

'99 추계 학술발표회 논문집

한국원자력학회

PNL30-35 혼합핵연료 임계실험에 대한 HELIOS 코드 검증

Verification of HELIOS Against PNL30-35 Critical Experiments Loaded with Mixed-Oxide Fuel

김 종 채, 주 형 국

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150번지

요 약

혼합핵연료에 대한 HELIOS 검증계산의 일환으로 PNL30-35 임계실험에 대한 단위격자 및 이차원 임계도계산 그리고 반경방향 출력분포 계산을 수행하였다. 임계도계산에서 단위격자 계산의 경우 전체적으로 $1\% \Delta k$ 내로 잘 예측하고 있으며, 특히 이차원 임계도계산의 경우 모든 임계실험에 대해서 500pcm 이내로 잘 일치하였다. 또한 반경방향 출력분포의 경우 PNL-33 임계실험에 대한 RMS가 3.18%로서 다소 높은 경향을 보이고 있으나 전체적으로 측정치와 잘 일치하는 것으로 나타났다.

ABSTRACT

HELIOS code verification was performed against PNL30-35 MOX critical experiment. The multiplication factor of unit cell calculation and 2-dimensional calculation, rod-wise pin power distribution were compared with measured data. HELIOS predicts multiplication factor within the range of $1\% \Delta k$ and $0.5\% \Delta k$ error bounds for unit cell and 2-D calculation, respectively. The rod power distribution calculated with HELIOS is also in good agreement within the maximum RMS error 3.18%.

1. 기 요

HELJOS는 직선, 원 및 원호로 구성된 임의의 2차원 기하구조에 대해서 중성자 및 감마선 수송방정식의 해를 구하는 코드이다. HELJOS는 임의의 기하구조를 다수의 structure로 구분하고 structure내에서는 CPM(Collision Probability Method)를, structure와 structure 사이의 경계면이나, system 외곽의 경계면은 CCCP(Current Coupling Collision Probability Method)를 사용한다. 따라서 structure 및 격자 구성방법, 경계면의 표면중성자향류(surface angular current) 각분할 방법과 경계조건 등에 따라 계산결과가 달라 질 수 있다^[1]. 또한 증명영역을 가진 핵종들의 증명영역 적분방법, 라이브러리 등에 따라서도 영향을 받는다. 1.4 version에서는 34, 89, 190군 중성자 라이브러리가, 1.5 version에서는 35, 90 그리고 190군 중성자 라이브러리가 사용되고 있으며, 1.5 version의 35 또는 90군 라이브러리의 경우 비교적 혼합핵연료 계산에 잘 맞도록 U^{238} 및 Pu^{240} 증명영역에서의 에너지 그룹구조를 1.4와 달리하여 축약된 라이브러리이다. 그리고 이 라이브러리에는 30여종의 증명흡수 원소를 포함하고 있으며, 각 증명흡수 원소들의 증명영역의 중성자단면적 적분방법을 사용자가 다양하게 선택할 수 있다. 1.4 version에서는 증명적분을 일반핵종과 중핵종으로 구분하는 방법(resonance option 2)이, 1.5 version에서는 일반핵종, U^{238} 및 U^{235} 를 제외한 중핵종으로 구분하는 방법(resonance option 4)이 기본 option으로 되어 있다.

본 연구에서는 HELJOS^[23] 코드가 혼합핵연료용 집합계산코드로 사용될 수 있는지에 대한 예비계산의 일환으로 수행된 PNL30-35^[4,6] 임계실험의 단위격자 및 2-D 검증계산을 수행하였다.

2. PNL 임계 실험

PNL30-35 임계 실험은 1975년 말부터 1976년 초에 걸쳐 미국의 Pacific National Laboratory(PNL)의 Plutonium Recycle Critical Facility(PRCF)에서 수행된 혼합핵연료 임계 실험이다. 그림 1은 PNL 임계 실험에 사용된 핵연료의 기하학적 모델을 나타낸 것이다. 실험은 격자간격을 달리하면서 수행되었으며 각 격자간격에 대해서 순수한 물과 붕산수가 사용되었다. 실험결과의 요약은 표 1과 같은데 정확히 임계상태라기 보다는 약간의 잉여반응도를 갖는다. 이 실험에 사용된 혼합핵연료내 플루토늄 농도는 2.0wt.%로 비교적 저함량이나 particle 형태로 피복관내에 vipac 되어 있는 것이 특징이다.

표 2는 검증문제에 대한 참조해^[7]라 할 수 있는 임계치를 나타낸 것이다. 즉 임계 실험에서 측정된 반응도는 거의 임계상태라고 하더라도 임계 실험을 전산코드로 묘사하는 과정에서

핵연료를 particle 형태 그대로 모델링하지 않고, 핵연료가 완전히 균질화 되었다고 가정하기 때문에 발생할 수 있는 불확실도가 포함된 임계치이다. 또한 간략화된 모델은 그림 1에서 핵연료 밀부분의 UO_2 를 혼합핵연료로 대체한 경우이며 상세모델은 그림 1를 그대로 모델링한 경우의 임계치이다.

3. HELIOS Modeling

HELIOS는 계산에 영향을 미치는 인자중 사용자가 어느 것을 선택하고, 어떤 방법으로 structure나 system을 구성하느냐에 따라 계산 결과가 크게 달라질 수 있다. 본 연구에서는 우선 먼저 혼합핵연료에 적합한 단위격자 구조, 표면중성자향류 및 경계조건 등을 선정할 목적으로 민감도 분석을 수행하였다.

단위격자 구조에 대한 민감도 계산은 그림 2에 나타난 것처럼 UO_2 핵연료 분석에 일반적으로 사용되는 두가지(case1, case2)를 포함하여 4개 형태에 대해서 수행되었다. 격자분할에 대한 민감도 분석은 플루토늄 함량이 2w/o인 ESADA¹⁸⁾ 임계 실험에 사용된 핵연료를 사용하여 수행되었으며, V_m/V_f 변화에 따른 영향 분석은 다른 조건은 그대로 유지하고 pitch만 바꾸어 수행되었다. 표 3은 격자분할 방법에 대한 민감도 분석결과를 나타낸 것이다. 단위격자 계산외에 핵연료가 3×3 형태로 배열된 2차원 구조에 대한 계산도 수행하였으며, 동일한 표면중성자향류와 경계조건을 사용할 경우 단위격자 계산이나 2-D계산이 같은 결과를 나타냈다. 또한 단위격자나 2-D 계산에서 표면중성자향류가 0 이고 경계조건이 반사경계조건(reflective boundary condition)인 1(0) 이면 격자형태에 관계없이 동일한 결과를 얻을 수 있었다. 그러나 2-D 계산의 경우 표면중성자향류 선택값을 0으로 하면 3×3 인데도 많은 시간이 걸리므로 상용 혼합핵연료에 적용하는 것은 memory 문제로 불가능하다. 따라서 0이 아닌 표면중성자향류와 경계조건을 사용해야 되는데, 결과에서도 알 수 있듯이 Water/Fuel 비율이 클 경우에는 무한중배계수의 변화가 거의 없으나 작은 경우에는 격자형태, 표면중성자향류 및 경계조건에 따라서 600pcm 이상의 차이를 보는 것으로 나타났다. 가장 근접한 결과를 보이는 형태는 "sun mesh"라 명명된¹⁹⁾ case 4 격자형태로서 표면중성자향류 4, 경계조건으로는 White 혹은 1(0)임을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서 2-D 계산시 단위격자로는 case 4를 이용하였으며, 경계조건으로는 반사 경계조건인 1(0), 표면중성자향류는 π 의 입계각을 16개 각으로 분할하는 방법(current coupling order 4)을 채택했다. 그리고 단위격자계산에서는 반사 경계조건인 1(0)을 사용하였으며, 냉각제 영역의 반경방향을 등제적이 되도록 여러개의 소구간으로 나누어 계산을 수행하였다. 또한 증명적분법은 증명 영역을 가진 모든 핵종들을 개별적으로 고려하는 방법(RE5 9)을 사용하였다.

4. 결과 및 논의

PNL 임계실험에 대해 HELIOS 코드를 이용하여 해석한 결과는 표 4와 같다. 반응도 계산은 RES 9을 선택하고 190군을 제외한 라이브러리를 이용하여 단위격자 및 2-D 계산을 수행하였다. 단위격자 계산에서는 표 1의 total buckling 값을 사용하였으며, 2-D 계산에서는 반경방향으로 30cm의 반사체를 두고 axial buckling 값을 이용하였다. 또한 각 임계 실험 별로 HELIOS 35군으로 계산된 반경방향의 출력 분포는 그림 3부터 그림 8까지와 같다.

HELIOS 반응도계산에서 단위격자 계산의 경우 전체적으로 잘 일치하나 PNL-32와 PNL-34의 경우 1%△k 차이를 보이고 있어 이 실험에서 나온 total buckling 값에 오차가 큰 몫을 차지하는 것으로 판단된다. 그러나 2-D 계산의 경우 모든 실험에 대해서 500pcm 이내로 잘 일치하였다. 특히 계산 시간이 가장 빠른 34/35군 라이브러리의 경우 300pcm 이내에서 일치함으로써 혼합핵연료에 대한 경제적인 계산을 위하여 34/35군 라이브러리 사용이 가능함을 확인하였다. 그리고 반경방향 출력분포의 경우 PNL-33 임계실험에 대한 RMS가 3.18%로서 다소 높은 경향을 보이고 있으나 전체적으로 측정치와 잘 일치하는 것으로 나타났다.

지금까지 수행된 PNL 임계 실험에 대한 검증계산에서는 HELIOS 코드가 혼합핵연료 계산에서 활용 가능함을 확인하였다. 그러나 추가로 확보되는 임계 실험 및 수치검증 계산, 축약된 HELIOS 라이브러리 효과, 연소계산을 통한 검증계산 등이 수행되어야 하며, 더 나아가 노심분석용 코드와 연계된 노심계산이 수행되어야 할 것이다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발 사업의 일환으로 수행되었음.

참고 문헌

1. T. K. Kim, et al., "Evaluation of General 2D Geometric Transport Code, HELIOS," Proc. of the KNS Spring Mtg, Cheju, May 1996.
2. HELIOS version 1.4, TN19/41.16.15, Scandpower, July 3, 1996
3. Release Notes for HELIOS System 1.5, TN36/41.16.15, Scandpower, October 31, 1998
4. T. Yamamoto, "Critical Arrays of Mixed Plutonium-Uranium Fuel Rods with Water-to-Fuel Volume Ratios Ranging from 2.4 to 5.6," MIX-COMP-THERM-004, Internatianl Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments, OECD/NEA, Seprember 1997.
5. R. I. Smith and G.J.Konzek, "Clean Critical Experiment Benchmarks for Plutonium Recycling in LWRs," EPRI-NP-196, Vol.1, April 1976.
6. R. I. Smith and G.J.Konzek, "Clean Critical Experiment Benchmarks for Plutonium Recycling in LWRs," EPRI-NP-196, Vol.2, September 1978.3. 주형국 외, "혼합핵연료, 토륨핵연료 및 Inert Matrix 핵연료에 대한 HELIOS-1.4 검증," KAERI/TR-129/99, 1999.
7. Hyung-kook Joo, Rectangular Arrays of Water Moderated UO_2 -2.0wt.% PuO_2 Fuel Rods, MIX-COMP-THERM-002, ICSBEP Handbook, 1997.
8. R. D. Leamer et al., " PuO_2 - UO_2 Fueled Critical Experiments," WCAP-3726-1, July 1967.
9. Personal communication, Rudi Stamm'ler, April, 1999.

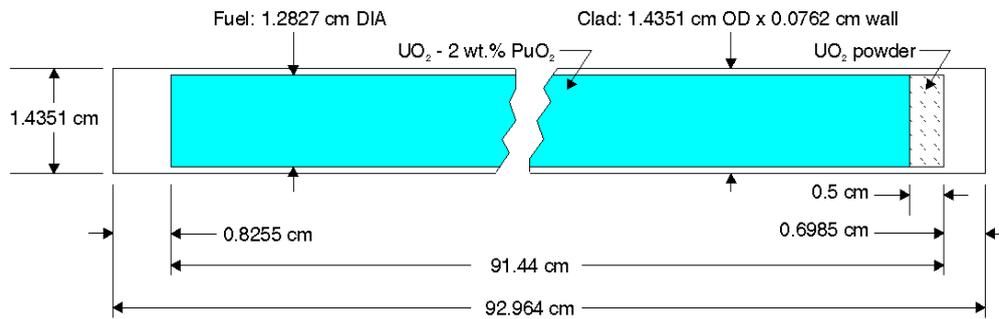


그림 1. PNL 임계실험 핵연료의 기하학적 구조

표 1. PNL 임계실험 요약

Experiments	Pitch (inch)	Critical Number of Rods	Boron Concentration (ppm)	Excess Reactivity (cents ^a)	Temperature (°C)	Buckling(m ⁻²)	
						Axial	Total
PNL-30	0.70	469	1.7 ± 0.1	+ 5.1	20.98	9.091	71.277
PNL-31	0.70	761	687.9 ± 2	+ 1.8	21.9	9.381	59.315
PNL-32	0.87	195	0.9 ± 0.2	+ 5.57	22.75	9.322	111.0
PNL-33	0.87	761	1090.4 ± 2	+ 6.5	22.66	9.487	44.877
PNL-34	0.99	161	1.6 ± 0.1	+27.81	22.15	9.842	104.238
PNL-35	0.99	689	767.2 ± 2	+ 3.8	23.4	9.480	40.822

(a) 1 cent = 3447 × 10⁻⁵ k

표 2. PNL 임계실험 벤치마크 모델 k_{eff}

Lattice Parameter	PNL-30	PNL-31	PNL-32	PNL-33	PNL-34	PNL-35
Experimental k _{eff}	1.00018	1.00006	1.00019	1.00022	1.00096	1.00013
k _{eff} of PuO ₂ particle effects for homogeneous fuel	+0.0008	+0.0008	+0.0022	+0.0022	+0.0028	+0.0028
k _{eff} of temperature effects	-0.00006	-0.00016	-0.00007	+0.00011	+0.00013	-0.00029
k _{eff} of omitting grid, replacing UO ₂ with MOX	+0.00074	+0.00259	+0.00002	+0.00160	+0.00049	+0.00023
Benchmark-Model k _{eff} , (Detailed Model)	1.0009	1.0007	1.0023	1.0025	1.0039	1.0026
Benchmark-Model k _{eff} , (Simplified Model)	1.0017	1.0033	1.0023	1.0041	1.0044	1.0029

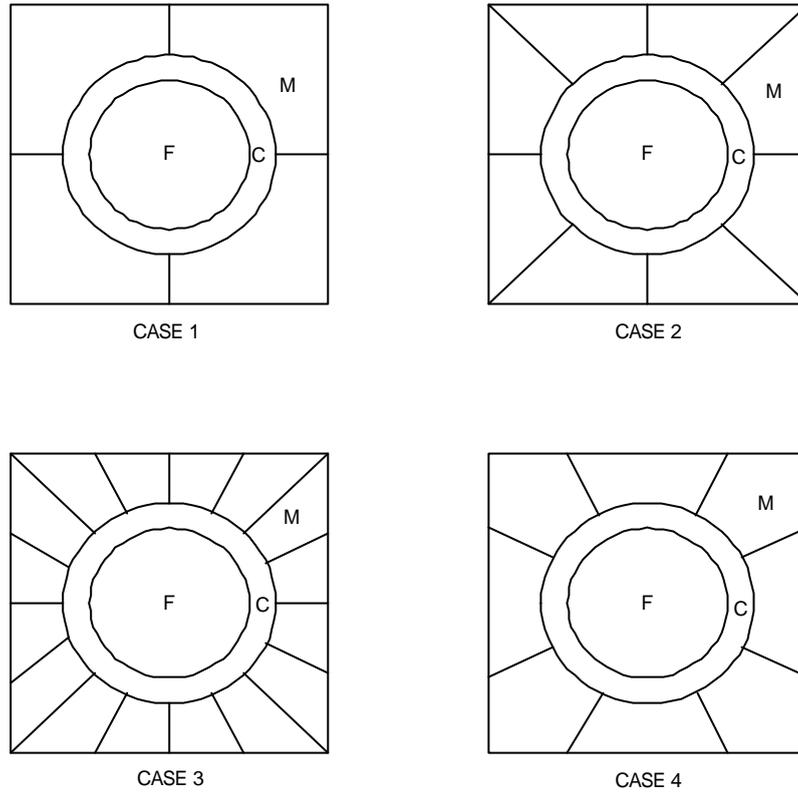


그림 2. 민감도 분석을 위한 단위격자 구조 후보

표 3. 단위격자 선정을 위한 민감도 분석결과

Type	B.C.	Pitch(V_m/V_j)											
		1.7526(1.125)				2.47855(3.5)				3.50520(8.26)			
		Case1	Case2	Case3	Case4	Case1	Case2	Case3	Case4	Case1	Case2	Case3	Case4
Unit Cell	1(0)	1.00287	1.00290	1.00279	1.00277	1.12255	1.12254	1.12216	1.12202	0.98475	0.98471	0.98446	0.98423
	2(White)	-642	-651	-544	-473	-41	-35	-27	-9	17	29	18	40
	4(White)	-564	-574	-197	-107	-51	-46	21	62	-4	8	13	71
2-D	1(0) ^a	1.00273	1.00277	1.00253	1.00252	1.12251	1.12252	1.12210	1.12195	0.98499	0.98498	0.98472	0.98437
	2(White)	-643	-653	-543	-463	-34	-31	-20	2	29	38	31	61
	4(White)	-566	-575	-186	-97	-45	-41	28	71	8	18	24	93
	4 ^b , 1(0)	-412	-417	-149	-90	-20	-21	24	49	24	26	31	70

(a) : 표면중성자항류 0, B.C. 1(0)

(b) : 표면중성자항류 4, B.C. 1(0)

(c) : B.C. 1(0)에 대한 각 case 별 무한중배계수 차이(pcm)

표 4. PNL 임계 실험 검증계산 결과

Experiment Number	Lattice Pitch (inch)	Benchmark Model k_{eff}	HELIO8(RE8 9)							
			Unit Cell				2-D			
			34g	35g	89g	90g	34g	35g	89g	90g
PNL-30	0.70	1.0017	1.00964	1.00751	1.00508	1.00437	1.00256	1.00114	0.99876	0.99664
PNL-31	0.70(688*)	1.0033	0.99981	0.99768	0.99532	0.99459	1.00346	1.00192	0.99751	0.99739
PNL-32	0.87	1.0023	0.99150	0.99049	0.98640	0.98927	1.00268	1.00194	0.99894	0.99691
PNL-33	0.87(1090)	1.0041	1.00740	1.00635	1.00341	1.00329	1.00336	1.00248	0.99704	0.99707
PNL-34	0.99	1.0044	1.01097	1.01028	1.00547	1.00535	1.00093	1.00030	0.99540	0.99534
PNL-35	0.99(767)	1.0029	1.00558	1.00489	1.00150	1.00141	1.00472	1.00409	0.99837	0.99839

* : Boron concentration(ppm)

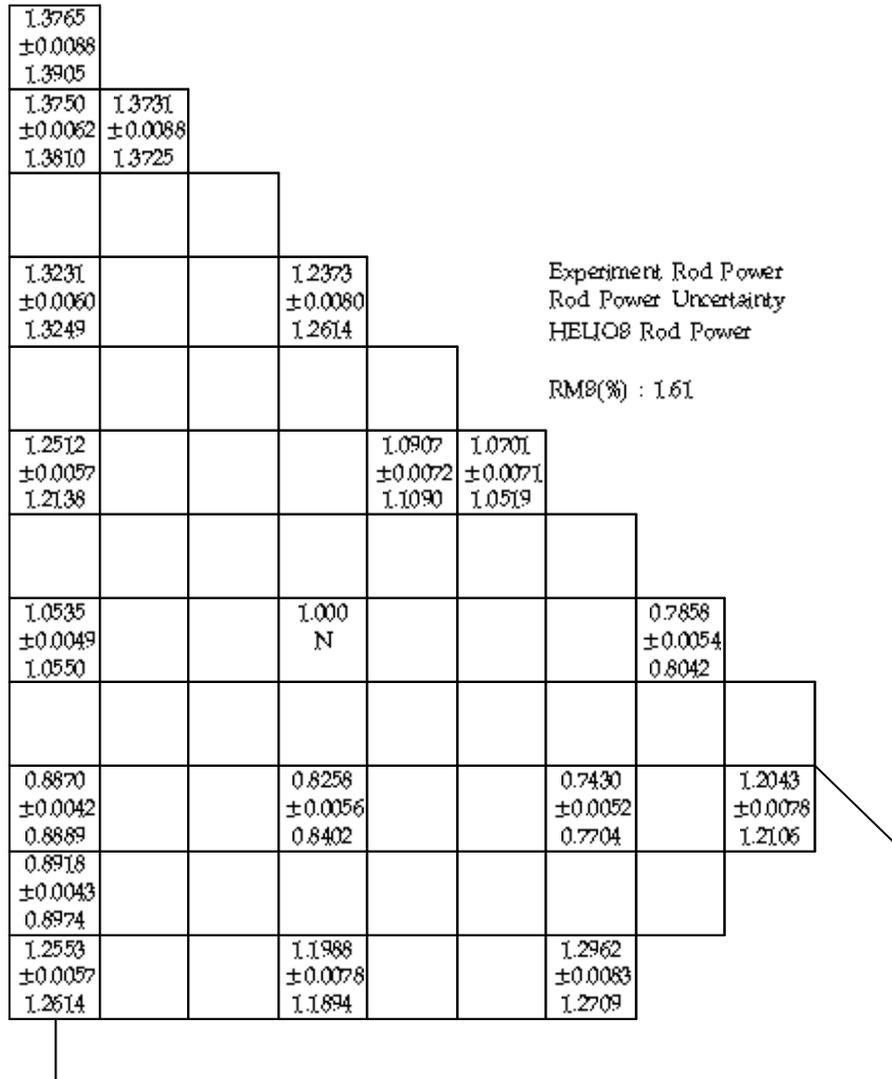


그림 3. PNL-30 임계 노심 출력분포

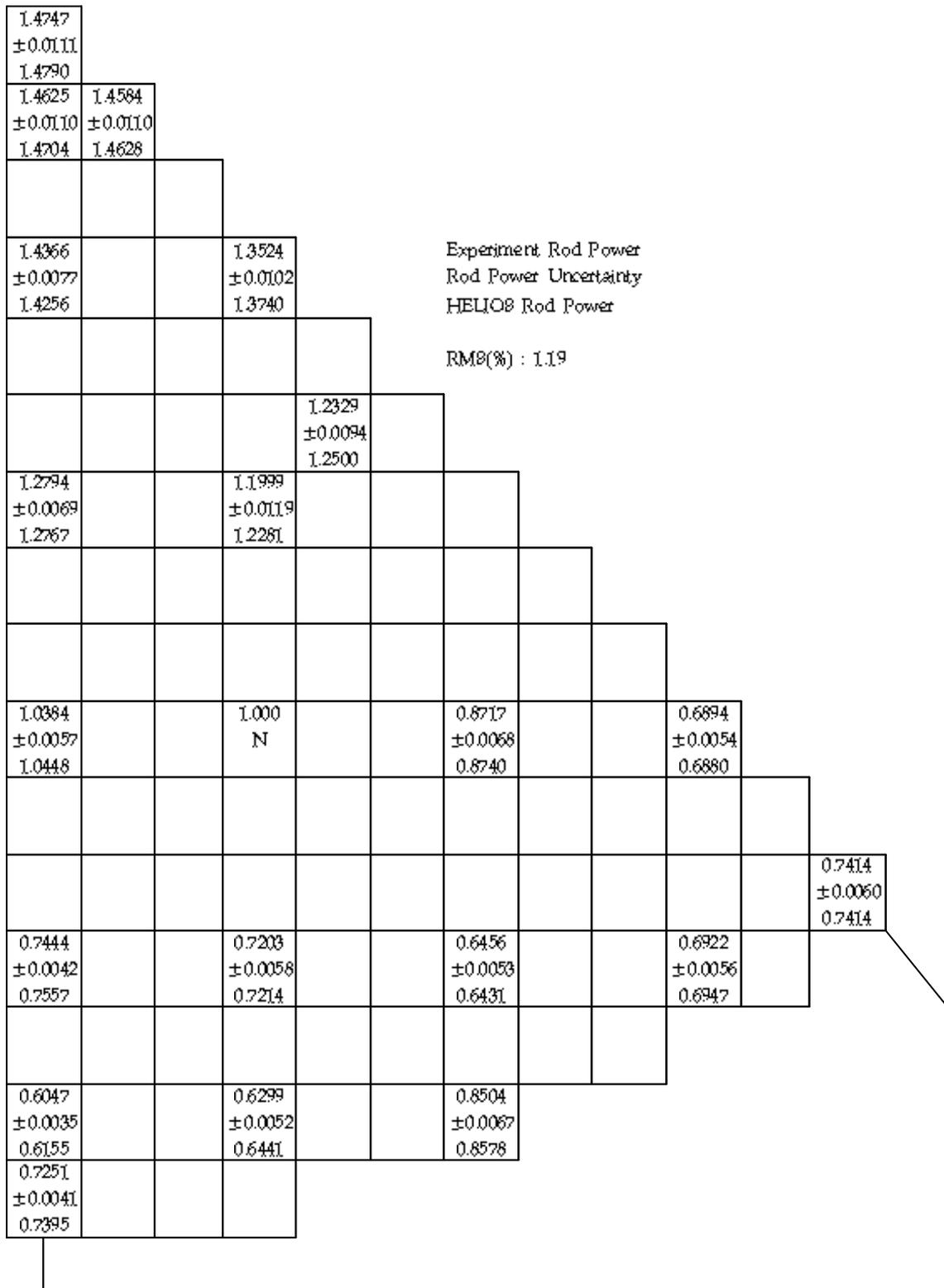


그림 4. PNL-31 임계 노심 출력분포

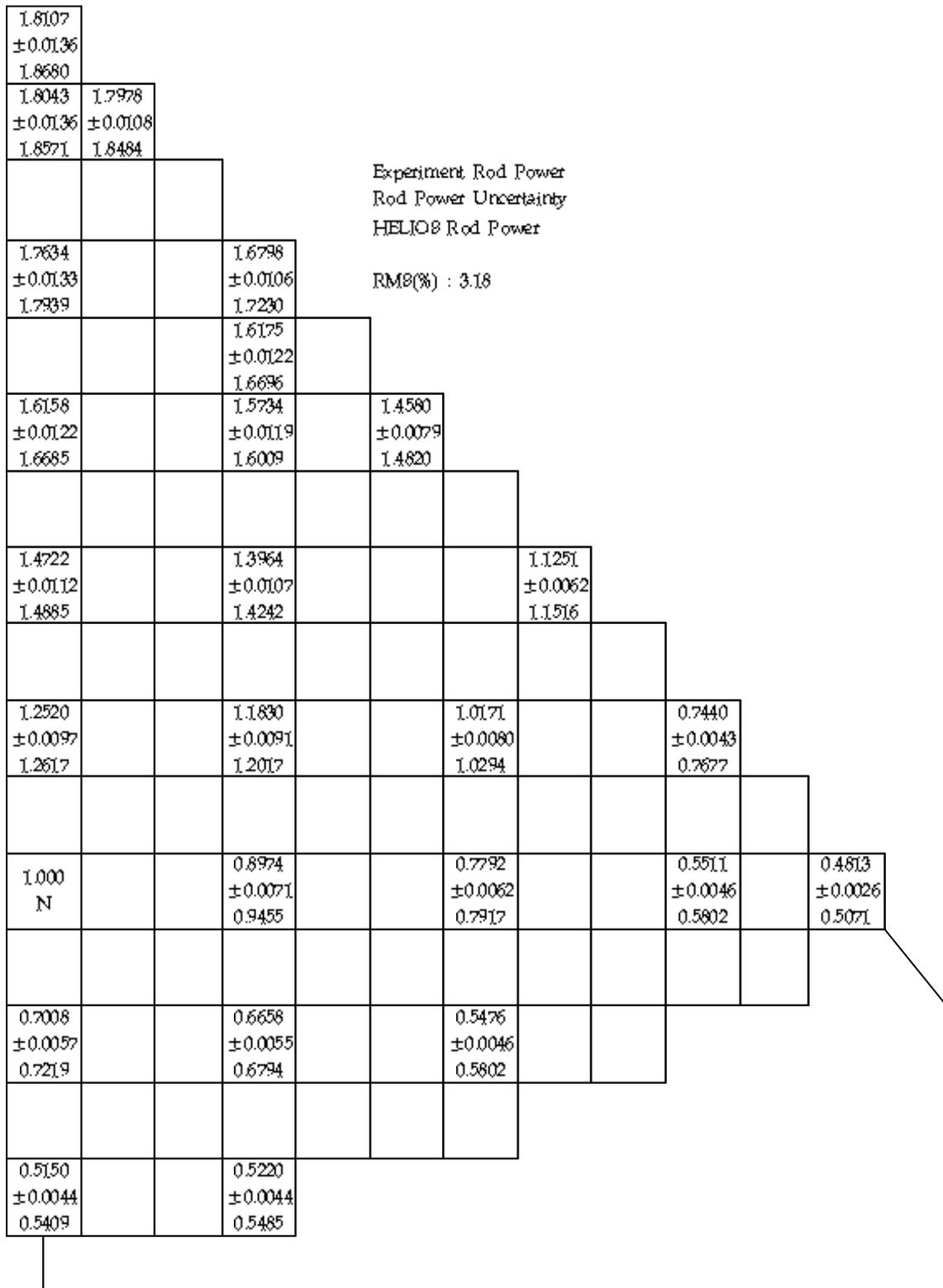


그림 5. PNL-33 임계 노심 출력분포

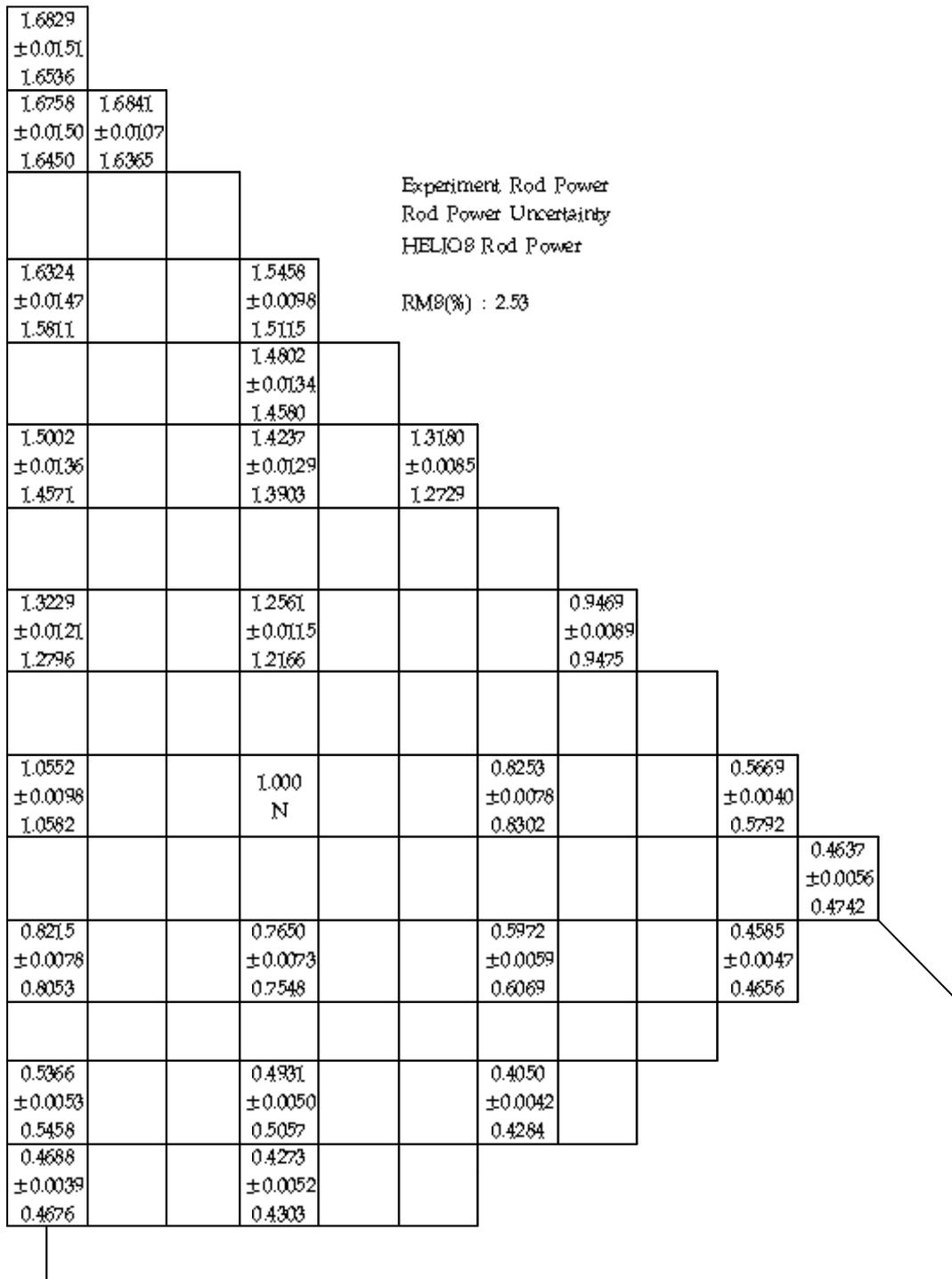


그림 8. PNL-35 임계 노심 출력분포