

Primera fase de la evaluación de cupones de corrosión en los cementerios de elementos combustibles (fisurados, fallados y tanque principal) en el reactor RP-10 del Centro Nuclear RACSO

Iván Babiche⁽¹⁾ cbabiche@ipen.gob.pe, Constantino León⁽¹⁾ cleon@ipen.gob.pe,
Ángel Revilla⁽¹⁾ arevilla@ipen.gob.pe

(1) IPEN, Dirección General de Instalaciones, Av. Canadá 1470, Lima 41, Perú

Resumen

Se presenta las actividades desarrolladas por el grupo de trabajo de corrosión relacionadas a la inmersión, monitoreo y remoción de dos racks de corrosión en su primera fase, después de un año de exposición en los cementerios de elementos combustibles fisurados, fallados y tanque principal del reactor nuclear RP-10. Para esto se evaluó la importancia de la química del agua, los sedimentos y otros contaminantes en el deterioro de los cupones de acero inoxidable 304 y de los aluminios AA1050 y AA6061 debido a la corrosión de éstos por picado, resquicio o por formación de par galvánico, permitiendo predecir el comportamiento de estos materiales para luego realizar acciones de control asegurando la integridad de la vaina de los elementos combustibles gastados durante su almacenamiento temporario en los depósitos actuales. Estos dos racks evaluados son parte de los seis racks inmersos en el agua del reactor nuclear RP-10 para su retiro a uno, dos y cuatro años de exposición.

1. Introducción

1.1. Calidad del Agua

Durante el monitoreo de la calidad del agua del tanque principal y pileta auxiliar, donde se encuentran los cementerios de los elementos combustibles fisurados, fallados y tanque principal, se tomaron muestras de agua en diferentes puntos analizando los siguientes parámetros:

Tabla 1

Parámetro	Intervalo de Trabajo
Temperatura °C	15 < °C < 45
Conductividad µS/cm	< 2.00
pH u.p.h.	5.5 < pH < 6.5
Cloruros mg/L	< 1.00
Fierro Total mg/L	< 0.05

2. Descripción General del Combustible, Elemento Combustible Normal y de Control, y Elementos Reflectores

2.1 Combustible

Tipo de Combustible	Tipo de Elemento	Enriquecimiento (%)
MTR	PLACA	19.75
Material Meat	Peso Nominal/Caja U ²³⁵ (g)	Material de la Vaina
U ₃ O ₈ -Al	SF ^[1] : 280 CF ^[2] : 210	AlMg ^[3]

[1] Standard Fuel Element

[2] Control Fuel element

[3] Mg % Peso 0.7 – 1.1 Al (99.5 %) peso restante

2.2 Elemento Combustible

Tipo de Elemento Combustible	PLACAS
Longitud nominal y dimensiones de sección del elemento (cm)	Longitud : 65.5 Sección : 6.72 x 0.176
Dimensiones Nom. del meat (cm)	61.5 x 6.275 x 0.1
Peso Nominal total del meat (g)	168.2
Forma Química del meat	U ₃ O ₈ -Al
Peso Total del U, peso del U235 (g)	U: 88.6, U ²³⁵ : 17.5 ± 0.26
Material Dispersante	Dispersión de U ₃ O ₈ en Al
Material de la Vaina	AlMg1
Espesor de la Vaina (mm)	0.38

2.3 Elemento Combustible Normal

Número de Elementos por Caja	16 Placas
Dimensiones Externas (cm)	95.73 x 8.124 x 7.62
Peso Total (g)	6790
Peso Total de U (g)	1418
Peso Total de U ²³⁵ (g)	280 ± 4.16
Enriquecimiento (%)	19.75
Placa Lateral: Material Dimensiones (cm)	02 placas laterales: AlMgSi1 ^[4] 80.5 x 8.124 x 4.5
Boquilla Final: Material Dimensiones totales (cm)	01 boquilla de fijación: AlMgSi1 cilindro: 6.15 diámetro externo, 12.5 altura, 0.535 espesor
Otras partes estructurales (tornillos, remaches): Material, cantidad y dimensiones	01 Pin de manipuleo: AlMgSi1 con 1.3 diámetro, 08 Tornillos: AlMgSi1 M6 x 10

[4] Si % peso 0.7 – 1.3, Mg % peso 0.6 – 1.2, Al (99.5 %) peso restante

2.4 Elemento Combustible de Control

Número de Elementos por Caja	12 Placas
Dimensiones Totales (cm)	163.33 x 8.124 x 7.62
Peso Total (g)	9420
Peso Total de U (g)	1063
Peso Total de U ²³⁵ (g)	210 ± 3.12
Enriquecimiento (%)	19.75
Placa Lateral: Material Dimensiones Totales (cm)	02 placas laterales: AlMgSi1 148.2 x 8.124 x 4.5
Boquilla Final: Material Dimensiones totales (cm)	01 boquilla de fijación: AlMgSi1 cilindro: 6.15 diámetro externo, 12.5 altura, 0.535 espesor
Otras partes estructurales (tornillos, remaches, guías): Material, cantidad y dimensiones	04 guías de placas: AlMgSi1 c/levas internas superficiales 30 Tornillos: AlMgSi1 M6 x 10 04 Tornillos: AlMgSi1 M10x16

2.5 Elementos Reflectores

Elemento Reflector de Berilio (ECR): (ISO) AlSi1MgMn – (DIN) AlMgSi1 (Si 0.7 – 1.3, Fe 0.5, Cu 0.1, Mn 0.4 – 1.0, Mg 0.6 – 1.2, Cr 0.25, Zn 0.2, Ti 0.1, otros 0.15).

Elemento reflector de Grafito (ERC): (ISO) AlMgSi – (DIN) AlMgSi0.5 (Si 0.3 – 0.6, Fe 0.1 – 0.3, Cu 0.1, Mn 0.1, Mg 0.35 – 0.6, Cr 0.05, Zn 0.15, Ti 0.1, otros 0.15).

3. Inventario del Combustible Irradiado

Tipo de Combustible	Número de Cajas en Núcleo Actual	Número Promedio Gastados por año	
MTR	29	3 ^[5]	
Número de Cajas Irradiadas en Depósito de Almacenamiento		Fallados durante	
Tanque y Pileta Auxiliar	Facilidad de Almacenamiento	Operación	Mantenimiento
5 ECN y 2 ECC	Ninguna	1 ECC ^[6]	Ninguna

[5] A partir del 2002 cuando se alcanzó la configuración de equilibrio.

[6] Falla de ensamble mecánico, no de fisura.

4. Materiales en el Área de Almacenamiento

Lining de Pileta Auxiliar y Tanque Principal: SS 316L. Depósito o Grillas (Grid): Aluminio 99.5 IRAM 681 (Al 99.5 min., Si+Fe 0.5 max., Zn 0.1 max., Cu 0.1 max., Mg 0.05 max., Mn 0.05 max.).

5. Capacidad de Almacenamiento

De almacenamiento temporal es 136 posiciones.

5.1 Pileta Auxiliar

En el Cementerio de Elementos combustibles Fisurados, 16 posiciones, en el Cementerio de Elementos Combustibles Fallados, 96 posiciones.

5.2 Tanque Principal

En los Cementerios de Elementos Combustibles Tanque Principal N° 1 y 2, 24 posiciones. Esto hace un total de 136 posiciones para el almacenamiento temporal de los elementos combustibles.

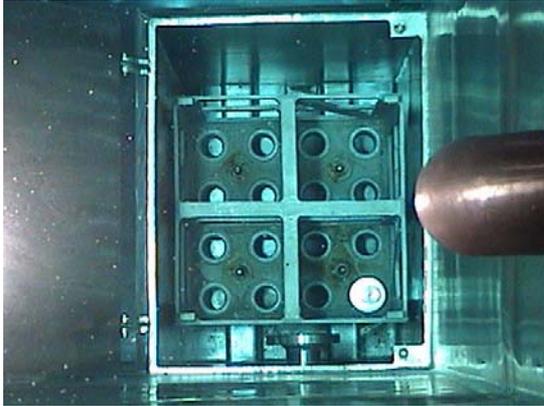
6. Racks de Corrosión

Se han colocado en la pileta auxiliar y tanque principal del reactor nuclear RP-10 seis (06) racks de corrosión cuyas ubicaciones y características se muestran a continuación. Cabe notar que los seis fueron colocados el 10-10-2002 y extraídos los racks 34 y 37 el 13 de Octubre del 2003, desensamblado cada uno, midiendo el pH a cada cupón en ambas caras, pesándolo, evaluando la superficie y las formaciones desarrolladas, luego se midió su actividad promedio, y

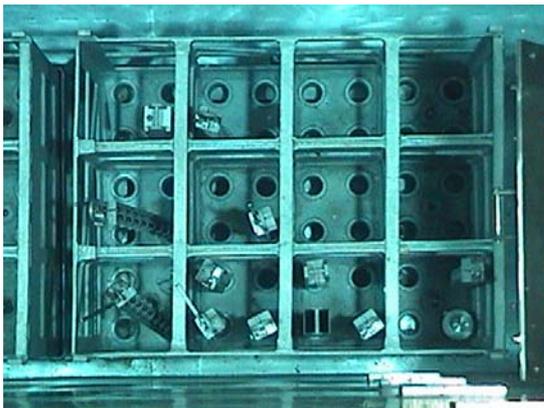
posteriormente se evaluó la morfología de las picaduras desarrolladas en cada una y en ambas caras de todos los cupones extraídos.

6.1 Ubicación de los Racks

6.1.1 En la Pileta Auxiliar



Cementerio de Elementos Combustibles Fisurados RACK 32

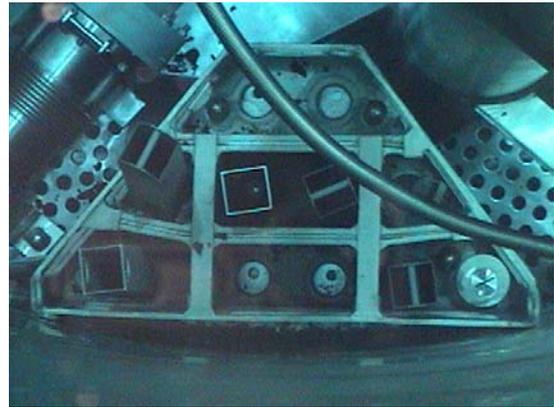


Cementerio de Elementos Combustibles Fallados RACK 33



Cementerio de Elementos Combustibles Fallados RACK 34

6.1.2 En el Tanque Principal



Cementerio de Elementos Combustibles Tanque Principal N° 1 RACK 35

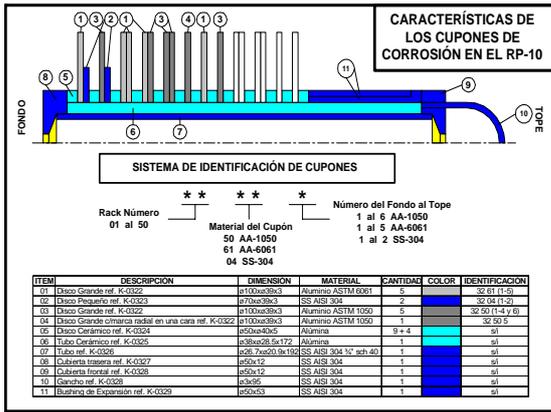


Cementerio de Elementos Combustibles Tanque Principal N° 2 RACK 36 y 37

6.2 Características y Materiales Constituidos



RACK de Corrosión y Cupones ensamblados



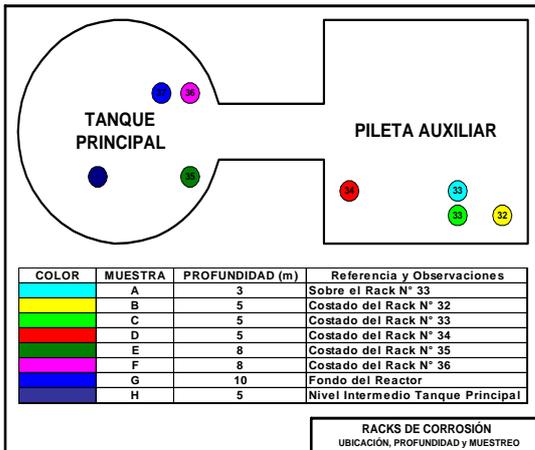
Características, especificaciones y materiales constituidos en los RACKS

La distribución de los cupones en cada uno de los racks es la siguiente a partir del tope al fondo:

Cupón Simple: Al 1050, Al 6061 y Al 1050 (con marca radial).

Cupla Formada: Al 1050 – Al 1050, Al 1050 – Al 6061, Al 6061 – Al 6061, SS 304 – Al 1050 y SS 304 – Al 6061.

7. Toma de Muestras de Agua

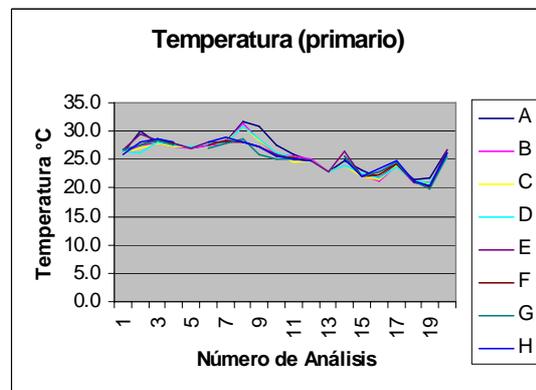
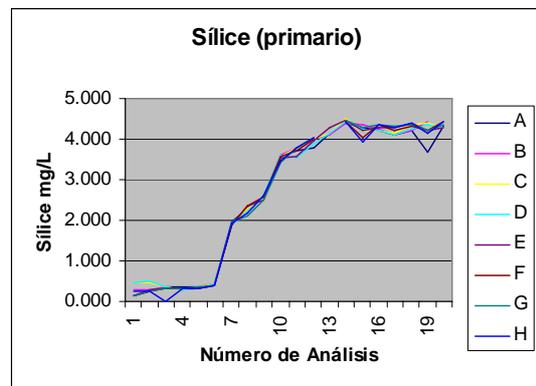
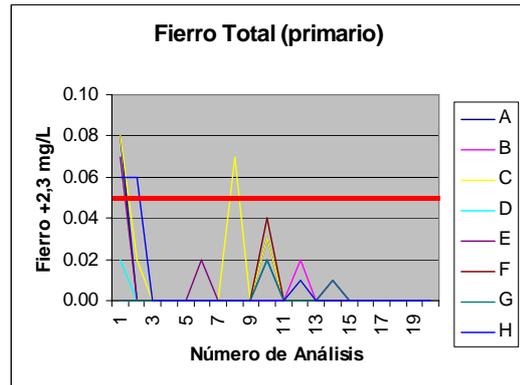
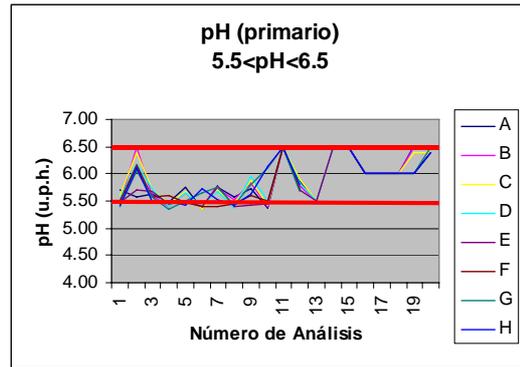


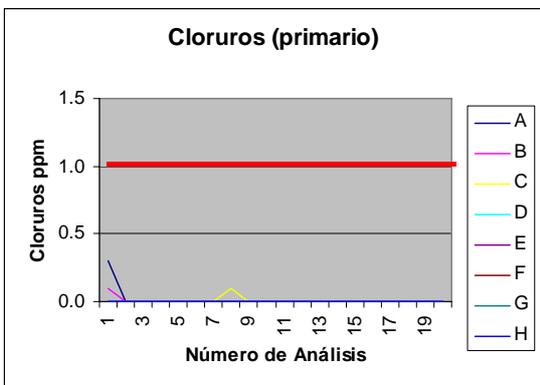
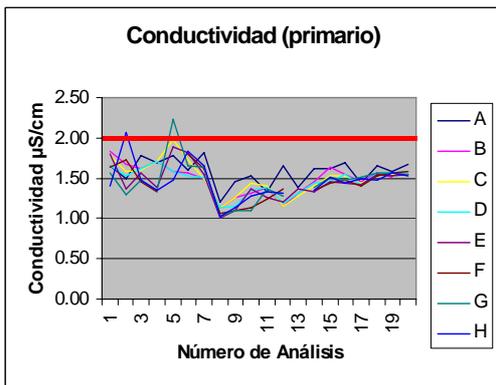
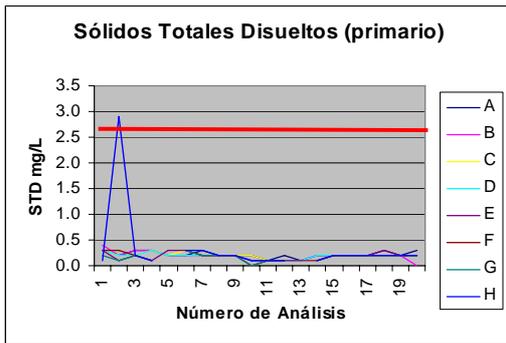
8. Calidad del Agua

Durante todo el año 2003 se realizaron los siguientes análisis fisicoquímicos: pH, temperatura, conductividad, sólidos totales disueltos, hierro total, sílice y cloruros.

9. Medición de dosis cerca de los Racks

Dosis Año 2003 (mSv/min)						
	29-Ene	18-Feb	03-Abr	10-Jul	09-Oct	Ubicación
1	0.24	12.18	0.00	0.00	0.00	Lateral Rack 32
2	0.78	931.68	0.11	40.56	1.54	Lateral Rack 33
3	1501.80	1610.40	4062.00	1306.11	1578.25	Lateral Rack 34
4	226.45	0.25	182.99	160.35	108.16	Sobre Racks 36 y 37





superficial $\alpha/\beta/\gamma$ TBM-3 y sus pHs con papel pHydrión (dip stik de 5 – 9 u.p.h.).

RACK 34			
CUPÓN CÓDIGO	Peso Inicial (g)	Peso Final (g)	Diferencia (g)
34611	54.7358	54.7524	0.0166
34041	61.4356	61.4398	0.0042
34501	53.9845	53.9988	0.0143
34042	61.2310	61.2342	0.0032
34612	54.9942	55.0311	0.0369
34613	54.9278	54.9724	0.0446
34502	53.9094	53.9558	0.0464
34614	54.8733	54.9111	0.0378
34503	51.7390	51.7833	0.0443
34504	52.8031	52.8455	0.0424
34505	52.6287	52.6388	0.0101
34615	54.9767	54.9947	0.0180
34506	54.5293	54.5480	0.0187

RACK 37			
CUPÓN CÓDIGO	Peso Inicial (g)	Peso Final (g)	Diferencia (g)
37611	54.7369	54.7512	0.0143
37041	62.7764	62.7764	0.0000
37501	54.5353	54.5494	0.0141
37042	62.2749	62.2783	0.0034
37612	55.0680	55.1192	0.0512
37613	55.1399	55.2115	0.0716
37502	53.7955	53.8781	0.0826
37614	54.9011	55.0090	0.1079
37503	53.9211	53.9895	0.0684
37504	53.3044	53.3474	0.0430
37505	51.7992	51.8007	0.0015
37615	54.7866	54.8912	0.1046
37506	53.4090	53.4600	0.0510

10. Remoción de Racks de Corrosión

El 13 de Octubre del 2003 fueron extraídos los racks 34 y 37, de la piletta auxiliar y del tanque principal del reactor nuclear RP-10 obteniéndose los siguientes resultados en cuanto a la variación en peso de los cupones, la contaminación promedio en ambas caras de cada uno de los cupones así como sus pHs. El peso de los cupones fue medido con una aproximación a la décima de mg con una balanza analítica, su contaminación superficial fue medida en cuentas por minuto (CPM) con un monitor de contaminación

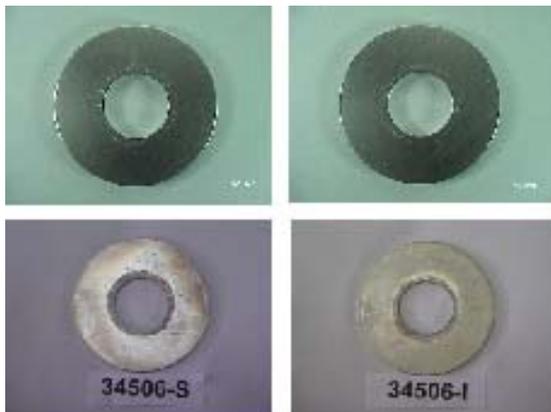
pH (u.p.h)				
Cupón Código	Rack 34		Rack 37	
	Anverso	Reverso	Anverso	Reverso
34/7611	6.0	6.0	6.0	6.0
34/7041	6.0	6.0	6.0	6.0
34/7501	6.0	6.0	6.0	6.0
34/7042	6.0	6.0	6.0	6.0
34/7612	6.5	6.0	6.5	6.0
34/7613	6.0	6.5	6.0	6.5
34/7502	6.0	6.0	6.0	6.0
34/7614	6.0	6.0	6.0	6.0
34/7503	6.0	6.0	6.0	6.0
34/7504	6.0	6.0	6.0	6.0
34/7505	6.0	6.0	6.0	6.0
34/7615	6.0	6.0	6.0	6.0
34/7506	6.0	6.0	6.0	6.0

Actividad de Cupones (CPM) ^[7]				
Cupón Código	Rack 34		Rack 37	
	Anverso	Reverso	Anverso	Reverso
34/7611	100	120	215	533
34/7041	25	15	58	18
34/7501	90	100	223	275
34/7042	35	25	60	45
34/7612	36	110	77	1370
34/7613	85	16	1308	44
34/7502	20	120	17	1020
34/7614	85	25	1433	68
34/7503	25	125	37	1033
34/7504	118	28	783	17
34/7505	287	323	1108	933
34/7615	75	81	1320	1383
34/7506	175	135	552	833

^[7] Fondo 30 CPM

11. Visualización de Cupones

11.1 Rack 34

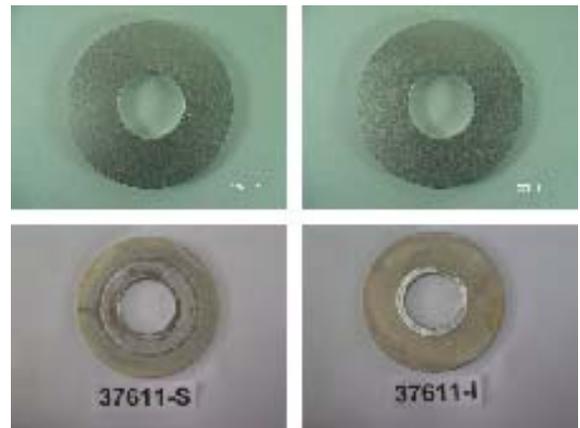


Cupones de Corrosión antes y después de la inmersión de la aleación AA 1050 de su anverso (S) y su reverso (I), en cupla con SS 304



Cupones de Corrosión antes y después de la inmersión de la aleación SS 304 de su anverso (S) y su reverso (I), con cupla con AA 1050

11.2 Rack 37



Cupones de Corrosión antes y después de la inmersión de la aleación AA 6061 de su anverso (S) y su reverso (I), con cupla con SS 304



Cupones de Corrosión antes y después de la inmersión de la aleación SS 304 de su anverso (S) y su reverso (I), con cupla con AA 6061

12. Evaluación de pits con analizador de Imágenes

Se determinaron los tamaños máximos y mínimos de sus diámetros, así como también sus promedios, de todos los pits encontrados en cada uno de los cupones evaluados de los racks 34 y 37. En las siguientes tablas se muestran los resultados obtenidos.

RACK 34 (diámetro de pit en μm)						
Cupón	Tipo	Aleación Código	Lado	Máximo	Mínimo	Promedio
1	S	AA 1050 34506	A	261	37	66.7
			R	120	42	66.6
2	S	AA 6061 34615	A	140	41	70.5
			R	190	39	67.7
3	S	AA 1050 34505	A			No Pit
			R			No Pit
4	C	AA 1050 34504	A	116	50	68.5
			R			No Pit
5	C	AA 1050 34503	A			No Pit
			R	184	39	71.1
6	C	AA 1050 34502	A			No Pit
			R			No Pit
7	C	AA 6061 34614	A			No Pit
			R			No Pit
8	C	AA 6061 34613	A			No Pit
			R			No Pit
9	C	AA 6061 34612	A			No Pit
			R			No Pit
10	C	AISI 304 34042	A			No Pit
			R			No Pit
11	C	AA 1050 34501	A			No Pit
			R			No Pit
12	C	AISI 304 34041	A			No Pit
			R			No Pit
13	C	AA 6061 34611	A	3000	1000	1400
			R			No Pit

RACK 37 (diámetro de pit en μm)						
Cupón	Tipo	Aleación Código	Lado	Máximo	Mínimo	Promedio
1	S	AA 1050 37506	A	319	42	75.7
			R	260	42	80.8
2	S	AA 6061 37615	A			No Pit
			R			No Pit
3	S	AA 1050 37505	A			No Pit
			R			No Pit
4	C	AA 1050 37504	A			No Pit
			R			No Pit
5	C	AA 1050 37503	A			No Pit
			R			No Pit
6	C	AA 1050 37502	A			No Pit
			R			No Pit
7	C	AA 6061 37614	A			No Pit
			R			No Pit
8	C	AA 6061 37613	A			No Pit
			R			No Pit
9	C	AA 6061 37612	A			No Pit
			R			No Pit
10	C	AISI 304 37042	A			No Pit
			R			No Pit
11	C	AA 1050 37501	A			No Pit
			R			No Pit
12	C	AISI 304 37041	A			No Pit
			R			No Pit
13	C	AA 6061 37611	A			No Pit
			R			No Pit

13. Conclusiones

- Las zonas con circulación de agua minimizan los efectos de la corrosión sobre la superficie de los cupones de Aluminio. El rack 37 estuvo expuesto en una zona con circulación de agua y el rack 34 en una zona sin circulación.
- Siempre se ha repuesto agua desmineralizada al tanque principal y pileta auxiliar con una calidad superior ($0.05 \mu\text{S/cm}$)
- Los depósitos y sedimentos sobre los cupones de aluminio son la causa del inicio del pitting.
- El principal condición para almacenar combustible gastado por largo tiempo es mantener la calidad del agua en un nivel óptimo.
- Especial atención se deberá tener a las partículas que caen sobre los cupones de aluminio, especialmente aquellas que contienen hierro.
- El uso de componentes de acero o de actividades cercanas a la vecindad de los contenedores que promuevan la caída de partículas deberán ser evitadas.
- La corrosión por picadura fue la principal forma de corrosión.
- La reducción en conductividad y en el contenido de cloruros en el agua de los contenedores es esencial para mantener bajas tasas de corrosión.
- La aleación de aluminio 6061 es mas resistente al picado que la aleación 1050.
- La corrosión en resquicios no fue necesariamente acompañada con picado en las superficies de aluminio dentro de los resquicios.
- La corrosión galvánica de las aleaciones de aluminio 6061 acopladas con acero inoxidable 304 fueron más severas que las cuplas de aleación de aluminio 1050 con acero inoxidable 304.
- El programa de monitoreo implementado es capaz de detectar situaciones que afectarían al combustible almacenado debido a la corrosión de sus materiales metálicos.
- A pesar de la buena calidad del agua del contenedor, las aleaciones de aluminio por sí solas o formando cuplas entre ellas o con acero inoxidable siempre sufren algún tipo de corrosión.
- En general la extensión de la corrosión varió del siguiente modo: AA 6061 > AA1050; parte superior del cupón > parte inferior del cupón; cuplas de metales > cupones individuales

Bibliografía

1. IAEA, Corrosion of Research Reactor Aluminum Clad Spent Fuel in Water, Technical Reports series N° 418 (2003).
2. Pierre R. Roberge, Handbook of Corrosion Engineering. McGraw-Hill.
3. Uhlig, H., Corrosion and Control Corrosion, 2nd Ed., John Wiley & Sons, (1971).
4. Babiche, I., Criterios para la Protección contra la Corrosión en los Elementos Combustibles Gastados en el Almacenamiento Húmedo Provisional en el Centro Nuclear "RACSO".
5. Davis, J.R., Specialty Handbook. Aluminum and Aluminum Alloys ASM International. 2nd ed., Introduction to Aluminum and Aluminum Alloys, Vol. 1 Davis, Davis & Associates (1994).
6. Workshop on Characterization, Management and Storage of Spent Fuel from Research and Test Reactors [IAEA Project RER/9/058 in Swierk, Poland, 8-12 May 2000).