

# MOX燃料의 技術開發

## — 設計 및 核特性 —

플루토늄을 氧化物의 형태로 우라늄 氧化物과 혼합하면 混合氧化物(Mixed Oxide : MOX)燃料이 된다. MOX燃料은 高速爐用으로 개발되고 있으나 高速爐가 본격적으로 도입될 때까지는 熱中性子爐用으로 이용되고 있다. 高速爐와 熱中性子爐에서는 燃料의 사용 조건이 크게 다르기 때문에 MOX燃料의 設計도 이에 따라 많은 차이가 있다.

### 1. MOX燃料의 核特性

#### 1.1 우라늄과 플루토늄의 核特性

輕水爐에서 사용되고 있는 우라늄燃料에는 核分裂性核種으로서 약 3%의 U-235가 포함되고 있으며 나머지는 거의가 U-238이다. 또한, 플루토늄에는 몇가지의 同位體가 있는데 통상 질량수가 238부터 242까지 5종류가 고려의 대상이 된다. 이중 질량수가 홀수의 것이 核分裂性核種이다.

#### (1) 斷面積

대표적인 핵분열성핵종의 核分裂斷面積을 그림 1에 표시했다. 轉水爐 및 ATR에서는 熱中性子領域의 중성자가 주요한 역할을 하기 때문에 이들의 斷面積은 수백바안의 값이 된다. 한편 高速爐에서는 高에너지의 중성자가 대상이 되기 때문에 核分裂斷面積은 수바안이 된다. 이것이 高速爐用燃料의 核分裂性物質의 濃度を 熱中性子爐用燃料보다 높게해야만 하는 이유의 하나이다.

Pu-239과 Pu-241의 熱中性子에 대한 단면적은 表 1에서와 같이 U-235보다 커지고 있다. 이것이 熱中性子爐에서 플루토늄을 이용할 경우 우라늄연료와의 出力값, 制御棒價에 대해서 고려해야 하는 이유이다.

#### (2) 遲發中性子比率과 即發中性子壽命

表 2에서와 같이 우라늄同位體에 비해 플루토늄同位體의 遲發中性子比率( $\beta$ )은 작다. 그러나 전형적인 輕水爐에서 우라늄爐心の  $\beta$ 에 비해 MOX燃料을 1/3程度 裝荷한 輕水爐 爐心の  $\beta$ 는 약 10% 감소하나, 燃燒末期에는 거의 같은 정도가 되어 큰 영향은 없다.

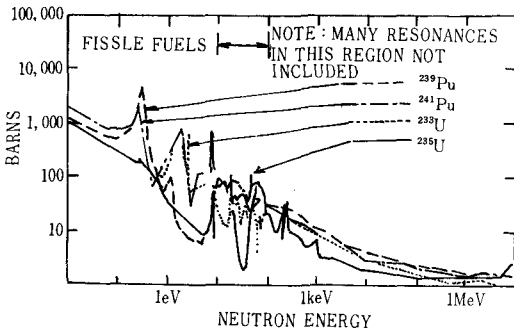
即發中性子の 壽命( $l_0$ )은 熱中性子爐와 高速爐에서는 많이 차이가 난다. 熱中性子爐의  $l_0$ 은  $10^{-6}$ 秒오더이나 高速爐에서는  $10^{-7}$ 秒의 오더이며, 또한 열중성자로서 우라늄대신에 플루토늄을 이용하면 플루토늄의 吸收斷面的이 크기 때문에  $l_0$ 은 10~30% 작아진다.

#### (3) 燃料燃燒

〈表 1〉 플루토늄 同位體의 斷面積(單位 : barn, 1 barn = 10<sup>-24</sup>cm<sup>2</sup>/nucleus)

Parameter	Thermal neutrons Eneutron=0.025eV						Fast neutrons Eneutron in fast reactor		
	U-235	Pu-238	Pu-239	Pu-240	Pu-241	Pu-242	U-235	Pu-239	Pu-240
$\sigma_c = \sigma_f \div \sigma_c$	678 ± 1.9	420	1012 ± 4.1	281	1375 ± 8	30	1.65	2.11	0.5
$\sigma_f$ fission	580.2	17	741.6	0.03	1073	< 0.2	1.40	1.85	~0.2
$\sigma_c$ capture	98.3	403	271.3	281	368.1	30	0.25	0.26	~0.3
$\alpha = \frac{\sigma_c}{\sigma_f}$	0.1694	23.7	0.3659	~9400	0.3654	> 150	~0.18	0.118	~1.5
$\nu$	2.4229		2.8799		2.934		2.6	2.98	2.8
$\eta = \frac{\nu}{1-\alpha}$	2.0719	very small	2.1085	very small	2.149	very small	2.2	2.52	~1.9

〈그림 1〉 中性子 에너지와 核分裂斷面積



우라늄燃料과 MOX燃料에서는 연소에 따르는 反應度의 變化가 다르다. 그림2에서와 같이 MOX燃料은 우라늄燃料에 비해 연소에 의한 反應度劣化가 작기 때문에 이로 인해 MOX燃料이 共存하는 爐心에 대해 장기간에 걸친 反應度의 관리에 대해 고려할 필요가 있다.

1.2 各種 MOX 燃料의 特徵

(1) 轉水爐用 MOX 燃料

우라늄과 플루토늄의 核特性의 차에서 생기는 문제점을 해결하기 위한 구체적인 방법은 PWR와 BWR에서 약간의 차이가 있다. 이것은 PWR와 BWR에서는 制御의 方法이 다르기 때문이다.

PWR에서는 어느 위치에 裝荷된 燃料集合體 속에 직접 制御棒이 삽입되는 방식이며, BWR에서는 제어봉이 集合體의 바깥부분에 삽입되는 방식을 취하고 있다. 이 차이에서 集合體內

〈表 2〉 遲發中性子比率

Isotope	$\beta$
<sup>235</sup> U	0.0067
<sup>238</sup> U	0.0164
<sup>239</sup> Pu	0.0022
<sup>240</sup> Pu	0.0029
<sup>241</sup> Pu	0.0054
<sup>242</sup> Pu	0.0051

\* Note : These values are intended as a rough guide since data strongly dependent on construction details and physical characteristics of fast reactors (size, geometry, coolant, structural materials, etc.), construct

및 集合體사이의 出力피크 및 制御棒價의 감소를 허용범위에서 억제하기 위해 PWR와 BWR에서는 集合體內의 燃料棒의 배치 및 集合體의 爐心配置가 다르게 된다. PWR에서는 all-Pu 集合體라 불리며, 集合體內의 연료봉 모두를 MOX燃料로 하고 제어봉은 우라늄 집합체내에 배치하는 方法이 일반적이다. 한편 BWR에서는 island型集合體라고 불리며, 集合體의 중앙부에 MOX燃料를 배치하고 그 外側에 우라늄燃料를 배치함으로써 制御棒價의 감소를 억제하는 方法이 고려되고 있다.

(2) ATR用 MOX 燃料

ATR에서는 熱中性子が 주로 重水속에서 減速되어 연료집합체의 外側에서 돌아오므로 연료집합체내의 熱中性子束 分布는 中心을 향해 낮아지게 된다. 따라서 집합체내의 出力과 燃

燒度를 평균화하기 위해 核分裂生成物을 집합체 내에서 2종류로 조정하고 있다. 또 제어봉과 연료에서부터 떨어져 있는 重水속에 삽입되어 중성자는 비교적 긴 거리를 움직여서 감속되므로 어떤 연료를 사용해도 制御棒價는 그다지 변하지 않는다. 중성자는 約 60°C의 重水속에서 감속되므로 ATR用燃料은 다음과 같은 특징을 가진다.

(ㄱ) Pu-239와 Pu-241를 U-235와 대체, 이용할 수 있다.

(ㄴ) Pu에 의한 共鳴吸收의 영향을 비교적 받기 어렵다.

따라서 ATR에 플루토늄을 이용할 경우 核分裂性 플루토늄과 U-235의 畵을 일정하게 하면 플루토늄의 同位體組成에 그다지 영향을 받지 않고 동일한 燃燒度를 얻을 수 있다고 생각된다.

(3) FBR用 MOX燃料

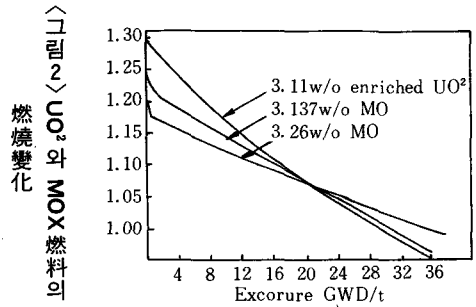
FBR爐心燃料은 MOX燃料로서 爐心 주변에 배치되어 爐心부터 새나오는 중성자를 포획하여 U-238을 플루토늄으로 전환하기 위한 블랭킷 燃料領域을 가진다. 爐心 MOX燃料의 核分裂性 核種濃度는 輕水爐用燃料의 5~6배이다. 高速爐에서는 熱中性子爐와는 달리 집합체내의 중성자속분포가 거의 均質이기 때문에 집합체내는 한 종류의 核分裂性物質濃度로 되어있다.

2. 熱中性子爐用 MOX燃料의 設計

2.1 ATR用 MOX燃料의 設計

(1) 核燃料集合集體

ATR燃料集合集體는 原子爐가 壓力管型爐이기 때문에 圓柱狀構造로 되어 있다. ATR實証爐 燃料를 예로 들어보면 집합체는 36개의 燃料와 1개의 스페이서支持管, 上下타이플레이트 및 燃料사이의 간격유지를 위한 12개의 스페이서로 구성되며, 중간층 6개의 타이로드燃料要素를 上下타이플레이트에 연결, 고정해서 조립된



다. 스페이서는 薄肉圓筒面에 슬리트모양으로 용수철을 잘라 스포트용접으로 결합한 소위 링素子型 스페이서이다. 燃料은 外徑이 경수로연료보다 약간 클 뿐 기본적인 구조는 같다.

(2) 設計基準

燃料設計는 플랜트의 성능, 특히 로심성능 및 설비진체의 설계와 상호 모순이 없게 조화되며 또한 安全性, 健全性 및 信賴性이 사고시를 제외한 모든 원자로운전상태에서 燃料壽命期間中 유지되도록 정해진 설계기준에 따라 행해진다. 이 설계기준은 熱的인 것과 기계적인 것으로 나누어진다.

○ 熱的設計基準 :

(ㄱ) 沸騰遷移에 대해 충분한 여유를 가질 것. 熱的여유를 평가하는 지표로서 限界出力比 (CPR)를 사용한다.

(ㄴ) 펠릿의 중심온도는 溶融點以下일 것.

○ 機械的設計基準 :

(ㄱ) 피복관의 圓周方向塑性歪가 1% 이하일 것.

(ㄴ) 펠릿에 의한 지지 및 內壓을 무시하더라도 피복관은 座屈하지 않을 것. 또 外壓을 무시하더라도 FP가스 등의 內壓에 의해 파손되지 않을 것.

(ㄷ) 照射效果, 腐蝕, 變動荷重 등 燃料壽命에 미치는 영향을 고려해도 피복관의 파손, 과도한 진동, 壓延 등을 방지할 수 있는 설계일 것.

(ㄹ) 피복관의 應力은 기준치 이하일 것.

(口) 累積疲勞사이클은 設計疲勞壽命을 넘지 말 것.

설계평가를 할때는 사용재료, 사용온도, 압력 조건, 照射效果 등을 고려해야 한다.

(3) ATR燃料設計

이 설계의 기본은 설계조건, 燃料仕様, 熱水力計算結果 등을 入力해서 燃料壽命中の 燃料舉動을 追跡計算하여 燃料온도, 內壓 등의 특성을 解析함과 함께 應力解析 등의 強度計算을 하여 燃料의 舉動解析은 펠릿유효길이를 軸方向 및 半徑方向으로 분할해서 계산한다. 또 照射時間에 따라서 軸方向의 각 메쉬마다에 燃料온도, 갭, 컨덕턴스, FP가스放出, 펠릿 및 피복관의 변형 등을 계산하고 이어서 燃料전체길이의 플레넘, 體積, 內壓 등을 계산한다.

彈性應力解析은 定格時와 함께 과도상태의 가장 엄한 조건하에서 행해지며, 피복관의 腐蝕에 의한 살두께(肉厚)감소도 고려해 넣는다. 歪解析에서는 燃料의 연소기간을 통해서 피복관에 생기는 圓周方向 永久歪를 구한다. 계산에서는 피복관은 完全軸對稱性을 가진 것으로 가정하고, 歪計算은 最高燃燒率의 燃料로서 실시한다. 疲勞解析에서는 ASME Sec. III에 의거한 방법에 의해서 평가하며, 照射한 設計疲勞曲線을 이용해서 累積損傷率을 구한다.

(4) 設計의 特徵

기본적으로는 경수로燃料의 설계방법과 같으나 MOX燃料設計에서 특징적인 것은 아래와 같은 것이 있다.

(ㄱ) 플루토늄濃縮에 기인하는 燃料펠릿의 物性變化

(ㄴ) 플루토늄 스포트

(ㄷ) 核分裂性物質의 濃縮率

(ㄱ)의 物性變化에 관해서는 플루토늄濃縮率은 約 3.5wt% 以下이며 이정도의 濃縮率에서는 熱傳導度, 熱膨脹率, 스웰링, FP가스放出率 등의 값은 UO<sub>2</sub>燃料과 큰차가 없음이 여러

가지 실험데이터에 의해 제시되고 있다.

(ㄴ)의 플루토늄스포트란 PuO<sub>2</sub>粉末과 UO<sub>2</sub>粉末을 기계적으로 혼합할때 생성하는 PuO<sub>2</sub>濃도가 높은 부분을 말한다. 이 크기는 熱中性子爐用燃料의 경우 通常 200μm이하이며, 解析의 결과 燃料설계상 꼭 고려해야 할 필요는 없는 것으로 나타났다.

(ㄷ)은 MOX燃料의 製造에서 PuO<sub>2</sub>와 UO<sub>2</sub>의 혼합율은 통상 우라늄과 플루토늄의 核分裂性物質量을 일정하게 하는 방법으로서 행하고 있다. 플루토늄의 同位體組成은 使用後核燃料의 燃燒度, 原子爐의 종류 등에 따라 다르며, 再處理해서 얻어지는 플루토늄의 同位體組成은 변동한다. 또한 Pu-241은 約15年の 半減期로서 붕괴하므로 이로 인한 각 동위원소에 대한 核的인 等價性에 대한 공통의 尺度를 만들어 이 尺度에 따라서 플루토늄濃縮率을 정의하는 방식이다.

2.2 輕水爐用燃料의 設計

(1) 燃料集合體의 概要

輕水爐用 MOX燃料集合體는 통상의 BWR 또는 PWR燃料의 구조와 전혀 다른 구조를 가지고 있다. 輕水爐用 MOX燃料가 통상의 경수로 燃料와 다른 것은 燃料펠릿의 조성뿐이다. 이들의 集合體內 燃料配置設計例를 그림 3 및 그림 4에 표시한다.

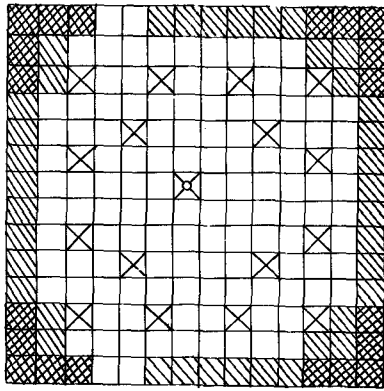
〈그림 3〉 MOX 燃料 設計例 (BWR)

制御棒側

4	3	2	1	1	2	3	4
3	1	G	P <sub>2</sub>	P <sub>2</sub>	G	1	3
2	G	P <sub>1</sub>	P <sub>1</sub>	P <sub>1</sub>	P <sub>1</sub>	G	2
1	P <sub>2</sub>	P <sub>1</sub>	P <sub>1</sub>	W	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	1
1	P <sub>2</sub>	P <sub>1</sub>	W	P <sub>1</sub>	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	1
2	G	P <sub>1</sub>	P <sub>1</sub>	P <sub>1</sub>	P <sub>1</sub>	G	2
3	1	G	P <sub>2</sub>	P <sub>2</sub>	G	1	3
4	3	2	1	1	2	3	4

1, 2, 3, 4 : 低濃縮UO<sub>2</sub> 燃料棒  
 P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub> : MOX 燃料棒  
 G : Gadolinium 燃料棒  
 W : Water rod

〈그림 4〉 MOX 燃料 設計例 (PWR)



- ☒ 制御棒案内
- ☒ 計測用案内
- 高濃縮燃料棒
- ▨ 中濃縮燃料棒
- 低濃縮燃料棒

(2) 燃料設計

輕水爐用 MOX 燃料의 경우 플루토늄濃縮度는 ATR 燃料보다 약간 높으나 플루토늄濃縮度에서 物性的으로는  $UO_2$  燃料과 큰 차는 없으며, 기본적으로 통상의 경수로연료와 같은 설계 방법이 사용되고 있다.

3. FBR 用 MOX 燃料의 設計

3.1 燃料集合體의 概要

FBR 用 燃料은 發熱을 분담하는 爐心 燃料과 增殖을 분담하는 블랭킷 燃料로서 나누어진다.

爐心 燃料集合體는 爐心 燃料의 增殖性을 높이기 위해 最密配列, 즉 正三角으로 配列하고 上部에 핸들링 헤드, 下部에 엔터런스 노즐을 적합한 나팔관에 수납한 것이다.

爐心 燃料은 混合氧化物 펠릿을 軸方向 블랭킷용 2 酸化우라늄 펠릿과 함께 被覆管內에 밀봉한 것으로 上部에는 핵분열 생성가스를 모으는 플레넘이 설치되어 있다.

燃料은 下端만 支持部에 의해 고정되어 있고, 인접한 연료사이의 간격은 와이어스페이스 또는 그리드스페이스에 의해 유지된다. 나팔관은 단면이 正六角形의 단단한 管으로 燃料冷却을

위한 流路를 확보함과 함께 연료를 보호하는 기능을 가진다.

핸들링헤드는 나팔관의 上端에 용접, 고정되어 있으며, 나팔관의 下端에 고정되어 있는 엔터런스 노즐에는 爐心 支持板側의 구조와 함께 冷却材의 流量調節을 행하는 冷却材流入孔이 여러개 설치되어 있다.

3.2 設計基準

FBR 燃料의 設計基準는 輕水爐의 경우의 기본적으로 큰 차는 없으나 사용온도가 높았기 때문에 크립破損防止에 중점을 두고 있는 것이 특징으로 볼 수 있으며, 그 외에도

- ① 펠릿의 중심온도가 溶融點以下일 것,
- ② 燃料被覆管의 부풀음이 과대하지 않을 것,
- ③ 被覆管의 應力은 許容應力以下일 것,
- ④ 被覆管은 內壓에 의해 크립破損하지 않을 것,
- ⑤ 累積疲勞사이클은 設計疲勞壽命을 넘지 않을 것,
- ⑥ 輸送, 取扱中에 가해지는 荷重에 견딜 것 등이 고려되어야 한다.

여기서 ②의 제한은 피복관이 스웰링이나 照射크립으로 인해 집합체의 除熱效率을 현저하게 劣化시키지 않게하기 위해 설치하는 것이며, 熱中性子 燃料에서 1% 基準(被覆管의 損傷을 방지하기 위한 기준)과는 차이가 있다.

3.3 FBR 燃料設計

高速爐 燃料設計에서는 연료집합체, 爐內構造物 등의 設備仕樣에 대해 爐心의 核設計, 熱設計 및 動特性에서 얻어지는 자료로서 燃料 및 燃料集合體의 特性을 평가한다.

燃料設計에서는 高溫 高出力下에서의 사용조건을 감안해서 燃料中心最高溫度, 高速中性子照射에 기인하는 스웰링에 의한 피복관의 外徑增加, 高燃燒度에 의한 FP가스에 의한 內壓의 상승 및 高溫使用時 크립壽命과 피복관의 應力 및 비틀어짐(歪) 등과 疲勞사이클에 대해 평가할

필요가 있다.

燃料集合體設計에서는 고온의 流動나트륨속에서 耐久試驗 등의 爐外評價試驗結果에 따른 設計모델에 의한 力學的評價, 즉 집합체의 각 부분에 미치는 應力 및 나팔관의 變形에 대해서 평가하여 그 健全성을 확인할 필요가 있다.

### 3.4 FBR燃料設計의 特徵

高速爐의 MOX燃料과 輕水爐의 UO<sub>2</sub> 燃料의 사용조건 등을 表3에 표시했다.

高速爐燃料은 輕水爐燃料에 비해 피복관에 스텐레스鋼을 사용하고 있는 것과 펠릿의 密度가 상당히 낮다는 것이 특징이다. 스텐레스鋼의 사용은 高速爐에서는 高速中性子에 의한 핵분열을 이용하므로 輕水爐에서와 같이 中性子吸收를 걱정하지 않아도 되기 때문에 高溫에 강하고 또한 충분한 강도를 가지고 있다는 점에서 재료로 선정되고 있다. 또한 펠릿의 密度가 낮은 것은 高速爐에서는 輕水爐에 비해 약 3배 정도 燃燒도가 높기 때문에 펠릿의 스웰링을 방지하고, 펠릿의 스웰링을 완화시킬 수 있기 때문이다.

高速爐燃料에서 플레넘의 길이를 충분히 잡고 있는 이유는 高燃燒도에 따르는 플레넘속의

〈表3〉 高速爐燃料과 輕水爐燃料의 比較

		高速爐	輕水爐
燃 燃 仕 樣	펠릿密度(TD)	(Pu, U)O <sub>2</sub> (85%)	UO <sub>2</sub> (95%)
	被覆管	SUS 316	Zr
	燃料펠릿直徑	6.5mm	9~13mm
	被覆管두께(t/D)	~0.08	0.06~0.07
	펠릿被覆管갭(g/D)	~0.03	0.02~0.025
使 用 條 件	플레넘對 爐心길이비	~1.2	0.05~0.1
	冷却材入口溫度	~400°C	280°C
	被覆管最高溫度	~675°C	~350°C
	冷却材壓力	~8kg/cm <sup>2</sup>	70~160kg/cm <sup>2</sup>
	燃料最高內壓	70~kg/cm <sup>2</sup>	~70kg/cm <sup>2</sup> sec
件	高速中性子束	~4×10 <sup>15</sup> n/cm <sup>2</sup> sec	<10 <sup>14</sup> n/cm <sup>2</sup> sec
	出力密度	~300kw/l	50~100kw/l
	爐心平均燃燒度	~80,000Mwd/t	~30,000Mwd/t
	冷却材의 種類	Na	水

로의 FP가스의 多量放出에 의한 管内壓의 상승을 완화시키기 위한 것이다. 高速爐燃料의 사용조건을 輕水爐燃料과 비교했을때의 차이점을 살펴보면,

- ① 高速中性子束의 조건에서 사용된다.
- ② 出力密度가 크다.
- ③ 到達燃燒도가 높다.
- ④ 冷却材로서 나트륨을 사용한다.
- ⑤ 低壓에서 사용되는 점 등 이다.

이로 인해 高速爐의 燃料舉動은 輕水爐燃料와는 다르다. 전형적인 高速爐燃料의 舉動을 살펴보면 다음과 같다.

高速爐燃料에서는 연료펠릿내의 溫度不均配가 크기 때문에 輕水爐燃料에 비해 製造時 보이드의 蒸發-凝縮作用에 의한 中心部으로의 移動速度가 크고 照射外 초기단계에서 中心空孔의 형성 및 연료의 柱狀晶, 等軸晶의 形成이 일어난다. 燃燒의 진행과 함께 연료의 스웰링 등에 의해 燃燒被覆管과 펠릿의 갭폭은 점점 작아져서 접촉하게 된다. 接觸壓은 연료온도가 높기 때문에 연료의 크립이 완화되어 그다지 큰값은 갖지 않는다. 또 피복관에 사용되고 있는 스텐레스鋼의 熱膨張率은 輕水爐에서 사용되고 있는 지르칼로이에 비해 3배 가까이 크기 때문에 過渡時 연료와 피복관의 熱膨張差에 의한 펠릿·被覆管機械的相互作用(PCMI)은 高速爐에서는 경미한 것이 된다. 또한 燃燒의 진행에 따라 FB가스放出에 의해 內壓은 상승하고 高溫部の 被覆管內面に 세슘, 텔루륨 등의 FP에 의한 腐蝕이 일어난다.

照射末期에서 FP가스의 放出은 90% 이상이 되며, 內壓은 최종적으로 約70kg·cm<sup>2</sup>에 달하게 된다. 內壓에 의한 照射크립變形과 함께 피복관의 스웰링이 현저해지며, 燃料의 外徑이 增加된다. 高速爐의 燃料設計에서는 사용조건, 照射下의 舉動에서의 輕水爐燃料과의 차이를 충분히 배려하여 設計를 진행시킬 필요가 있다.