

TRANSPORTE MARITIMO DE MATERIALES NUCLEARES*

Julio Vergara Aimone
Capitán de Corbeta**

Introducción.

Hemos presenciado durante los últimos años travesías de buques por los mares australes con materiales y desechos relacionados con la operación de los reactores nucleares japoneses. Estas naves, periódicamente hacen noticia provocando gran alarma y, durante un par de semanas, reciben diversos apodos, tales como "buque de la muerte" o "cargamento del infierno".

El propósito de este artículo es distraer a los lectores de esta revista de la noticia emocional y a veces desinformada, y así darle mayor racionalidad al tema. Las inquietudes y enriquecedoras opiniones de expositores y asistentes a una reciente mesa redonda, organizada por el Centro de Estudios Estratégicos de la Armada, motivaron al autor a profundizar el trabajo que presentó en esa oportunidad como panelista. La idea central es ilustrar sobre los orígenes y necesidades de este problema, establecer algunas tendencias futuras en el transporte de materiales nucleares, describir las clases de carga y los recipientes de transporte para cada una de ellas, aventurar en el posible impacto ambiental de un sabotaje o accidente, y, proponer a las autoridades, en cada materia, ciertas iniciativas. Algunas de las ideas planteadas son extrapolables al caso de Chile.

Transporte de Materiales Nucleares.

El transporte de materiales nucleares tiene un origen económico, fundado en las tendencias energéticas globales. Este fenómeno ha sido anticipado por Japón, país que ha diseñado una estrategia geopolítica de muy largo plazo, destinada a mantener su actual posición industrial y comercial reduciendo gradualmente su alta dependencia energética, en circunstancias que otros países, entre los cuales se incluye Chile, recurren en una medida importante a un abastecimiento dependiente de combustibles alternativos de corto plazo, de origen regional o extracontinental. Japón señala a la energía nucleoelectrica como un agente de creciente relevancia en su estructura energética. De hecho, el problema del suministro energético no es exclusivo de Japón, aunque para este Estado sea considerado estratégico.

El incremento del consumo de energía está compuesto por el producto del incremento de la población (N) y del crecimiento del producto interno bruto (PIB) per capita, asumiendo un nivel tecnológico medianamente constante, definido éste último por la tasa de cambio entre la energía y el PIB.

$$\delta E = \delta N \cdot \frac{\delta \text{PIB}}{N} \cdot \frac{\delta E}{\text{PIB}} = \delta N \cdot \frac{\delta \text{PIB}}{N}$$

* Versión ampliada de un trabajo del mismo título presentado en mesa redonda organizada por el Centro de Estudios Estratégicos de la Armada, en abril de 1985.

** Licenciado en Ciencias Navales y Marítimas e Ingeniero Naval. MBA de la Universidad Adolfo Ibáñez. PhD en Nuclear Materials Engineering, M.Sc. en Naval Architecture and Marine Engineering, M.Sc. en Materials Engineering, y M.Sc. en Nuclear Engineering, todos del MIT.

El primer factor es cada vez más empujado, pues la población actual, de más de cinco mil millones de habitantes, se está duplicando cada 50 años. El segundo factor refleja el estándar de vida, el que difícilmente se reducirá en el futuro; por lo demás los países de bajo nivel tienden a avanzar a mayores tasas. El tercer factor indica qué tan eficientemente se consume la energía para mantener el producto, el que pese a ser decreciente, es excedido por los otros factores. Por lo tanto, aun con esfuerzos de ahorro energético, el crecimiento de una economía hace necesario incorporar nuevas centrales generadoras de energía. Como resultado, la demanda de energía eléctrica mundial crece a mayores tasas que el producto interno bruto de las naciones. En los países desarrollados, mientras el PIB crece a un 2.2% anual en promedio, la electrificación crece al 2.5% por año. En países en desarrollo, las cifras son del orden del 1.8 y 8%, respectivamente. A modo de comparación, en Chile, el PIB y la electrificación crecen al 6.2 y 7.3%, respectivamente, es decir presenta una correlación energía a PIB correspondiente a la de los países desa-

rollados, pero con tasas de países en desarrollo.

Una vez que se comprende el problema de la demanda, se puede analizar la oferta energética. Una tendencia anticipable en forma clara es que existe un agotamiento progresivo de los recursos energéticos de bajo costo, por ejemplo el petróleo y el gas natural. Nótese que no es la energía en sí la que se agota, sino que la de bajo costo. Por otro lado, los recursos renovables se copan (hidroelectricidad, geotérmica) o son de baja densidad energética (solar directa, mareomotriz, mareotérmica, eólica, solar microonda, etc.) como para ser aplicadas a gran escala. Junto con los recursos carboníferos, los recursos uraníferos para la energía nuclear son los únicos que durarían más allá del año 2100.

En la siguiente Tabla se comparan los recursos primarios, en toneladas métricas de petróleo equivalente (TMPE), y un índice de la autonomía, dado por la razón reserva-producción (R/P) al año 1990. Nótese que esta cantidad es referencial ya que pueden variar tanto las reservas como la producción. La fracción R/P para la opción nuclear considera la tecnología actual de reactores.

Recurso vs Año	Consumo Anual (TMPE)			R/P (años) (1990)	
	1970	1980	1990	Mundial	Regional
Hidroelectricidad	255	432	541	renovable	renovable
Carbón	1662	1815	2192	238	456
Gas Natural	900	1286	1738	58	76
Petróleo	2260	3024	3101	43	46
Uranio	23	172	461	130	>200
Total primarios	5100	6729	8033

A modo de ilustración, la generación de energía hidroeléctrica en Chile, excepto en períodos de sequía, disponible sólo en el Sistema Interconectado Central (SIC), es cercana al 90%, con recursos hidráulicos viables estimados entre 10 a 17 GWe. A las tasas de crecimiento de la demanda indicadas, éstos se coparían a partir del año 2010. Los proyectos de generación a

gas con suministro desde Argentina y Bolivia, del orden de los 2 a 3 GWe para el SIC, y de ~1 GWe para el Sistema Interconectado del Norte Grande (SING), sólo dilatan en algunos años las soluciones autónomas de largo plazo. La energía nuclear es una de esas opciones para reemplazar a los combustibles fósiles.

Algunos grupos de presión sostienen que la

solución al problema de fondo es la eficiencia energética, como por ejemplo el uso de aislación térmica, iluminación de baja potencia, etc. Muchas de estas medidas son necesarias, pero no son sostenibles en el largo plazo sin cambios importantes en la conducta humana, tales como reducir la temperatura media en las casas, cocinar en hornos solares, reducir los electrodomésticos, etc.. Esas medidas de eficiencia son asintóticas, y además los mismos dispositivos modernos de ahorro de energía han sido fabricados utilizando energía contaminante, a veces en grandes cantidades. Algunos de esos grupos de presión generan dificultades a muchas de las opciones, sin ofrecer soluciones concretas.

La energía nucleoelectrica debe verse como una opción adicional, en especial para el mediano y largo plazo, con las ventajas y desventajas que se expondrán más adelante. Para un nutricionista energético la clave del momento es establecer una dieta energética balanceada; para un financista energético será disponer de una cartera diversificada de fuentes, para un bajo riesgo.

Todas las opciones implican un impacto ambiental, con externalidades negativas y a veces positivas, aún las más simples. Los recursos renovables demandan represas, alteraciones de riego, ruido, etc., que crean algún tipo de depredación natural. Los recursos fósiles (carbón, petróleo, gas natural) producen un impacto ambiental global degradante en el mediano plazo, manifestado principalmente por dos fenómenos:

- . Efecto invernadero, debido de la emanación a la atmósfera de anhídrido carbónico y otros agentes, que ocasiona un aumento de temperatura, con cambios climáticos globales, con aumento del nivel del mar por desprendimiento de hielos continentales y con expansión térmica.

- . Deposición ácida o lluvia ácida (óxidos nitrosos y sulfurosos), que se estima afectará a la cadena alimenticia en el mediano plazo. Este afecta bosques, lagos y aguas, aumenta los productos de corrosión, etc..

Casi todas las opciones energéticas implican algún tipo de transporte cuando la industria respectiva no está completamente integrada, es decir cuando no se disponen localmente de ciertos procesos. La energía de fisión nuclear no está ajena al impacto ambiental ni a la necesidad de transporte, como es el caso de Japón, que ha debido subcontratar servicios de reproceso de com-

bustible nuclear en Europa, hecho que es la motivación central de este trabajo.

La energía nuclear compite comercialmente desde 1957, logrando una participación de alrededor del 10% de la energía primaria, y el 18% de la generación eléctrica, manteniendo en operación 430 centrales nucleares de variados diseños, con reactores de hasta 1450 MWe de potencia individual, además de 70 reactores en construcción y otros 60 en proyecto. Japón posee más de 40 centrales en operación y otra decena en construcción. El rendimiento y la seguridad de operación de esos reactores es substancialmente superior a la de los existentes en Estados Unidos, debido en gran parte a una visión de largo plazo y al mayor esfuerzo en investigación y desarrollo. Japón ha sido uno de los líderes en considerar al transporte marítimo de propulsión nuclear en el panorama energético. Esta forma de propulsión sería rentable en ciertos buques con perfil de navegación continua, preferentemente de alta potencia.

Por el momento, en espera de mejores condiciones competitivas, de demanda y de entorno, la propulsión nuclear sólo encuentra aplicaciones en buques de guerra, especialmente submarinos y portaaviones, con alrededor de 400 reactores navales, la mayoría con una tecnología muy similar a la de las centrales nucleoelectricas.

La Energía de la Fisión Nuclear.

Para comprender mejor el origen del transporte marítimo de combustible nuclear usado, plutonio, desechos nucleares, etc., y su posible impacto ambiental, es necesario conocer brevemente la naturaleza de esta energía y su aplicación en la generación de electricidad y en la propulsión naval, incluyendo sus inconvenientes.

Al contrario de las reacciones químicas de los combustibles fósiles, la energía nuclear se deriva de las poderosas fuerzas internas que mantienen unido al núcleo del átomo. El combustible de fisión nuclear tradicional es el uranio, que existe en la naturaleza en una mezcla de isótopos de propiedades nucleares diferentes: El ^{238}U en un 99.3%, y el ^{235}U en un 0.7%. En general, todos los elementos químicos de alta masa pueden fisionarse si están suficientemente excitados, pero entre ellos, el ^{235}U es el único isótopo aún disponible en la tierra, capaz de fisionarse al ser impactado por un neutrón de baja energía (neutrón lento). Cuando un núcleo del ^{235}U es enfrentado por este neutrón, existe una alta probabilidad de absorberlo, tornándose inestable y fraccionándose. La ener-

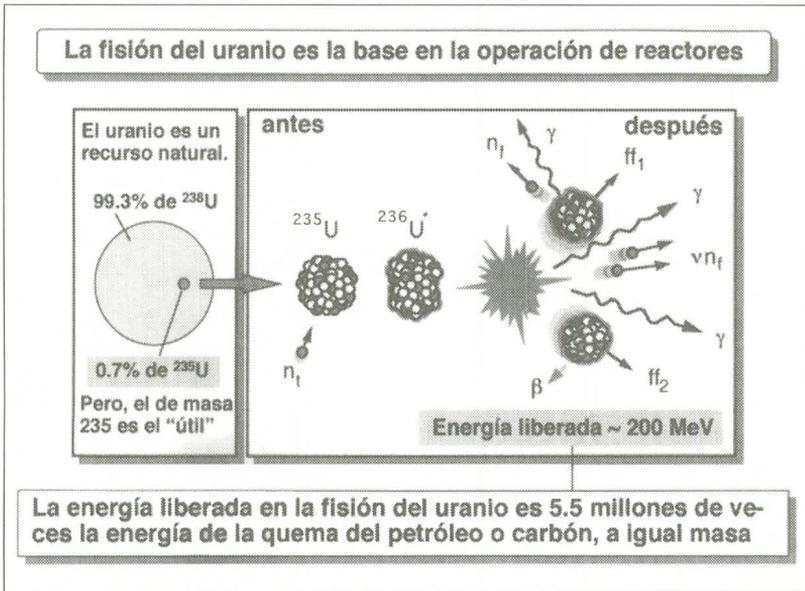


Figura 1. Proceso de fisión nuclear del Uranio-235.

gía liberada resulta de una diferencia o defecto de masas de esa partición, la que ha sido transformada en energía según la ecuación $E=mc^2$. De acuerdo a la Figura 1, se obtienen dos núcleos más pequeños (llamados fragmentos de fisión (ff), como el cesio y el estroncio) con una elevada energía cinética. El núcleo atómico también emite radiación electromagnética de alta energía (radiación gamma) y partículas de carga eléctrica unitaria (radiación beta), además de 2 a 3 neutrones de alta energía (neutrones rápidos). Estos últimos, después de frenarse, enfrentarán otros núcleos de ^{235}U , permitiendo mantener la reacción en cadena en el reactor. La energía cinética de todos los productos de la fisión del uranio, equivalente, a igual masa, a 5.5 millones de veces la liberada en cualquier reacción química, se transforma en calor que es aprovechable en plantas térmicas, ya sea como vapor u otro medio.

Este fenómeno se produce también con núcleos de plutonio ^{239}Pu , que no existe en la naturaleza. Este isó-

topo del plutonio es creado artificialmente en los reactores nucleares mediante reacciones sucesivas a partir de los abundantes núcleos de ^{238}U , según la Figura 2, y queda disponible para una reacción de fisión nuclear. Luego, se puede producir combustible en reactores nucleares. Además, durante la operación se van generando, en menor cantidad, otros elementos de mayor masa atómica que el uranio, denominados transuránidos (TRU), los que tienen una vida media muy larga. La fisión también se logra con uranio ^{233}U , creado de

manera similar al ^{239}Pu , a partir del torio ^{232}Th , unas cuatro veces más abundante en la tierra que el uranio.

Los fragmentos de la fisión (ff) son altamente radiactivos, es decir son núcleos atómicos muy inestables, que tenderán a su estabilidad emitiendo ondas o partículas, con una vida media de unos 30 años. Algunos de estos fragmentos o de los TRU pueden ser separados para servir como

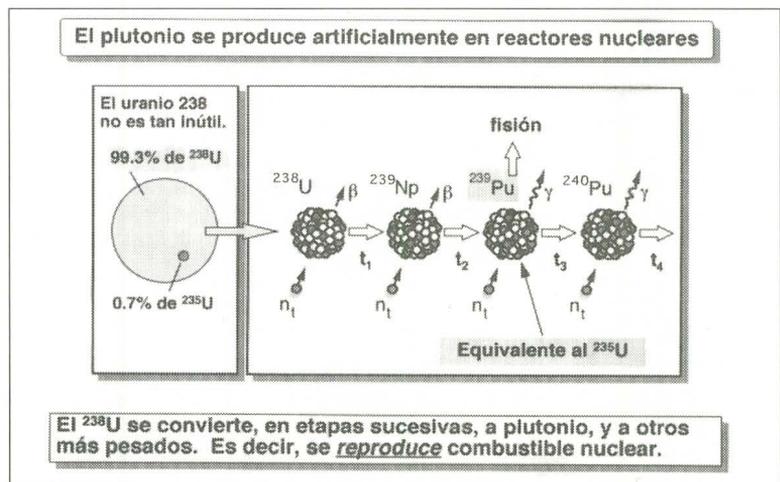


Figura 2. Proceso de formación de Plutonio-239 y de elementos químicos transuránidos.

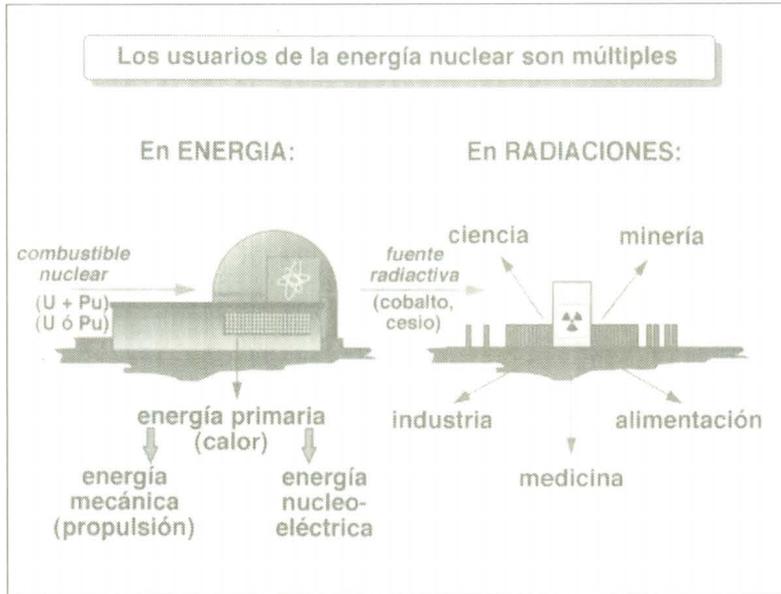


Figura 3. Usos de la energía y de las radiaciones nucleares.

fuentes de radiaciones nucleares ionizantes, necesarias para su uso en la industria, medicina, alimentación, ciencia, etc. Otras fuentes de interés pueden ser activadas al exponer materiales especiales en un reactor. Es decir, como se muestra en la Figura 3, la energía nuclear encuentra múltiples aplicaciones en la actividad industrial moderna.

Ciclo de Combustible Nuclear.

Para lograr los beneficios de la energía de la fisión nuclear se debe procesar los minerales uraníferos hasta lograr el combustible en la pureza y concentración requerida, además de conformar a una geometría que permita el funcionamiento en el reactor. Estas operaciones se realizan en el llamado ciclo de combustible nuclear, que comprende los procesos desde la extracción del uranio hasta su tratamiento después de ser consumido. El ciclo sólo es dominado en toda su extensión por una veintena de países. La ausencia de capacidad local de algunos de estos procesos del ciclo de combustible obligan al transporte de materiales nucleares. En general, el manejo de materiales antes de ser introducido en un reactor no reviste problemas en el transporte. La peligrosidad está en el manejo después de ser consumido en el reactor, donde se han generado productos de alta radiotoxicidad.

En la Figura 4 se muestra el ciclo más simple

de todos, el denominado ciclo abierto, que ha sido favorecido por Estados Unidos, México, Brasil, Corea, etc., mientras que en la Figura 5 se muestra el denominado ciclo cerrado, entre los cuales destaca Japón, Inglaterra, Francia, Argentina, Bélgica, China, etc.

En breve, el ciclo comienza en la mina, donde el mineral se encuentra como óxidos de composición y concentración variable. Este se muele para ser concentrado químicamente y reducir el volumen a transportar. Luego se purifica eliminando impurezas químicas que comprometen las reacciones

nucleares. El siguiente paso, de alto nivel tecnológico, es el enriquecimiento donde se aumenta la proporción de ^{235}U por sobre la natural, típicamente hasta un 3.2%, para lo cual requieren de una conversión química previa y de una posterior, denominada reconversión. Los elementos combustibles requieren ser fabricados con un cierto compuesto químico y enriquecimiento, y quedar dispuestos en una geometría definida, según el tipo de reactor.

El atributo diferenciador del ciclo cerrado es que en este último se reprocesa o se recicla el combustible gastado, para:

- Recuperar combustible no utilizado.
- Clasificar los desechos por familias y comportamiento.
- Obtener fuentes para radiaciones nucleares.

En primer lugar se puede recuperar el uranio remanente y separar el plutonio generado, ambos reutilizables en los reactores nucleares. Entre estos últimos, existe un concepto avanzado especialmente apto para optimizar el uso del recurso base, denominado reactor reproductor rápido (FBR) donde se puede obtener tanto combustible (plutonio), generado en un manto de ^{238}U , como el uranio y/o plutonio que se ha consumido originalmente en el corazón del reactor. El grado de utilización del uranio puede aumentar desde un valor típico del 4% con los reactores actuales, hasta un 80% con esos reactores

FBR, además de justificar la extracción de uranio de menor ley. Luego, con el reproceso de combustible y con una combinación adecuada de reactores, la fracción R/P de uranio es unas 8 veces la alcanzable con los reactores clásicos. Sin embargo, el bajo costo actual del uranio, sumado a otros problemas que se verán a continuación, han retardado los avances más allá del prototipo industrial.

El reproceso permite clasificar el volumen remanente por especies, según su comportamiento y vida media radiactiva, para así reducir el volumen neto de los residuos de largo plazo, los que requieren de un tratamiento previo al depósito permanente. Los productos de fisión son de alta radiotoxicidad inicial pero decaen en períodos relativamente cortos en elementos químicos menos radiactivos, mientras que los transuránidos son de menor radiotoxicidad inicial pero permanecen radiactivos por períodos relativamente largos. Luego, esta discriminación previa al depósito final es conveniente y necesaria. La complementación del reproceso con reactores FBR permitiría lograr un proceso de partición y transmutación in-situ de los transuránidos, simplificando el reproceso posterior, la radioprotección, y los flujos asociados. Si se lograra transmutar los transuránidos al

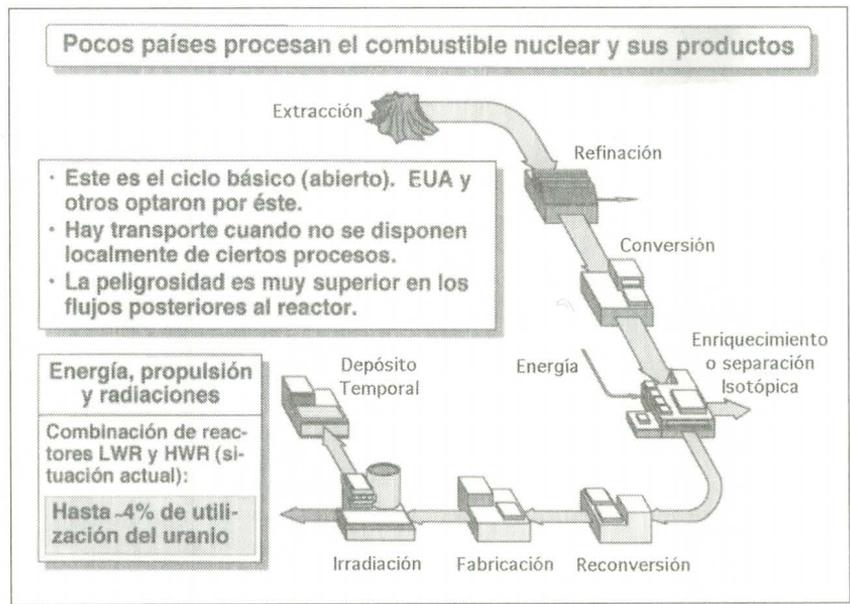


Figura 4. Ciclo abierto de procesamiento de combustible para la fisión nuclear.

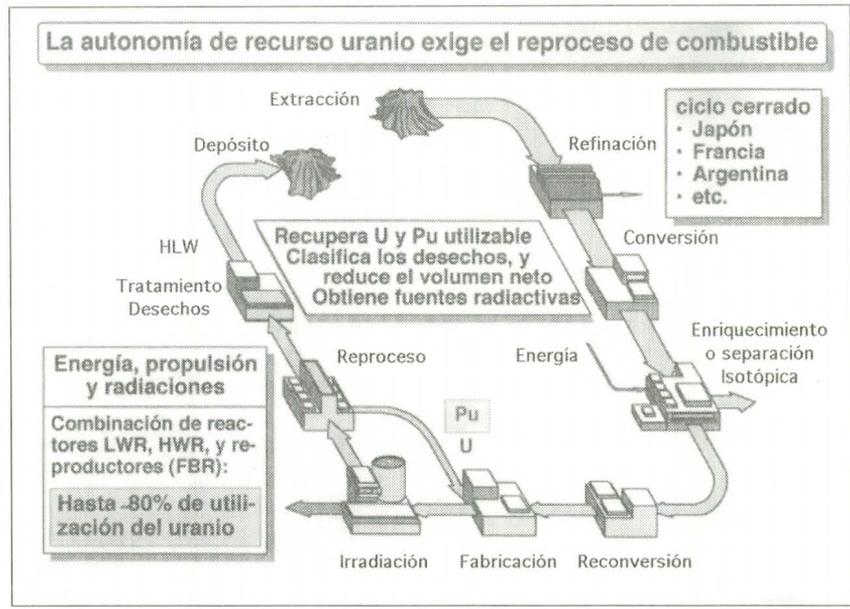


Figura 5. Ciclo cerrado de procesamiento de combustible para la fisión nuclear. La diferencia está en el reciclaje o reproceso de combustible.

0.5% de su valor original, la radiotoxicidad caería en unos dos órdenes de magnitud.

Por último permite separar elementos aptos para ser usados en fuentes radiactivas para aplicaciones en la medicina, como por ejemplo el ^{99m}Tc y ¹³⁷Cs, que son productos de fisión, como también para la generación radioisotópica de elec-

tricidad en satélites y faros, como por ejemplo el ^{238}Pu , ^{242}Cm y ^{90}Sr , y varios otros elementos útiles.

El reproceso de combustible es un proceso controversial, pues por un lado es vital para garantizar la autonomía del recurso uranio, y por otro tiene aplicaciones militares, al obtener plutonio para armas, como se muestra en la Figura 6. En el combustible descargado, aproximadamente el 60% del plutonio es ^{239}Pu después del primer ciclo de reproceso, el que, purificado, constituye una materia prima de muy alta calidad y baja masa, apto para ser usado como explosivo nuclear (una bomba de última generación, de ^{239}Pu y ^{241}Pu , dopada, requiere de unos 5 kg. de muy alta pureza, equivalente a una esfera de 8 cm. de diámetro). Luego, aparece una componente adicional cuando se transporta plutonio, ante el riesgo de abordaje y captura por un grupo terrorista intermediario de un país con ambiciones de armamento nuclear. No obstante, después de unos cinco ciclos de reproceso, el plutonio posee menos ^{239}Pu y más plutonio ^{238}Pu , ^{240}Pu , ^{242}Pu , muy inestables para ser usados en un arma nuclear. Por otro lado, el reproceso deja de justificarse económicamente cuando hay suficiente uranio disponible a bajo costo, pues el reproceso eleva el costo unitario de combustible y complica el proceso de fabricación.

Por ello, en varios países no se realiza, dejándose los elementos combustibles en piscinas temporales contiguas a los reactores, en espera de soluciones de largo plazo. Puede notarse que los explosivos también pueden ser fabricados a partir de uranio de muy alto enriquecimiento (HEU) en ^{235}U (>90%) y purificado, al intensificar la magnitud del proceso de enriquecimiento respecto de su versión comercial, o bien repitiendo muchas veces el proceso. El HEU es mucho menos práctico que el plutonio, pues requiere de una esfera de unos 14 cm de diámetro.

Por esta relación con las armas nucleares, presentes en unos pocos países, la industria nuclear ha sido muy entorpecida.

Tendencias en el Transporte de Materiales Nucleares.

El transporte de materiales nucleares sólo ha cobrado notoriedad en Chile desde hace algunos años, con el transporte de materiales desde Europa a Japón. No obstante, los viajes vienen sucediendo desde hace más tiempo. Esto obedece a una política energética de creciente autosuficiencia y de muy largo plazo, que ha exigido mayor énfasis en la energía nucleoelectrónica, que se estima crecerá a ritmos superiores al 4% anual, y que sorprendió a ese país sin la debida capacidad propia de reproceso. El transporte marítimo se

debe a que Estados Unidos (dueño del combustible original) no permitió el transporte aéreo. La Ley 94-79 de 1975 prohibió el tráfico aéreo de plutonio hasta no desarrollarse un contenedor que resistiese la caída y explosión del avión. Se fabricaron paquetes de mayor resistencia que la exigencia original, pero de tamaño relativamente pequeño para uso en gran escala comercial. Esta ley ha obligado a otros países a modificar sus políticas de transporte aéreo, eliminándose como opción, y dando paso obligado al trans-

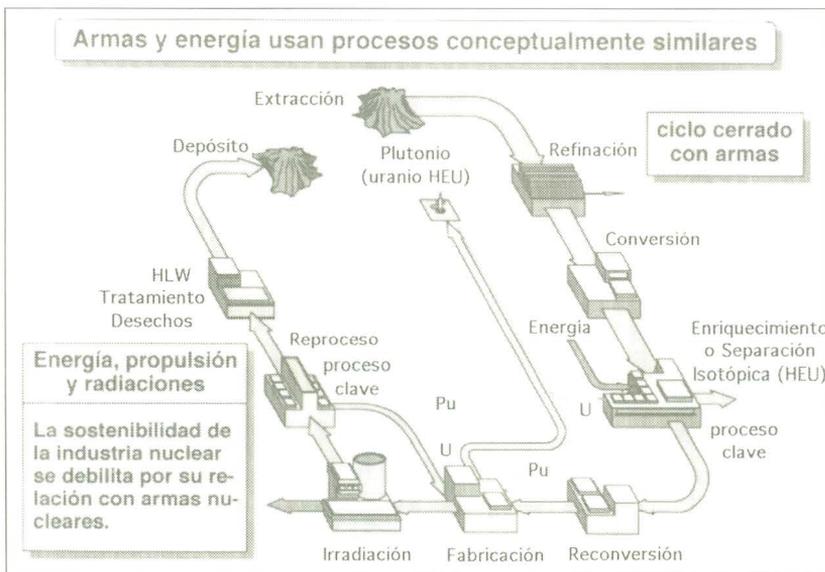


Figura 6. Ciclo cerrado de combustible para reactores y su relación conceptual con el combustible para armas nucleares. Nótese que para bombas de Uranio, el proceso de enriquecimiento es más energético y masivo.

porte marítimo. La ruta ha sido aparentemente elegida para evitar grupos de presión, y abordaje.

La subcontratación de los servicios de reproceso por Japón data de 1977, cuando se llevaron por primera vez parte de las 7000 toneladas de combustible usado a las plantas de La Hague (Francia) y Sellafield (UK). A cambio de un valor se les entregarán unas 30 toneladas de plutonio, junto a los desechos de la operación, que serán devueltos en transportes sucesivos hasta el año 2010. En 1977 entró en funcionamiento a nivel experimental la planta de reproceso de Tokai, en Japón y recientemente, en 1993, se inició la construcción de la planta de reproceso de Rokkashomura, que durará hasta el año 2000, diseñada para reprocesar 800 toneladas al año, la que se encargará de separar otras 50 toneladas de plutonio acumuladas en el combustible usado hasta el 2010. A partir de ese año, vendrán otras tres plantas de reproceso, y no será necesario el transporte masivo debido a la independencia en el ciclo de combustible nuclear.

Debido a los problemas actuales, que afectan la imagen y competitividad de la energía nuclear, existe una reducción del número de pedidos de nuevas centrales nucleoelectricas, a lo que se suma la salida planificada de centrales que van cumpliendo su vida útil. Por otro lado, se espera se cumplan progresivamente las tendencias energéticas, que implican un aumento del

costo de generación, donde la energía nuclear posee ventajas relativas.

Hacia el año 2020 se espera que confluyan dos fenómenos; el primero de ellos como resultado de una importante pérdida de participación de generación eléctrica en el corto plazo, lo que expondrá a varios países al uso de energías más caras y contaminantes; el segundo, la disponibilidad de reactores denominados avanzados, de media potencia, de bajo costo relativo de construcción, aptos para mercados en desarrollo y que, a la vez, incorporan sistemas pasivos de seguridad, más confiables y efectivos que los activos. Como resultado, es posible anticipar a partir de esa fecha una recuperación sostenida de la participación de la energía nuclear. Además, este efecto hará que el costo del uranio natural aumente, con un consiguiente incremento de la demanda e importancia del reproceso de combustible. Si los proveedores de reproceso permanecen concentrados, implicaría un aumento del transporte, pero no necesariamente por la vía marítima.

La siguiente Tabla indica las capacidades actuales (y las capacidades adicionales esperadas en el plazo de una década) de reprocesamiento para reactores de agua liviana (LWR, los más comunes), en toneladas de metal pesado (THM), actualmente concentrado en pocos países.

País	Reactores LWR	Reactores FBR	Otros Reactores
Francia	1200 (+400)	5	600
India			200 (+400)
Japón	100 (+800)		
Rusia	400 (+1500)		
Inglaterra	1200 (+400)	10	1500
Total :	2900 (+3100)	15	2300 (+400)

Estados Unidos posee una de las mayores capacidades de reproceso, pero no las opera comercialmente pues optó, en los años 70, por un ciclo abierto en generación de energía, para así desincentivar la proliferación horizontal de armas nucleares, destinando esas plantas a su programa militar. También existen capacidades

menores en otros países, tales como Alemania, Bélgica, Argentina, e Italia.

El colapso de la Unión Soviética y su pérdida de poder relativo frente a Estados Unidos ha permitido iniciar un incipiente desmantelamiento de las cabezas nucleares. El arsenal nuclear actual, entre armas operativas y arsenales es de unas

55000 cabezas totales, mayoritariamente entre Estados Unidos y la ex Unión Soviética, con un inventario de alrededor de 1000 toneladas de uranio de alto enriquecimiento y unas 220 toneladas de plutonio, combustible suficiente para unos 4 años de generación nucleoelectrónica. Actualmente, se estima que se desmantela a una tasa de no más de 4000 por año, limitada por el elevado costo del desarme. Se prevé que en unas dos décadas se habrá desmantelado el 50%

de los arsenales, quedando ese valor a futuro. Estados Unidos ya ha comprado uranio enriquecido a Rusia, y es posible esperar que también exista comercialización y transporte de plutonio.

En el mediano o largo plazo, dependiendo de la evolución del precio del uranio, y también de las tendencias políticas, se prevé una introducción progresiva de los reactores FBR que consumen y demandan plutonio, los que además, pueden convertir in-situ los elementos químicos de larga vida media, simplificando el reproceso y los flujos asociados. Cabe destacar que antes de que se agote el uranio natural, se espera haber dominado la tecnología de la fusión nuclear, cuyas materias primas candidatas para combustible son el deuterio, el helio, y el tritio. De lograrse la compleja tecnología de reactores de fusión, estimado en al menos unos 50 años más, en especial aquella que considera el deuterio que está contenido en el agua, se contaría con un recurso limpio, casi sin residuos radiactivos, y prácticamente inagotable.

Impacto Ambiental de la Energía Nuclear.

La energía nucleoelectrónica es una de las opciones de menor impacto ambiental relativo cuando es administrada responsable e integralmente, es decir cuando se opera en forma segu-

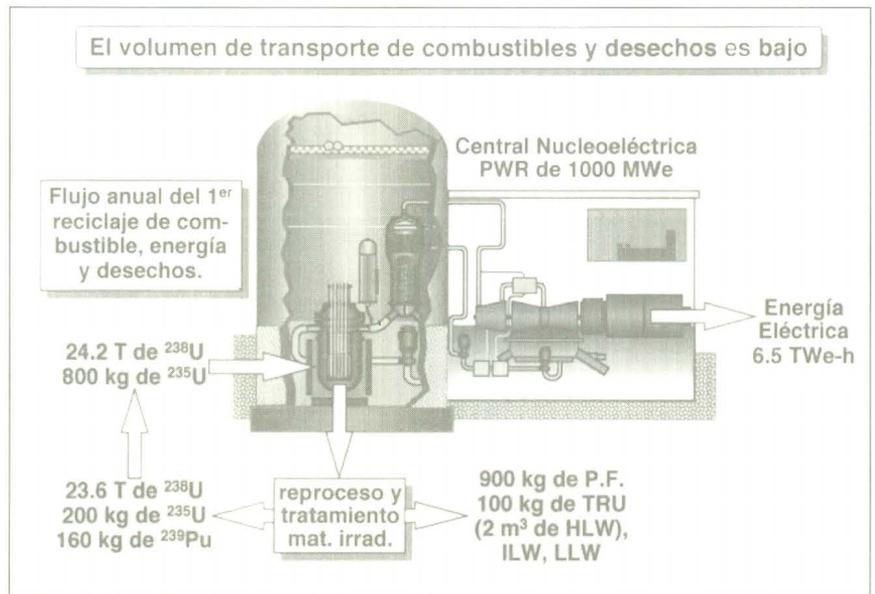


Figura 7. Flujos anuales equivalentes para la operación de una Central Nuclear de 1000 MWe. Los flujos corresponden al primer ciclo de proceso. La composición de la alimentación y descarga de combustible de ciclos sucesivos varía levemente.

ra, se desacopla de la producción de armas nucleares y se da un tratamiento adecuado a los desechos nucleares. El principal problema es que el material radiactivo (o tóxico) escape de su recipiente, fluya por algún mecanismo hasta alcanzar y afectar al ser humano.

Los tres flujos relacionados con el reproceso: el combustible irradiado, los desechos y el uranio o plutonio reciclado, son los de mayor relevancia radiotóxica, en especial los dos primeros, y pueden ser una potencial causa de exposición al ser humano. Por el momento, es posible adelantar que el flujo relativo neto de materiales es comparativamente muy bajo.

La Figura 7 muestra los flujos equivalentes anuales para la operación de un reactor actual de 1000 MWe, operando con una disponibilidad del 75%. En la práctica, el combustible se reemplaza por partes cada 18 meses, y cada tercio permanece en el reactor por unos 3 a 4 años. Para un enriquecimiento del 3.2% en ²³⁵U, se requiere unas 25 toneladas de uranio anuales, de las cuales unas 23.8 toneladas (96%) se descargan sin uso. Si se reprocesa el combustible usado se puede separar el uranio (llamado uranio reprocesado o REPU) y obtener unos 200 kg (~1%) de plutonio adicionales, el que puede consumirse mezclado con uranio (denominado combustible de óxi-

dos mixtos o MOX) en esos reactores hasta con un 3% de plutonio, sin modificaciones mayores, o bien consumirse enriquecido al ~20% en los reactores FBR.

En cualquier caso, la contaminación atmosférica en operación normal es nula, y por ende no contribuye a los fenómenos globales citados anteriormente. Por el lado de los desechos definitivos, se separa alrededor de 1 tonelada (~3%) de desechos de alta radiactividad (HLW), principalmente productos de fisión, elementos transuránicos, y algunos productos activados y de corrosión, equivalentes a unos 2 m³.

Otros desechos denominados de radiactividad media o baja (ILW y LLW) son los derivados de la mantención y operación de los reactores, del procesamiento de combustible, y de todas las aplicaciones nucleares. Cabe destacar que los desechos tóxicos de la industria química son muy superiores a los de la industria nuclear.

La Figura 8 muestra una comparación de los flujos equivalentes anuales para la operación de una central nucleoelectrónica con ciclo cerrado, y una central termoelectrónica a petróleo, ambas de 1000 MWe, operando con una disponibilidad del 75%. Se compara además la autonomía del recurso fuente y el costo de obtención del combustible. En el lado de la central a petróleo, se muestran entre paréntesis los valores para una central a carbón. En el lado de la central nuclear, se muestran entre paréntesis los valores con ciclo abierto. En términos de impacto se aprecia que es una de las opciones energéticas más ecológicas. Debe notarse que aún no existen regulaciones para confinar los residuos de las plantas termoelectricas.

Lo anterior se refiere a la operación normal de las centrales. Para mayor comprensión conviene exponer algunos aspectos de la operación anormal, y para ello es conveniente hacerlo en función del riesgo de generación, es decir la frecuencia de eventos anormales por la conse-

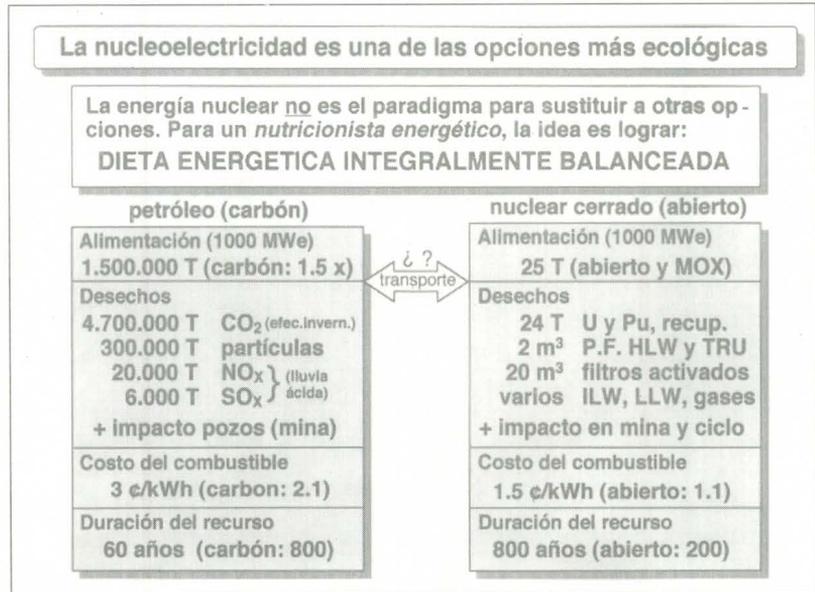


Figura 8. Flujos anuales de Centrales Termoelectricas. Se muestra el costo relativo del combustible anual y la duración del recurso.

cuencia, en función del número de fatalidades de cada uno.

Por unidad de energía generada en un cierto tiempo (ej. TWe-h), el riesgo de la opción nuclear es varios órdenes de magnitud menor a otras opciones. En el caso nuclear la frecuencia probable es muy baja pero la fatalidad esperada es comparativamente alta, aunque la percepción sea diferente. La Figura 9 muestra el riesgo relativo de la operación de 100 reactores nucleares, comparado con eventos causados por el hombre y eventos naturales. Los accidentes de la operación de reactores, y durante el transporte nuclear, son de muy baja probabilidad, pero de grandes consecuencias si ocurren.

El accidente de Chernobyl es lo más grave que le puede pasar a un reactor nuclear. Hubo algunas razones de diseño, pues éste carecía de varios sistemas de seguridad estándares en el resto del mundo. El accidente mismo es atribuido a una sumatoria de eventos innecesarios, precedidos por acciones negligentes de los administradores y operadores de la central. Esto resultó en la muerte directa de 31 trabajadores y bomberos. En el largo plazo incrementará el número de personas normalmente afectadas de cáncer, en una cantidad que es difícil de determinar en forma científica, debido a las diferentes exposiciones, resistencia humana y ambiente, ade-

más de las dificultades de seguimiento individual. Se estima que el costo para remediar los daños a las áreas afectadas superará los mil millones de dólares. Por el lado de la generación termoeléctrica (recursos fósiles) se registran varios accidentes de consecuencias humanas comparables, y un gran número acumulativo de bajas en su ciclo de extracción y elaboración de combustible. El riesgo de ese tipo de generación es mayor que la nuclear.

Transporte de Materiales Nucleares.

En primer lugar, el flujo neto relativo de materiales nucleares es muy bajo. Comparando los combustibles que estarán disponibles en el mediano plazo, el carbón y el uranio, según la Figura 8, para igual cantidad de energía generada, el primero demanda 75000 veces más requerimientos de transporte que el segundo, lo que significa menos accidentes, menor tráfico marítimo y menor contaminación atmosférica. La demanda de carbón se satisface con unos 35 buques cargueros de 250 metros de eslora. La demanda de uranio, incluido el reproceso, se satisface con un sólo buque de la clase Pacifico, diseñado para treinta veces la carga que normalmente transporta.

Por ejemplo, el *Akatsuki Maru* transportó en 1992 un par de toneladas de plutonio de reproceso, equivalente a la operación de 6 reactores de 1000 MWe (2 años de la generación eléctrica total chilena de 1994). Recientemente, el *Pacific Pintail* transportó cerca de 14 toneladas de residuos HLW vitrificado, que contiene hasta un máximo de casi 3500 kg. de productos de fisión

y transuránidos, que corresponde a la operación de unos 4 de esos reactores. Los residuos HLW son el equivalente de las emanaciones de gases y residuos sólidos de plantas a carbón. Si los 6 reactores indicados no hubiesen existido, se habrían emitido 28 millones de toneladas adicionales de CO2, 2 millones de toneladas de partículas, y 160 mil toneladas de óxidos nitrosos y sulfurosos.

Las características del buque de transporte y el tipo y cantidad de la carga están relacionadas por la radiactividad total y específica, según la Tabla. Existen tres tipos de cargamento. El primer tipo sólo requiere consideraciones menores. El segundo tipo requiere de sistemas de emergencia y supervivencia especiales, mientras que el tercer tipo es de un diseño y construcción especial.

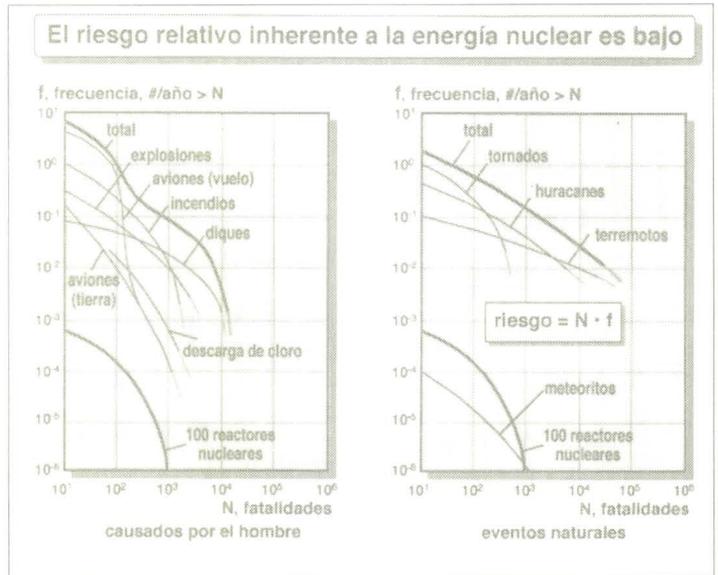


Figura 9. Riesgo relativo de operación de 100 Reactores Nucleares, comparado con el de eventos causados por el hombre y por la naturaleza.

Clase de buque	Radiactividad total a bordo (TBq)		Características especiales del buque
	HLW y comb usado	Plutonio	
INF-1	<4000	<4000	Satisfacción del regulador
INF-2	≥ 4000 y <2.10 ⁶	≥ 4000 y <2.10 ⁵	Control de averías y Temp.
INF-3	≥ 2.10 ⁶	≥ 2.10 ⁵	Buque especial

El buque de la clase Pacífico es de 104 metros de eslora y 17 de manga, con un desplazamiento de 5100 toneladas, y un peso muerto de 3000 toneladas. Las dimensiones y márgenes son adecuadas para un buen comportamiento en navegación. Posee dos plantas independientes de propulsión Diesel de 1900 SHP cada uno, con dos ejes y dos timones, para una velocidad máxima estimada de unos 18 nudos, con una hélice transversal a proa. Posee una resistencia estructural superior, debido a un diseño de doble casco y fondo que ofrece mejor protección al cargamento en caso de colisión o varada, y mejores condiciones de estabilidad. Posee sistemas redundantes en equipos contra incendio, inundación, refrigeración de la carga, y generación eléctrica, y sistemas de navegación (GPS, ecosonda, etc.). El buque cumple con normas de la Organización Marítima Internacional (IMO) y del Ministerio de Transporte de Japón. En Noviembre de 1993 la asamblea de la IMO adoptó un código para el transporte seguro de HLW, plutonio, y combustible irradiado.

Las características del contenedor de transporte varían según el tipo de carga: elementos combustibles usados, combustible reprocesado y desechos de alta actividad.

Los elementos combustibles usados permanecen algunos años en piscinas contiguas al reactor y luego se llevan a la planta de reproceso, o a depósitos temporales, en recipientes

especialmente diseñados. Un elemento combustible típico en un conjunto de 4 a 5 metros de largo compuesto por 264 tubos de una aleación de circonio de 1 cm de diámetro, cada uno con más de 300 pellets de dióxido de uranio (uranio-plutonio). Estos se transportan en embalajes tipo B de acuerdo a la clasificación del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), que están blindados con más de 20 cm. de plomo y otras barreras para evitar que la radiactividad afecte a las personas, y poseen capacidad para refrigerar el calor generado por el decaimiento radiactivo. Por ejemplo, hay versiones de 30 toneladas, para 4 elementos combustibles, hasta unos de 100 toneladas, para 12 elementos combustibles (un reactor de 1000 MWe requiere entre 4 y 5 de estos contenedores al año). El interior puede estar seco, con o sin ventilación forzada, o con agua borada, según las necesidades de refrigeración. La caja externa es una combinación de cilindros de cobre y de acero de alta resistencia de más de 20 cm de espesor. Para un transporte tipo INF-2, es decir con un buque estable, con equipos especiales contra incendio y refrigeración pero no construido especialmente para este propósito, puede transportarse un contenedor de 100 toneladas con combustible que lleva descargado del reactor unos 150 días, o bien llevar hasta 6 contenedores de estos, con un combustible de 2 años después de ser descargado.

El transporte de combustible reprocesado es más simple desde el punto de vista de la contención de su radiactividad, pero complejo desde el punto de vista de su criticidad, debiendo ser embalados en pequeñas cantidades, y con materiales absorbentes de neutrones. Estos se transportan, por ejemplo, en cantidades de no más de 10 kg., en contenedores de madera y cadmio. Un contenedor típico mide 1.3 m de largo, 0.8 m de diámetro, y pesa casi 200 kg. La Figura 10 muestra la configuración de empaques usado en 1992.

El contenedor para los desechos HLW es similar a uno para elementos com-

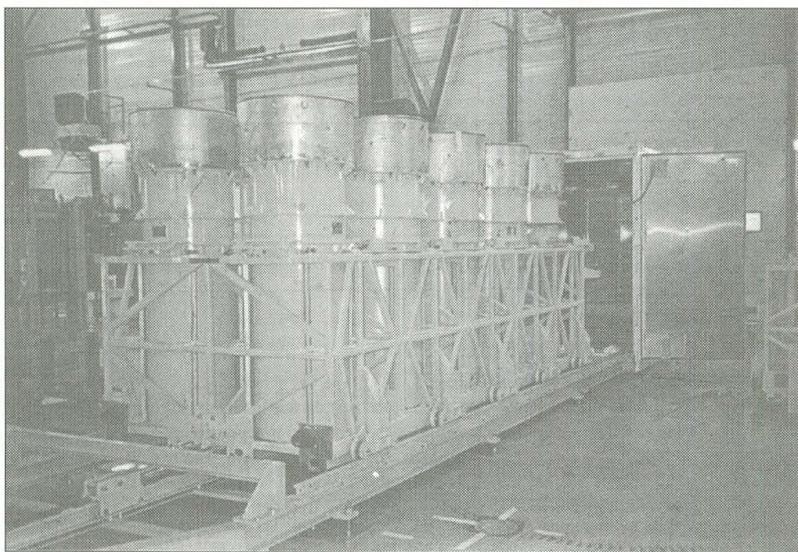


Figura 10. Configuración de recipientes usados para el transporte de Plutonio desde Francia a Japón en 1992.

bustibles usados, pero contiene varios recipientes sellados de menor tamaño en su cavidad. Por ejemplo, el cargamento del *Pacific Pintail* consistió en 28 residuos vitrificados, cada uno en un recipiente de acero inoxidable con tapa soldada, y con un peso total de 500 kg, de los cuales unos 65 kg. son de productos de fisión y transuránidos. El recipiente exterior (Mod TN28VT) es de acero, con 6.6 metros de largo y 2.4 m de diámetro, y un peso de 98 toneladas, el que está diseñado para evacuar 41 kW de calor de decaimiento. Para un transporte tipo INF-2, como podría ser un *Pacific Pintail*, puede llevar hasta dos contenedores TN28VT de HLW de un combustible descargado 10 años antes.

Antes del envío de cada contenedor se revisa la estanqueidad, la contaminación residual, temperatura, y los accesorios de levante. La Figura 11 muestra un diagrama esquemático de contenedores típicos para el transporte de combustible usado y para HLW vitrificado. La disposición del contenedor de desechos HLW en el buque se muestra en la Figura 12, la que además muestra un esquema del proceso de vitricado.

El diseño del contenedor debe someterse a varias pruebas estándares de integridad física. Entre estas destacan la resistencia a la caída libre desde 9 metros a un suelo rígido de concreto y acero, que equivale a caer a un muelle desde 15 metros de altura. La velocidad de choque en ese caso es de por lo menos 1.5 veces la velocidad de impacto del buque en el fondo del mar en el caso de volcarse y hundirse. No obstante, se han realizado pruebas que incluyen el choque de un tren a 150 km/h a un remolque atravesado con un contenedor en la línea férrea, demostrándose su integridad y supervivencia sin fallas, como se muestra en la Figura 13.

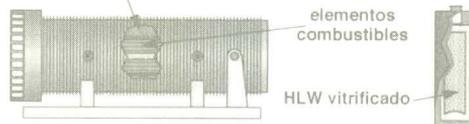
Los contenedores están diseñados para impedir un derrame

Elementos Combustibles Usados

- Ej. 4.7m (L) x 0.9m (φ) x 20 Ton para 4 elementos combustible (1.3 Ton U)
- Combustible en sus vainas
- Materiales estructurales radiactivos
- 20 cm de plomo, liner de cobre, y cubierta de acero de alta resistencia.

Desechos del Reproceso (HLW)

- Ej. 1.7m (L) x 0.6m (φ) x 0.5 Ton para el equivalente a 1 Ton uranio
- HLW disperso en una matriz de vidrio Borosilicato.
- 10 cm de plomo, 1 cm de titanio, y liner de acero inoxidable.



Pruebas de integridad física al contenedor patrón.

- caída libre de 9 metros a suelo de concreto y acero
- chorro de agua de alta presión, y sumersión a 16 m.
- compresión sin deformación interna (sin criticidad)
- penetración (caso de choque con tren a 150 km/h)
- 30 minutos de incendio de gasolina a 800°C
- pruebas hidráulicas y de estanqueidad radiactiva.

Figura 11. Características de un contenedor para el transporte de combustible usado y de un contenedor individual para residuos de alta radiactividad (HLW).

El Pacific Pintail transportó HLW para depósito permanente

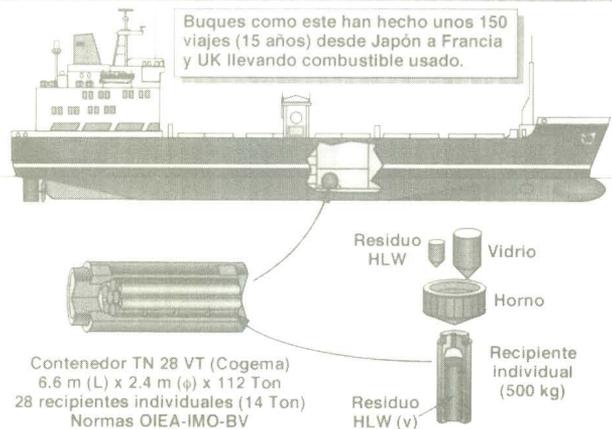


Figura 12. Disposición de un contenedor múltiple de transporte de recipientes HLW en el "Pacific Pintail". (Foto del Pacífico Norte). Se muestra el esquema de vitricado en los contenedores individuales.

Otras pruebas son la supervivencia a un incendio de 30 minutos de gasolina (~800°C), el chorro de agua de alta presión, y sumersión a 16 m de profundidad, estanqueidad radiactiva, y compresión sin deformación interna (para prevenir un problema de criticidad neutrónica).

Para el transporte y depósito seguro de HLW, o cualquier material que va a ser confinado permanentemente, se requiere atraparlos en una matriz estable, y de baja disolución en agua.

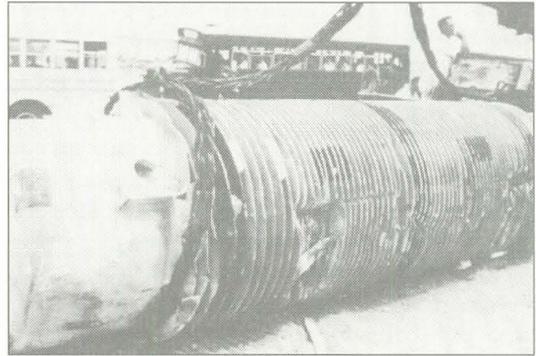
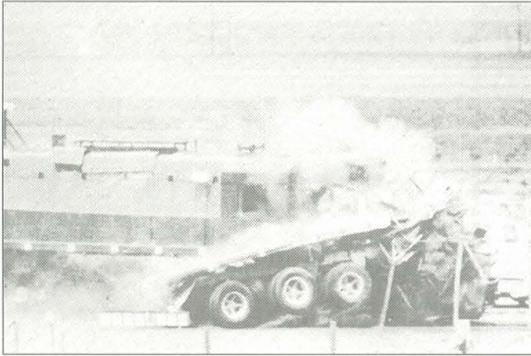


Figura 13. Prueba de colisión de un contenedor contra un tren a alta velocidad. El contenedor queda integralmente intacto después del impacto.

El vidrio ha demostrado ser uno de los mejores candidatos, y su longevidad ha sido comprobada. Entre otros, el de mejores características de inmovilización de HLW es el vidrio borosilicato, que puede contener hasta un máximo de 30% de HLW, según la cantidad de calor generado por decaimiento de los desechos al momento de depositar. Este posee una mejor conductividad y capacidad térmica que otros medios, y una menor tasa de percolación o disolución de 10^{-6} gramos por cm^2 al día. Estas tasas implican de acuerdo a modelos experimentales y matemáticos que, si el vidrio de un recipiente entra en contacto con el agua al décimo año se escapará el 0.001% de la radiactividad del momento del reproceso. Si el agua ingresa al cabo de 300 años ese valor será un centésimo de esto. El vidrio de un recipiente se habrá disuelto al cabo de 150 mil a 1 millón de años.

Las hipótesis de accidente de mayor consideración en el transporte de materiales nucleares son el naufragio por colisión en aguas profundas sin recuperación y el incendio descontrolado y persistente con fallas en la opción de inundar el compartimiento, hasta llegar a deformar los contenedores y alterar el vidrio. Para ambas situaciones existen medidas anticipadas.

El transporte de HLW japonés termina en el área de Rokkashomura, que cuenta con una instalación de depósito temporal, donde permanecerán hasta unas cinco décadas más, en espera de que decaigan los productos de fisión de corta vida, permitiendo un enfriamiento adicional, por medio de aire. El depósito permanente está previsto que será habilitado a partir del año 2035.

Impacto Ambiental del Transporte de Materiales Nucleares.

La posibilidad de derrame del cargamento es muy baja; está respaldada por el exigente diseño de los contenedores, que son probados para múltiples solicitaciones, y por el transporte en buques calificados.

El principal problema considerado en los procedimientos y diseños es que el material radiotóxico caiga al agua, se derrame, fluya, alcance y afecte al ser humano, en esa secuencia, asumiendo que no ha sido posible su rescate. El problema no es la radiactividad, pues para ello basta diseñar un blindaje adecuado. Si un elemento combustible usado pero no dañado, o un contenedor sellado con HLW caen al agua, estos ya no serán dañinos, desde el punto de vista de la exposición a la radiactividad, más allá de unos pocos metros de distancia. Por ejemplo, en reactores experimentales tipo piscina, los operadores pueden ver el núcleo del reactor encendido, donde hay intensa emisión de neutrones y radiación gama, y que sólo está a unos 10 metros bajo el nivel de la superficie.

Si se produce un derrame de los agentes radiotóxicos en el mar, éstos para ser relevantes deberán llegar a la población ya sea en forma directa o por medio de la cadena alimenticia. Además, existen efectos de difusión y dilución del medio marino que reducen las consecuencias de una exposición. Por sobre esto, los compuestos radiotóxicos experimentan con el tiempo un decaimiento natural de su radiotoxicidad. Si llegan a alcanzar al hombre, el organismo rechaza una parte importante de lo ingerido. La radiotoxicidad se ha determinado con ratones de laboratorio, y en algunos casos con perros.

Adicionalmente se ha hecho estudios en los casos que ha existido contaminación humana. En estos se ha realizado un detallado seguimiento de las especies radiactivas, verificando las excreciones, los efectos visibles y los efectos internos, mediante técnicas autoradiográficas. Los resultados se extrapolan para un ser humano normal y se le definen cantidades anuales máximas permitidas (ALI), por cada especie radiotóxica, para ingestión de la cual se deriva su valor para inhalación (DAC). Los valores límites, prescritos por la Comisión Internacional de Radioprotección (ICRP), se sobredimensionan respecto de los índices observados. Además, una gran parte del radiotóxico es eliminado por el cuerpo en el corto plazo.

Ya se ha establecido que los flujos de combustible natural antes de ser introducidos en un reactor no ofrecen mayores problemas de radiotoxicidad, mientras no se ingieran o inhalen; es decir, pueden presentar, según su forma química y solubilidad, algún nivel de toxicidad, tal como ocurre con muchos metales pesados (mercurio, cadmio, plata, plomo, cromo, etc.). En particular, la toxicidad del uranio es comparable a la del plomo. Cuando se aumenta el nivel de enriquecimiento en ^{235}U , aparece una fracción no despreciable de radiación gama de media energía, que requiere algo de blindaje, o de un manejo en cantidades más pequeñas. El mar contiene isótopos radiactivos naturales, como el radio (Ra) y el potasio (K). Por ejemplo, la actividad natural total del ^{40}K existente en el mar abierto, es equivalente a la actividad de 180 mil elementos combustibles recién gastados, suficiente para mil reactores nucleares de potencia, o a la de 2.6 millones de elementos combustibles después de 10 años de decaimiento, suficiente para 17 mil de esos reactores. Como referencia, el uranio existe en forma natural en el mar, con una concentración promedio de 3.3 mg por m^3 , y el 0.7% de éste es ^{235}U .

Desde el punto de vista del impacto ambiental del transporte marítimo de materiales nucleares, los flujos relacionados con el reproceso también son los de mayor relevancia y peligrosidad radiotóxica. No obstante, el flujo relativo neto de materiales por envío es relativamente bajo, y es equivalente a una gran cantidad de energía generada.

Entre los tres flujos del reproceso, el más peligroso a considerar a priori, ante una eventual falla del contenedor de transporte después de hundirse el buque, es el combustible usado, por

cuanto las vainas de esos elementos combustibles están debilitadas por su uso en el reactor, y los pellets de uranio-plutonio están muy fracturados en su interior. El diseño de esos elementos optimiza su funcionamiento seguro en el reactor y no ha concebido funciones de contención de largo plazo, como el propio contenedor.

En segundo lugar está el transporte de combustibles reprocesados, debido a que estos deben ser recuperados en el puerto de destino y fabricados en nuevos elementos combustibles. Tanto el plutonio como el uranio son principalmente emisores de partículas alfa, las que requieren de un escaso blindaje, para lo cual basta en principio una hoja de papel. Estos elementos químicos son principalmente tóxicos, como otros elementos pesados, y muy peligrosos desde el punto de vista de la ingestión o inhalación. Sin embargo, cuando provienen de un reproceso comercial contienen impurezas de los productos de fisión y transuránidos, en menos del 0.005 del contenido total, que son radiactivas, emisores de partículas beta y rayos gama. Desde el punto de vista de la exposición, la radiación gama, de tipo electromagnética, es la de mayor cuidado, por su alta penetración. Por ejemplo, el uranio reprocesado contiene ^{232}U que decae en dos fuertes emisores gama. Otras impurezas, tales como el ^{236}U , o el ^{238}Pu , que aparecen en combustibles con varios ciclos de reproceso, tienen capacidad de fisionarse espontáneamente, y por ello deben manejarse en menores cantidades.

En tercer lugar está el transporte de los desechos de alta actividad, debido a que estos están contenidos en fase vitria (es vidrio sólido, y no simplemente un envase de vidrio) y en recipientes sellados y diseñados para ser depositados en forma permanente, de acuerdo a cada país, en algún lugar geológicamente estable. El atributo de seguridad está en las características de estabilidad del vidrio.

La Figura 14 muestra la evolución de la radiotoxicidad, expresada en litros por unidad de masa original. El diagrama de la izquierda corresponde al combustible usado sin reprocesar de un reactor típico, y el diagrama de la derecha a los desechos HLW del combustible del mismo reactor, en el cual sólo se ha removido el 99.9% del uranio, y el 99.8% del plutonio (es decir no se ha realizado transmutación o incineración in-situ, ni se han removido los actínidos

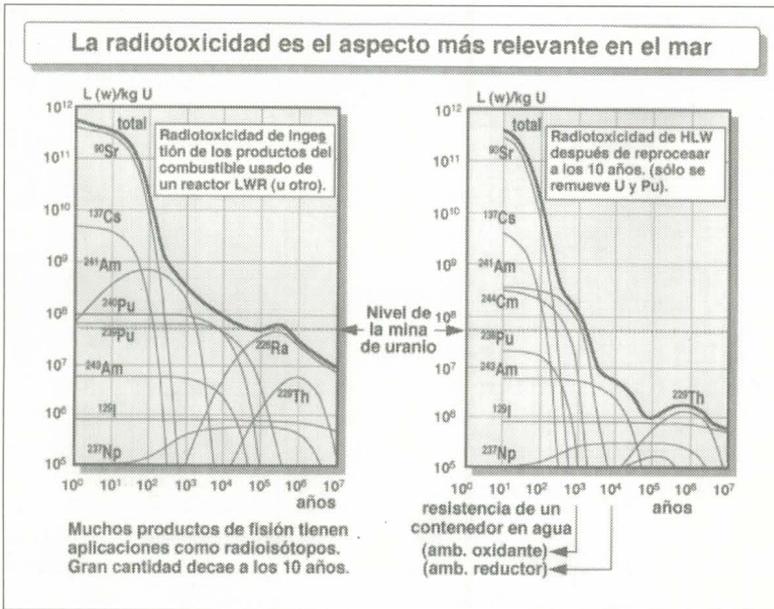


Figura 14. Evolución temporal de la radiotoxicidad del combustible nuclear usado y del combustible reprocesado, realizado al décimo año de retirado del reactor.

menores) después de 10 años. En ambos casos se compara, para referencia, con la radiotoxicidad del uranio natural obtenido en la mina, normalizando las masas. Al comparar estos dos diagramas se puede apreciar la ventaja relativa del reproceso. Sin éste, un combustible usado tendrá la misma radiotoxicidad que el mineral original, una meta bastante exigente, y lo podrá retirar con la mano, al cabo de 12 mil años; en cambio, al reprocessar se logra lo mismo pero al cabo de 1200 años. Nótese que si un repositorio definitivo de HLW sólido es estable, el contenedor podrá durar esos años y más, y si éste llegase a fallar antes de decaer completamente, el material fluiría a velocidades muy bajas, por la baja permeabilidad, porosidad y gradiente hidrostático del terreno, con un factor de retención no despreciable. Si el repositorio no es tan estable, el agua subterránea tomará unos 10 años en alcanzar una fuente de agua superficial a 300 metros de distancia. Al ^{90}Sr y al ^{137}Cs , los más radiotóxicos, le tomarán 300 y 4500 años, respectivamente, en alcanzar la misma distancia. En ese tiempo ya no serán radiactivos.

Para ilustrar las posibles consecuencias del derrame en el mar, conviene considerar un escenario extremo, pero con algunos supuestos irreales: supongamos que el cargamento del *Pacific*

Pintail fue puesto en forma líquida (por alguna razón olvidaron vitrificar después del reproceso, realizado 10 años antes), y en un compuesto químico de disolución instantánea en el agua, y dentro de un contenedor sin tapa. El buque sigue faltando a las normas y procedimientos, y se vuelca en el Paso de Drake derramando el total del cargamento al mar. La zona de derrame del cargamento HLW, que posee una actividad inicial de unos 8.105 TBq (Becquerel por 1012), alcanzará el valor permisible para ingestión (ALI) entre unos 2 y 12 años, con la acción de los efectos de dilución o difusión. La navegación por la zona no

requiere ser interrumpida, pero debe cuidarse que el agua de bebida sea previamente filtrada. La pesca en la zona debe ser reducida y monitoreada. Pero antes de seguir, debemos repasar los supuestos: se omitieron las barreras, no hubo vidrio, no hubo tapa, ni se llegó a destino. Más aún, si se derramara toda la demanda de reproceso anual al mar, más de 4000 toneladas, inmediatamente después de reprocessada, es decir sin esperar el decaimiento natural de la radiotoxicidad, se obtiene un volumen anual de 9.1014 m^3 para una dispersión total en el mar, lo que es equivalente al 0.06% de la capacidad oceánica, sin sobrepasar el ALI.

Conclusiones y Temas Pendientes.

La energía nuclear es una opción real para el suministro de electricidad en el mediano y largo plazo, que pese a sus desventajas intrínsecas ofrece mejores condiciones ecológicas que las opciones fósiles, y a un riesgo menor. La energía nuclear no es el paradigma para sustituir a otras opciones, sino que un complemento. La autonomía del recurso mejora notablemente al adoptar un ciclo cerrado con reproceso, pero al existir servicios de reproceso concentrados en pocos países, surge la necesidad de la subcontratación y con ello la de transporte. Por razones

más bien políticas, cuando el transporte es extracontinental, este debe efectuarse por la vía marítima.

La energía nuclear en su contexto amplio es segura desde el punto de vista tecnológico, existiendo, claro está, adecuados reactores, buques y contenedores de transporte de materiales. Sin embargo, persiste un problema socio-técnico. La negligencia y soberbia que a veces caracteriza al hombre, por falta de motivación, capacitación u otra causa, altera lo que a ellos mismos les ha costado hacer. La gran mayoría de los problemas que ha experimentado la industria se encuentra en esa categoría. Podemos decir que la energía nuclear está en una fase madura en lo tecnológico pero no en lo extratecnológico. Además, los líderes de la industria y de los gobiernos no han sabido manejar los problemas asociados a esta opción, como son la seguridad nuclear, el manejo responsable y definitivo de los desechos nucleares y su relación con las armas nucleares, todo lo cual, ha creado una pésima imagen. Todos podemos influir para tener una opción energética más ecológica, barata y de largo plazo que las opciones fósiles, pero exigiendo que se corrijan sus externalidades.

Es conveniente reiterar la dependencia que existe hoy con las armas nucleares. Este tema ha mantenido y muy probablemente mantendrá en jaque a toda la industria nuclear, retrasando el acceso a los beneficios de la energía del núcleo atómico. Los países que poseen armas nucleares han intentado en vano mantener el estatus político por esta vía. Para ello han creado tratados, leyes y otras restricciones para buscar la desnuclearización o la no proliferación de los otros. Estos acuerdos sólo han limitado al resto del mundo el acceso a la tecnología con fines pacíficos, y por consiguiente a ellos mismos, pero han hecho poco o nada por un enfoque global y de largo plazo del tema. Para mejorar la imagen de esta industria, y para un mundo más promisorio, todo pasa por el desarme total y completo de sus armas nucleares. Aún existe mucha emocionalidad en este aspecto, en circunstancias que la energía nuclear, bien utilizada, puede ser vital para el desarrollo y subsistencia en el largo plazo. Se hace esta aclaración, con un sentido ético, pues pueden destacarse oportunidades de explosiones nucleares pacíficas para la minería extractiva y obras civiles intensivas, a costos más bajos y en escaso tiempo.

Proposiciones.

Más que negar o prohibir la existencia del reproceso y del transporte de materiales nucleares, lo que debe buscarse es la reducción de su impacto ambiental. Pese a que la carga es naturalmente peligrosa, en rigor es lícito el paso por el Paso de Drake, pero no es lógica la navegación de un buque que zarpó desde la latitud 50°N con rumbo a un puerto en latitud 42°N por un paso poco seguro ubicado en latitud 60°S. Desde todo punto de vista esto es insólito. Esa ruta es una de las menos seguras para la navegación en el mundo, es más cara y el buque contamina más, debido a la mayor distancia y energía consumida. Además, la dotación pierde rendimiento con el tiempo y la operación se hace más vulnerable, todo lo cual aumenta la probabilidad de un accidente y con ello aumenta el riesgo. Por lo tanto, es posible hacer algunas recomendaciones a los respectivos líderes:

- Informar y documentar mejor, individual y colectivamente;
- Se debe promover el aprendizaje de lo que hay detrás del transporte de materiales nucleares, en un contexto amplio, evitando una sobreinfluencia de parte de los grupos de presión ambiental, los que han evitado atender los problemas de esta opción energética en forma integral y han retardado soluciones de largo plazo. El tema se confunde normalmente con el de las armas de destrucción masiva y con la contaminación a todo nivel, en circunstancias que esto debe asociarse a la generación de energía nucleoelectrónica, una de cuyas ventajas, si es debidamente manejada, es la superior ecología global.
- El uso de la energía nucleoelectrónica minimiza el transporte marítimo neto de combustibles, con el consiguiente impacto positivo directo sobre la ecología marina. Para ello basta comparar los requerimientos de tonelaje de transporte de las opciones energéticas. Si a esto agregamos que varias opciones deberán controlar su propio impacto algún día, y por ejemplo confinar el material particulado que emiten, la posición de la opción nuclear deberá mejorar. Además, se podrá obtener un impacto indirecto adicional si una parte de las plantas propulsoras en el transporte marítimo es de tipo nuclear, en especial en buques de alta demanda de potencia y alto factor de capacidad operacional.
- Para minimizar más aún el impacto, debería promoverse que cuando la economía de opera-

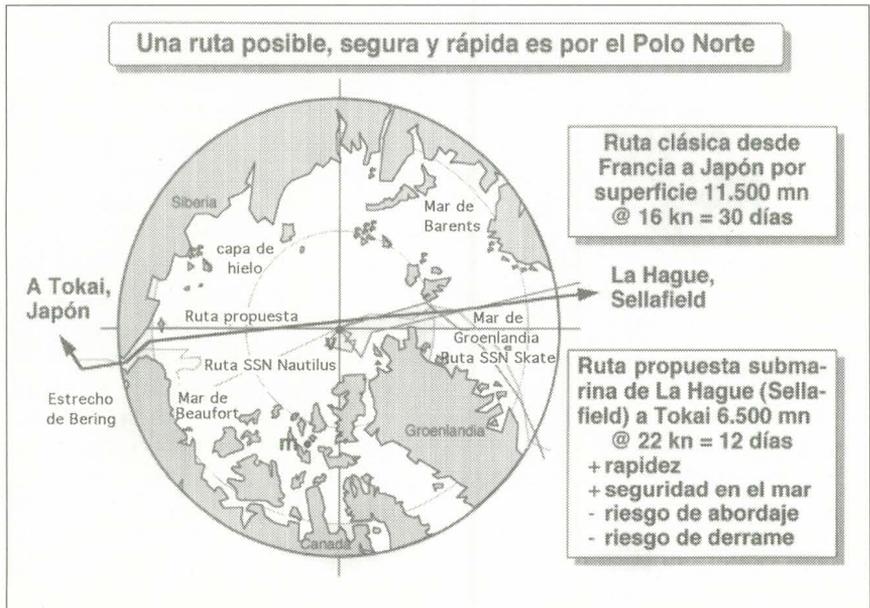


Figura 15. Ruta propuesta para el transporte rápido submarino de materiales nucleares entre Francia y Japón.

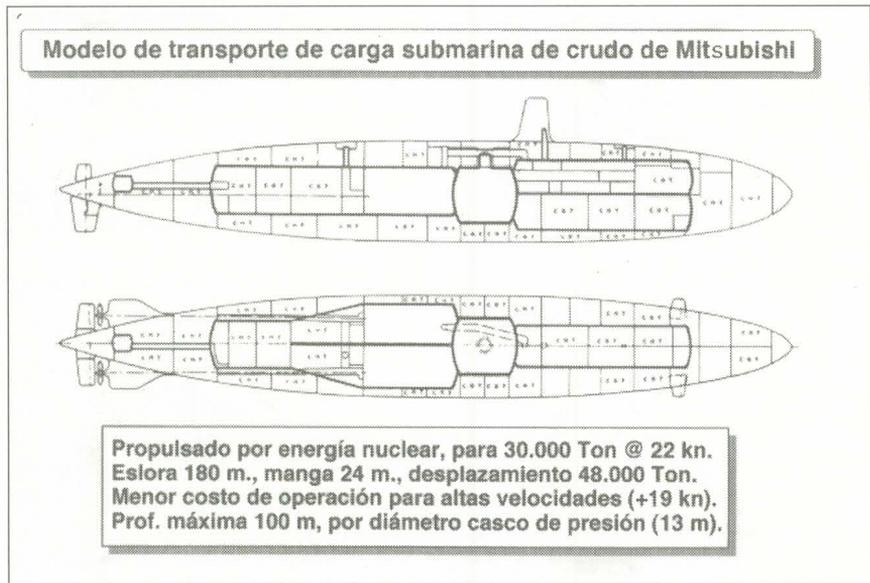


Figura 16. Concepto de submarino de propulsión nuclear para el transporte de petróleo crudo.

ción y proyecciones de largo plazo hagan conveniente reprocesar el combustible, éste se realice integrado verticalmente al resto de los procesos, ya sea nacional o regionalmente, con distancias mínimas, reduciendo así el requerimiento neto de transporte. Si éste se necesita, debe

todo el año y aún no es utilizada en forma comercial, es la ruta ártica submarina, como la indicada en la Figura 15. Los submarinos de propulsión nuclear tienen la capacidad para completar esa travesía sin necesidad de aflorar. Los submarinos nucleares de guerra normalmente operan en

evaluarse rigurosamente la conveniencia de hacerlo por tierra o por mar.

- Si no hay opciones de ruta terrestre, deben usarse rutas marítimas cortas y seguras dando debido soporte a la navegación y apoyo portuario en caso de ser necesario. En este aspecto, el impacto de los grupos de presión ha predominado, lo que probablemente ha obligado a los usuarios a mantener sus trayectorias en secreto. Es necesario que la ruta esté previamente definida, conversada con las respectivas autoridades marítimas de los países cercanos a la ruta óptima, para que estén en condiciones de asistir al buque ante un problema, y de llevarlo a puertos debidamente equipados, si ello da mayores garantías de seguridad.

- Una ruta marítima probada, de distancia mínima entre Japón y Francia, que es navegable durante

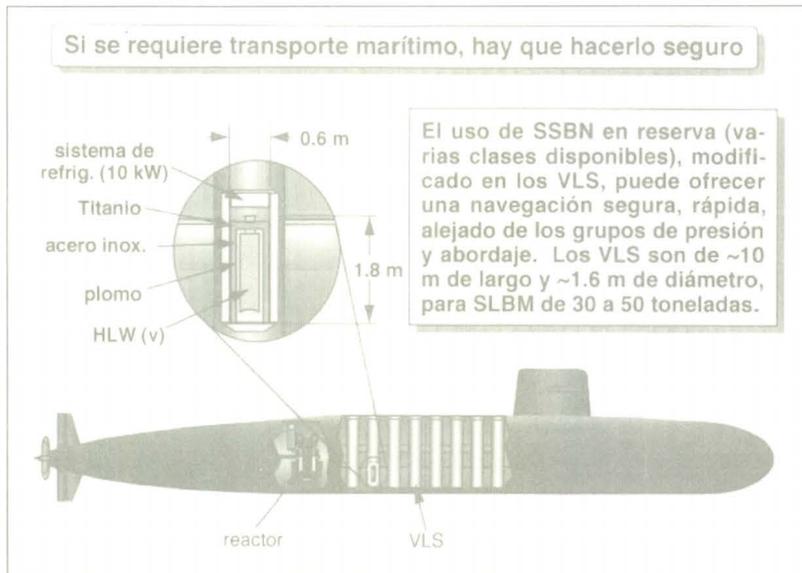


Figura 17. Modelo esquemático de submarino SSBN acondicionado para el transporte de materiales nucleares.

esa área, incluso aflorando en el Polo Norte. El ideal es poseer un sumergible de propulsión nuclear, especialmente diseñado y acondicionado para el transporte de materiales nucleares. Alguna vez existió un proyecto japonés para el transporte submarino de 30 mil toneladas de petróleo crudo. La Figura 16 muestra un modelo de submarino nuclear de carga, de dimensiones hidro-

dinámicas óptimas, diseñado por Mitsubishi. En el intertanto, podrían usarse los sistemas de lanzamiento vertical (VLS) de los submarinos nucleares portadores de misiles balísticos (SSBN) que han ido quedando operativamente obsoletos, debidamente adaptados o reacondicionados como se muestra en la Figura 17, y así darles uso alternativo en este servicio.

BIBLIOGRAFIA

- Benedict M., Pigford T.H., y Levi H.W.: "Nuclear Chemical Engineering, McGraw- Hill Series in Nuclear Engineering", New York, 1981.
- Vergara, J.: "El Ciclo de Combustible Nuclear para la Propulsión de Buques", Congreso IPIN, Valdivia, Mayo, 1993.
- Turner, J.: "Atoms, Radiation, and Radiation Protection", Pergamon, 1986.
- Schroerer, D.: "Science Technology and the Nuclear Arms Race, Wiley and Sons", N. York, 1984.
- Vergara, J. et. al.: "Análisis de la Industria Nuclear", Universidad Adolfo Ibáñez, Noviembre de 1994.
- IAEA, UNEP, y WHO: "Risks and Benefits of Energy Systems", Abril, 1984.
- Choppin, C.R. y Rydberg, J.: "Nuclear Chemistry: Theory and Applications", Pergamon Press, 1980.
- International Atomic Energy Agency, IAEA Yearbook, 1993 y 1994, Vienna.
- Vergara, J.: "Evaluation of the Feasibility for Nuclear Power Generation in Chile", NED-MIT, 1991.
- International Atomic Energy Agency, Boletines Trimestrales IAEA, Vienna.
- Neff, T.: "Disposition of HEU and Plutonium from Nuclear Weapons", Centro de Estudios Internacionales, MIT, en Uranium and Nuclear Energy, 1992.
- Pocock, R.F.: "Nuclear Ship Propulsion", Ian Allan, 1970.
- Comisión Nacional de Energía, El Sector Energía en Chile, 1989 y 1993.
- Westinghouse Advance Power Systems, Nuclear Waste Management, a Manageable Task, 1980.