

IRRADIAÇÃO DE MINIPLACAS DE ELEMENTOS COMBUSTÍVEIS TIPO DISPERSÃO DE REATORES DE PESQUISA

DOMINGOS¹, Douglas Borges; CONTI², Thadeu das Neves; YAMAGUCHI³, Mitsuo; SILVA⁴, José Eduardo Rosa da; ANDRADE⁵, Delvonei Alves de; UMBEHAUN⁶, Pedro Ernesto; SILVAⁿ, Antonio Teixeira e.

¹IPEN/CEN, Av. Lineu Prestes 2242, Cidade Universitária, São Paulo-SP, douglasborgesdomingos@yahoo.com.br

²IPEN/CEN, Av. Lineu Prestes 2242, Cidade Universitária, São Paulo-SP, tnconti@ipen.br

³IPEN/CEN, Av. Lineu Prestes 2242, Cidade Universitária, São Paulo-SP, mitsuo@ipen.br

⁴IPEN/CEN, Av. Lineu Prestes 2242, Cidade Universitária, São Paulo-SP, jersilva@ipen.br

⁵IPEN/CEN, Av. Lineu Prestes 2242, Cidade Universitária, São Paulo-SP, delvonei@ipen.br

⁶IPEN/CEN, Av. Lineu Prestes 2242, Cidade Universitária, São Paulo-SP, umbenhaun@ipen.br

ⁿIPEN/CEN, Av. Lineu Prestes 2242, Cidade Universitária, São Paulo-SP, teixeira@ipen.br

Resumo- O presente trabalho tem como objetivo qualificar elementos combustíveis tipo dispersão de U_3O_8 -Al com densidades de até 3.0 gU/cm^3 e elementos combustíveis tipo dispersão de U_3Si_2 -Al com densidades de $4,8 \text{ gU/cm}^3$. Estes combustíveis são fabricados no IPEN-CNEN/SP e serão utilizados nos reatores nacionais, entre eles o Reator IEA-R1 do IPEN-CNEN/SP. Para qualificação, foi projetado e construído um dispositivo onde serão alojadas miniplacas dos combustíveis acima. Estas miniplacas serão colocadas no núcleo do reator IEA-R1 e irradiadas até queimas de aproximadamente 80% do U-235, proporcionando a qualificação dos combustíveis fabricados no IPEN-CNEN/SP nas máximas densidades de urânio qualificadas no mundo para este tipo de combustível. A obtenção dos combustíveis nas suas densidades de urânio máximas qualificadas no mundo permitirá uma melhor utilização do combustível no reator IEA-R1, a redução do volume do seu núcleo e a possibilidade de ampliar a produção de radioisótopos para uso medicinal no país.

Palavras-chave: Combustível Nuclear MTR, Combustíveis a dispersão, Desempenho do Combustível, Qualificação do Combustível, Física de reatores.

Área do Conhecimento: Engenharia Nuclear.

Introdução

Em 1987, no *International Meeting on Reduced Enrichment for Research and Test Reactor* realizado em Buenos Aires, Argentina, foram apresentados trabalhos que deram como qualificadas as dispersões UAl_x -Al, U_3O_8 -Al e o U_3Si_2 -Al com densidades, respectivamente, de até $2,3 \text{ gU/cm}^3$ (45% em volume da fase UAl_x), $3,2 \text{ gU/cm}^3$ (45% em volume da fase U_3O_8) e $4,8 \text{ gU/cm}^3$ (42,5% em volume da fase U_3Si_2), devido ao bom desempenho apresentado pelas mesmas nos testes realizados (COPELAND, 1987).

O IPEN-CNEN/SP com intuito de alcançar os padrões internacionais de qualidade em combustíveis nucleares a dispersão fabricou e qualificou U_3O_8 -Al a uma densidade de $2,3 \text{ gU/cm}^3$ (33% em volume) e o de U_3Si_2 -Al até uma densidade de $3,0 \text{ gU/cm}^3$ (26% em volume) que são usados no núcleo do reator de pesquisa IEA-R1. Entretanto o interesse do IPEN-CNEN/SP é alcançar as densidades máximas qualificadas no mundo ($3,0 \text{ gU/cm}^3$ e $4,8 \text{ gU/cm}^3$, respectivamente, para os combustíveis U_3O_8 -Al e U_3Si_2 -Al), mas para tal qualificação são

necessários testes de irradiações de miniplacas. No ano de 2007, houve a substituição do trocador de calor do Reator IEA-R1, o que possibilitou a sua operação até uma potência de 5 MW. Nesta potência, é possível atingir queimas elevadas do combustível em tempos relativamente mais curtos. Assim, foi proposto colocar a partir de 2008 no reator IEA-R1 miniplacas combustíveis fabricadas no IPEN-CNEN/SP do tipo dispersão de U_3O_8 -Al e U_3Si_2 -Al nas densidades máximas qualificadas no mundo e acompanhar o seu desempenho sob irradiação. Em caso de um bom desempenho, seriam construídos combustíveis completos nas densidades máximas qualificadas no mundo para posterior utilização no reator IEA-R1. Isto possibilitaria uma melhor utilização do combustível e a redução do volume do núcleo do reator.

Metodologia

O grupo de engenheiros do Centro de Engenharia Nuclear (CEN/IPEN) projetou um dispositivo irradiador adaptado especialmente para conter um estojo com dez miniplacas (5 miniplacas

de U_3O_8 -Al com densidades de $3,0 \text{ gU/cm}^3$ e 5 de U_3Si_2 -Al com densidades de até $4,8 \text{ gU/cm}^3$) tipo dispersão que serão colocadas no núcleo do reator IEA-R1. A geometria externa do irradiador é idêntica a um elemento combustível padrão. As modificações foram feitas na geometria interna para conter o estojo com as miniplacas e garantir o fluxo do refrigerante para troca de calor.

O processo de fabricação das miniplacas é o mesmo utilizado para a produção dos elementos

combustíveis usados no núcleo do reator IEA-R1 (U_3O_8 -Al e U_3Si_2 -Al, com densidades de $2,3 \text{ gU/cm}^3$ e $3,0 \text{ gU/cm}^3$ respectivamente). A Tabela 1 apresenta um conjunto de miniplacas já fabricadas pelo Centro do Combustível Nuclear (CCN) do IPEN-CNEN/SP, que dentre as quais serão selecionadas cerca de 10 para a primeira irradiação no núcleo do Reator IEA-R1.

Tab. 1: Principais características das miniplacas fabricadas pelo Centro do Combustível Nuclear (CCN) do IPEN-CNEN-SP (Si = $U_3Si_2 - Ox = U_3O_8$)

Identificação	Espessura (mm)	Massa de Urânio (g)	Porosidade do núcleo (vol%)	Dimensões do Núcleo (mm)		Densidade do Urânio nominal gU/cm^3
				Comprimento	Largura	
Si-E-01	1,53	10,42	7,65	120	42	3,1
Si-E-01	1,53	10,40	7,40	116	42	3,1
Si-E-01	1,53	10,38	8,55	116	42	3,1
Si-E-01	1,53	10,39	8,48	114	42	3,1
Si-E-01	1,53	16,13	10,44	114	42	4,8
Si-E-01	1,53	16,13	12,06	117	42	4,8
Si-E-01	1,53	16,14	12,03	115	42	4,8
Si-E-01	1,53	16,14	12,36	115	42	4,8
Ox-E-01	1,53	7,72	10,85	122	42	2,3
Ox-E-01	1,53	7,71	11,08	116	42	2,3
Ox-E-01	1,53	7,73	10,81	116	42	2,3
Ox-E-01	1,53	7,74	11,33	117	42	2,3
Ox-E-01	1,53	10,74	14,18	123	42	3,2
Ox-E-01	1,53	10,75	15,05	119	42	3,2
Ox-E-01	1,53	10,72	14,73	116	42	3,2
Ox-E-01	1,53	10,75	14,83	118	42	3,2

Cálculos preliminares baseados na potência do reator IEA-R1 (que pode variar entre 3,5 MW e 5 MW) prevêem um tempo de 2 a 3 anos de irradiação para se atingir uma queima considerável para a qualificação dos combustíveis. Estudos neutrônicos e termo-hidráulicos referente ao dispositivo de irradiação serão conduzidos, considerando as possíveis formas de colocação deste dispositivo para irradiação no reator IEA-R1.

Os cálculos das distribuições de densidade de potência nas miniplacas no núcleo do reator IEA-R1 foram realizados com os programas HAMMER-TECHNION (BARHEN, RHOTENSTEIN, TAVIV, 1978) para geração das seções de choque e CITATION (FOWLER, VONDY, CUNNINGHAM, 1971) para cálculo do núcleo. Para cálculo das distribuições de temperatura nas miniplacas e do impacto do desvio de vazão no núcleo através do dispositivo de irradiação serão efetuados cálculos utilizando o pacote Engineering Equation Solver – EES.

O IPEN-CNEN/SP não possui células quentes para análise destrutivas de combustíveis nucleares. Em consequência, é também objetivo deste trabalho aplicar técnicas de exames não destrutivos para avaliar o comportamento sob irradiação destas miniplacas. Esta avaliação seria desenvolvida em dois passos:

1. Monitoramento do desempenho sob irradiação das miniplacas combustíveis durante a operação do reator IEA-R1 através dos seguintes parâmetros: potência do reator, tempo de irradiação, fluxo neutrônico na posição do dispositivo de irradiação, queima, temperatura de entrada e saída da água de resfriamento do reator, pH da água, condutividade da água, quantidade de cloro e análise radioquímica da água do reator;

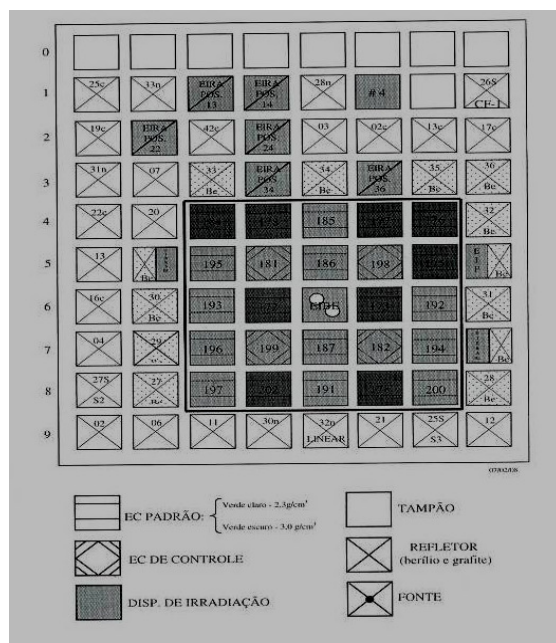
- Inspeção visual periódica das miniplacas com câmera subaquática para verificar a sua integridade e condições superficiais, medida de espessura das miniplacas para verificar o inchamento do combustível ao longo da queima e eventuais teste de “sipping”, caso haja suspeita de falha de alguma miniplaca.

A medida das miniplacas durante o tempo de irradiação será feita por um medidor de placas (figura 3) que será acoplado à piscina do reator IEA-R1. As medidas das miniplacas serão fundamentais para sua qualificação, visto que através das medidas é que teremos os valores de inchamento sobre irradiação. O equipamento de medição está sendo usado no momento para fazer a medida a frio das miniplacas a serem irradiadas antes da sua colocação no reator IEA-R1. Após termino dessas medidas o equipamento será colocado no reator IEA-R1 para executar a medida das miniplacas após períodos determinados de queima do combustível.

Resultados

O cálculo das distribuições de densidades de potenciais nas miniplacas foi realizado com os programas HAMMER-TECHNION para geração de seções de choque e CITATION para o cálculo do núcleo. Foi adotado a configuração 236 apresentada na Figura 1, onde estão indicadas as três posições (23, 36 e 37 da placa matriz) que podem ser utilizadas para colocar o dispositivo irradiador de miniplacas.

Figura 1 – Placa matriz do núcleo do reator IEA-R1



O escoamento do fluido refrigerante, que se dá no sentido descendente, promovido pela bomba principal, faz com que o fluido refrigerante escoe através dos elementos combustíveis padrão e de controle, irradiadores que permitem a passagem de água, furos secundários não tamponadas da placa matriz, canais entre elementos combustíveis e canais entre refletores e irradiadores.

O escoamento nos canais dos elementos combustíveis padrão e de controle promove o resfriamento das placas combustíveis internas; o escoamento através dos canais entre elementos promove resfriamento das faces externas das placas combustíveis laterais; o escoamento pelos canais entre refletores e irradiadores tem por finalidade principal permitir que não haja estagnação de fluido refrigerante e o escoamento pelos furos principais e secundários não tamponados não tem finalidade nenhuma e desviam parte da vazão que deveria estar passando pelos canais ou irradiadores onde há geração de calor.

A introdução deste novo dispositivo de irradiação certamente desviará parte da vazão de resfriamento do núcleo, tornando importante a análise termo-hidráulica deste novo dispositivo, de tal forma a garantir seu resfriamento, sem por outro lado desviar um valor muito acima do necessário, minimizando assim o impacto no resfriamento do núcleo.

O dispositivo é formado por 2 conjuntos de 5 miniplacas. A espessura de cada miniplaca é de 1,55 mm com canal de refrigeração de 3,77 mm. A altura ativa é de 136 mm, no entanto, foi considerada conservativamente uma altura de 140 mm. As miniplacas são fabricadas com largura ativa de 20 mm e 40 mm.

A condição crítica de irradiação foi obtida para a situação em que são irradiadas simultaneamente dez miniplacas de U₃Si₂-Al com 4,8 gU/cm³ e com 2 cm de largura ativa. Nesta situação a vazão pelo irradiador de miniplacas deverá ser calibrada, experimentalmente, para um dos seguintes valores:

- 7,3 m³/h caso o irradiador seja colocado na posição 26;
- 10,2 m³/h caso o irradiador seja colocado na posição 37; ou
- 12,3 m³/h caso o irradiador seja colocado na posição 36.

Do ponto de vista de resfriamento do núcleo do reator a melhor posição é a 26 pois, é a que acarreta o menor desvio de vazão do núcleo ativo, porém necessitando de maior tempo de irradiação para atingir a queima desejada.

Discussão

A qualificação de combustíveis em densidades máximas (U_3O_8-Al e U_3Si_2-Al , com densidades de $2,3 \text{ gU/cm}^3$ e $3,0 \text{ gU/cm}^3$ respectivamente) é de suma importância para a pesquisa nuclear no Brasil. Com o aumento da massa específica de U-235 pode se otimizar o núcleo de reatores e com isso gerar mais potência elevando o rendimento do reator. Vários países detentores de tecnologia nuclear como Estados Unidos da América (EUA), Japão, França e Argentina já produzem e utilizam combustíveis com densidades elevadas de U-235 e o IPEN-CNEN/SP já domina o processo de fabricação deste tipo de combustível que está sendo testado para seu uso seguro em núcleo de reatores.

Conclusão

A tecnologia de processo e fabricação de combustíveis de altas densidades de U-235 já é dominado e feito no IPEN-CNEN/SP. Agora é preciso testá-los e qualificá-los para seu bom desempenho em reatores. Os resultados conclusivos só serão possíveis em dois ou três anos, mas os cálculos neutrônicos e termo-hidráulico já realizados nos permite a colocação no núcleo de um dispositivo de irradiação de miniplacas que servirá para analisar o comportamento sob irradiação dos combustíveis tipo MTR nas ultimas densidades.

Referências

- BARHEN, J.; RHOTENSTEIN, W.; TAVIV, E. *The HAMMER Code System Technion*. Israel Institute of technology, Haifa, Israel, NP-565, 1978.
- BEESTON, J. M.; HOBBS, R.R.; GIBSON, G. B.; FRANCIS, W. C. *Development and Irradiation Performance of Uranium Aluminide Fuels in Test Reactors*. Nucl. Technol., 49:136-49, 1980.
- BREAZEÀLE, W. M. *The Swimming pool. A Low Cost Research Reactor*. Nucleonics, 10(11): 56-60, 1952.
- CASTILLO, V. F. J.; MARIN, J. E.; CHAVES, P. J. C.; HECHENLEEITNER, S. H.; TESTART, T. E.; CORTEZ, N. D. *Fabricacion de Combustible Tipo Disperso (MTR)*. Nucleotecnica, 11: 11-22, 1986.
- COPELAND, G. *High-Density, Reduced-enrichment Fuels for Research Reactors – I*. Trans. Am. Nucl. Soc., 55:274, 1987.
- EL-WAKIL, M. M. *Nuclear Heat Transport*. ANS Publishers, Hinsdale – 111,1978.
- FOWLER, T. B.; VONDY, D. R. AND CUNNINGHAM, G.W. – *Nuclear Reactor Core Analysis Code: CITATION*, Oak Ridge National Laboratory , ORNL-TM-2496, Ver. 2, July, 1971.
- HOLDEN, A. N. *Dispersion Fuel Elements*. New York, N. Y., Gordon & Breach, 1968.
- HROVAT, M. F.; HASSEL, H. W.; WEHNER, E. L. *AdvancedMTR Fuel*. Nuclear Europe, 6: 28-30, 1985.
- KAUFMANN, A. R. *Nuclear Reactor Fuel Elements - Metallurgy and Fabrication*. New York, N. Y., John Wiley e Sons, 1962.
- KLEIN, S. A.; ALVARADO, F. L. *EES Engineering Equation Solver for the Microsoft Windows Operating System, Version 4.334W* Dec. 1996. Middleton, WI.: F-Chart Software, 1992.
- NAZARÉ, S. *Low Enrichment Dispersion Fuels for Research and Test Reactors*. J Nucl. Mater., 124: 14-24, 1984.
- SAMOILOV, A. G.; KASHTANOV, A. I.; VOLKOV, V. S. *Dispersion Fuel Nuclear Reactor Elements*. Jerusalem, IPST, 1968.
- SIMÕES, A. V. *Desempenho sob irradiação de combustíveis a dispersão de MTR*. 1993. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.
- TERREMOTO, L. A. A.; DAMY, M. A.; UMBEHAUM, P. E; CEGALLA, M. A.; YAMAGUCHI, M. *Acompanhamento da irradiação dos elementos combustíveis Nacionais no Reator IEA-R1 - (2003)*. Relatório Técnico, Nov. 2004. (PSE.CENC.IEAR1.068.00 RELT.003.00).
- UMBEHAUN, P. E. *Metodologia para Análise Termo-Hidráulica de Reatores de Pesquisa Tipo Piscina com Combustível Tipo Placa* – Dissertação de Mestrado – São Paulo, (2000).

