

EXPERIMENTO DE CARREGAMENTO DO NÚCLEO DO REATOR IPEN/MB-01

Alfredo Abe, Elcio Angioletto, Hertz Pasqualetto, João M. L. Moreira, Marco A. Sabo, Rinaldo Fuga e Rogério Jerez*

Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo, CTMSP
Divisão de Física de Reatores
Caixa Postal 68 550
Av. Prof. Lineu Prestes, 2242 - Cidade Universitária
21945-970, São Paulo, Brasil
e-mail: ayabe@net.ipen.br

*Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN/CNEN-SP
Supervisão de Operação de Reatores
Caixa Postal 11049
Travessa R-400, Cidade Universitária
05422-970, São Paulo, Brasil

RESUMO

O reator IPEN/MB-01 atingiu a sua primeira criticalidade nuclear em Novembro de 1988 e desde então vêm sendo executados inúmeros experimentos dentro do programa de validação e qualificação de metodologias de cálculo de Física de Reatores. Neste sentido, realizou-se recentemente o experimento de carregamento do núcleo do reator visando obter o conjunto de varetas para a massa crítica do sistema utilizando a técnica da multiplicação inversa ($1/M$). Este experimento pode ser considerado como um padrão e contribui para a verificação de sistemas de cálculos de reatores assim como a qualidade dos dados das bibliotecas de dados nucleares básicos.

Palavras chave : Criticalidade, carregamento, arranjo, códigos.

I. INTRODUÇÃO

O núcleo do reator IPEN/MB-01 foi carregado pela primeira vez durante a fase de comissionamento da instalação em novembro de 1988[1]. Desde a primeira criticalidade o núcleo basicamente manteve sempre a mesma configuração ou arranjo (retangular com arranjo de 28x26). As únicas modificações na configuração do núcleo foram efetuadas para obtenção de uma configuração com um arranjo quadrado e um arranjo cilindrizado. Desta forma, o núcleo do reator após o seu primeiro carregamento nunca foi descarregado e recarregado até a presente data.

A Divisão de Física de Reatores do CTMSP vem conduzindo um programa experimental visando a qualificação de metodologias de cálculos, códigos e bibliotecas de seções de choque utilizados no projeto do reator da INAP. Neste sentido, recentemente foi efetuado o experimento de carregamento do núcleo do reator IPEN/MB-01 com a finalidade de obter a massa crítica do sistema. Este experimento pode ser utilizado para a verificação da cadeia de códigos envolvidos no cálculo de núcleo de reatores desde a qualidade dos dados das seções de choque das

bibliotecas básicas (ENDF, JENDL, JEF, etc) até a modelagem tridimensional explícito do núcleo utilizando códigos mais complexos como MCNP[2].

II. DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO

O experimento do carregamento do núcleo do reator IPEN/MB-01 foi efetuado estabelecendo-se um determinado número de sequências ou etapas. Nestas etapas foram definidas as quantidades de varetas a serem inseridas e as suas respectivas posições dentro do núcleo. Durante cada etapa ou sequência do carregamento a multiplicação de nêutrons do sistema foi monitorada através de um conjunto de 5 detectores de BF_3 , 2 detectores de B-10 e dois detectores da faixa intermediária. Dentre o conjunto de detectores citados, quatro destes pertencem a mesa de operação do reator juntamente com outros dois detectores da faixa intermediária. Os demais três detectores (dois de BF_3 e um de B-10) foram selecionados e colocados em posições estratégicas exclusivamente para o acompanhamento deste experimento.

A Figura 1. ilustra as posições dos detectores utilizados neste experimento. O sinal do detector durante as etapas de carregamento é função da posição deste em relação a fonte de nêutrons. Neste sentido escolheu-se posições em todas as faces do reator para a colocação dos

detectores, exceto na face onde encontrava-se a fonte de nêutrons (face oeste).

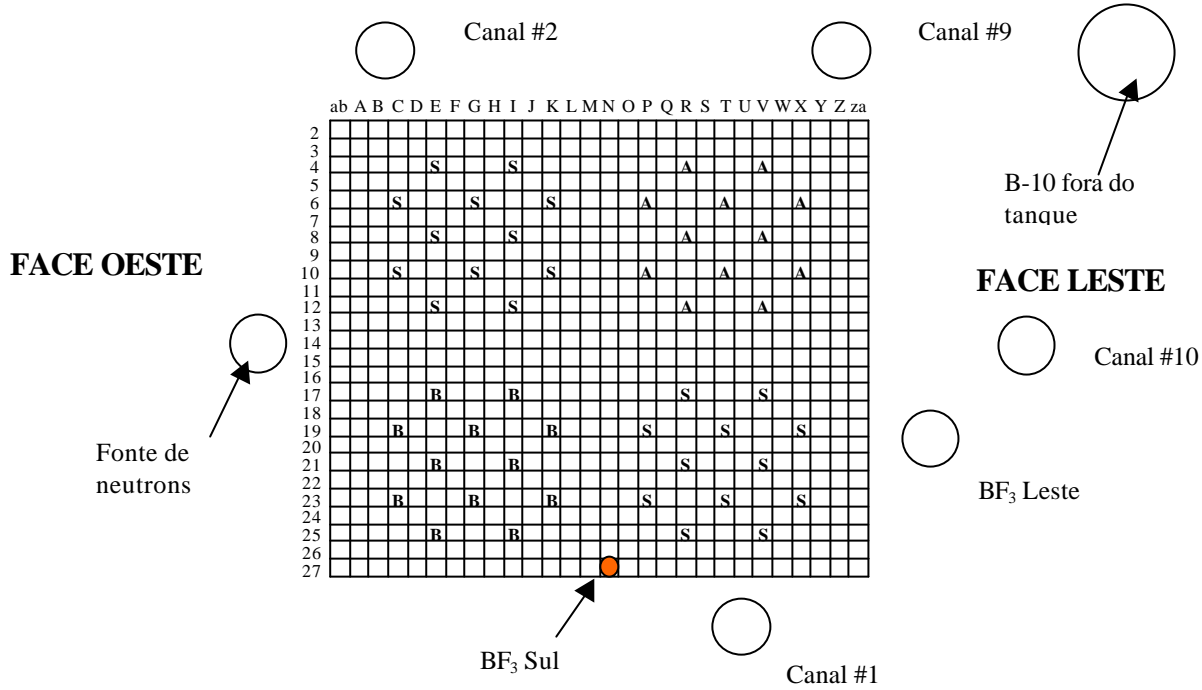


Figura 1. Ilustração Esquemática da Localização dos Detectores

III. MULTIPLICAÇÃO SUBCRÍTICA DE NÊUTRONS E A CURVA 1/M

Define-se o fator de multiplicação subcrítica^{3/} como sendo a razão entre o número total de nêutrons no núcleo do reator (nêutrons da fonte e nêutrons de fissão) e o número de nêutrons no núcleo do reator devido somente a fonte de nêutrons (ausência de fissões).

O fator de multiplicação subcrítica, M, é definido como:

$$M = \frac{\langle F(\underline{r}, E) \cdot \mathbf{f}(\underline{r}, E) \rangle}{\langle S(\underline{r}, E) \rangle} \quad (1)$$

onde $\langle \rangle$ significa integral nas variáveis energia e espaço e $S(\underline{r}, E)$ é a intensidade da fonte em [n/s.cm³] e $F(\underline{r}, E)$ é o operador que representa a produção de nêutrons por fissão. Para o reator subcrítico a equação de balanço de nêutrons tem solução estacionária no tempo e pode ser escrita como:

$$L(\underline{r}, E) \cdot \mathbf{f}(\underline{r}, E) = F(\underline{r}, E) \cdot \mathbf{f}(\underline{r}, E) + S(\underline{r}, E) \quad (2)$$

onde $L(\underline{r}, E)$ é o operador que representa o desaparecimento de nêutrons no reator por espalhamento, absorção e fuga de nêutrons.

O fator efetivo de multiplicação do reator é definido como :

$$k = \frac{\langle F\mathbf{f} \rangle}{\langle L\mathbf{f} \rangle} \quad (3)$$

Integrando a equação (2) obtém-se:

$$\langle L\mathbf{f} \rangle = \langle F\mathbf{f} \rangle + \langle S \rangle \quad (4)$$

Dividindo por $\langle F\mathbf{f} \rangle$ e utilizando as definições dadas na equação (1) e na equação (3), tem-se

$$\frac{\langle L\mathbf{f} \rangle}{\langle F\mathbf{f} \rangle} = 1 + \frac{\langle S \rangle}{\langle F\mathbf{f} \rangle}, \text{ ou}$$

$$\frac{1}{k} = 1 + \frac{1}{M} \quad (5)$$

Após alguma manipulação, fornece :

$$M = \frac{k}{1-k} \quad (6)$$

Observa-se, claramente, que à medida que k se aproxima de 1 (um), o fator de multiplicação subcrítica tende o infinito. Desta forma, torna-se conveniente, na prática, expressar a aproximação da criticalidade pelo inverso da multiplicação subcrítica. Assim, o inverso do fator de multiplicação subcrítica tende a zero quando o reator se aproxima da criticalidade. O fator de multiplicação inversa de cada etapa auxilia na previsão de criticalidade do sistema, uma vez que para cada etapa são inseridas mais varetas combustíveis no núcleo. A previsão de criticalidade pode ser obtida construindo-se um gráfico de valores do inverso do fator de multiplicação em função da quantidade de etapas ou quantidades de varetas correspondente.

A extrapolação da curva indicará a quantidade ou etapa onde ocorrerá a criticalidade do sistema. A previsão utilizando-se a extrapolação assegura a não ocorrência de uma criticalidade não programada e antes do desejado. A forma da curva do inverso da multiplicação depende do posicionamento dos detectores. A Figura 2. ilustra um exemplo de uma curva do inverso da multiplicação ($1/M$) para três detectores localizados em diferentes posições.

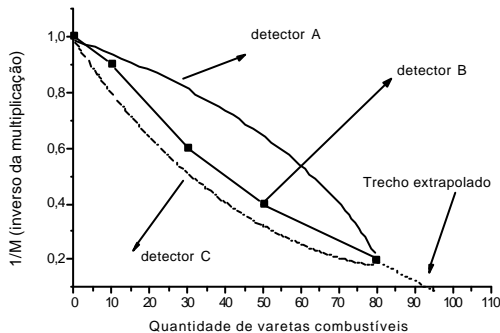


Figura 2. Inverso do fator de multiplicação subcrítica em função da quantidade de vareta combustível e posição dos detectores.

Observa-se que a geometria fonte, núcleo e o detector influencia a forma da curva $1/M$. Na Figura 2., a curva relativa ao detector *A* ilustra uma situação onde o detector foi bastante sensibilizado pelos nêutrons provenientes da fonte, inversamente ocorrendo na situação do detector *C* onde a informação da multiplicação é afetado pela crescente absorção dos nêutrons pelo combustível. A curva relativa ao detector *B* indica uma situação mais próxima da realidade onde o detector é sensibilizado pelos nêutrons provenientes de fissões no combustível.

IV. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Inicialmente o núcleo atual (configuração 28x26) foi descarregado parcialmente, isto é, as varetas foram retiradas da placa matriz permanecendo no núcleo somente 116 varetas localizadas abaixo da “aranha” das barras de controle e segurança. As 116 varetas combustíveis foram deixadas no núcleo devido a dificuldade na remoção das mesmas, que implicaria na desmontagem do sistema de suporte das varetas de controle e segurança.

Após o descarregamento efetuou-se o posicionamento dos detectores experimentais a serem utilizados para o monitoramento do carregamento. A Figura 1, ilustra esquematicamente as posições dos detectores em relação às faces do núcleo.

O detector de BF_3 da face sul foi colocado dentro de um tubo plástico de PVC e posicionado na meia altura ativa do núcleo entre as colunas L e M. Outro detector de BF_3 foi colocado dentro de um “tubulão” de alumínio e posicionado na face leste oposta à fonte. O detector de B-10 foi colocado fora do tanque moderador, na metade da altura ativa do núcleo e na direção nordeste.

A fonte de nêutrons, com a intensidade aproximada de 1 Ci, foi colocada dentro de um “tubulão” de alumínio e posicionada na metade da altura ativa e na face oeste do núcleo do reator. Após o posicionamento dos detectores foram efetuadas as ligações de cabos e conectados os instrumentos associados. O carregamento foi efetuado em 22 (vinte duas) etapas, conforme a Tabela I.

TABELA I. Etapas e quantidades de varetas

ETAPAS	# de varetas inseridas na etapa	Total de varetas no núcleo
1*	128	244
2	28	272
3	29	301
4	28	329
5	29	358
6	28	386
7	29	415
8	28	443
9	29	472
10	22	494
11	22	516
12	22	538
13	22	560
14	1	561
15	1	562
16	1	563
17	1	564
18	2	566
19	2	568
20	2	570
21	6	576
22	2	578

* 116 varetas já se encontram sob as aranhas das barras de controle e segurança

A Figura 3. ilustra esquematicamente a instrumentação utilizada na montagem dos detectores de BF₃ e B-10.

Em relação a Tabela I. ressalta-se que da etapa 14 até a etapa 17 foram inseridas somente uma vareta para cada etapa pois, de acordo com o primeiro carregamento do núcleo (comissionamento do reator) na décima sétima etapa seria o valor do núcleo crítico. Este valor foi obtido da extrapolação da curva 1/M efetuado na época.

RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os resultados deste experimento são basicamente as contagens nos detectores da mesa de controle e os experimentais, os valores de 1/M (fator de multiplicação inverso) de cada etapa, a configuração crítica final e o excesso de reatividade deste núcleo. O excesso de reatividade da configuração final do núcleo foi quantificado utilizando-se a informação do período do reator pois, o período estável do reator está relacionado com a reatividade por meio da equação Inhour. Neste trabalho será apresentado somente a configuração crítica final e o respectivo excesso de reatividade, as curvas 1/M dos detectores juntamente com os valores das contagens de cada etapa para cada detector.

A Figura 4. ilustra a configuração final com 578 varetas com as barras de controle e segurança totalmente retiradas.

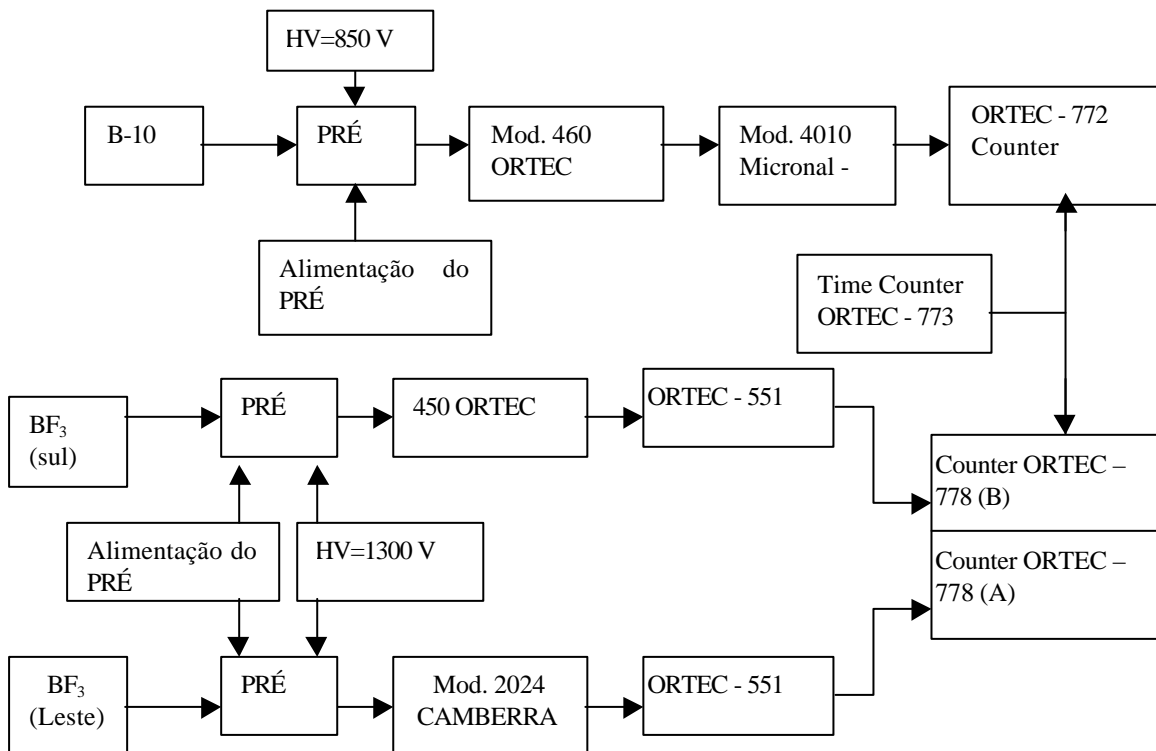


Figura 3. Diagrama de blocos do sistema de detecção utilizado para monitorar a produção de nêutrons no carregamento do núcleo.

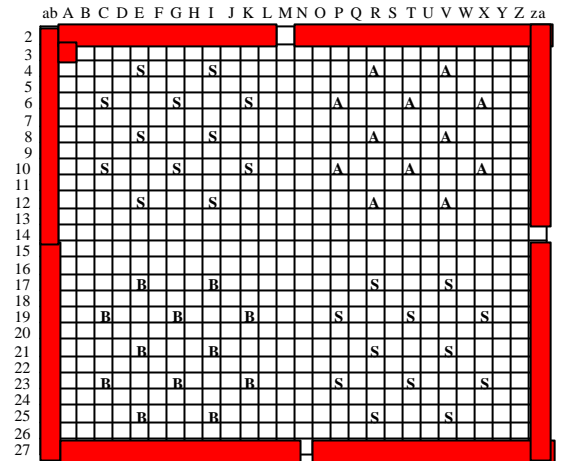


Figura 4. Configuração Crítica com 578 varetas combustíveis

O núcleo final obtido (Figura 4.) apresenta uma configuração assimétrica pois, utilizou-se quatro varetas para ajustar o nível do excesso de reatividade no menor valor possível. O excesso de reatividade obtido foi de aproximadamente 4 pcm.

A Figura 5. ilustra a curva 1/M para os seis detectores utilizados durante o carregamento em função do número de varetas inseridas, enquanto a Figura 6. ilustra em detalhe o trecho referente as cinco últimas etapas do carregamento.

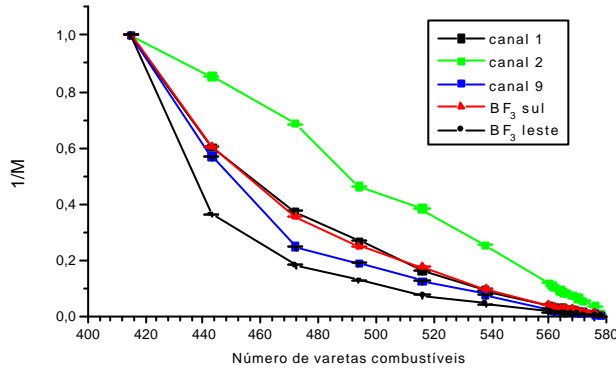


Figura 5. Curva 1/M em função do número de varetas para o carregamento do reator IPEN/MB-01.

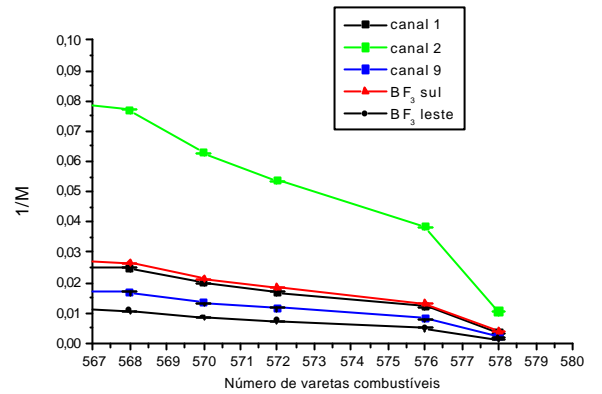


Figura 6. Detalhe da Curva 1/M em função das últimas etapas do carregamento do reator IPEN/MB-01.

A Tabela II ilustra os valores das contagens em função do número de varetas inseridas no núcleo.

TABELA II – Valores das contagens dos detectores durante o carregamento

<u>Etapa/varetas</u>	<u>Contagens BF₃ (sul)</u>	<u>Contagens BF₃ (leste)</u>	<u>Contagens B-10</u>	<u>Contagens Canal #1</u>	<u>Contagens Canal #2</u>	<u>Contagens Canal #9</u>
Ref.	1712 ± 41	25 ± 5	14 ± 4	175 ± 13	1628 ± 40	-
1	2642 ± 51	86 ± 9	16 ± 4	218 ± 15	1691 ± 41	121 ± 11
2	3899 ± 62	121 ± 11	17 ± 4	252 ± 16	1776 ± 42	130 ± 11
3	8366 ± 91	232 ± 15	11 ± 4	437 ± 21	1760 ± 42	-
4 / 329	3349 ± 58	223 ± 15	11 ± 4	359 ± 19	1801 ± 42	153 ± 12
5 / 358	4270 ± 65	327 ± 18	14 ± 4	398 ± 20	1831 ± 43	228 ± 15
6 / 386	8893 ± 94	679 ± 26	16 ± 4	652 ± 26	2329 ± 48	367 ± 19
7 / 415	10900 ± 104	704 ± 27	16 ± 4	759 ± 28	2268 ± 48	346 ± 19
8 / 443	18054 ± 134	1944 ± 44	14 ± 4	1260 ± 35	2655 ± 52	609 ± 25
9 / 472	30482 ± 175	3843 ± 62	14 ± 4	2025 ± 45	3312 ± 58	1385 ± 37
10 / 494	43439 ± 208	5476 ± 74	17 ± 4	2831 ± 53	4911 ± 70	1825 ± 43
11 / 516	61854 ± 249	9254 ± 96	18 ± 4	4624 ± 68	5917 ± 77	2736 ± 52
12 / 538	111227 ± 334	15736 ± 125	19 ± 4	8086 ± 90	8945 ± 95	4431 ± 67
13 / 560	260712 ± 511	40829 ± 202	27 ± 5	19167 ± 138	19032 ± 138	13535 ± 116
14 / 561	298154 ± 546	47000 ± 217	29 ± 5	22192 ± 149	21969 ± 148	15840 ± 126
15 / 562	343437 ± 586	53989 ± 232	30 ± 5	25280 ± 159	24686 ± 157	17633 ± 133
16 / 563	374338 ± 612	59303 ± 244	29 ± 5	27454 ± 166	26510 ± 163	18677 ± 137
17 / 564	393030 ± 627	62747 ± 250	34 ± 6	29399 ± 171	28205 ± 168	20641 ± 144
18 / 566	409055 ± 640	65842 ± 257	44 ± 6	30691 ± 175	29504 ± 172	20476 ± 143
19 / 568	510693 ± 715	82512 ± 287	51 ± 7	38168 ± 195	36117 ± 190	25994 ± 161
20 / 570	588619 ± 767	96451 ± 311	48 ± 7	44709 ± 211	42230 ± 205	29689 ± 172
21 / 576	829761 ± 911	142184 ± 377	68 ± 8	62625 ± 250	59113 ± 243	42654 ± 207
22 / 578	2826933 ± 1681	533680 ± 731	184 ± 14	235295 ± 485	216325 ± 465	158450 ± 398

CONCLUSÕES

O experimento de carregamento do núcleo do reator foi realizado em vinte duas etapas acompanhado por intermédio de sete detectores de nêutrons colocados em posições estratégicas ao redor do núcleo. A configuração crítica final obtida foi com um arranjo de 578 varetas e, um excesso de reatividade de aproximadamente 4 pcm.

Importante ressaltar a utilidade deste experimento para a qualificação de dados de seções de choque das bibliotecas de dados nucleares básicos, assim como códigos e metodologias aplicado no cálculo do núcleo do reator.

REFERÊNCIAS

- [1]. Jerez, R. "Carregamento e Pré Criticalidade". Relatório Técnico : R410380035065-01-00 (Documento Interno), Novembro de 1988.
- [2] Briesmeister, J.F; " A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, MCNP ", Los Alamos National Laboratory, ORNL-13221, Oak Ridge, TN, USA.
- [3] Duderstat, J. J; Hamilton, L., J; "Nuclear Reactor Analysis", John Wiley & Sons, Inc., New York 1976.

ABSTRACT

IPEN/MB-01 is a critical assembly which reaches a first criticality at November 1998, since then a several experiments have been conducted in order to validate and qualify the Reactor Physics methodologies and codes. Recently, loading experiment was performed to determine the critical number of fuels rods using a multiplication inverse technique ($1/M$). The experiment can be considered as benchmark and contribute toward reactor physics methodologies, codes and basic nuclear data libraries validation and qualification.