debida a la exposición profesional durante el funcionamiento de los reactores. Esta contribución basada en la experiencia proporcionada por los reactores de agua ligera en funcionamiento está en acuerdo con la situación española ya que con una experiencia de 15 años reactor se obtuvo una dosis colectiva media de 1,2 rem.hombre/MW(e) · año (5).

5. ESTIMACION DE LA MAXIMA TASA DE DOSIS MEDIA QUE SE ALCANZARA EN EL FUTURO DEBIDA A LA INDUSTRIA NUCLEOELECTRICA

La evaluación de la dosis colectiva legada por unidad de práctica es particularmente útil para estimar las exposiciones futuras debidas a prácticas continuas, tal como se expuso en el apartado 2 de este informe. Para la industria nucleoelectrica, el valor de la dosis colectiva legada incompleta por unidad de práctica se deduce de las estimaciones del apartado 3 y la misma resulta ser de 6,1 rad.hombre/MW(e) · año para la irradiación de todo el cuerpo. Para estimar la tasa máxima de dosis media que se alcanzará en el futuro, debe conocerse el valor R/V , es decir la potencia eléctrica nuclear instalada por persona (MW(e)/hombre). En la actualidad, la potencia nuclear instalada (en kW(e)/habitante) alcanza un valor de 0,46 en Suecia y 0,22 en los Estados Unidos, siendo menor en otros países que adoptaron esta forma de generación de energía (6). Si se supone que la futura potencia nuclear global alcanzará un valor de 1 kW(e)/hombre, la tasa máxima de dosis *per caput* futura será:

$$\begin{aligned}\bar{D}_{\text{máx}} &= 10^{-3} \frac{\text{MW(e)}}{\text{hombre}} \\ &\cdot 6,1 \frac{\text{rad.hombre}}{\text{MW(e)} \cdot \text{año}} = \\ &= 6,1 \times 10^{-3} \frac{\text{rad}}{\text{año}}\end{aligned}$$

Otra de las estimaciones interesantes que pueden hacerse se refiere al cálculo de la tasa de dosis media en todo el cuerpo, que se alcanzará en el futuro en la población española, debida al propio programa nuclear nacional.

En España, la potencia nuclear actual es de 0,03 kW(e)/habitante y las previsiones del Plan Energético Nacional 1978-1987 contemplan para éste último año unos 10.500 MW(e) de origen nuclear, lo cual llevaría a

una potencia instalada de alrededor de 0,26 kW(e)/habitante. En lo que respecta a la dosis en la población, originada por la liberación al ambiente de radionucleidos, resulta preponderante la producida por algunos nucleidos de distribución global y particularmente el ^{14}C . Teniendo en cuenta la relación entre la cantidad de población española respecto a la global, es posible estimar un factor de reducción de dos a tres órdenes de magnitud para la fracción de las dosis colectivas legadas que recibiría la población del país, con respecto a la dosis legada total. Esto nos lleva a valores que resultan pequeños con respecto a las dosis colectivas legadas debidas a la irradiación profesional.

Aún considerando para la irradiación profesional el valor total estimado en el apartado 3 de 3,8 rad.hombre/MW(e) · año, el cual, evidente-

mente, podría considerarse como una sobreestimación, resultaría una tasa de dosis media futura para una capacidad nuclear instalada de 0,26 kW(e)/habitante de:

$$\begin{aligned}\dot{D}_{\text{máx}} &= 0,26 \times 10^{-3} \frac{\text{MW(e)}}{\text{hombre}} \cdot \\ &\quad \cdot 3,8 \frac{\text{rad hombre}}{\text{MW(e) \cdot año}} \approx \\ &\quad \approx 1 \times 10^{-3} \frac{\text{rad}}{\text{año}}\end{aligned}$$

En el caso, más real, de no efectuarse en forma total alguna etapa del ciclo de combustible en el país o que la investigación y el desarrollo asociado al mismo sea necesaria solamente en una menor proporción que

la que sirvió de base para las estimaciones del UNSCEAR, la tasa de dosis media en el futuro sería solamente de algunas décimas de mrad por año.

En conclusión puede decirse que, basándose en los resultados obtenidos por UNSCEAR en el seno de las Naciones Unidas, los programas nucleares conducirán en el futuro a unas tasas medias de irradiación de la población relativamente pequeñas. El propio programa nacional producirá tasas medias de dosis en la población española muy bajas, debidas casi exclusivamente a la contribución de las personas profesionalmente expuestas. De cualquier modo es conveniente tener muy en cuenta que la irradiación futura de la población española, debida a la contaminación radiactiva ambiental, dependerá mucho más de los programas nucleares del resto de los países que del propio.

REFERENCIAS

- (1) International Commission on Radiological Protection. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 26. Pergamon Press, Oxford 1977.
- (2) United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. *Sources and Effects of Ionizing Radiation*. UNSCEAR 1977 report to the General Assembly, with annexes. United Nations Sales publication. Sales N.º E. 77. IX. 1, New York, 1977.
- (3) *Principles for Establishing Limits for the Release of Radioactive Materials into the Environment*, IAEA, Safety Series N.º 45, 1978.
- (4) BENINSON, DAN., "Implementation of radiation protection requirements in the limitation of the release of radioactive effluents", Seminario Regional sobre aplicación del análisis de las repercusiones ambientales a la industria nucleoelectrónica, OIEA, Buenos Aires, 29 agosto - 2 septiembre 1977.
- (5) "Recopilación de las dosis equivalentes recibidas por el personal profesionalmente expuesto en las centrales nucleares españolas en operación (1969-1977)", J. E. N. Departamento Seguridad Nuclear, documento DPS/IP/28/02/78 (febrero 1978).
- (6) Revista "Energía", año IV, número 3, mayo-junio 1978.