

注4 燃料棒被覆管を通して冷却材に伝えられる単位長さ当たり発熱量。単位は、W/cmまたはkW/m。

注5 燃料に含まれるウラン1トンから取り出したエネルギー。単位は、MWd/tまたはGWd/t。

3. セラミックの特徴

二酸化ウランは、格子定数 0.547nm の面心立方（螢石型）結晶である。その融点は、約 2,800℃ で、融点に至るまで相変態がない。単結晶の理論密度は、10.96g/cm³ であるが、二酸化ウラン燃料として用いられるのは、粒径約 5 ~ 10μm の多結晶焼結体であり、その密度は、通常理論密度の 95 ~ 97% である。

4. 製法

二酸化ウラン粉末をプレス機で圧縮成形して円柱形状の成形体（グリーン・ペレット）とし、これを 1700 ~ 1800℃ の還元雰囲気中で焼成して焼結ペレットとする。製造工程を図2に示す。

成形工程では、薬品の錠剤製造に使われる打錠機と同様のロータリー・プレスが使用される。製品密度の均一性を良くし、焼結時の変型を小さくし、生産性を上げるため二酸化ウラン粉末の流動性を良くすることが求められる。このため、造粒工程や潤滑剤添加混合工程をとることがある。グリーン・ペレットをモリブデン合金製容器に入れ、これを 1700 ~ 1800℃ の水素と窒素の混合ガス等の還元雰囲気中の焼結炉に挿入し、4 ~ 8 時間かけて焼結する。この焼結の結果、密度が理論密度の 95 ~ 97%、OU 比が 2.00 の焼結ペレットを得る。焼結ペレットの外周をセントレス・グラインダで研削し、外径を精度よく仕上げる。UO₂ ペレットは、全数外観検査し、厳格な湿分管理等の品質管理のもとで燃料棒に封入される。

5. 製品性能・スペック

BWR 燃料集合体および PWR 燃料集合体に使用される UO₂ ペレットの外観を図3に示す。高さ、直径とも約 10mm (PWR 燃料ペレットの方がわずかに小さい) の円柱形で、BWR 燃料ペレットにはチャンファ（面取り）が、PWR 燃料ペレットには端面デッシュ（へこみ）とチャンファが付けられている。UO₂ ペレットの外径は、1μm 単位で研削されている。これは UO₂ ペレットと燃料棒被覆管内面との熱伝導性を良くし、同時に UO₂ ペレットと被覆管との接触力を緩和するため、その間隙を精密に管理する必要があるからである。

二酸化ウラン燃料は、原子炉中で核分裂を起こし、発生した熱は燃料棒被覆管を通して冷却材に伝えられる。この発熱量（燃料線出力^{注4}）は、長さ 1cm 当たり最大 440W である。このため、二酸化ウラン燃料の中心温度は、1800℃ にもなる。この使用中の温度上昇と出力変動により、UO₂ ペレットには図4に示すような結晶成長、クラック、ペレット片の再配列が生じる。

燃料集合体は、原子炉で 4 ~ 7 年間使用される。この間、二酸化ウラン燃料から取りだされるエネルギーを燃焼度^{注5}と言う尺度で表す。電力会社はエネルギー効率を考慮して燃焼度を出来るだけ上げようとするが、燃焼度は、国の許認可事項である。わが国の BWR および PWR では、二酸化ウラン燃料を最大 55,000MWd/t まで使用することが認可されている。

二酸化ウラン燃料は、核分裂による UO₂ 結晶の損傷や核分裂片等による照射損傷を受ける。核分裂片はそのほとんどが UO₂ 結晶中に保持される。核分裂片の気体成分（核分裂生成ガス—Xe, Kr—）は、低温・低燃焼度では UO₂ 結晶内に保持されているが、高温・高

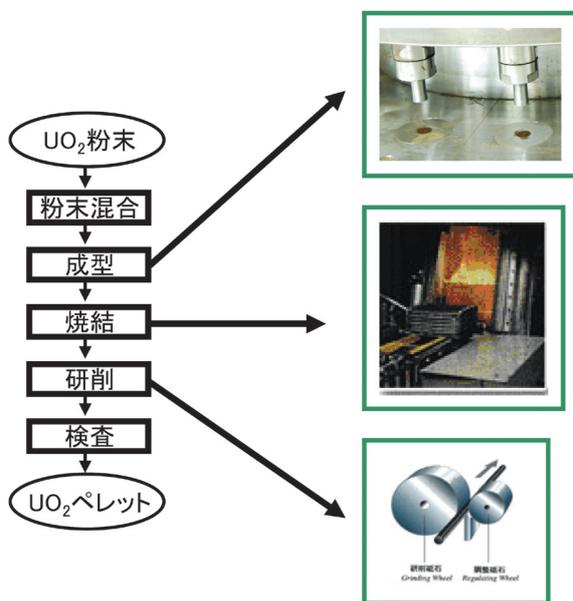


図2 二酸化ウラン (UO₂) ペレット製造工程

二酸化ウランペレットは、二酸化ウラン粉末と潤滑剤等との粉末混合工程、ロータリー・プレスによる成形工程、還元雰囲気での焼結工程、セントレス・グラインダによる研削工程、検査工程を経て製品に仕上げられる。



BWR燃料ペレット
直径：約 9.6mm 高さ：約 10mm
チャンファ付



PWR燃料ペレット
直径：約 8mm 高さ：約 10mm
ディッシュ・チャンファ付

図3 二酸化ウラン (UO₂) ペレット

二酸化ウラン粉末を成形、焼結、研削して円柱形ペレットとする。BWR燃料ペレットにはチャンファ（面取り）が、PWR燃料ペレットには端面デッシュ（へこみ）とチャンファが付けられている。

燃焼度になると図5に示すように拡散して結晶粒界に集まり、粒界にトンネルを形成して UO_2 ペレットから燃料棒内の空間に放出される。核分裂生成ガスの放出により燃料棒内圧が高くなると被覆管の損傷に至る恐れがあるので、出来るだけ UO_2 ペレット内に閉じ込めることが要求される。

6. 現在・将来展望

現在の軽水炉燃料には、 UO_2 に酸化ガドリニウム(Gd_2O_3)粉末を混合したガドリニア混合ペレットも使用されている。これは燃焼に伴う反応度変化を制御するために中性子吸収能の大きなGdを最大10%未満添加したもので、製法および特徴は、 UO_2 燃料とほとんど変わらない。

フランス、ドイツ、スイス等では、 UO_2 に PuO_2 を混合したMOX (Mixed Oxide) 燃料も発電用原子炉で使用されている。これは、使用済燃料を再処理して得られるプルトニウム(Pu)を最大10%程度まで混合して軽水炉で使用するものである。わが国でもこのプルサーマルの実施を目指して電力会社で計画を進めている。

軽水炉の次の段階の原子炉として開発が進められている高速炉(FBR, Fast Breeder Reactor)の燃料は、Puを20~30%含有するMOX燃料で、燃焼度100,000MWd/tを目標とした高性能燃料である。

文献

- 1) 田辺朗他, 日本原子力学会誌, 46, 566-572 (2004).
- 2) 宇根勝己他, 日本原子力学会誌, 46, 728-735 (2004).
- 3) 森 一麻, 日本原子力学会誌, 46, 838-844 (2004).
- 4) 原子力発電技術機構, 平成13年度 高燃焼度等燃料安全試験に関する報告書 (BWR 高燃焼度燃料 総合評価編), 平成14年3月.

[連絡先] 林 洋
Hayashi Lab.

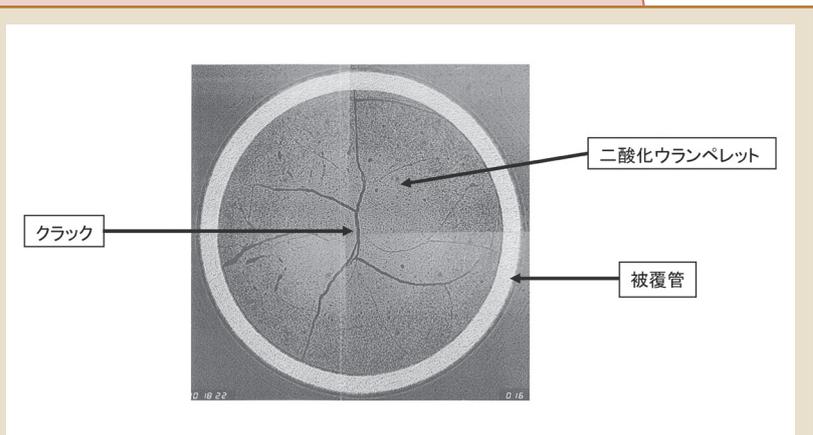


図4 使用済燃料棒の断面金相写真

原子炉で使用した燃料棒を切断し、断面を研磨して撮影した写真。二酸化ウランペレットが割れ、被覆管内面に接触しているのがわかる。

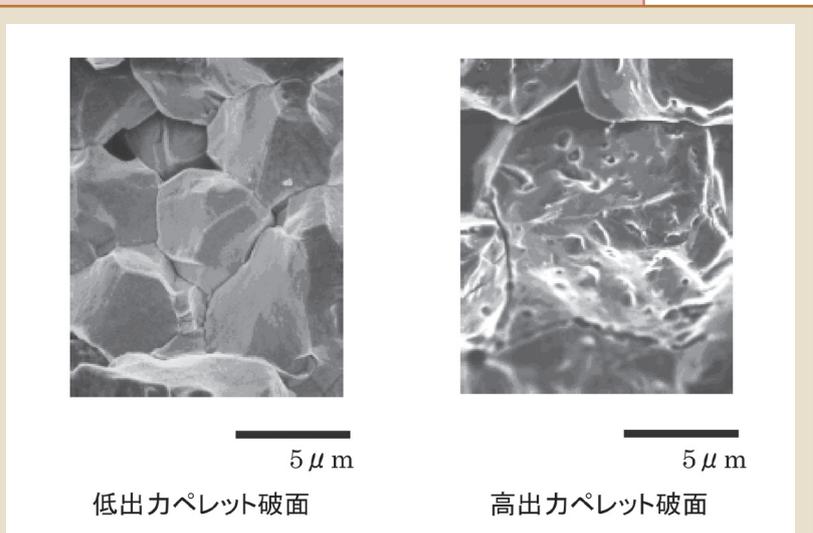


図5 使用済二酸化ウラン燃料ペレットの破面結晶詳細観察

低出力で使用したペレットでは結晶粒表面が製造時と同様だが、高出力を経験したペレットでは結晶粒表面に核分裂生成ガスの気泡が析出しているのが見える。