

Para los participantes únicamente
25 de noviembre de 2005
Español
Original: inglés

Comisión sobre la Utilización del Espacio

Ultraterrestre con Fines Pacíficos

Subcomisión de Asuntos Científicos y Técnicos

43º período de sesiones

Viena, 20 de febrero a 3 de marzo de 2006

Tema 9 del programa*

**Utilización de fuentes de energía nuclear en
el espacio ultraterrestre**

**Reunión técnica conjunta de las Naciones Unidas y el
Organismo Internacional de Energía Atómica sobre los
objetivos, el alcance y los atributos generales de una posible
norma técnica de seguridad para las aplicaciones de fuentes
de energía nuclear en el espacio ultraterrestre
(Viena, 20 a 22 de febrero de 2006)**

**Situación relativa a la seguridad nuclear en el espacio
ultraterrestre y necesidades conexas: una perspectiva de
diseño**

Documento de trabajo presentado por Francia

Nota de la Secretaría

1. De conformidad con el párrafo 16 de la resolución 60/99 de la Asamblea General, de 8 de diciembre de 2005, la Subcomisión de Asuntos Científicos y Técnicos de la Comisión sobre la Utilización del Espacio Ultraterrestre con Fines Pacíficos organizará, junto con el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), una reunión técnica conjunta sobre los objetivos, el alcance y los atributos generales de una posible norma técnica de seguridad para la utilización de fuentes de energía nuclear en el espacio ultraterrestre, que se celebrará del 20 al 22 de febrero de 2006.

* A/AC.105/C.1/L.283.



2. El documento de trabajo que figura en el siguiente anexo se preparó con vistas a la reunión técnica conjunta según el calendario de trabajo indicativo de dicha reunión convenido por el Grupo de Trabajo sobre la utilización de fuentes de energía nuclear en el espacio ultraterrestre durante la reunión entre períodos de sesiones celebrada en Viena del 13 al 15 de junio de 2005 (A/AC.105/L.260).

Anexo I

Situación relativa a la seguridad nuclear en el espacio ultraterrestre y necesidades conexas: una perspectiva de diseño

Documento de trabajo presentado por Francia

I. Situación y contexto

1. Es probable que en el futuro próximo se emprendan nuevas iniciativas en que se utilicen diversos sistemas de energía y propulsión nucleares. En cuanto a la utilización sustancial de la energía nuclear en las aplicaciones civiles en el espacio ultraterrestre, es señalar que ello provocaría inquietud en muchos países en lo que respecta a sus posibles riesgos radiológicos. De hecho, lamentablemente la experiencia ha demostrado que muchos países se sienten preocupados por los efectos transfronterizos de los accidentes de naves espaciales con sistemas nucleares a bordo. A manera de ejemplo, cabe mencionar los incidentes relacionados con la SNAP-9A (dispersión de 1 kilogramo de plutonio-238 (^{238}Pu) – 17 kilocurios (kCi)), el reactor Cosmos 954 en 1978 (Canadá septentrional, contaminación de 50.000 kilómetros cuadrados, >4.000 partículas de desechos – 85 kCi del inventario total – 50 Ci recuperados) y el reactor Cosmos 1402 en 1983 (Océano Índico). Además, siguen existiendo riesgos potenciales; por ejemplo, la reciente misión Cassini/Huygens, cuyo éxito se vio facilitado por el uso de tres generadores termoeléctricos radioisotópicos (GTR) que portaban 28,5 kilogramos de ^{238}Pu -0,5 MCi.

2. Además, cabe destacar que, teniendo en cuenta el número de sistemas de energía nuclear lanzados hasta el presente, la probabilidad de que se produzca un accidente con ese tipo de sistema es del orden de 10^{-4} por año por sistema. Este valor, aunque no se aplica a un gran número de sistemas, puede compararse al valor máximo de 10^{-6} actualmente permitido para la frecuencia de daño del núcleo por reactor/año de una central nuclear terrestre. Esto justifica y subraya la importante necesidad de aplicar un programa amplio y minucioso en materia de seguridad nuclear en el espacio ultraterrestre.

3. Habida cuenta de lo anterior, el diseño de todo sistema nuclear espacial deberá tener en cuenta necesariamente la cuestión de su seguridad. De hecho, los aspectos relativos a la seguridad (análisis y ensayo) han ocupado siempre un lugar importante en proyectos y programas (por ejemplo, SP100, Topaz y Nerva). Sin embargo, esos análisis de seguridad se han realizado atendiendo a objetivos de seguridad fijados por los distintos programas de aplicaciones de la energía nuclear en el espacio ultraterrestre sin basarse en ningún marco internacional. Si bien la mayoría de las decisiones relativas a las aplicaciones terrestres de la energía nuclear se adopta en el plano nacional, los intereses internacionales deben quedar explícitamente representados en el caso de las aplicaciones de la energía nuclear en el espacio ultraterrestre.

4. La Comisión sobre la Utilización del Espacio Ultraterrestre con Fines Pacíficos propuso un enfoque general preliminar en una primera resolución aprobada por la Asamblea General en 1992. Si bien cabría poner de relieve algunos aspectos importantes, como la prohibición del uso del isótopo de plutonio ^{239}Pu en

los reactores espaciales, se reconoce que la primera resolución no contempló todos los aspectos pertinentes (como la propulsión nuclear) y carece de un verdadero carácter jurídico vinculante. Además, aunque no se han establecido criterios cuantitativos internacionales de seguridad para la utilización de la energía nuclear en el espacio ultraterrestre, la Comisión ha formulado recomendaciones sobre la manera en que deberían elaborarse objetivos de seguridad para abordar ese importante tema.

5. Los amplios programas de seguridad elaborados en el marco de proyectos anteriores parecen conformar una política y un enfoque en materia de seguridad y constituyen una suerte de cultura general sobre la seguridad de la aplicación de la tecnología nuclear en el espacio ultraterrestre. Como ocurre respecto de las centrales nucleares terrestres, el principal concepto de la seguridad consiste en reducir los riesgos a los niveles más bajos que razonablemente puedan alcanzarse.^{a, b} Partiendo del principio de defensa en profundidad (concepto relativo a las líneas de defensa, las barreras múltiples, etc.), se establecen objetivos de seguridad para garantizar la salud pública y la protección del medio ambiente. Los objetivos de seguridad deben contribuir, de ser posible, a la reducción total (a cero) del riesgo (frecuencia y consecuencias) por medios técnicos y económicos.

II. Las aplicaciones de la energía nuclear en el espacio ultraterrestre y el medio natural

6. En primer lugar, cabe señalar que todos los objetivos de seguridad relativos a las centrales nucleares se han definido sobre la base de la radiactividad de fondo natural y artificial (médica) tolerada por el cuerpo humano. También es preciso destacar que el medio natural del espacio ultraterrestre sigue siendo muy hostil desde el punto de vista de las radiaciones (el cinturón de Van Allen, los rayos cósmicos galácticos, los fenómenos asociados a las partículas solares, etc.). Esto quiere decir que, lejos de la Tierra, los objetivos de seguridad deberían adaptarse a la ausencia de vida humana y a la radiactividad natural de fondo en ese medio. Esto también plantea la cuestión relativa a los umbrales de dosis o de emisión mínima que deberían utilizarse al calcular los riesgos de accidente, así como los límites de dosis que deberían aplicarse en condiciones operacionales normales. En particular, deberían tenerse en cuenta los siguientes aspectos:

a) La emisión radiactiva de los sistemas de propulsión termonuclear, respecto de los cuales deberían fijarse niveles aceptables de erosión del combustible y valores de temperatura de trabajo a partir de objetivos de seguridad que tengan en cuenta los efectos directos en el rendimiento de los sistemas;

b) El nivel de radiactividad en el circuito primario de los sistemas de propulsión electronuclear (retención de productos de fisión en el combustible, temperatura de trabajo, etc.);

c) Dosis aceptables para las tripulaciones de las naves espaciales;

d) Las aplicaciones planetarias respecto de las cuales deberá definirse un perímetro (o límites del emplazamiento) teniendo en cuenta la radiación de fondo natural, en la que la aportación del reactor resulta insignificante.

7. Sin embargo, debería tenerse en cuenta que, además de la situación imperante lejos de la Tierra, existen otros importantes problemas de seguridad relacionados con la entrada (prevista o accidental) de los sistemas nucleares espaciales en la atmósfera terrestre. Todos estos aspectos de la seguridad están relacionados con el tipo de sistema nuclear que se utilice y son comunes a las situaciones particulares que pudieran surgir en cada una de las distintas etapas de las misiones, desde las actividades previas al lanzamiento hasta la disposición definitiva del sistema de energía nuclear. Más adelante se examinan esos aspectos.

III. Características de seguridad propias de los sistemas de energía nuclear en condiciones de trabajo normales en el espacio ultraterrestre

8. En lo que concierne a las condiciones de trabajo normales de un reactor espacial, los requisitos de seguridad pueden resumirse de la manera siguiente:

- a) El reactor debería mantenerse libre de productos radiactivos hasta alcanzar una órbita operacional segura;
- b) Las órbitas operacionales deberían definirse de manera tal que los productos radiactivos puedan desintegrarse hasta llegar a niveles despreciables antes de su posible entrada en la atmósfera;
- c) El reactor debería permanecer en el espacio después de su uso.

A. Reactor limpio y órbita inicial

9. Aún cuando la aplicación de estrictos criterios de diseño impidan la puesta en marcha y el funcionamiento no autorizados, en el primer aspecto antes citado se destaca la necesidad del lanzamiento de naves espaciales con núcleos limpios y se prevé su funcionamiento únicamente después de que hayan alcanzado una órbita segura. En primer lugar, todavía sería necesario definir órbitas iniciales seguras que formarían parte de los objetivos de seguridad. Después, sobre la base de la recomendación previa de la Comisión sobre la Utilización del Espacio Ultraterrestre con Fines Pacíficos, sólo se permitiría el funcionamiento de reactores alimentados con combustible de uranio sin irradiar. Por ese motivo, la mayoría de los reactores de fisión utilizados en aplicaciones espaciales se han diseñado para trabajar con ^{235}U , en especial uranio muy enriquecido (93%), atendiendo a requisitos de densidad y masa mínima.

10. Sin embargo, como los reactores espaciales son alimentados con una importante cantidad de uranio muy enriquecido, es preciso resolver problemas relativos a la aplicación de salvaguardias respecto de los reactores nucleares destinados al espacio ultraterrestre durante su transporte por tierra, su lanzamiento y después de su lanzamiento. Esos sistemas deben permanecer bajo el control de gobiernos estables y firmemente resueltos a promover la no proliferación.

B. Órbitas operacionales

11. Además, una vez que el núcleo de uranio frío y no crítico se encuentre en órbita, será preciso tomar precauciones en cuanto a las órbitas operacionales en los casos en que se prevea el regreso a la órbita terrestre (misiones de ida y vuelta, aceleración gravitacional de la Tierra, etc.) o en que simplemente los sistemas de propulsión electronuclear permanezcan un período prolongado en la órbita terrestre durante su aceleración. Esas órbitas operacionales deberían diferir de la órbita inicial ya que el núcleo tiene una mayor radiactividad, y deberían definirse como parte de los requisitos de seguridad teniendo en cuenta la duración en órbita y el inventario radiactivo del reactor (tiempo de desintegración).

C. Disposición final

12. Por último, también deberán definirse órbitas específicas con vistas a la disposición final de los reactores espaciales teniendo en cuenta el aumento de los riesgos de impacto con meteoritos y desechos a consecuencia de la prolongación de los períodos de permanencia. Se estudiará la posibilidad de aplicar otras soluciones, como las órbitas de escape del sistema solar y el envío de los sistemas de energía nuclear al Sol, que podrían recomendarse como soluciones intermedias de seguridad entre la reducción de riesgos y la idoneidad técnica de disponer de otra reserva de energía necesaria (a fin de prolongar la vida útil del núcleo del reactor).

D. Radiación inducida por los sistemas de energía nuclear

13. Generalmente los sistemas de energía nuclear están dotados de dispositivos de protección por sombra y no de protección biológica (como en las aplicaciones nucleares terrestres). Por consiguiente, es posible reducir la radiación inducida por el reactor a niveles mínimos respecto del medio natural. No obstante, es importante señalar que es necesario establecer reglamentos sobre límites de dosis para las misiones tripuladas. Esos límites de dosis influirán considerablemente en el rendimiento de los sistemas: la relación masa/empuje en los sistemas de propulsión termonuclear y la relación masa/potencia en los sistemas de propulsión electronuclear.

IV. Características de seguridad propias de los sistemas de energía nuclear en condiciones de accidente en el espacio ultraterrestre

14. Ya se ha dicho que las cuestiones relativas a la seguridad dependen de la fase de la misión y están muy relacionadas con el tipo de sistema nuclear que se utilice. Con la excepción del lanzamiento, que debería analizarse por separado, las distintas fases de la misión pueden resumirse de la manera siguiente:

a) La órbita terrestre, que corresponde o bien a la fase inicial o bien a la fase operativa (como en las misiones de ida y vuelta o los pases simples o múltiples cerca de la Tierra). En lo que concierne a la fase inicial, es importante señalar que la

reducción del tiempo de inyección en los sistemas de propulsión termonuclear (gran empuje) permitirá reducir el riesgo de accidente con núcleos radiactivos. Por el contrario, los sistemas de propulsión electronuclear de poco empuje requieren períodos de transferencia más prolongados cerca de la Tierra con un núcleo radiactivo;

b) Las situaciones interplanetarias, en las que podrían tolerarse accidentes de órbita de otro manera inaceptables. Esto significa, por ejemplo, que podría considerarse la reducción de los márgenes de viaje en el espacio profundo atendiendo a criterios de seguridad distintos de los vigentes para los viajes cercanos a la Tierra. En consecuencia, los objetivos de seguridad podrían ser diferentes durante la vida útil del reactor, lo cual constituye un enfoque completamente diferente del aplicado a las centrales nucleares ordinarias;

c) Las aplicaciones planetarias, en las que los objetivos de seguridad también serían distintos de los aplicados a las centrales nucleares terrestres debido a la diferencia en el número de personas que podrían verse afectadas en una situación de accidente y a la ausencia de biosfera. Sin embargo, en cuanto a las centrales energéticas, deberían preverse medidas uniformes en lo que respecta al accidente común de pérdida de refrigerante, las cuestiones relativas a la gestión de desechos de combustible y otros aspectos. Además, la presencia de generadores termoeléctricos radioisotópicos en la Luna destaca el hecho de que en la actualidad no se puede descartar la posibilidad de utilizar un planeta para el almacenamiento definitivo de desechos radiactivos terrestres α , para lo cual sería preciso aplicar un reglamento específico.

15. Por último, es posible que en algunos casos los requisitos relativos a la fiabilidad de las misiones trasciendan el ámbito de los objetivos de seguridad. De hecho, la redundancia de determinados componentes y la necesidad de mantener el funcionamiento de los sistemas de energía nuclear para garantizar el éxito de la misión contribuirán también a la seguridad.

A. Accidentes en la órbita terrestre

16. La protección contra los riesgos de reentrada accidental consiste en impedir situaciones de reentrada con gran radiactividad después de cumplida la etapa inicial. Es posible reducir la probabilidad de que ocurran situaciones de esa índole si se establecen trayectorias de vuelo y órbitas operacionales estables y adecuadas. Además, el mantenimiento de la maniobrabilidad del sistema incluso en condiciones de accidente también ayudará a reducir los riesgos. En este caso también cabe señalar que esta modalidad operacional degradada podría constituir un importante objetivo desde el punto de vista de la fiabilidad de la misión. Para mantener la maniobrabilidad de los sistemas de propulsión termonuclear o electronuclear es preciso asegurar una potencia mínima en caso de daño del núcleo (elemento combustible obturado, rotura del dispositivo de control de la reactividad, etc.). También es necesario disponer de algunos componentes de reserva (turbobomba, radiador dividido, etc.) en caso de falla del sistema de conversión.

17. A diferencia de las centrales energéticas terrestres, en el reactor espacial no es posible contar con la opción de la contención y el confinamiento. Esto significa, en primer lugar, que es necesario mantener la integridad del reactor incluso durante un

accidente y, en segundo lugar, que el diseño del reactor debe garantizar su seguridad hasta en condiciones de accidente. Por ejemplo, bajo cualquier circunstancia debe mantenerse controlada la reactividad, así como la remoción del calor de desintegración del núcleo en caso de pérdida de refrigerante. El control de la reactividad comprende:

a) Un coeficiente de huecos negativo que impida la criticidad inmediata en caso de pérdida de refrigerante;

b) Un coeficiente energético general negativo que limite espontáneamente la reacción de fisión en cualquier circunstancia en que se produzcan cambios de temperatura (para impedir la criticidad inmediata del reactor);

c) Suficiente ampliación del efecto Doppler que limite el aumento de la temperatura del combustible y la fusión del núcleo en caso de un accidente hipotético (accidente inducido por la reactividad). Cabe señalar que algunos reactores espaciales son pequeños reactores rápidos y que los espectros de neutrones rápidos suelen producir coeficientes Doppler muy bajos. Sin embargo, por otra parte, la utilización del combustible de uranio brinda un importante margen respecto de la criticidad inmediata ($\beta \sim 650$ por cien mil (p.c.m.));^c

d) Estimación del efecto en la reacción de fisión en cadena de la radiación espacial natural (por ejemplo, perturbación debida al flujo solar (p+) durante un fenómeno asociado a las partículas solares).

18. En cuanto a la respuesta a accidentes relacionados con la pérdida de refrigerante y la remoción del calor de desintegración, los sistemas de propulsión termonuclear y electronuclear difieren entre sí atendiendo a la densidad energética de sus núcleos:

a) Los sistemas de propulsión termonuclear con gran densidad energética suelen incorporar más tanques de refrigerante presurizados y otros dispositivos activos de seguridad en comparación con las centrales energéticas terrestres. A diferencia de los sistemas de propulsión electronuclear, los sistemas de propulsión termonuclear también requieren precauciones específicas en la remoción del calor de desintegración, debido a la potencia residual;

b) La eliminación pasiva del calor sigue siendo posible en los sistemas de propulsión electronuclear de poca densidad energética, pero en ese caso sólo cabe esperar la ocurrencia de fenómenos de transferencia de calor por conducción y radiación, al igual que en los conceptos de reactores de alta temperatura que ya se han explotado.

B. Otras situaciones hipotéticas de accidentes

19. Deberían elaborarse criterios y requisitos de seguridad adecuados para asegurar que en el diseño y funcionamiento de los sistemas de energía nuclear espaciales se tengan en cuenta los riesgos de colisión con meteoritos. De hecho, los meteoritos podrían provocar accidentes de pérdida de refrigerante o daños parciales al ciclo de conversión (la turbobomba, o especialmente el radiador en los sistemas de propulsión electronuclear, etc.). Estas situaciones hipotéticas de accidente deben clasificarse atendiendo a una escala de fenómenos cuyas consecuencias y

probabilidad de ocurrencia se relacionen con la masa y el tamaño de los meteoritos. Cabe hacer hincapié en que las aplicaciones planetarias también deben ser objeto de análisis en este sentido.^d

V. Principales aspectos de la seguridad durante el lanzamiento de sistemas de energía nuclear

20. En primer lugar, es importante tener presente que los sistemas radioisotópicos (GTR) y los sistemas de reactor (de propulsión termonuclear o electronuclear) no tienen el mismo inventario radiactivo inicial. Si bien en los reactores alimentados con uranio normalmente se producen unos cuantos curios, en las misiones basadas en sistemas radioisotópicos el combustible de $^{238}\text{PuO}_2$ puro genera varios cientos de kilocurios. En el siguiente cuadro se brindan ejemplos de inventarios normales de naves espaciales típicas dotadas de GTR y de reactor, así como algunos ejemplos de accidentes, con ambos tipos de sistemas de energía nuclear (en curios):

<i>Misión con generador termoeléctrico radioisotópico (Cassini)</i>	<i>Misión con sistema de reactor</i>	<i>Accidente con un generador termoeléctrico radioisotópico SNAP-9</i>	<i>Accidente con Cosmos 954</i>	<i>Chernobil</i>
~500 kCi	Varios Ci	17 kCi	85 kCi (potenciales) 50 Ci (recuperados)	>MCi

21. Sin embargo, la ausencia de radiactividad inicial en los sistemas de energía nuclear impulsados por reactores se ve contrarrestada por el riesgo de criticidad. De hecho, si bien es posible prever la integridad del GTR en caso de entrada en la atmósfera terrestre, deberían elaborarse criterios y requisitos de seguridad específicos que garanticen el no funcionamiento del reactor en caso de accidente durante el lanzamiento (para evitar la criticidad accidental). En este sentido, cabe mencionar los dos enfoques siguientes:

a) Como sucede actualmente con los vehículos de lanzamiento, se podría incorporar dispositivos de destrucción de mandos para evitar trayectorias de vuelo erráticas y excluir todo riesgo de criticidad del núcleo. Esa opción de destrucción/dispersión podría aplicarse a los reactores alimentados con uranio, los cuales, por una parte, tendrían un bajo nivel de radiactividad y, por la otra, no podrían llegar a la criticidad si contaran con sistemas de destrucción que aseguraran la dispersión de los elementos combustibles del núcleo. Si se utilizaran dispositivos pasivos y de reserva se podría asegurar la separación de los elementos combustibles y evitar configuraciones críticas. Sin embargo, si se tiene en cuenta que los reactores espaciales contienen básicamente uranio muy enriquecido, esta opción podría resultar inaceptable desde el punto de vista de la proliferación;^e

b) En los casos de inundación o compactación del núcleo es preciso controlar la reactividad del núcleo. Existen muchas posibles soluciones, como determinados sistemas de seguridad por absorción, la carga de combustible en órbita y la contaminación del núcleo, pero éstas inciden considerablemente en el rendimiento de los sistemas mundiales.

VI. Otras características de seguridad propias de los sistemas de energía nuclear en el espacio ultraterrestre

22. Es preciso poner de relieve determinadas características de seguridad inherentes a la utilización de sistemas nucleares en el espacio ultraterrestre, a saber:

a) Es posible realizar algunas operaciones tecnológicas y de transporte en presencia de un reactor cargado con combustible nuclear;

b) El reactor deberá funcionar en dos medios (de la Tierra y del espacio) sin límites de emplazamiento. Esto complica aún más la definición de los criterios de seguridad. En particular, los límites de la liberación de productos radiactivos durante los ensayos en tierra de prototipos de sistemas de propulsión termonuclear se manifiestan como límites del nivel de potencia de la unidad de motor;

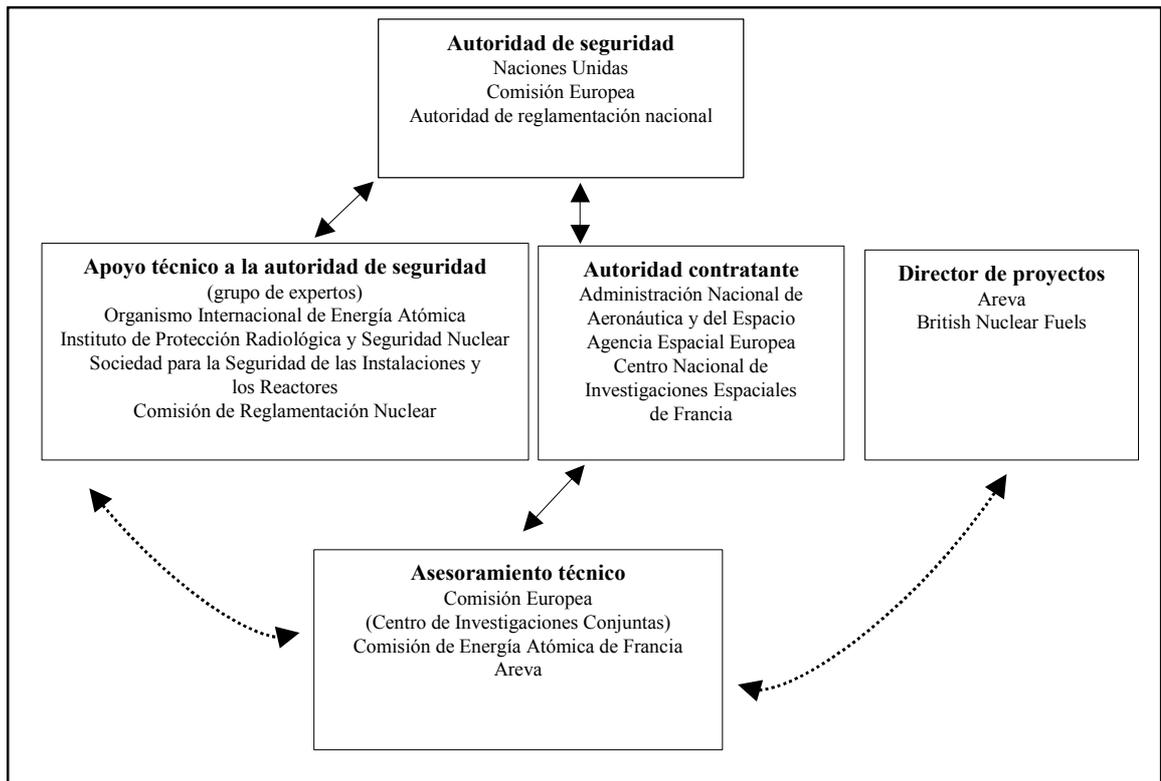
c) El factor de la ingravidez en los vuelos interplanetarios dificulta la convección natural para la remoción del calor de desintegración (seguridad pasiva) y, por consiguiente, limita la densidad energética del núcleo de los sistemas de propulsión electronuclear;

d) El retardo de las señales de control cuando se trata de sistemas ubicados a gran distancia de la Tierra puede complicar aún más la gestión de accidentes iniciados por reactividad. Si se define este aspecto como un problema de seguridad, deberían determinarse las características técnicas del control telemétrico de los sistemas a los efectos del control del reactor.

VII. Marco jurídico para la definición de los objetivos de seguridad

23. Los objetivos de seguridad pueden ayudar a decidir si un sistema nuclear espacial es seguro o no. En consecuencia, la formulación de recomendaciones y directrices en materia de seguridad podría ser de utilidad para las autoridades encargadas de adoptar decisiones en esa esfera. Por eso, en lo que concierne a la utilización de sistemas de energía nuclear en el espacio ultraterrestre, es importante determinar qué instancia es la encargada de adoptar decisiones (operadores, reglamentadores, diseñadores, el público o un ministerio) y en qué instancia recae la responsabilidad jurídica (por ejemplo, la autoridad contratante).

24. Si bien la mayoría de las decisiones relativas a las aplicaciones terrestres de la energía nuclear se adopta en el plano nacional, en el caso de las aplicaciones espaciales los intereses internacionales deben quedar explícitamente representados ya que éstas podrían provocar mayor preocupación en los países interesados respecto de los efectos transfronterizos de posibles accidentes de sistemas de energía nuclear en el espacio ultraterrestre. En la figura que aparece a continuación se ofrece un ejemplo, sobre la base de las aplicaciones terrestres, de las instancias que podrían intervenir en los procesos de examen de la seguridad y de aprobación de aplicaciones espaciales:



Notas

- ^a *Regulatory Practices and Safety Standards for Nuclear Power Plants: Proceedings of an International Symposium on Regulatory Practices and Safety Standards for Nuclear Power Plants*, Organismo Internacional de Energía Atómica, Proceedings Series (Viena, OIEA, 1989).
- ^b M.S. El-Genk, ed., *A Critical Review of Space Nuclear Power and Propulsion: 1984-1993* (Nueva York, American Institute of Physics Press, 1994).
- ^c S. Bernard y otros, "Conceptual design of the MAPS NTP cargo shuttle based on a PBR", documento preparado con vistas al decimotercer simposio sobre la energía y la propulsión nucleares en el espacio ultraterrestre, celebrado en Albuquerque, Nuevo México, en 1996.
- ^d Agencia Espacial Europea, *Lunar Nuclear Power System (LunPS) Studies* (1998).
- ^e E. Rigaut y X. Raepsaet, "First studies on the Optimized Propulsion Unit System OPUS within the current Nuclear Space Program in CEA", documento presentado a la conferencia sobre la energía nuclear y el espacio (Space Nuclear Conference) celebrada en San Diego, California, del 5 al 9 de junio de 2005.