

ESTUDIO ECONOMICO DEL CICLO COMBUSTIBLE DEL REACTOR RP-10

Gilberto Salas

Instituto Peruano de Energía Nuclear, Apt. 1687, Perú

Recibido el 20 de Agosto de 1985

RESUMEN

Se analizan los costos involucrados en el ciclo de combustible del reactor peruano de investigación de 10 MW. Los costos de uranio, el reprocesamiento, el transporte de elementos frescos e irradiados están referidos a los ofrecidos por los fabricantes y suministradores. La etapa que incide fuertemente en el ciclo traducido en dólares por MW por día (\$/MWd), es el quemado. Decreciendo el quemado de U-235 de 57 % a 50 %, el costo queda incrementado en un 14 %. Para la carga de U-235 considerada, un quemado promedio de 57 % y considerando un factor de utilización del reactor de 40 % el valor obtenido es de \$(207±5)/MWd.

ABSTRACT

The cost components of the uranium fuel cycle, for the Peruvian research reactor RP-10, are discussed. The current costs of uranium, reprocessing and irradiated and non-irradiated element transportation are taken from companies data. The fuel burning has a high influence on the cost. An 14 % increase on the cost is obtained if the uranium burning is diminished from 57% to 50%. In one considers an average burning of 57 % and an utilization of 40 % one obtains a cost of \$(207±5)/MWd.

1. INTRODUCCION

El ciclo de combustible del reactor peruano RP-10, estará constituido por las siguientes etapas: a) compra de uranio enriquecido, bajo la forma de U_3O_8 , en el extranjero; b) fabricación de los elementos combustibles, en el exterior; c) consumo de combustible en el reactor; d) transporte de los elementos combustibles a la planta de de reproceso; e) reprocesamiento del elemento irradiado; f) conversión del producto obtenido en la planta de reprocesamiento a U_3O_8 y g) devolución del material nuclear no utilizado al propietario.

Estas operaciones tienen lugar en tiempos diferentes y conducen por lo tanto a un elevado inventario de material fisiónable, lo que representará una inmovilización considerable de capital.

El estudio que a continuación se realiza tiene por objeto estimar el costo total del ciclo, desagregado en sus componentes para el reactor peruano de 10 MW. Los costos están basados en precios válidos ofertados por los suministradores [1], fabricantes, reprocesadores y transportistas de elementos combustibles MTR.

2. HIPOTESIS HECHAS PARA EL ANALISIS DE COSTOS

El análisis económico del costo de combustible del reactor RP-10 se efectuó bajo las hipótesis que mencionamos en los siguientes párrafos.

La potencia es de 10 MW. El factor de utilización es 40 %. El tamaño del núcleo (núcleo en equilibrio) 29 EC normales y 5 con barra de control (no se requiere datos sobre la disposición o geometría del núcleo, excepto que la reactividad sea suficiente para alcanzar el quemado especificado).

A los efectos del cálculo de inventario del material nuclear involucrado en el ciclo, se asumió que la cantidad de material nuclear a procesar en cada una de las etapas del ciclo es 26 elementos combustibles (21 normales y 5 con barras de control). Este tamaño de carga fue elegido teniendo en cuenta la capacidad de dos contenedores estandar de elementos combustibles irradiados igual a 26, usados para embarque.

En cuanto al quemado de referencia del elemento combustible se asumió 57 % de U-235, correspondiente a 128 MWd/EC (1.25 g U-235/MWd).

Los datos sobre el contenido de uranio por combustible se ha tomado de la Ref. [2]: 16 placas en elementos normales, 280 g U-235, 19.75 % enriquecido y 12 placas en elementos con barras de control, 210 g U-235.

Las pérdidas de material nuclear en las distintas etapas del ciclo son de 1.5 %.

3. CONSUMO DE COMBUSTIBLE

De acuerdo a planes de producción de radiosótopos inferidos, puede deducirse las condiciones de funcionamiento del reactor RP-10, en los próximos años.

La potencia de operación a partir del núcleo de equilibrio será de 10 MW. El contenido de U-235 en las placas combustibles sera de 17.5 g por placa. Las cajas de combustible se extraerán con quemado de 57 %.

El reactor funcionará en 12 periodos anuales de 12 días cada uno. De acuerdo a estudios realizados, el quemado al comienzo del ciclo del núcleo de equilibrio es de 23.1 % del inventario del material fisil, el correspondiente al final del ciclo es de 32.6 %. Por tanto el quemado por ciclo es de 9.5 %. El quemado de descarga es aproximadamente de 57 % para los elementos combustibles y de 47.5 % para los elementos de barra de control. De esto se deduce que los elementos combustibles rotan en el núcleo en seis posiciones, siendo la duración de cada ciclo de 60 días de plena potencia. De cumplirse estos planes, el reactor consumirá 12 cajas o elementos combustibles los años siguientes.

La masa de uranio total en el combustible irradiado se ha estimado en base al quemado, mediante la expresión siguiente (que tiene en cuenta la reacción de captura neutrónica para dar U-236):

$$e(B) = \frac{(1 - B)e_0}{1 - e_0 B / (1 + \alpha)}$$

donde e_0 es el enriquecimiento original, B es el quemado de U-235, α es la relación entre la sección eficaz de captura (σ_c , γ) y la de fisión (σ_f , f) del U-235. Para reactores de tipo MTR, este valor es 0.19.

Así, en el caso del RP-10, el enriquecimiento final será de $e(B) = 9.5$ %. La masa de uranio total en el combustible irradiado se obtiene dividiendo la masa de U-235 en el combustible por el enriquecimiento final.

4. COMPONENTES DEL COSTO DEL CICLO DE COMBUSTIBLE

Las componentes del costo del ciclo de combustible han sido tomadas de la Ref. [3].

4.1. COSTO DE URANIO ENRIQUECIDO

Los precios válidos de uranio natural y el costo de la unidad de trabajo están dados en la tabla 1. Para obtener 1 kg de uranio naturales

Tabla 1. Precios válidos del uranio natural y el costo de la unidad de trabajo separativo.

E (%)	U _{nat} (kg)	CU _{nat} (\\$)	USE (SWU)	Precio de 1 kg (U\\$)	
				U _{enr}	U-235
5	1100.50	8.851	875.50	1971.00	39420.08
10	2247.66	20.866	2052.17	4299.83	42998.33
15	3394.46	33.228	3267.97	6662.83	44416.25
20	4541.27	45.752	4499.71	9040.98	45204.87
30	6834.75	71.071	6989.83	13824.59	46081.95
40	9128.24	96.616	9502.83	18630.42	46576.06
45	10275.04	109.48	10767.36	21042.40	46760.89
50	11421.84	122.344	12032.53	21042.40	46908.75
60	13715.33	148.25	14580.39	23454.58	47159.53
70	16008.93	174.32	17144.37	28295.72	47361.87
80	18302.42	200.624	19731.37	33153.31	47542.24
90	20596.03	227.363	22361.15	42957.18	47730.20
93.2	21329.43	246.127	23223.04	44552.98	47803.62

necesario 2,6 de U_3O_8 . Con 38.748 kg de uranio natural se obtiene 1 kg de U 20%. El precio del uranio natural después de conversión a U_3O_8 , incluyendo 1.5 % de pérdidas en dicho proceso es de 117 U\$ por kg. Las unidades de trabajo separativo es de 98.35 U\$/SWU.

El valor de U_3O_8 será de 4541 (38.748x117). El valor de 1 kg de uranio enriquecido será de 9040 U\$/kg (4551 +4499). El costo por kg de U-235, será de 45205 U\$.

El uranio-235 para primera carga es de 5.88kg (280 g/EC x21) y 1.05 kg (210 g/EBCx5). El costo de enriquecimiento es de 309.654 U\$ (45,205x6.85).

4.2. FABRICACION DE ELEMENTOS COMBUSTIBLE

El precio por EC es 8,000 U\$. El servicio de transporte cuesta 400 U\$/EC. El costo total de fabricación es de 218,400 U\$ (8400x26).

4.3. TRANSPORTE Y SEGURO DE COMBUSTIBLE IRRADIADO

El costo de transporte de dos contenedores de 13 elementos combustible cada uno entre Europa y el sitio de reprocesamiento en Estados Unidos se calcula en base a los datos de la Ref. [3]. El costo de transporte del contenedor es de 40.825 U\$ (81,650/2). El costo del transporte por elemento combustible es 3140 U\$ (40,825/15) y el costo anual de transporte y seguro del combustible irradiado (26 EC/año) es de 81,640 U\$.

4.4. COSTO DE REPROCESAMIENTO

Se dispone de datos basados en los precios vigentes de reprocesamiento en USA, que incluyen costo de operación y almacenamiento del residuo producido (41 Federal Register 36244, August 27, 1976). Para un lote de 3.5 kg Al-U por elemento, el costo anual será 52,000 U\$ (400kgU-Alx5.0 kgAl-Ux26).

4.5. DEVOLUCION DEL COMBUSTIBLE CONSUMIDO

Veamos el precio de uranio enriquecido al 9.5 %. La cantidad de uranio natural para obtener 1 kg de uranio enriquecido al 9.5 % está dado por la fórmula siguiente:

$$f/p = (X_p - X_w)/(X_f - X_w),$$

donde f es el precio de alimentación (uranio natural), p es un kg de producto (U enriquecido al 9.5 %), X_p es la fracción en peso de U-235 en el producto (0.095), X_w es la fracción en peso de U-235 en la cola (0.002) y X_f es la fracción en peso de U-235 en la alimentación (0.00711). Tomando las cantidades correspondientes al caso estudiado se obtiene $f/p = 18.23$.

Las unidades de trabajo separativo [4,5] para obtener 1 kg de uranio enriquecido al 9.5 % están dadas por la fórmula siguiente:

$$v/f = [U(X_p) - U(X_w)] - f/p[U(X_f) - U(X_w)],$$

donde,

$$U_X = (2X - 1)/n[X/(1 - X)].$$

Tomando los valores de X, correspondientes al caso estudiado se obtiene $V/p = 19.70$. Es decir que se necesitan 19.70 unidades de trabajo separativo por kg de producto.

El valor del U_3O_8 es de 2133 U\$ (18.23x117). El enriquecimiento será 1937(19.70x98.35) U\$. El valor de 1 kg de uranio al 0.5 % es de 4070 U\$ (2133 + 1937). El uranio a devolver anualmente es 31.4 kg. El pago por devolución será de 127.605 U\$ (31.4x4070).

5. COSTO DEL CICLO

Los costos ligados al consumo de combustible será: costo total de uranio, 309,654; costo de fabricación, 218.400, sub-total 528,054; transporte de combustible irradiado, 81,640; costo de reprocesamiento, 52,000; devolución de combustible no consumido, 127,605; costo total del ciclo (\$), 644,089; MWd producidos, 3,100; \$/MWd, 207.7.

6. CONCLUSIONES

La conversión de núcleos de reactores de investigación de alto a bajo enriquecimiento incrementa los costos del ciclo combustibles, principalmente debido al mayor contenido de uranio requerido para los elementos combustibles, el incremento de los costos de fabricación y finalmente el incremento del costo de reprocesamiento. Sin embargo este incremento de costos puede ser compensado aumentando la energía producida por el elemento proporcionalmente, es decir disponiendo una gestión de combustible que permita un mayor quemado. el quemado tiene una influencia definitiva por MWd. Decreciendo el quemado de 57 a 50 %, el incremento del costo resulta 14 % superior.

REFERENCIAS

- [1] Contrato de Compra de Material Nuclear entre Perú y los EEUU. Documento Reservado, 1982.
- [2] G. Roegler, Core Analysis Report RP-10, documento interno elaborado por INTERATOM GmbH, 1982
- [3] A. Burtscher, "Research Reactor Core Conversion from the Use of Highy Enriched Uranium to the Use of Low Enriched Uranium Fuels", IAEA-TECDOC 233, Viena, 1980 p. 679
- [4] Oro-684 "AEC Gaseous Diffusion Plant Operation", USAAEC, enero 1972
- [5] F. Merchie, "Aspets financiers de la Consommation d'Uranium 235 dans les Piles Piscine du Centre d'Etudes Nucléaires de Grenoble", G/Pi-N.T.-163.46/65 (1965)
- [6] J. M. J. M. Costa Oliveira, "Estudio Económico da Utilaçao de Combustible Num Reactor Nuclear Tipo Piscina", LFEN-NL 73, 1972

Estudio económico del ciclo combustible del reactor RP-10 por Gilberto Salas se distribuye bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional.