

2001 춘계학술발표회 논문집

한국원자력학회

## Ball-mill 처리가 $UO_2$ 분말의

특성, 성형 그리고 소결에 미치는 효과

# The Effect of Ball-mill Treatment on Powder Characteristics, Compaction and Sintering of $UO_2$

나상호, 김시형, 정창용, 김한수, 이영우

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

### 요 약

습식공정으로 제조된 2 종류(ex-ADU 와 ex-AUC)의  $UO_2$  분말에 대하여 ball-mill 시간(0~4 시간)에 따른 분말의 특성변화, 성형성(성형압력 구간 : 200~400MPa) 그리고 소결성(소결조건 : 1700°C, 수소분위기)을 조사하였다. Ex-ADU  $UO_2$  분말은 그 입자크기가 작아(평균 입자크기 ; 0.9 $\mu$ m) ball-mill 의 효과는 거의 없는 반면에, ex-AUC  $UO_2$  분말에서는 그 입자크기가 비교적 커서 (평균 입자크기 ; 28 $\mu$ m) ball-mill 의 효과가 크게 나타났다. Ball-mill 에 의한 분말입자의 미세화효과는 1 $\mu$ m 보다 큰 크기를 갖는 분말입자에서 주로 나타났다. 또한 ball-mill 에 의해 최대 감소될 수 있는 분말입자 크기는 약 0.5 $\mu$ m 로 나타났다.

Ex-AUC  $UO_2$  인 경우, ball-mill 시간에 따라 분말입자 크기는 감소하였으며, 동일한 성형 및 소결조건하에서 ball-mill 처리된 분말의 성형밀도 및 소결밀도는 원료분말의 것에 비하여 증가하였다. 이것은 ball-mill 처리에 의해 미분쇄된 분말입자에 기인되는 것으로 나타났다.

### Abstract

The Effects of ball-milling time(0~4 hrs) have been investigated on the change of powder characteristics, compaction behavior (compaction pressure range : 200~400MPa) and sinterability (1700°C in  $H_2$  atmosphere) of the two different  $UO_2$  powders (ex-ADU and ex-AUC) prepared by wet process. It is observed that, while the ex-ADU  $UO_2$  has little been

affected, the ex-AUC  $\text{UO}_2$  has been largely affected by ball-milling treatment. This may be attributed to the characteristics of particle size formed during the preparation step, i.e., the former has a small average size of about  $0.9\mu\text{m}$ , while the latter has a relatively large average size of about  $28\mu\text{m}$ . It appeared that the effective size reduction by ball-milling treatment is limited to the particle size larger than  $1\mu\text{m}$ , and that to the extent of maximum decrease in size about  $0.5\mu\text{m}$ .

In the case of ex-AUC  $\text{UO}_2$ , it is observed that the particle size decreased with ball-milling time and green density and sintered density of ball-milled powder increased compared with those of as-received powere under the same conditions. This may be mainly due to the fine particles formed during the ball-milling treatment.

## 1. 서론

현재 원자력발전용의 핵연료로 가장 많이 사용되고 있는 것은  $\text{UO}_2$  이며,  $\text{UO}_2$  분말에서 펠렛까지의 제조공정은 일반적인 분말야금 제조공정과 유사하다.  $\text{UO}_2$  분말의 제조는 IDR(Integrated Dry Route)[1]과 같은 건식법이 있으나, 주로 습식방법인 ADU(Ammonium Di-Uranate)[2]와 AUC(Ammonium Uranyl Carbonate)[3] 와 같은 공정에 의해 이루어진다. 동일한 습식방법에서도 제조공정에 따라 제조된  $\text{UO}_2$  분말의 특성은 다르게 나타나며[4,5], 이러한 특성은 성형성이나 소결성에 영향을 미치는 것으로 많이 보고되고 있다[6-8]. 또한, 최근에 개량핵연료 개발의 일환으로, 중성자조사에 의한 핵연료성능을 보다 향상시키기 위하여 핵분열개체의 방출을 억제시킬 수 있는 미세구조의  $\text{UO}_2$  펠렛 가공방법의 개발이 꾸준히 연구되고 있다. 이와 같은 미세구조의 제어 및 소결성 향상 방법의 하나로  $\text{UO}_2$  펠렛제조에서 사용되는 원료분말의 특성을 적절히 조절하고, 이에 따른 분말의 성형거동이나 소결성을 적절히 제어하는 방법이 있다. 특히 혼합핵연료 소결체 제조의 경우, 혼합분말의 기계적인 분쇄는 필수적일 뿐만 아니라, 분쇄방법 및 사용기기에 따라 혼합된 분말의 특성, 분말의 성형성 및 소결성에 크게 변한다. 위와 같은 기술을 개발하기 위해서는 분말처리 방법에 따른 분말의 특성변화, 그리고 이들이 성형이나 소결성에 미치는 영향에 대하여 상세히 연구되어야 한다.

일반적으로 분말의 특성, 특히 분말입자 크기 및 형태는 분말의 성형성이나 소결성에 크게 영향을 미치는 것으로 잘 알려져 있다[9,10]. 분말입자 크기를 기계적으로 미분쇄시키는 방법에는 여러 가지가 보고되고 있으나[11], 본 실험에서는 그 중  $\text{UO}_2$  펠렛의 가공공정 뿐만 아니라 다른 분말처리에서도 가장 널리 이용되고 있는 ball-mill을 사용하여 원료분말을 미분쇄하고자 하였다.

Ball-mill 로 미분쇄시킬 경우, 원료분말이 상이한 두 원료분말의 특성변화 양상과 이러한 특성변화가 성형 및 소결에 미치는 영향에 대하여 조사하고자 하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 시료준비 및 실험조건

시료는 2 가지 종류의 서로 다른 분말, 즉 하나는 한국원자력연구소에서 AUC 공정으로 제조한 (ex-AUC)  $UO_2$  이며, 다른 하나는 캐나다에서 ADU 공정으로 제조한 (ex-ADU)  $UO_2$ 를 사용하여 이들을 ball-milling 시간에 따라 처리한 후, 성형, 소결하였다 원료(as-received) 분말과 ball-mill 처리된 분말의 주요 물리적 및 화학적 특성을 Table 1 에 수록하였다.

Sundrica[12] 식을 이용하여 산출한 80rpm 의 속도로 회전하는 내경 0.1m, 길이 0.12m 인 원통형의 stainless steel jar를 사용하여 원료분말을 대기분위기 및 비냉각하에서 건식으로 ball-mill 시켰으며, ball-mill 시간은 0.5, 1, 2 그리고 4시간으로 각각 변화시켰다. 4시간 보다 긴 ball-mill 시간에는 분쇄된 분말이 jar 의 내벽에 고착되는 현상이 관찰되어 그 이상의 장시간 ball-mill 실험은 수행하지 않았다. 시료량 및 분쇄매개체(media)인 직경 0.02m 의  $Al_2O_3$  ball 의 장입량은 jar 내적량의 20vol.% 및 50vol.% 로 하였다. Ball-mill 처리된 분말의 성형성 및 소결성을 조사하기 위하여 원료분말과 ball-mill 처리된 분말을 복동식 유압프레스에 분말을 동일하게  $20 \pm 0.1g$  장입한 후, 성형압력 200, 300 그리고 400MPa 로 각각 성형하였으며, 소결은 수소분위기하에서 온도 1700℃에서 4시간 유지하였다.

### 2.2 측정 방법

시료분말의 입자크기 및 분포측정은 laser type particle size analysis system(영국 Malvern 사 제품으로 Model : Mastersizer/E)으로 하였으며, 시료분말의 비표면적 및 O/U 측정은 각각 BET 방법과 산화중량법으로 하였다. 시료분말의 bulk density 는 ASTM-B329 에 기술된 측정기기를 사용하여 측정하였으며, 성형밀도와 소결밀도는 기하학적 방법과 수침법(immersion method)으로 각각 측정하였다. 시료분말과 성형체의 기공크기 및 분포는 mercury porosimeter(미국 Micrometrics 사 제품으로 Model : Poresizer 9320)를 사용하여 측정하였다.

## 3. 결과 및 토의

### 3.1 Ball-mill 처리가 $UO_2$ 분말의 특성에 미치는 영향

Ball-milling 시간이 분말의 특성, 즉 비표면적, O/U 비, bulk density, 입자크기 및 분포 그

리고 기공크기 및 분포에 미치는 영향을 조사하여 Table 1 에 수록하였다. Table 1 에 수록한 바와 같이, 분말종류(ex-AUC 및 ex-ADU UO<sub>2</sub>) 에 관계없이 원료분말(ball-mill 시간이 0)의 화학적 특성은 유사한 반면에, 물리적 특성, 특히 분말입자의 평균 크기 및 bulk density 는 크게 차이를 보여준다. 즉, ex-AUC UO<sub>2</sub> 분말입자의 평균 크기 및 bulk density 는 ex-ADU UO<sub>2</sub> 분말입자의 것보다 훨씬 크게 나타났다. Fig. 1 의 (a) 와 (b)에 각각 ex-AUC 와 ex-ADU UO<sub>2</sub> 원료분말의 morphology를 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이, ex-AUC UO<sub>2</sub> 분말입자는 비교적 큰 입자들이 둥근 형태를 이루는 반면에, ex-ADU UO<sub>2</sub> 분말입자는 불규칙하면서 미세한 입자들이 모여 있는 형태를 보여준다.

Fig. 2 는 원료분말의 입자크기 분포를 도시한 것으로, ex-AUC UO<sub>2</sub> 인 경우 입자크기가 약 28 $\mu$ m에서 피크(peak)값을 이루면서 정상적인 monomodal 분포를 보여주고 있으며, ex-ADU UO<sub>2</sub> 인 경우, bimodal 형태 (입자크기 0.5 $\mu$ m 와 5 $\mu$ m에서 두 개의 피크를 이룸)를 보여주고 있다. Fig. 3 의 (a)와 (b)는 각각 ex-AUC 와 ex-ADU UO<sub>2</sub> 에 대하여 ball-milling 시간에 따른 분말의 입자크기를 비교한 것으로, ex-AUC UO<sub>2</sub> 인 경우 monomodal 분포를 이루는 원료분말이 ball-mill 에 의해 입자크기가 감소하면서 두 개의 피크값(입자크기 : 약 23  $\mu$ m 와 0.8 $\mu$ m)을 갖는 bimodal 형태로 천이됨을 보여주고 있다. 반면에, ex-ADU UO<sub>2</sub> 인 경우 ball-mill을 하더라도 원료분말의 bimodal 형태는 거의 변하지 않고 다만 피크값, 예를 들면, 입자크기 5 $\mu$ m 에서는 피크값이 감소하고 0.5 $\mu$ m 에서는 피크값이 증가하는 경향을 보여준다. 이는 2~20 $\mu$ m 의 분말입자 크기를 갖는 ex-ADU UO<sub>2</sub> 원료분말이 ball-mill 에 의해 입자크기가 감소된 것으로 사료된다. 따라서 ball-mill 에 의한 분말의 미세화는 적어도 1 $\mu$ m 이상의 분말입자 크기를 갖는 분말에만 효과가 있는 것으로 사료된다. 또한, ball-mill 에 의해 감소될 수 있는 분말입자 크기는 약 0.5 $\mu$ m 으로 나타났다.

Ball-mill 처리된 분말의 경우에 있어서, 분말입자의 화학적 특성, 즉 O/U 비와 수분함량은 분말종류와 무관하게 ball-mill 시간에 거의 영향을 받지 않는 것으로 나타났다(Table 1 참조). 이는 대기분위기, 비냉각하에서 건식 ball-mill 처리를 하였지만, ball-mill 시에 발생하는 열이 분말의 화학적 특성에는 그다지 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다. 반면에, 분말입자의 물리적 특성, 즉 비표면적, bulk density 그리고 분말입자의 평균 크기 등은 ex-AUC UO<sub>2</sub> 분말의 경우에만 뚜렷하게 ball-mill 의 효과가 있음을 보여준다. Fig. 4 에 ball-mill 시간을 함수로 하여 분말입자의 평균 크기와 bulk density 변화를 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이, ex-ADU UO<sub>2</sub> 분말인 경우 ball-mill 시간이 증가하여도 분말입자 크기 감소 및 bulk density 변화는 거의 없는 것으로 나타났다. 반면에, ex-AUC UO<sub>2</sub> 분말인 경우 ball-mill 시간이 3 시간까지는 입자크기 감소가 급격하게 일어나고, 그 이상의 시간에서는 거의 변하지 않는 경향을 보여주고 있다. 따라서 3시간 이

상의 ball-mill 처리는 분말의 미세화에 크게 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

Ex-AUC  $UO_2$  분말인 경우, ball-mill 시간에 따른 분말의 bulk density 감소도 분말입자 크기 감소 경향과 유사한 경향을 보여주고 있다. 이는 ball-mill 시간 증가에 따라 불규칙하게 미세화된 분말의 증가로 인하여 유동성이 좋지 않게 될뿐만 아니라 조밀화에 영향을 미치는 것으로 사료된다. 즉, 분말입자의 크기 및 형태는 분말의 bulk density 와 밀접한 상관관계가 있는 것으로 판단된다.

### 3.2 Ball-mill 처리가 $UO_2$ 성형에 미치는 영향

Fig. 5 의 (a)와 (b) 는 각각 ex-AUC 와 ex-ADU  $UO_2$  의 원료분말과 4시간 ball-mill 처리된 분말을 사용하여 성형압력 300MPa 로 성형한 성형체의 기공직경 크기에 따른 기공부피 분포를 도시한 것이다. Ex-AUC  $UO_2$  원료분말과 4시간 ball-mill 처리된 분말로 성형한 성형체의 단위무게당 총 기공부피는 각각 73.3 과 70.2  $mm^3/g$  이며, ex-ADU  $UO_2$  분말과 4시간 ball-mill 처리한 경우에 단위무게당 총 기공부피는 각각 81.4 와 80.9 $mm^3/g$  으로 원료분말보다는 4시간 ball-mill 처리된 분말로 성형한 성형체의 기공부피가 작으며, ex-AUC  $UO_2$  보다는 ex-ADU  $UO_2$ 에서 기공부피가 크게 나타났다. Fig. 5(a)에서 보면, 원료분말로 성형한 성형체의 기공직경 크기분포는 두 개의 피크값(기공직경과 기공부피가 하나는 각각 0.12 $\mu m$  와 3.5 $mm^3/g$  이고, 다른 하나는 각각 0.043 $\mu m$  와 19.6 $mm^3/g$ )을 갖는 bimodal 형태의 분포를 이루고 있는 반면에, 4시간 ball-mill 처리된 분말로 성형한 성형체의 경우에는 하나의 피크값(기공직경 약 0.06 $\mu m$ 에서 기공부피 20 $mm^3/g$ )을 갖는 정상적인 분포형태를 나타내고 있다. 이것은 성형동안에 분말입자들이 재배열되면서 ball-mill 처리에 의해 미분쇄된 분말입자가 기공속으로 밀려들어가 기공의 크기를 감소시키는 것으로 사료된다. 반면에, ex-ADU  $UO_2$  인 경우, Fig. 5(b) 에 도시한 대로, 원료분말 및 4시간 ball-mill 처리된 분말 모두 동일한 하나의 피크값(기공직경 약 0.06 $\mu m$ 에서 기공부피 약 35 $mm^3/g$ )을 가지면서 동일한 형태의 정상적인 크기분포를 이루고 있다. 이것은 앞에서 언급한대로 ex-ADU  $UO_2$  인 경우 ball-mill 의 효과가 거의 없기 때문에 동일한 기공크기 분포를 이루는 것으로 사료된다. 또한, Fig. 5 의 (a)와 (b)를 상호비교하면, ex-AUC  $UO_2$  ball-mill 처리된 분말로 성형한 성형체의 기공크기 분포는 좀 더 넓은 형태의 monomodal 분포를 보이는 반면에 ex-ADU  $UO_2$  분말로 성형한 성형체의 기공크기 분포는, ex-AUC  $UO_2$  ball-mill 처리된 것에 비하여, 그 범위가 좁은 monomodal 형태를 보인다. 이것은 ball-mill 처리에 의해 비교적 큰 분말입자들이 모두 미분쇄되지 않을 뿐만 아니라 분말입자 크기가 1 $\mu m$  이하의 분말입자들은 거의 분쇄되지 않기 때문인 것으로 사료된다(Fig. 3(a) 참조). Fig. 6 에 성형압력 300MPa 로 성형한 성형체의 반경방향 파단면을 도시하였다. Fig. 6(a)와 (b)는 각각 ex-AUC  $UO_2$  의 원료분말과 4시간

ball-mill 처리된 분말로 성형한 성형체의 파단면으로, 원료분말로 성형한 성형체의 경우, 큰 원료 분말입자들이 원형을 그대로 보존하면서 분말입자사이에서 비교적 큰 기공들이 존재함을 보여준다. 반면에, 4시간 ball-mill 처리된 분말로 성형한 성형체의 경우, 덜 분쇄된 입자들 사이의 공간에 미분쇄된 분말입자들이 채워져 작은 기공들만 존재함을 보여준다. Fig. 6(c)와 (d)는 각각 ex-ADU  $UO_2$  의 원료분말과 4시간 ball-mill 처리된 분말로 성형한 성형체의 파단면을 도시한 것으로, 분말의 ball-mill 처리와는 무관하게 작은 기공들만 존재함을 보여준다.

ex-AUC  $UO_2$  와 ex-ADU  $UO_2$  의 각각의 원료분말과 4시간 ball-mill 처리된 분말의 성형압력에 따른 성형밀도의 관계를 Fig. 7 에 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이, 분말종류에 관계없이 성형압력이 증가할수록 성형밀도는 증가하였으며, ex-AUC  $UO_2$  의 성형밀도가 ex-ADU  $UO_2$  의 것보다 동일한 성형압력하에서 약  $0.2Mg/m^3$  정도 일정하게 높은 것으로 나타났다. 또한, ex-ADU  $UO_2$  의 경우에는 원료분말과 ball-mill 처리된 분말 모두 성형압력에 따라 성형밀도의 차이는 거의 없는 반면에 ex-AUC  $UO_2$  의 경우에는 원료분말로 성형한 성형체의 성형밀도보다는 4시간 ball-mill 처리한 것의 성형밀도가 조금 더 증가하였다. 이것은 ex-AUC  $UO_2$  의 경우에는 ball-mill 에 의한 입자감소의 효과가 거의 없기 때문이고, ex-AUC  $UO_2$  의 경우에는 ball-mill 에 의해 미분쇄된 분말입자들이 성형동안에 재배열되면서 입자사이의 빈 공간을 채우기 때문인 것으로 사료된다. 그리고 ex-AUC  $UO_2$  의 성형밀도가 ex-ADU  $UO_2$  의 것보다 크게 나타나는 것은 ex-AUC  $UO_2$  인 경우 성형동안에 미분쇄된 분말입자가 덜 분쇄된 입자들 사이에 밀려 들어가 그 공간을 채울 수 있는 반면에, ex-ADU  $UO_2$  인 경우 분말입자 크기가 극히 작으므로 성형동안에 분말입자사이의 공간에 채워지지 않고 성형압력에 의해서만 그 공간크기가 줄어들 뿐 거의 그대로 존재하기 때문인 것으로 사료된다. 이것은, 앞에서도 언급한 바와 같이, ex-ADU  $UO_2$  의 경우에는 원료분말 및 ball-mill 처리된 분말로 성형한 성형체의 총 기공부피 차이가 거의 없는 반면에 ex-AUC  $UO_2$  성형체의 경우에는 원료분말보다는 ball-mill 처리된 분말로 성형한 경우에 적게 나타났을 뿐만 아니라 ex-AUC  $UO_2$  성형체의 기공크기는 ex-ADU  $UO_2$  의 것보다 크게 크게 나타났지만 총 기공부피는 ex-AUC  $UO_2$  성형체의 것보다는 ex-ADU  $UO_2$  의 것이 크게 나타난 사실과 잘 일치한다.

### 3.3 Ball-mill 처리가 $UO_2$ 의 소결에 미치는 영향

Fig. 8 은 ex-AUC  $UO_2$  와 ex-ADU  $UO_2$  에 대하여 각각의 원료분말과 4시간 ball-mill 처리된 분말의 성형밀도에 따른 소결밀도의 관계를 도시한 것으로, 분말종류에 관계없이 성형밀도 증가에 따라 소결밀도는 증가하는 경향을 보여주고 있다. 또한, ex-ADU  $UO_2$  는 ex-AUC  $UO_2$  보다 동일 성형압력하에서 성형밀도는 낮지만(Fig. 7 참조) Fig. 8 에 도시한 바와 같이, 소

결밀도는 ex-ADU UO<sub>2</sub> 가 ex-AUC UO<sub>2</sub> 보다 훨씬 높다. 그리고 ex-ADU UO<sub>2</sub> 의 경우에는 ball-mill 처리효과가 소결밀도에 거의 영향을 미치지 않지만, ex-AUC UO<sub>2</sub> 의 경우에는 원료 분말로 성형소결한 소결체의 소결밀도보다는 4시간 ball-mill 처리된 분말로 성형소결한 것의 소결밀도가 크게 증가하였다. 이것은 미세한 기공크기를 갖는 ex-ADU UO<sub>2</sub> 인 경우 소결동안에 미세한 기공은 거의 소멸되어 높은 소결밀도를 얻을 수 있는 반면에 ex-AUC UO<sub>2</sub> 인 경우 비교적 조대한 기공은 잔존하게 되어 소결밀도를 증가시키지 못하는 것으로 사료된다.

#### 4. 결론

1) Ex-ADU UO<sub>2</sub> 의 경우에는 분말의 입자크기가 미세하므로 ball-mill 의 효과가 거의 나타나지 않았다. 즉 ball-mill 의 효과는 1 $\mu$ m 보다 작은 입자크기에서는 거의 없는 것으로 나타났다.

2) 분말입자 크기가 보다 큰 ex-AUC UO<sub>2</sub> 의 경우에는 ball-mill 의 효과가 다음과 같이 뚜렷하게 나타났다.

i) 분말의 특성인 비표면적, 입자크기 그리고 bulk density 가 ball-mill 시간에 따라 급격하게 감소하였다.

ii) ball-mill 처리된 성형체의 기공크기 및 그 분포는 원료분말로 성형한 성형체의 것에 비하여 기공크기는 작아지고, 그 분포범위는 좁아졌다.

iii) ball-mill 처리된 분말의 성형밀도 및 소결밀도는 원료분말의 경우에 비하여 크게 증가하였다.

#### Acknowledgement

본 연구는 과학기술부의 원자력연구 개발사업의 일환으로 수행되었음.

#### 참고 문헌

- [1] H. Assmann and H. Bairiot, Guidebook on Quality Control of Water Reactor Fuel, IAEA Technical Report Series, No. 221, p.149(IAEA, Vienna, 1983)
- [2] I.J. Hastings, AECL Report CRNL-2 (1983)
- [3] V. Mathieu, Trans. Am. Nucl. Soc., 28(1978)327
- [4] C.S. Choi, J. H. Park, E.H. Kin, H.S. Shin and I.S. Chang, Journal of Nuclear Materials, 153(1988)148
- [5] Lars Halldahl, ibid., 126(1984)170

- [6] Y.W. Lee and M.S. Yang, *ibid.*, 178(1991)217
- [7] W. Timmermans, A. V. Heck-Hennen, G. Gorle and R. De Batist, *ibid.*, 71(1978)256
- [8] P. Das and R. Choudhury, *ibid.*, 170(1990)286
- [9] 나상호 외, 2000년 추계학술대회, 한국원자력학회
- [10] Joel S. Hirshhorn, *Introduction to Powder Metallurgy*, 1st ed., p.46, American Powder Metallurgy Institute, USA, (1969)
- [11] M.E. Fayed and L. Otten, *Handbook of Powder Science and Technology*, 1st ed., p.563, Van Nostrand Reinhold Company, (1984)
- [12] J. Sundrica, *The International Journal of Powder Metallurgy and Powder Technology*, 17(4)(1981)291

Table 1. Characteristics of powder samples

characteristics	powder milling time (hr)	ex-AUC UO <sub>2</sub>					ex-ADU UO <sub>2</sub>				
		0	0.5	1	2	4	0	0.5	1	2	4
<b>Chemical</b>											
O/U		2.19	2.21	2.21	2.21	2.21	2.14	2.15	2.15	2.15	2.15
moisture contents(%)		0.36	0.40	0.36	0.40	0.42	0.42	0.33	0.39	0.35	0.40
<b>Physical</b>											
specific surface area(m <sup>2</sup> /g)		4.86	4.75	4.72	4.62	4.57	4.60	4.89	4.70	5.11	5.01
bulk density(Mg/m <sup>3</sup> )		2.32	2.04	1.70	1.54	1.48	1.20	1.23	1.22	1.22	1.14
average diameter(μm)		27.52	18.47	15.31	12.76	10.40	0.91	0.72	0.75	0.59	0.64

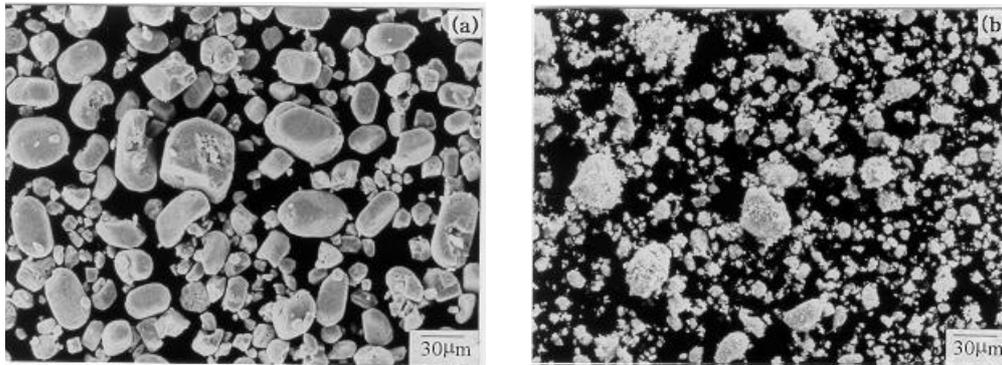


Fig. 1. Typical particle morphology of  $\text{UO}_2$  powder  
(a) ex-AUC  $\text{UO}_2$ (KAERI) and (b) ex-ADU  $\text{UO}_2$ (Canada)

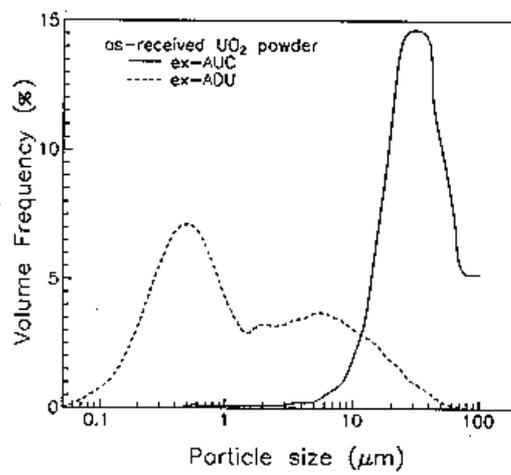


Fig. 2. Particle size distribution of as-received powders of ex-AUC and ex-ADU  $\text{UO}_2$

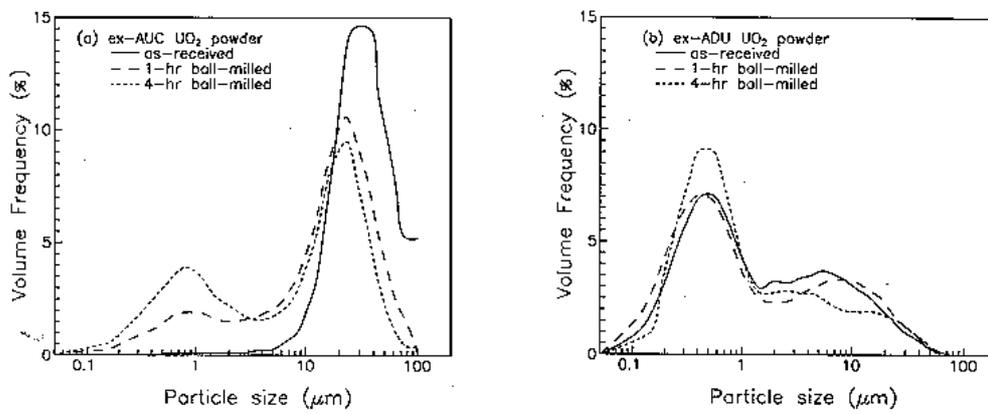


Fig. 3. Particle size distribution of ball-milled powder

(a) ex-AUC  $\text{UO}_2$  and (b) ex-ADU  $\text{UO}_2$

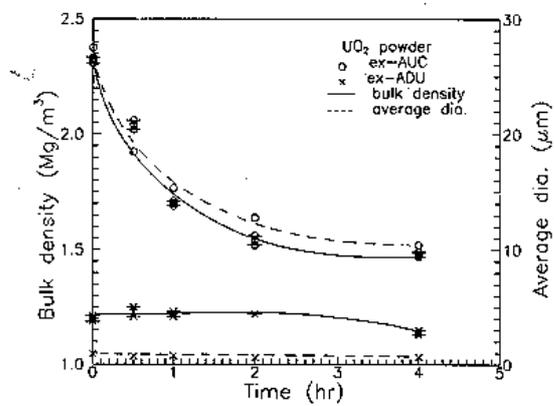


Fig. 4. Bulk density and average diameter of particle as a function of ball-milling time with ex-ADU  $\text{UO}_2$  and ex-AUC  $\text{UO}_2$  powders

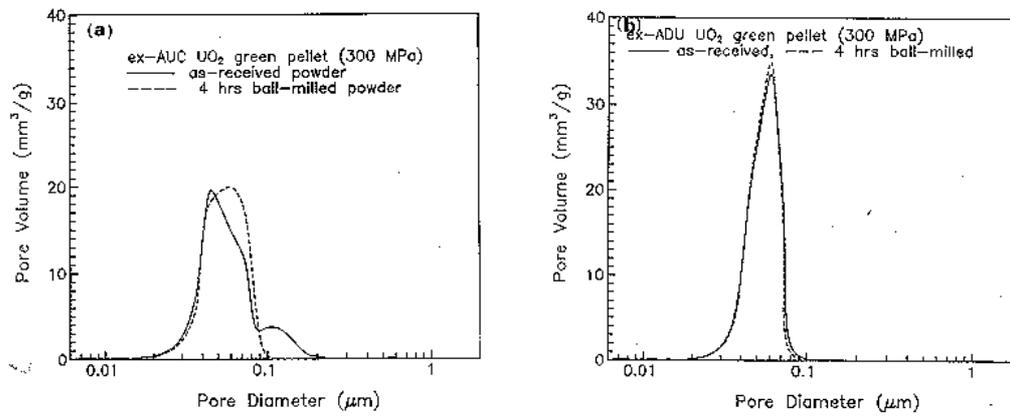


Fig. 5. Pore size distribution of  $\text{UO}_2$  green pellets with a compaction pressure of 300MPa

(a) ex-AUC  $\text{UO}_2$  green pellet and (b) ex-ADU  $\text{UO}_2$  green pellet

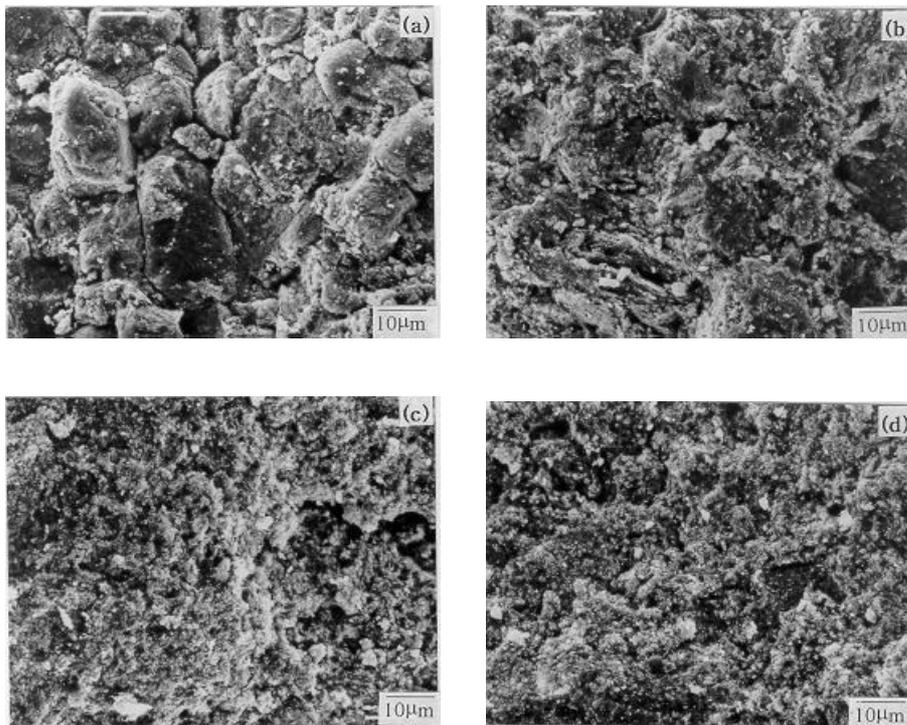


Fig. 6. Radial fractographs of the green pellets with a compaction pressure of 300MPa

(a) ex-AUC, as-received, (b) ex-AUC, 4-hr ball-milled,  
(c) ex-ADU, as received and (d) ex-ADU, 4-hr ball-milled

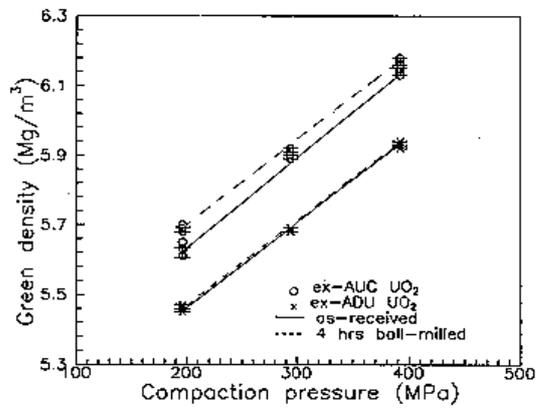


Fig. 7. Green density vs. compaction pressure relationship of ex-ADU and ex-AUC UO<sub>2</sub> green pellets with as-received and ball-milled powders

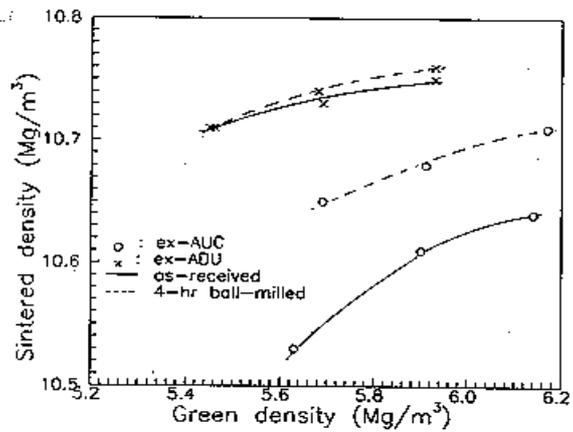


Fig. 8. Green density vs. sintered density relationship of ex-ADU and ex-AUC UO<sub>2</sub> pellets with as received and ball-milled powders