研究論文

370. スウェーデン酸化ウラン燃料棒の照射試験, (Ⅲ)

燃料棒断面観察

高橋 修一郎*, 関 義辰*, 久保田 正*, 本田 裕*, 野原忠英*

Irradiation Test on Swaged UO₂ Fuel, (Ⅲ)

Macrophotography on Sectioned Surface of Fuel Rods

By Shuichiro TAKAHASHI, Yoshinobu SEKI,
Tadashi KUBOTA, Yutaka HONDA and Tadahide NOHARA

Macrophotography on the sectioned surfaces of cold swaged UO₂ fuel rod, hot swaged UO₂ fuel rod, and sintered UO₂ pellets fuel rod, which were irradiated at the W.T.R. to 2,700 MWD/T.-UO₂ and 10~13 kW/ft. in burn-up and heat generation rate respectively, were described. The main results were as follows:

(1) A large radial crack was observed in the center position of swaged rod, and other part of the rod was found uniform.

While, a circular large crack, which plays a role to reduce thermal conductivity, was observed in hot swaged rod.

(2) In swaged rods, sintering and shrinkage occurred producing 50 μ gap to sheath tube. The density increase was estimated to be 2 % on the basis of the gap width.

I. ま え が き

Westinghouse 材料試験炉 (W.T.R.) において、燃焼度 2,700 MWD/T.-UO₂ および燃料棒単位長さ当りの発熱量 10~13 kW/ft. の照射条件で照射したコールドスウェージ UO₂ 燃料棒、ホットスウェージ UO₂ 燃料棒および焼結ペレット燃料棒に関する照射後試験結果のうち、外観検査、寸法重量変化および分裂生成ガスの挙動については、すでに第Ⅰ報および第Ⅱ報で報告した。本報では断面写真観察の結果について報告する。

UO₂ 燃料棒の炉中特性の重要なものの1つにクラックの発生の問題がある。UO₂ 燃料棒に中性子を照射した場合、核分裂によって多量の熱を発生する。その場合、熱は燃料棒被覆管の表面を流れる冷却水によって除去されるのであるが、金属燃料に比較してUO₂ の熱伝導性が悪いので、燃料の温度、特に中心部にお

ける温度が急激に上昇する傾向がある。この温度上昇によって燃料棒全般を通じて熱歪が発生するため、UO₂ 燃料棒内部の各所にクラックが形成され、このクラックがさらに UO₂ の熱伝導性に影響を与えている。特に円周方向に生ずるクラックは熱の流れを妨げ、熱伝導に悪影響を与える。すでに焼結 UO₂ ペレット燃料棒については、多くの照射試験結果が報告されており、クラックの形成と照射条件との関係について種々のデータがあるのに対して、スウェージ燃料についてはほとんどデータがない状態にある。本報においては、これらの点に着目しつつ断面写真観察の結果を報告する。

Ⅱ. 燃料棒断面写真観察

ペレット棒、ホットスウェージ棒、コールドスウェー

* 三菱原子力工業(株)(Mitsubishi Atomic Power Ind., Inc.)

ジ棒の3本の照射試料のうち、ホットスウェージ棒とコールドスウェージ棒は、WTR ホットセルでホイール・カッタ(SiC)を用いてFig. 1に示すように約10~20 mmの棒8個に切断した。そのうちの1箇所(各3~4面)だけは、破面をみるためにチューブ・カッタにより被覆管のみを切断後、 UO_2 棒を機械的に折って切断した。ペレット棒は約10 mm おきにチューブ・カッタで被覆管を切断しただけで、 UO_2 は特に切断しないようにした。ペレットの長さが約10 mm であるので、棒は10個に切断された。

Fig. 1 Sectioning of Fuel Rods

以上のようにして切断された各試料の各断面は、6.6倍、10倍、20倍のうち適当な倍率によって、ステレ

オグラフで約45枚撮影した。Photo. 1 (a)~(d)にコールドスウェージ棒断面の代表的写真を、Photo. 2 (a)~(d)にホットスウェージ棒の断面の代表写真を、Photo. 3 (a)~(d)にペレット表面と破面の代表的写真を示す。

コールドスウェージ棒には、中央に大きなクラックが断面を横切って生じていることが示されているが、このクラックは1~2 cm おきの各断面全部に現われており、上下に通じていると認められた。スウェージ棒は炉挿入初期においては熱伝導率は決してよくないので、中央部の温度が上昇し、むしろ円周状にクラックが入ることが予想されたが、このコールドスウェージ棒ではそれは現われなかった。この種のクラックは熱衝撃によって生ずると考えるのが妥当であるが、この場合、炉挿入のごく初期には粉末の焼結程度が小さいので、充分に熱歪を吸収できると認められ、必ずしも大きなクラックが発生する必要はないであろう。焼結が、ある程度進んだ状態でクラックが発生したものと認められる。Photo. 5には縦断面を示してあるが、大きな粒子と小さな粒子が混在していることが明瞭に見られ、また、クラックは1つも現われていなかった。

Photo. 1 Transverse Section of Irradiated Cold Swaged Compact

Photo. 2 Transverse Section of Irradiated Hot Swaged Compact

た。この縦断面および各横断面の写真からは、焼結が非常に進んでいるかどうかははっきりしないが、実際に原研ホットラボラトリーで調べると、 UO_2 コンパクトは非常に固くなっていることが認められた。

Photo. 1(d) でははっきり認められるように、被覆管と UO_2 コンパクトとの間には間隙が生じている。これは光学顕微鏡写真では、もっとはっきり認められている。スウェージ棒は製造のままでは、こういう間隙はないはずであるので、照射によって焼結が起って、この間隙を生じたものと認められる。この間隙は約 50μ ぐらいで直径方向 0.1 mm 程度 (約 1%) の収縮となり、密度としては 2% くらい上昇したことになる。

Photo. 2 (a)~(d) によると、ホットスウェージ棒にも、コールドスウェージ棒と同様な大きなクラックが認められ、さらに円周状にあるクラックも認められた。これらのクラックはやはり燃料棒の全長にわたって貫通していることも認められた。ホットスウェージ棒では製造プロセス途中でかなり固結しており、さらに円周方向のクラックが入りやすい傾向があることが

認められているので、炉に挿入の初期において、熱衝撃でこれらのクラックが発生したと認められる。

この円周方向クラックの内と外とでは、なにか組織が違うようにも見られるが、これは円周方向のクラックがあるために、照射によってクラックの内側が外側より高温になり焼結の進行が大きかったためか、あるいは、単に製造中に生じた相違によるものかははっきりしない。ただ、燃料棒内の熱伝導の点からみると、円周方向のクラックは好ましいことではないので、その意味からは、コールドスウェージ棒の方が燃料棒としては好ましい。ホットスウェージ棒の各断面はコールドスウェージの場合よりは一層緻密になっていることが認められるが、これは照射の影響ではなく、初めから密度が高く固められているからであろう。またコールドスウェージ棒の場合と同様に、照射による焼結の進行のために被覆管との間には、コールドスウェージ棒と同じ程度の間隙が認められた。

Photo. 3 (a), (b) はペレットの端面を示しているが、1個または2個の大きなクラックが認められた。Photo.

4 (a),(b)もペレットの端を示しているが、これらの写真はペレットの端部が大きく割れて欠けた所を示している。このような欠けは、ペレット棒を切断したことだけで生じたとも考えられるが、ペレット製造に際して端部が割れやすく(カップ状のクラックが入りやすい)なっていて、照射によって容易に割れて、切断の際に欠けてしまったものと考えられる。

Photo.5 にはペレットの縦断面を示しているが、この断面にも端部の欠けが大きく現われており、その他にもクラックがあることが示されている。Photo.6 にはコールドスウェッジ棒の縦断面が示されているが、これと Photo.5 を比べてもクラックの発生が、ペレットの場合一層多いことが認められる。しかし、このように写真では破損が大きく認められたが、原研ホットラボラトリーでピンセットをもって、ほじくろうとすると、かなり深くピンセットを入れることができるにもかかわらず、それ以上は非常に固くてくずすことはできなかった。このことは、熱衝撃による割れは、炉挿入の初期に起り、それ以上は燃料体の細分は進ま

ず、むしろ UO_2 のコンパクトは照射によって固化することを示している。今回、照射した3種の燃料棒では、ペレットがもっとも密度が高く、しかもよく焼結しているので、熱衝撃によるクラックがスウェッジ棒より入りやすいのは、当然と考えられる。

Photo.5 Longitudinal Section of Irradiated Sintered Pellet (11-1)

Photo. 6 Longitudinal Section of Irradiated Cold Swaged UO_2 Fuel Rod (polished and etched) (9-1)

Ⅲ. 結 語

以上、述べてきた結果と今後検討を要する事項とを要約すると、つぎのとおりである。

- (1) コールドスウェージ棒では、中央に大きなクラックが上下に貫通して生成した。ホットスウェージ棒でも中央に大きなクラックが上下に貫通し、さらに、円周方向のクラックが上下に貫通して生成した。この円周状クラックは熱伝導の上から好

ましくなく、ホットスウェージ棒はマクロスコピックに見たクラックに関しては、きわめて一様であった。ただ大きな粒子の周囲の小さな粒子が焼結する結果として大きな粒子の縁に沿って空隙が生じ、それが連続しているのがしばしば認められた。スウェージ燃料体内のクラック発生機構については、燃料棒の熱的挙動を知る上にさらに検討の余地がある。

- (2) ペレットの端部の割れているものが多く、これは、いわゆるカップリングと称するクラックである。
- (3) スウェージ棒では焼結の進行が認められ、被覆管との間に 50μ くらいの空隙を生じた。これによる密度の上昇は2%ぐらいになる。

三菱原子力工業(株)研究所長 大井上 博 博士は本報の公表を許可せられ、杉本一六研究所副長、渡辺 孝章博士および小倉正士博士には、本研究の遂行にあたり有益なご配慮を賜わった。

以上の諸氏に対し、著者らはここに深甚なる謝意を表する。

(1963年 11月27日 受理)

研究論文

371. $\text{UC}_{1-x}\text{O}_x$ に関する研究, (Ⅱ)*

難波 慎吾**, 井本正介**, 佐野 忠雄**

A Study of $\text{UC}_{1-x}\text{O}_x$, (Ⅱ)

By Shingo NAMBA,
Shosuke IMOTO and Tadao SANO

A study has been made on the formation of $\text{UC}_{1-x}\text{O}_x$ through the reaction of UC and UO_2 or UC_2 and UO_2 in several composition ratio under the pressure of CO gas of $10^{-3} \sim 10^{-4}$ mmHg and the temperature varying in the range $1,200^\circ \sim 1,750^\circ\text{C}$ for 2 ~ 16 hr.

The main phase of the reaction product was identified to be $\text{UC}_{1-x}\text{O}_x$, where x covered the range of 0 ~ 0.8 depending upon the initial composition ratio UO_2/UC or UO_2/UC_2 .

The lattice parameter of the $\text{UC}_{1-x}\text{O}_x$ decreased with the increase in x

* 難波 慎吾, 井本正介, 佐野 忠雄: $\text{UC}_{1-x}\text{O}_x$ の生成, 本誌, 3, No. 6, 457 (1961) を $\text{UC}_{1-x}\text{O}_x$ に関する研究, (Ⅰ) とする。

** 大阪大学 工学部原子力工学教室 (Dept. of Nucl. Engng., Faculty of Engng., Osaka Univ.)