`99 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

DUPIC 핵연료 제조시설에 대한 핵임계도 분석

Nuclear Criticality Analysis for DUPIC Fuel Fabrication Facility

신희성, 이형석, 배강목, 노성기, 이호희, 박장진
한국원자력연구소
대전광역시 덕진동 150

요 약

DUPIC 핵연료 제조시설에서 취급할 최대 UO_2 기준 핵물질량을 520 kg으로 가정하고 정상상태에 대한 핵임계도 분석을 수행하였다. 또한 가상사고조건을 설정하여 핵물질 용기의 배열상태, 핵물질의 밀도, 수분농도, 농축도 및 취급 핵물질량 등에 대한 민감도 분석을 수행하였다.

그 결과, 정상상태에서는 미임계 조건을 충분히 만족하는 것으로 나타났다. 핵물질 용기 배열 및 수분농도에 대한 민감도 분석결과, 최적 감속상태에서 농축도가 4 wt%이하면 미임계 상태를 유지하는 것으로 나타났다. 또한 전체 핵물질을 한 덩어리로 가정 할 경우, 최적 감속상태에서의 최대핵임계도값은 농축도가 3 및 5 wt%일 때 모두 미임계 한계치 0.95를 초과하는 것으로 나타났다. 연소도 이득 적용시에도 악티나이드만 고려한 경우와 15 개 악티나이드와 21 개 핵분열생성물을 고려한 두 경우 모두 최대핵임계도값이 미임계 한계치 0.95보다 높게 나타났다.

공극의 수분농도에 대한 핵임계 및 미임계 질량 분석결과, 농축도가 3 및 5 wt%인 경우 공극의 수분농도가 각각 0.33과 0.23 g/cm^3 이하면 UO_2 핵물질 520 kg을 취급하는 DUPIC 핵연료 제조시설은 핵임계 관점에서 안전한 것으로 나타났다.

ABSTRACT

Nuclear criticality analysis for DUPIC fuel fabrication facility at the normal conditions has been carried out under the assumption that UO_2 amount to be handled in the facility is 520 kg. The sensitivity analyses at the hypothetic accidental conditions have been done for the nuclear material container array, UO_2 bulk density, water concentration, enrichment, and UO_2 amount in the facility.

The result shows that the facility at the normal condition is sufficiently maintained in the subcritical condition. It is also proved that the facility is well below the critical condition when enrichment is equal to or lower than about 4.0 wt% through the sensitivity analysis for the container array and water concentration. In the hypothetical accident condition that the all nuclear materials are clustered, the maximum k_{eff} values at 3 and 5 wt% of the enrichment are much higher than the subcritical limit of 0.95. Even though burnup credit is applied, the maximum k_{eff} values of both actinide-only and actinides (14 nuclides) plus fission products (21 nuclides) are higher than 0.95. It is revealed that 520 kg can be handled in the facility under the limited condition that water concentration in the void of UO_2 material is below 0.33 and 0.23 g/cm^3 for 3 and 5 wt% of the enrichment, respectively.

1. 서론

하나로 부속시설인 조사재시설의 M6 핫셀에 DUPIC 핵연료 제조 공정장치가 설치되어 있다. 이 DUPIC 핵연료 제조공정장치(이하 핵연료 제조시설이라함)에서 취급할 핵물질량, 핵물질의 농축도 및 허용수분농도 등을 결정하기 위한 핵임계도 분석이 필요하다. 그리고 규제기관으로부터 인.허가를 획득하려면 핵임계 안전성 분석방법의 결정에 대한

근거자료를 먼저 제시하여야 한다.

본 연구에서는 핵연료 제조공정의 설계자료[1]를 기준으로 핵물질 용기의 크기, 위치 및 핵물질량을 보수적으로 추정하여 정상상태를 가정하고 이에 대한 핵임계도 분석을 수행하였다. 또한 가상사고 조건을 설정하여 핵물질의 배열상태, 핵물질의 밀도, 수분농도, 농축도 및 취급 핵물질량 등에 대한 민감도를 분석하였다.

2. 계산모델 설정 및 핵임계도 계산방법

가. 계산모델 설정 및 가정

핵연료 제조공정 장치들의 실제 배치상태를 바탕으로 정상상태 조건을 가정하였으며, 핵물질의 밀도, 농축도, 핵물질량 및 수분량의 민감도 분석을 수행할 수 있도록 가상사고 조건을 설정하였다. 모든 핵임계도 분석에서 30 cm 물반사체를 가정하고 반사경계조건을 가정하였다

1) 정상상태 계산모델

핵연료 제조시설 내에는 핵물질을 포함한 15가지 공정 장치들이 Fig. 1과 같이 배열되어 있으며, 주요한 장치들의 형태는 Fig. 2-5에 제시한 바와 같다. 핵물질 용기를 부피가 동일한 원통형이나 직육면체로 단순화하였고 보수적인 관점에서 각 용기 내에는 핵물질이 가득 들어 있다고 가정하였다. 핵물질 용기의 형태와 크기를 Table 1에 제시하였다.

보수적인 관점에서 분말, 압분체 및 소결체의 밀도를 각각 3.2, 5.2 및 10.6 g/cm^{3}로 가정하여 밀도(bulk density)를 결정하였다. 압분체 보관/수송 선반(rack)의 경우에는 압분체가 가장 조밀하게 쌓이는 경우를 가정하여 압분체 용기의 밀도를 4.32 g/cm^{3}로 결정하였다. 나머지 용기의 경우에는 용기의 크기와 용량의 설계치를 기준으로 밀도를 결정하였다. 핵물질의 밀도 및 질량을 Table 1에 제시하였다. 제조된 핵연료를 제조시설 내에 약 200 kg 저장하는 것으로 가정하였으며, 총 핵물질량을 520 kg으로 가정하였다.

2) 가상사고시의 계산모델

가상사고의 하나로서 용기가 시설내에서 이동하고 동시에 용기사이의 수분농도가 최적 감속상태에 도달한다는 것을 가정하였다. 간격의 변화에 따른 계산을 용이하게 하도록 용기의 직경을 10 cm인 원기둥형태로 통일하였다. Fig. 6과 같이 정사각형 형태를 갖고 중심에 밀도가 높은 용기를 배치하고 중심에서 멀어질수록 낮는 밀도의 핵물질을 배치하는 경우에 대해 분석하였다. 두번째 가상사고 모델로 전체 핵물질(520 kg)이 한군데로 모여 구형을 이룬 상태에서 핵물질의 밀도와 공극에 존재하는 수분량이 변하는 것을 가정하였다.

3) 핵임계 및 미임계 질량 결정 모델

두번째 가상사고 모델에서 핵물질량과 핵물질 공극의 수분농도를 변화시키면서 핵임계 상태와 미임계 상태(k_{eff}=0.95)에서 핵물질량을 결정하였다. 여기서는 잠정적으로 핵연료의 저장기준인 k_{eff}=0.95를 핵연료 제조시설에서의 핵물질 취급양 결정에 적용하였다.

나. 핵임계 안정성 평가방법

1) 최대핵임계도값 결정방법

최대핵임계도값은 핵임계도 계산값, 계산오차, 전산코드의 계산편차 및 입력자료의 불확정도에 의해 다음과 같은 식으로 결정된다.

$$k_{eff(max)} = k_{cal} + \Delta k_b + \Delta k_u \quad (1)$$

k_{cal}은 계산오차를 고려해서 95 % 신뢰범위에서 결정한 계산값이고, k_b는 검증계산을 통하여 결정한 계산코드의 계산편차다. k_u는 입력자료의 오차에 의한 불확정도를 나타내는데, 본연구에서는 그것을 영으로 가정하였다.

2) 핵임계 안전 평가기준

핵연료 제조시설 내에는 분말, 소결체 및 핵연료 집합체 등 다양한 형태의 핵물질이 존재하고, 핵연료 제조공정 장치를 핫셀 내에 설치하기 때문에 다른 핵물질과 완전히 격리되어 있다고 볼 수 있다. 이를 소규모의 핵연료 제조 혹은 저장 시설로 간주하여 NUREG-0800[2]에서 제시한 기준을 적용할 수도 있고, 소외의 핵물질 취급시설로 간주하여 ANSI8.1.83[3]에서 제안하고 있는 기준을 따른다고 볼 수도 있다. 그러나 본 연구에서는 공정장치를 독립적으로 분석하지 않고, 시설내 전체를 하나의 핵물질계로 간주하여 분석하였기 때문에 ANSI8.1.83에서 제시하는 질량에 대한 안전인자를 적용하지 않아도 된다고 판단된다. 참고문헌[2]에서 정상상태에서의 미임계한계치를 0.95로 규정하고 있고, 가상사고시에는 0.98로 규정하고 있다. 본 연구에서는 보수적인 관점에서 정상상태와 가상사고시 모두에 미임계한계치, 0.95를 적용하였다. 즉 핵임계 안전조건을 다음 식과 같이 표현한다.

$$K_{max} \le 0.95 \qquad (2)$$

4. MCNP4B 코드의 검증계산

핵임계도 분석에 사용할 MCNP4B코드[4]의 검증계산을 수행하였다. 핵연료 제조공정에서는 UO_2 분말, 압분체, 소결체 및 집합체 형태 등의 다양한 형태의 핵물질이 존재하지만 핵연료집합체가 40 % 정도를 차지하기 때문에 저농축도 UO_2 핵연료 집합체의 핵임계 실험자료를 기준으로 MCNP4B의 검증계산을 수행하였다[5]. Table 2에 실험자료의 특성을 제시하였다. 농축도는 2.35에서 5.0 wt%의 범위에 있고, 가돌리늄이 포함되어 있으며, 40 가지는 사각형이며 10 가지는 육각형 형태다.

핵임계도의 실험값과 MCNP4B의 계산값을 비교하여 계산오차와 그에 따른 표준편차를 결정하여 Table 2에 제시하였다. Table 2의 평균계산오차와 표준편차는 각 계산값의 표준편차로 가중하여 결정하였다. 표준편차에 허용한계인자(tolerance limit factor) (2.065)[6,7]를 곱하여 95 % 신뢰도와 95 % 확률을 갖는 불확정도를 결정하고, 이를 평균계산오차에 더해서 MCNP4B 코드의 계산편차를 0.02487로 결정하였다[8].

5. 핵임계도 분석

가. 정상상태의 핵임계도 분석

Table 1에 제시한 핵물질 용기들이 Fig. 1과 같이 배치된 정상상태에 대한 핵임계도 분석을 수행하였다. 이때 용기사이의 공기중 수분농도를 변화시켜 수분에 의한 감속재의 영향을 고려하였으며, 계산결과는 Fig. 7과 같다. 최적 감속상태는 공기중 수분농도가 1 g/cm^3 인 경우에 나타났으며, 예상한 바와 같이 핵임계도값이 매우 낮은 값을 보여 정상상태에서 핵연료 제조시설은 핵임계 안전성이 충분히 확보됨 알 수 있다.

나. 용기 간격에 따른 민감도 분석

Fig. 6에 제시한 모델에 대해 용기의 간격과 공기중 수분농도를 변화시키면서 핵임계도 분석을 수행하였다. 농축도가 5 wt%인 경우에 식(1)에 의해 결정한 최대핵임계도값을 Fig. 8에 제시하였다. Fig. 8에서 볼 수 있듯이 수분농도가 증가할수록 핵임계도 값은 증가하고, 간격이 2 cm 근방에서는 미임계한계치 0.95를 넘는 경우가 생긴다. 그러나 공기중 수분농도가 0.6 g/cm^3 이하일때 계산의 불확정도와 전산코드의 계산편차를 고려하더라도 미임계한계치 0.95 이하를 유지하는 것을 알 수 있다. 공기중 포화수증기의 수분농도가 0.001327 g/cm^3인 것을 감안하면 수분농도 0.6 g/cm^3는 매우 높은 것으로 침수가 되지 않은 조건하에서는 충분히 안전성을 확보할 수 있다고 볼 수 있다. 또한 연소도를 고려한다면 침수될 경우에도 핵임계 안전성을 확보할 수 있을 것이다.

농축도의 변화에 따라 동일한 방법으로 핵임계도 분석을 수행하였으며, 그 결과는 Fig. 9와 같다. 농축도가 4.0 wt% 이하에서는 최대 핵임계도 값이 미임계 한계치 0.95를 넘지 않음을 알 수 있다. 따라서 농축도가 4.0 wt% 이하면 침수 및 용기 배열의 변화에 관계없이 미임계상태를 유지할 수 있음을 알 수 있다.

다. 전체 핵물질이 합해진 경우의 핵임계도 분석

1) 3.0 및 5.0 wt% 농축도인 경우

농축도가 3 및 5 wt%인 경우에 UO_2의 밀도와 수분량을 변화시키면서 핵임계도 계산을 수행하여, 최대핵임계도값을 각각 Fig. 10과 11에 제시하였다. Fig. 10에서 볼 수 있듯이 핵물질의 밀도가 낮은 경우에는 공극율이 높기 때문에 더 높은 핵임계도 값을 나타냈다. UO_2의 밀도가 2 g/cm^3 근방에서 핵임계도는 최대값을 보였고, 미임계한계치보다 훨씬 높은 1.30 정도로 나타났다. Fig. 11에 볼 수 있는 것처럼 농축도가 3.0 wt%인 경우에도 비슷한 경향을 보였으며, 최대 핵임계도 값은 1.18 정도로 나타났다.

2) 연소도 고려 핵임계도 분석

연소한 핵연료 속에 들어있는 핵종량을 고려하여 핵임계도 분석을 수행하였다. 초기농축도로 3.5 wt%인 영광 1&2호기의 KOFA 핵연료를 37240 MWd/tU으로 연소시킨후 3 년 동안 냉각한 사용후핵연료로 DUPIC 핵연료를 제조한다고 가정하였다. 핵종량을 SCALE4.4 SAS2H 모듈의 전산코드로 계산하였고, 계산한 핵종량에 보정인자를 곱하여 95 % 신뢰도 및 95 % 확률을 갖는 보수적인 핵종량을 결정하여 사용하였다. 보정인자값이 없는 핵종의 핵종량인 경우 영으로 가정하였다[9].

우라늄, 플루토늄 및 ^{241}Am 등의 악티나이드만 고려한 경우와 14 개 악티나이드 핵종 및 21 핵분열생성물 핵종을 고려한 경우에 대해 각각 핵임계도 분석을 수행하였다. 앞에서와 같이 핵물질의 밀도와 수분비율을 변화시키면서 핵임계도 값을 계산하였으며, 그 결과를 각각 Fig. 12와 13에 제시하였다. 예상과는 달리 두 경우 모두 미임계 한계치 0.95를 초과하는 경우가 발생하였다. 따라서 연소도를 고려하여도 최적 감속상태에서는 미임계상태를 유지할 수 없음을 알 수 있다. 악티나이드만 고려한 경우와 모두 고려한 경우의 핵임계도값 차이가 크지 않는 이유는 핵임계도에 미치는 영향이 큰 ^{149}Sm 및 ^{103}Rh등을 핵임계도 계산에 고려하지 않았기 때문이라 볼 수 있다.

3) UO_2 밀도의 영향 분석

Fig. 14에는 농축도 3.0 및 5.0 wt%에 대하여 연소도를 고려한 두 가지 경우의 핵임계 계산결과를 UO_2의 밀도 변화로 나타냈다. 각각의 경우 최고점이 서로 다르지만 대체로 2 ~ 3 g/cm^3 근방에서 나타나는 것을 알 수 있다.

라. 핵물질량에 따른 핵임계도의 민감도 분석

핵물질 공극의 수분농도가 포화수증기인 0.001327 g/cm^{3}인 경우와 그의 100 배인 0.01327 g/cm^{3}인 경우에 대해서 핵물질의 밀도와 핵물질량을 변화시키면서 핵임계도 분석을 수행하였다. 최대핵임계도값을 각각 Fig. 15와 16에 제시하였다. Fig. 15에서 볼 수 있듯이 포화수증기인 경우에는 모든 경우에 미임계한계치를 만족하는 것으로 나타났다. 수분농도가 0.01327 g/cm^{3}인 경우에는 Fig. 16에서 볼 수 있듯이 UO_2기준 핵물질량이 약 3,600 kg 이상일 때 미임계한계치를 초과는 경우가 발생하는 것으로 나타났다.

Fig. 17에는 공극의 수분농도에 따라 결정한 핵임계 및 미임계(k_{eff}=0.95) 질량을 제시하였다. Fig. 17에서 공극에 물이 가득 찬 경우, 핵임계 질량은 약 36 kg으로 나타났다. 이는 참고문헌[9]에 제시된 32 kg과 비슷하며, 정밀한 계산을 수행하면 동일한 값을 얻을 수 있을 것이다. 농축도가 3 및 5 wt%인 경우 공극의 수분농도가 각각 0.33 및 0.23 g/cm^3 이하면 UO_2 핵물질 520 kg을 취급하는 DUPIC 핵연료 제조시설은 핵임계 안전성이 보장되는 것으로 나타났다.

6. 결론

DUPIC 핵연료 제조시설에서 취급하는 핵물질의 양을 520 kg으로 가정하고 핵임계도에 미치는 영향이 큰 핵물질의 밀도, 수분농도, 농축도 및 용기의 배열상태에 대한 핵임계도 분석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 정상상태에서는 충분히 핵임계 안전성 확보가 가능하다.
- 핵물질이 용기 밖으로 누출되지 않는 조건 하에서 최적 감속조건을 가정하여도 농축도가 4.0 wt% 이하면 핵임계 안전성 확보가 가능하다. 또한 연소도 이득을 적용하면 농축도가 5 wt%인 경우에도 안전성 확보가 가능하다.
- UO_2 핵물질이 한 덩어리로 뭉쳐져 있다고 가정했을 때 농축도가 3 및 5 wt%인 경우, 공극의 수분농도가 각각 0.33 및 0.23 g/cm^3 이하면 UO_2 핵물질 520 kg을 취급하는 DUPIC 핵연료 제조시설은 핵임계에 관한한 안전하다.

본연구는 과학기술부 원자력연구개발사업의 일환으로 DUPIC핵연료시설기술개발과제에서 수행한 것임.

참 고 문 헌

[1] 양명승외, "Development of Manufacturing Equipment and QC Equipment for DUPIC Fuel, ", KAERI/TR-1319/99, KAERI (1999).
[2] U.S. NRC, "Standard Review Plan," NUREG-0800 (1981).
[3] U.S. NRC, "Nuclear Criticality Safety in Operations with Fissionable Materials Outside Reactors, "ANSI-8.1.1993 (1983).
[4] Judith F. Briesmeister, "MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code Version 4B," LA-12625, LANL (1997).
[5] OECD/NEA, "International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments : Highly Enriched Uranium System, NEA/NSC/DOC(95)03/III(1995).
[6] R.E. Walpole and R.H. Myers, Probability and Statistics for Engineers and Scientists, 5th, Prentice Hall, New York (1993).
[7] Robert E. Odeh and D. B. Owen, Table for Normal Tolerance Limits, Sampling Plans, and Screening, Marcel Dekker, Inc., New York (1980).
[8] S. G. Ro, "Nuclear Criticality Safety Guide," KAERI/TR-861/97, KAERI (1997).
[9] H. S. Shin, "Determination of Correction Factor for Prediction of Spent Fuel Composition," Proceedings of the Korea Nuclear Society Sprint Meeting (1999).
[10] S. G. Ro, "Development of Advanced Spent Fuel Management Process : Criticality Safety Analysis of Integrated Mockup and Metallized Spent Fuel Storage," KAERI/TR-1250/99, KAERI (1999).

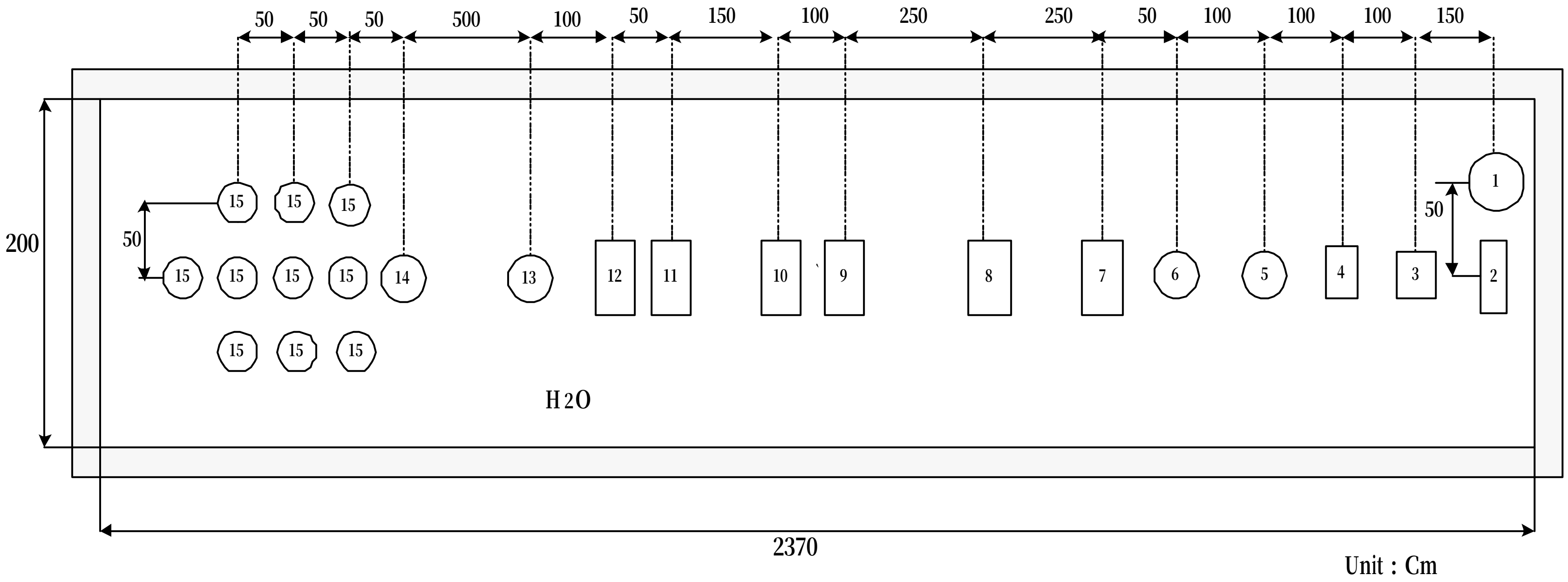
Table 1. Design Specification of DUPIC Fuel Fabrication Device

Device	Material			Geometrical model	
	Status	Density	Mass (kg)	Type	Dimension (cm)
1. Rod-cut storage	Pellet	5.2	40	Cylinder	20(Dia.), 25(H)
2. Slitting machine	Pellet fragment	5.2	34	Cubic	12.5(W)×24.5(L)×21.3(H)
3. OREOX furnace	Powder	3.2	32	Cubic	17.76(W)×28.76(L)× 19.5(H)
4. Mill	Powder	3.2	3	Cubic	9(W)×9(L)×12(H)
5. Roll compact	Powder	4	40	Cylinder	20(Dia.), 31.4(H)
6. Mixer	Powder	4	40	Cylinder	20(Dia.), 31.4(H)
7. Compaction press	Green pellet	4.32*	11	Cubic	9.5(W)×20.2(L)×13.5(H)
8. Sintering furnace	Pellet	7.63**	19.8	Cubic	9.5(W)×20.2(L)×13.5(H)
9. Centerless grinder	Pellet	7.63	19.8	Cubic	9.5(W)×20.2(L)×13.5(H)
10. Pellet cleaner /dryer	Pellet	7.63	19.8	Cubic	9.5(W)×20.2(L)×13.5(H)
11. Pellet stack adjuster	Pellet	7.63	19.8	Cubic	9.5(W)×20.2(L)×13.5(H)
12. Pellet loading machine	Pellet	7.63	19.8	Cubic	9.5(W)×20.2(L)×13.5(H)
13. End cap welder	Pellet	10.6	0.82	Cylinder	1.4(Dia.), 50(H)
14. End plate welder	Pellet	5.2	20	Cylinder	10(Dia.), 50(H)
15. Dupic bundle storage	Bundle	5.2	200	Cylinder	10(Dia.), 50(H) Cylinder : 10
Total			520		

* Bulk Density = 0.72 x 6.0 g/cm^3 (Green Pellet).
** Bulk Density = 0.72 x 10.6 g/cm^3 (Sintered Pellet).

Table 2. Benchmark Calculation Results for NEA Criticality Safety Experiments

No	U(%) (Gadolinium Concentration)	Fuel Type	Cluster Dimension / Pitch (cm) / Fuel Length (cm)	Experiment	Calculation		Δk	$s_{\Delta k}$
				$k_{eff} \pm s$	k_{eff}	s		
1	2.35	S	17 x 36 / 1.684 / 91.44	1.0000 ± 0.0039	0.98237	0.00183	-0.01763	0.00431
2	(1.04 ± 3.6	Q	21 x 25		0.98656	0.00173	-0.01344	0.00427
3	g/cm^3)	U	23 x 23		0.98980	0.00220	-0.01020	0.00448
4		A	24 x 22		0.98848	0.00177	-0.01152	0.00428
5		R	34 x 18		0.98653	0.00202	-0.01347	0.00439
6		E	23 x 22		0.98355	0.00195	-0.01645	0.00436
7			23 x 24		0.98602	0.00212	-0.01398	0.00444
8			23 x 23		0.98955	0.00173	-0.01045	0.00427
9			17 x 17, 17 x 1		0.98131	0.00179	-0.01869	0.00429
10			17 x 17		0.98344	0.00196	-0.01656	0.00436
11			17 x 17, 17 x 4		0.98471	0.00198	-0.01529	0.00437
12			17 x 17, 17 x 15		0.98309	0.00175	-0.01691	0.00427
13			17 x 17, 17 x 1		0.98383	0.00183	-0.01617	0.00431
14			7 x 17, 17 x 2		0.98190	0.00184	-0.01810	0.00431
15			17 x 17, 17 x 4		0.98277	0.00200	-0.01723	0.00438
16			17 x 17, 17 x 9		0.98267	0.00183	-0.01733	0.00431
17			17 x 17, 17 x 12		0.98207	0.00208	-0.01793	0.00442
18			17 x 17, 17 x 15		0.98439	0.00161	-0.01561	0.00422
19			17 x 17, 25 x 20		0.98391	0.00199	-0.01609	0.00438
20			17 x 20, 25 x 18		0.98203	0.00187	-0.01797	0.00433
21	4.31	S	12 x 18 / 1.892 / 92.71	0.9998 ± 0.0033	0.99298	0.00183	-0.00682	0.00377
22	(1.04 ± 3.6	Q	14 x 15		0.99050	0.00173	-0.00930	0.00373
23	g/cm^3)	U	16 x 13		0.98942	0.00220	-0.01038	0.00397
24		A	17 x 12		0.99113	0.00177	-0.00867	0.00374
25		R	14 x 13		0.98826	0.00202	-0.01154	0.00387
26		E	14 x 16		0.98380	0.00195	-0.01600	0.00383
27			14 x 14		0.99078	0.00212	-0.00902	0.00392
28	4.31	S	9 x 12 / 1.892 / 92.71	0.9998 ± 0.0035	0.98467	0.00173	-0.01513	0.00390
29	(1.04 ± 3.6	Q	12 x 16		0.98438	0.00179	-0.01542	0.00393
30	g/cm^3)	U	12 x 16		0.99978	0.00196	-0.00002	0.00401
31		A	9 x 12, 9 x 2		0.98147	0.00198	-0.01833	0.00402
32		R	9 x 12, 9 x 12		0.98161	0.00175	-0.01819	0.00391
33		E	9 x 12, 9 x 1		0.98675	0.00183	-0.01305	0.00395
34			9 x 12, 9 x 1		0.98820	0.00184	-0.01160	0.00395
35			9 x 12, 9 x 2		0.98552	0.00200	-0.01428	0.00403
36			9 x 12, 9 x 4		0.98702	0.00183	-0.01278	0.00395
37			9 x 12, 9 x 8		0.98219	0.00208	-0.01761	0.00407
38			9 x 12, 9 x 10		0.98613	0.00161	-0.01367	0.00385
39			9 x 12		0.98715	0.00199	-0.01265	0.00403
40			9 x 10, 9 x 9		0.97945	0.00187	-0.02035	0.00397
			(No. of Rods)					
41	5.0	H	3939 / 0.7 / 59.7	1.0000 ± 0.0063	1.01258	0.00110	0.01258	0.00640
42		E	2124 / 0.8 / 59.7	1.0000 ± 0.0058	1.00628	0.00113	0.00628	0.00591
43		X	1319 / 1.4 / 59.7	1.0000 ± 0.0061	1.00664	0.00086	0.00664	0.00616
44		A	3267 / 1.3 / 59.7	1.0000 ± 0.0020	0.99319	0.00109	-0.00681	0.00228
45		G	1305		0.99848	0.00114	-0.00152	0.00230
46		O	1051		0.99883	0.00110	-0.00117	0.00228
47		N	952		0.99812	0.00116	-0.00188	0.00231
48			842		0.99660	0.00113	-0.00340	0.00230
49			785		1.00670	0.00098	0.00670	0.00223
50			654		0.99766	0.00104	-0.00234	0.00225
$\overline{\Delta k} \pm \bar{s}_{\Delta k}$						-0.00905 ± 0.00766		
Cal. Bias						0.02487		



1. Rod-Cut Storage (Pellet)
2. Slitting Machine (Pellet+Powder)
3. OREOX Furnace (Powder)
4. Mill (Powder)
5. Roll Compactor (Granular Powder)
6. Mixer (Granular Powder)
6. Compaction Press (Green Pellet)
8. Sintering Furnace (Pellet).
9. Centerless Grinder (Pellet)
10. Pellet Cleaner/Dryer (Pellet)
11. Pellet Stack Adjuster (Pellet)
12. Pellet Loading Machine (Pellet)
13. End Cap Welder (Pellet)
14. End Plate Welder (Pellet)
15. Bundle Storage(Pellet)

Fig. 1. Geometrical Model for DUPIC Fuel Fabrication Facility.

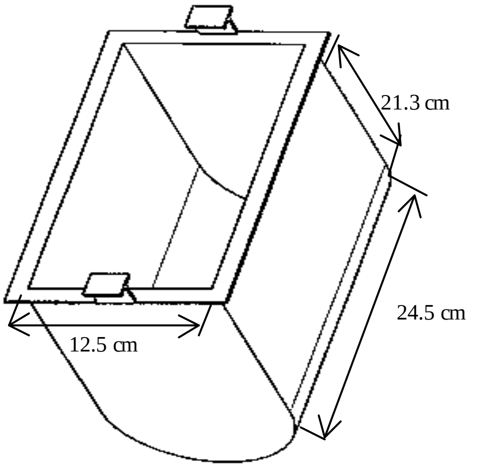


Fig 2. Pellet Containment in Slitting Machine.

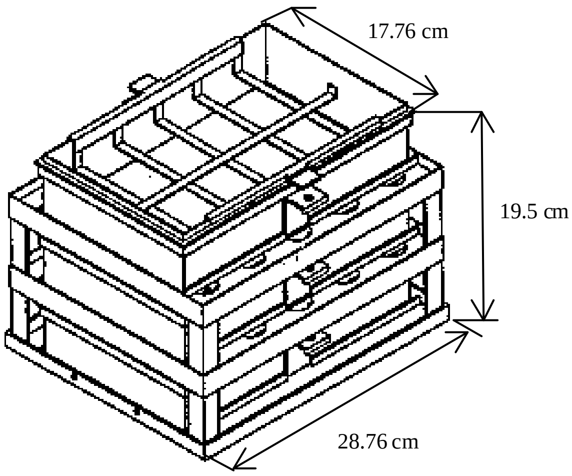
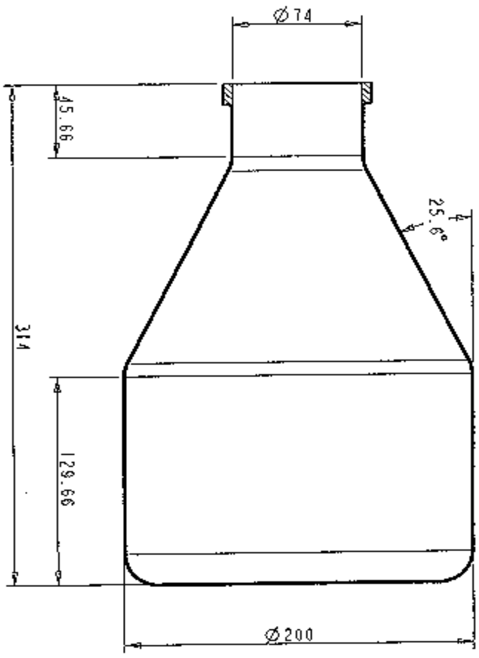


Fig.3. OREOX Furnace.



Unit: mm

Fig. 4. Roll Compactor and Mixer Machines.

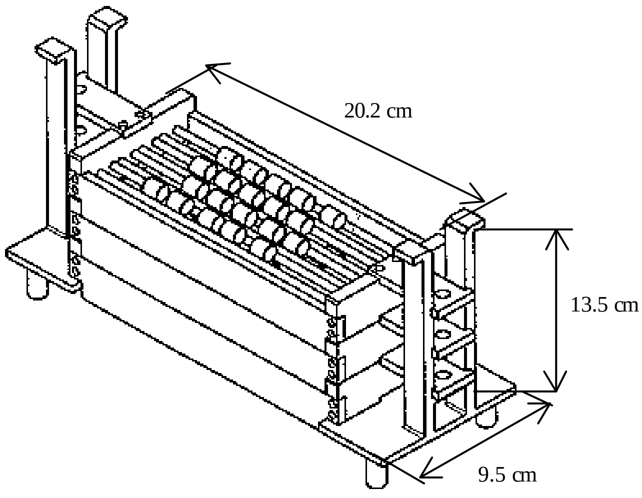
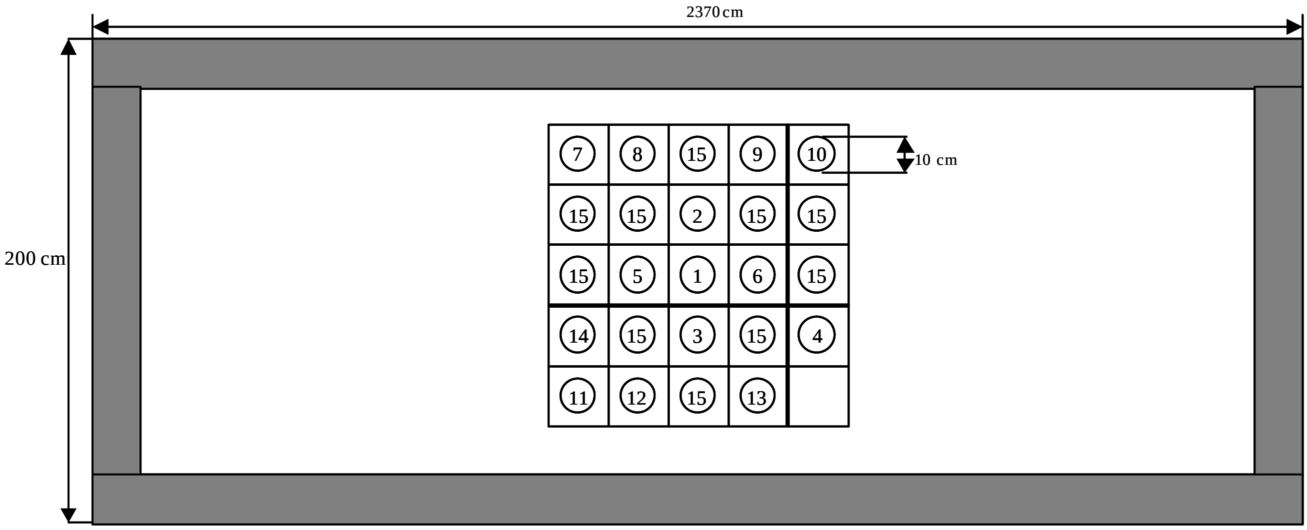


Fig. 5. Sintered Pellet Rack.



1. Rod-Cut Storage (Pellet)
2. Slitting Machine (Pellet Fragment)
3. OREOX Furnace (Powder)
4. Mill (Powder)
5. Roll Compactor (Granular Powder)
6. Mixer (Granular Powder)
7. Compaction Press (Green Pellet)
8. Sintering Furnace (Pellet)
9. Centerless Grinder (Pellet)
10. Pellet Cleaner/Dryer (Pellet)
11. Pellet Stack Adjuster (Pellet)
12. Pellet Loading Machine (Pellet)
13. End Cap Welder (Pellet)
14. End Plate Welder (Pellet)
15. Dupic Bundle Storage (Pellet)

Fig 6. Fuel Fabrication Device Array at the Accidental Condition.

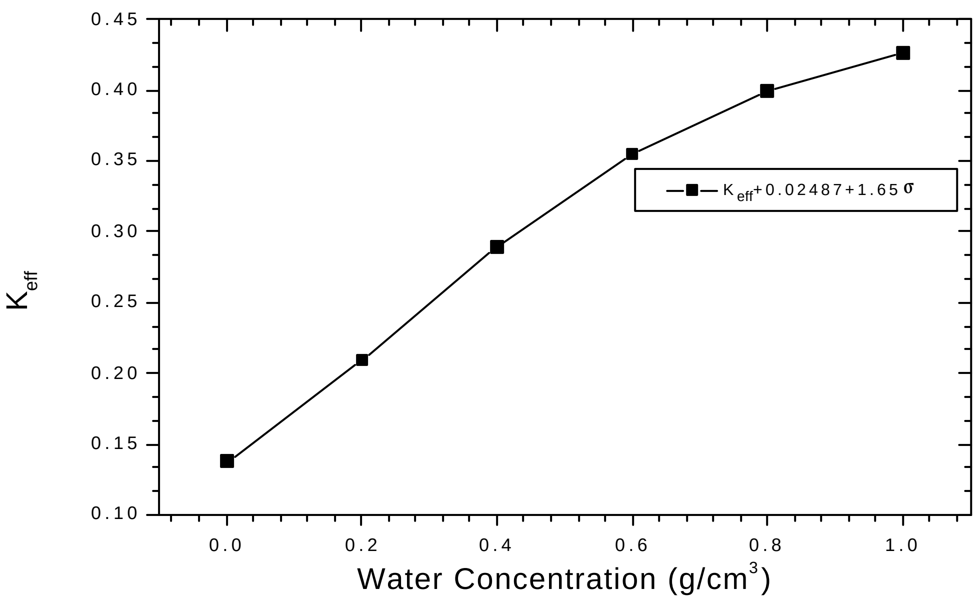


Fig. 7. K_{eff} as a Function of Water Concentration at the Normal Condition.

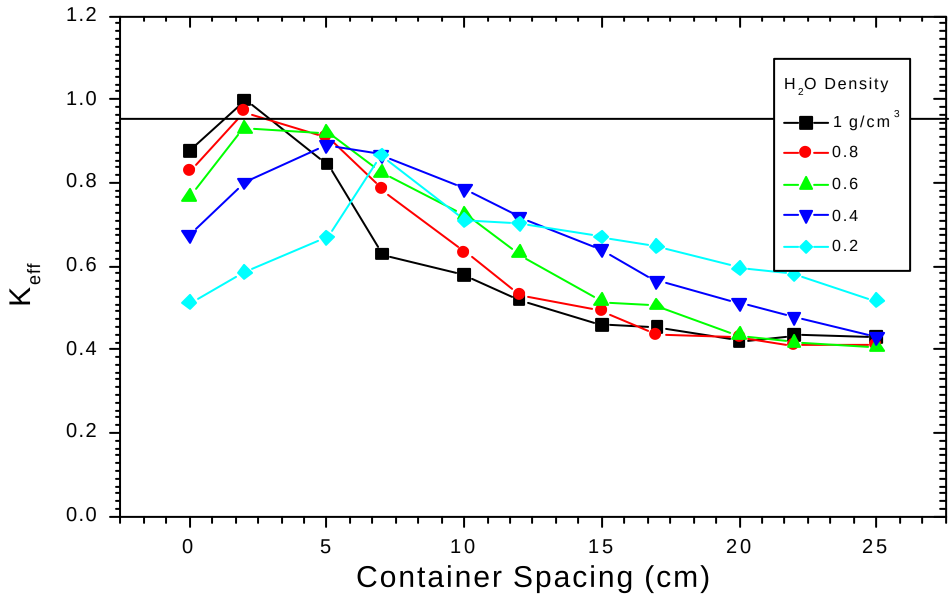


Fig. 8. K_{eff} as a Function of Container Spacing at the Accidental Condition.

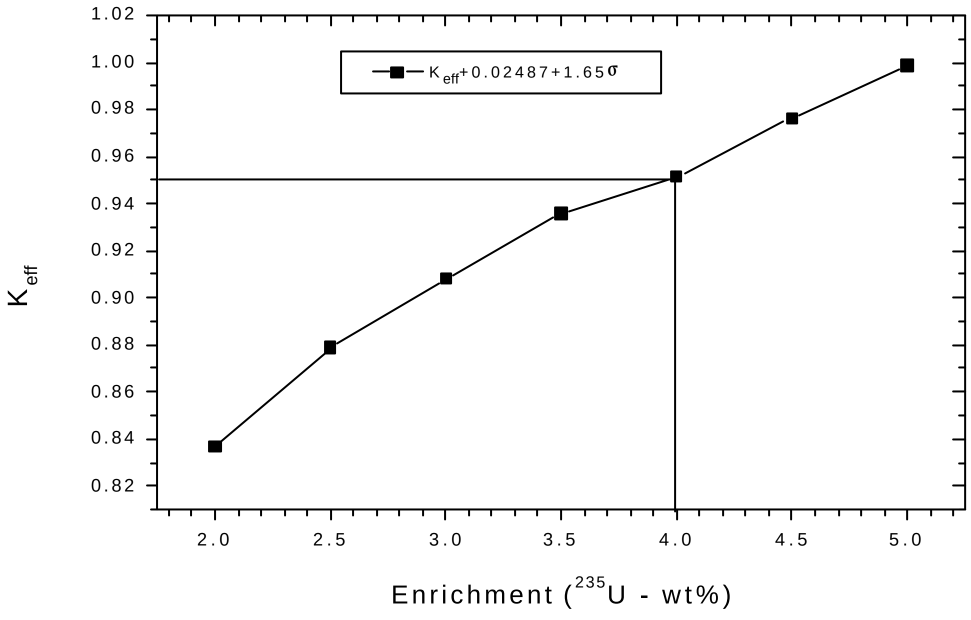


Fig. 9. K_{eff} as a Function of Enrichment at the Accidental Condition.

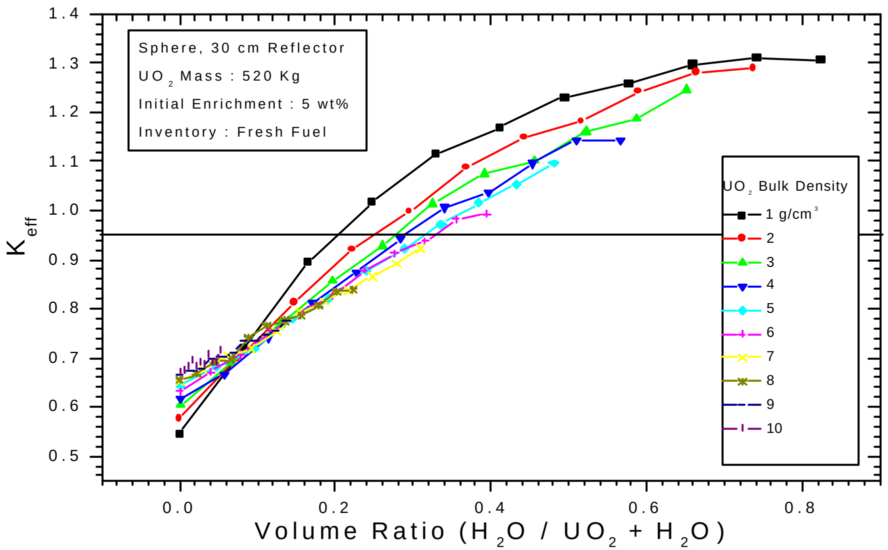


Fig. 10. K_{eff} as a Funtion of Volume Ratio at 5 wt% Enrichment.

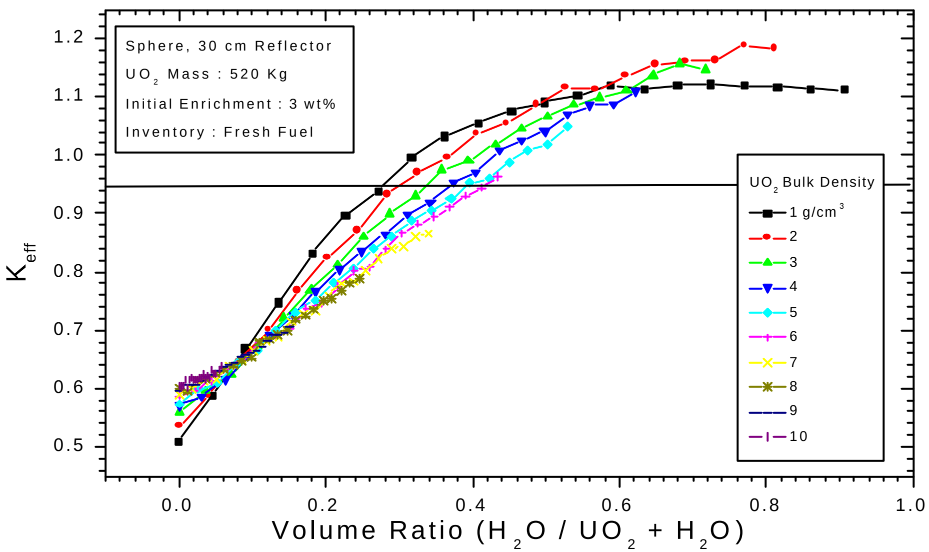


Fig. 11. K_{eff} as a Funtion of Volume Ratio at 3 wt% Enrichment.

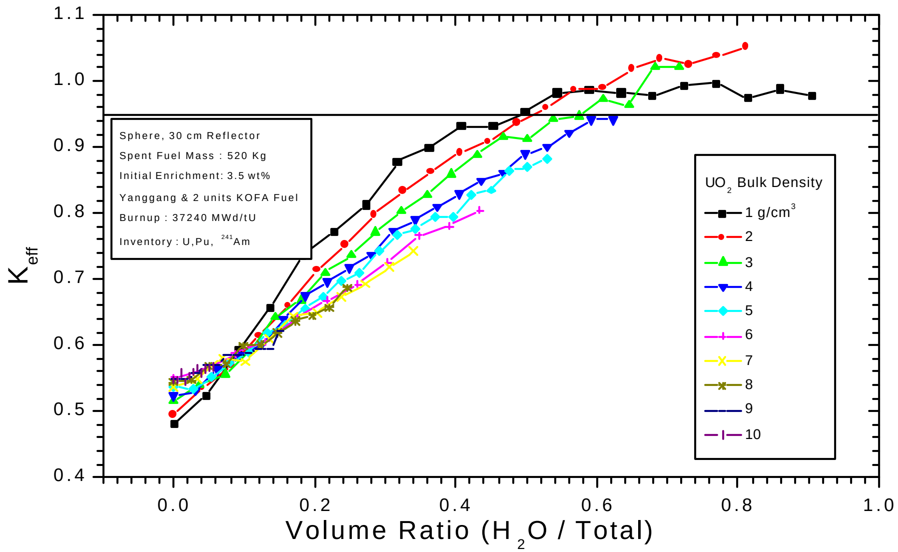


Fig. 12. K_{eff} as a Function of Volume Ratio for Using Pu, U, ^{241}Am.

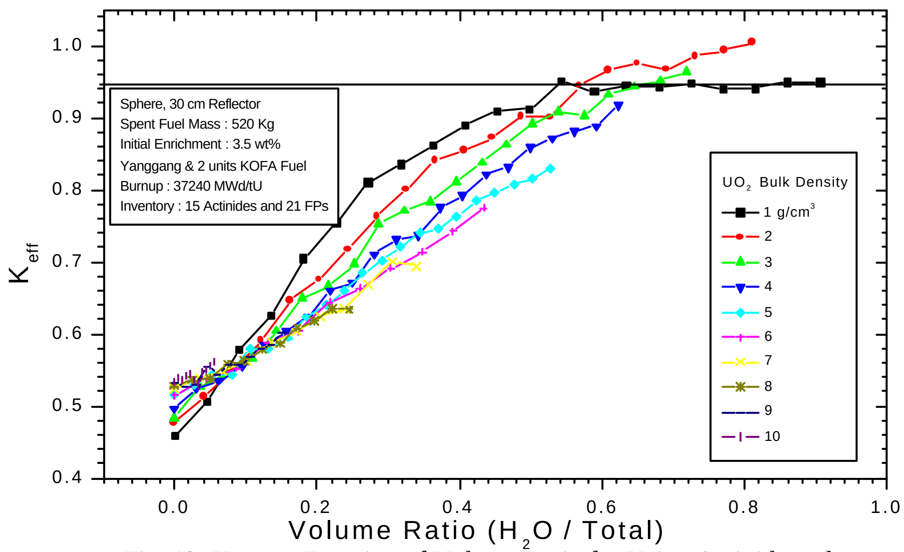


Fig. 13. K_{eff} as a Function of Volume Ratio for Using Actinide and Fission Products.

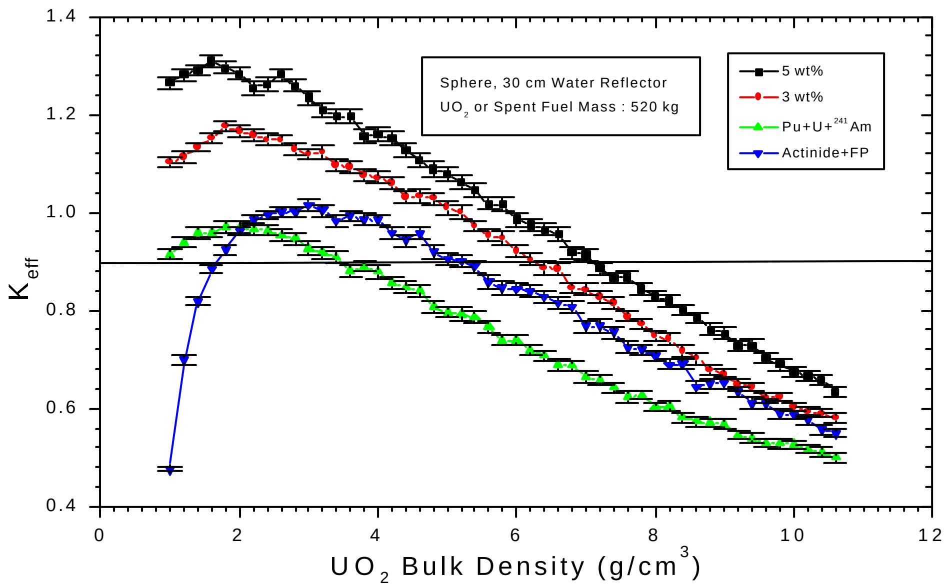


Fig. 14. Maximum K_{eff} as a Function of UO_2 Bulk Density.

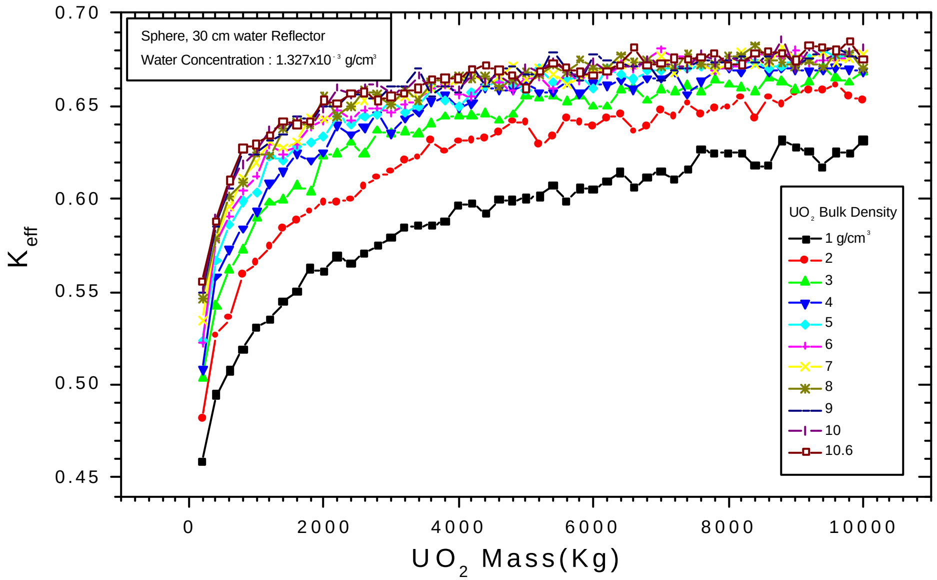


Fig. 15. K_{eff} as a Function of UO_2 Mass at 1.327×10^{-3} g/cm^3 Void Water Concentration of UO_2 Material.

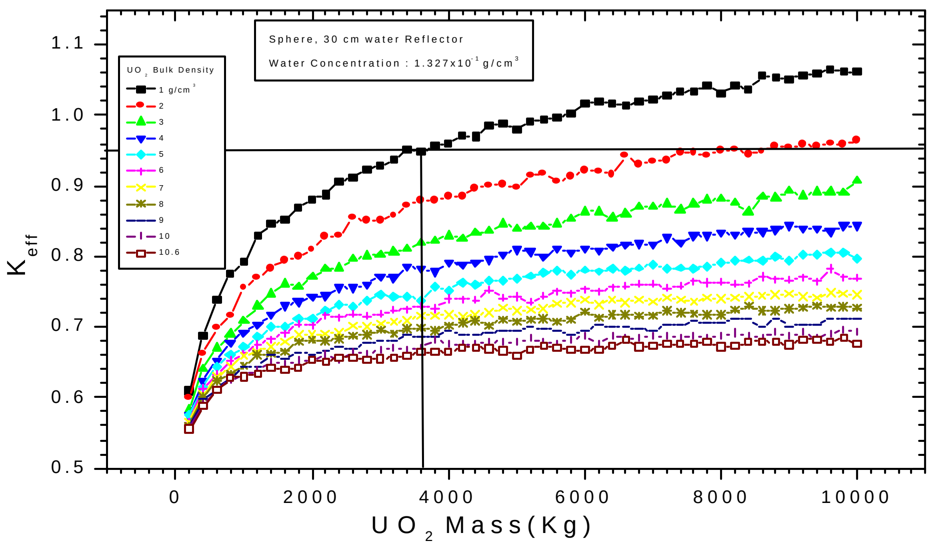


Fig. 16. K_{eff} as a Function of UO_2 Mass at 1.327×10^{-1} g/cm^3 Void Water Concentration of UO_2 Material.

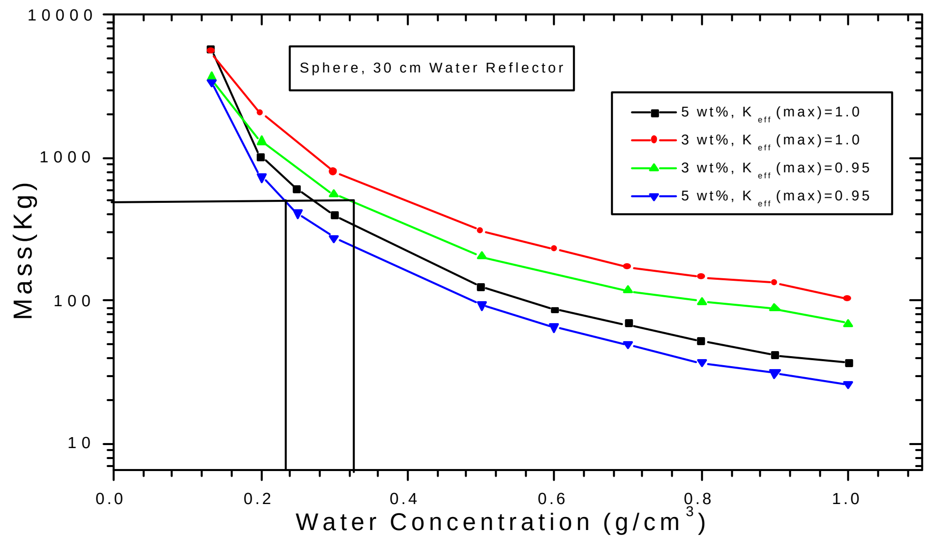


Fig. 17. Critical and Subcritical Mass as a Function of Water Concentration in the Void of UO_2 Material.