

輕水爐燃料의 高燃燒化

＝ 加熱되는 燃燒度增加 競爭 ＝

1. 概 要

世界的으로 核燃料의 高燃燒化 즉, 燃燒度 伸長에 관심이 높아져가고 있다.

燃燒度 伸長에 관심이 모여지는 이유는 核燃料 사이클의 경제성향상, 특히 운전사이클 기간의 연장에 따르는 燃料사이클비용을 검토한 결과 사용한 燃料排出量의 低減을 포함, 경제적 효과가 뚜렷해졌기 때문이다. 특히 美國에서는 核燃料의 再處理에 따라 소위 One-Through 方式을 생각하고 있기 때문에 燃燒度 伸長에 더욱 정열을 쏟고 있다.

현재 輕水爐에서의 取出燃燒도는 美國의 BWR에서 平均 29,000MWd/t, PWR에서 35,000MWd/t 정도이다. 이에 대해 美國의 에너지省(DOE)에서는 18개월 사이클로 BWR 50,000MWd/t, PWR 55,000MWd/t을 목표로 하고 있다. 이를 위해 DOE가 후원하여 다수의 發電所에서 燃燒度伸長의 實證試驗이 행해져 왔다.

또 이들의 계획 이외에도 美國에서는 750體以上の PWR燃料가 36,000MWd/t以上으로 사용되고 있으며, 燃料에는 전혀 파손이 발생하지 않았다고 한다.

한편 日本에서는 再處理를 전제로 하고 있으므로 경제성, 자원의 유효이용 등을 고려해서 高燃燒化의 검토가 추진되고 있다. 현재 日本

에서의 안전심사에서 인정되고 있는 燃燒度의 상한선은 BWR에서 40,000MWd/t, PWR에서는 39,000MWd/t인데, 이것을 1990년도 경에는 BWR경우 50,000MWd/t, PWR경우 48,000MWd/t로 증대시킬 계획으로 되어 있다. 이와 같은 高燃燒化에 따라 原子力發電所의 連續運轉期間도 현재의 11개월 정도에서 美國과 같이 15~18개월로 長期化를 도모할 예정으로 되어 있다. 西獨이나 프랑스에서도 이같은 연료의 燃燒度伸長이 계획되고 있으며, 이미 이와 관련된 많은 실험이 행해져 왔다.

燃料의 高燃燒度化에 대해서는 기술적으로는 燃料特性의 濃縮度の 증가에 따르는 爐心特性의 검토나 안전평가상 중요한 核的, 熱水力的 檢討가 필요하다. 이에 本稿에서는 燃燒度伸長의 기본이 되는 核燃料의 高燃燒時에서의 거동에 대해서 그 현황과 전망에 대해서 언급하기로 한다.

2. 燃料温度

核燃料內的 온도분포는 연료의 熱膨脹을 지배하여 核分裂生成物의 移行과 放出에 영향주며 냉각재 상실사고 등의 연료온도평가에 중요한 연료봉의 축적 에너지를 결정한다. 연료중심 온도는 일반적으로 tungsten, rhenium 합금의 熱

電對를 사용, 측정하여 10,000MWd/t 정도의 燃燒度까지는 많은 측정 데이터가 보고되었으나, 20,000MWd/t를 넘는 燃燒度에서의 측정은 그다지 없다. 연료중심온도에 큰 영향을 주는 것은 연료펠릿과 被覆管사이의 열전달이다.

그림 1은 高燃燒燃料棒의 중심온도와 線出力密度와의 測定例를 나타낸 것으로 약 24,000MWd/t 照射後의 중심온도는 照射開始前에 비해 높은 것을 알 수 있다. 이것은 照射中에 FP가스가 연료봉내에 방출되어 이 FP가스의 熱傳導度는 제조시에 연료봉에 봉입하는 He가스보다 현저히 낮기 때문에 갭부분에서 큰 온도차가 생기기 때문이다. 그림속에 點線으로 표시된 것은 일본 原研의 연료거동 코드 FEMAX I-III로서 계산한 결과인데, 측정치와 좋은 일치를 보여주고 있다.

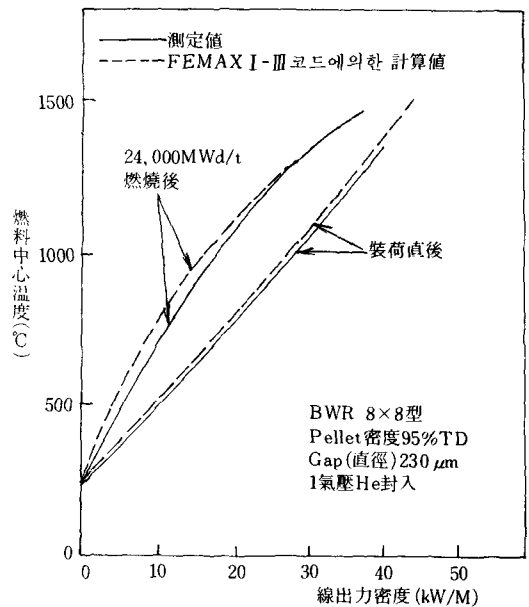
연료펠릿과 피부의 갭을 75 μ m로 작게한 연료봉을 最高 約350W/cm에서 약36,000MWd/t까지 照射했을 경우 중심온도 측정치는 照射開始前에 비해 거의 변화가 없다. 이것은 EP가스가 거의 방출되지 않았기 때문이다. 40,000MWd/t를 넘는 高燃燒度에서의 데이터는 발표된 것이 없으나 高燃燒에 의한 FP가스가 방출된다 하더라도 우라늄이나 초우라늄원소의 3중분열에 기인하는 He가스에 의해 갭부분의 열전달 개량으로 처리 가능하다.

高燃燒度에서의 연료중심온도의 측정은 熱電對를 포함시킨 短尺燃料를 發電爐에서 高燃燒度까지 照射하고 그후 試驗爐에서 再照射하여 측정하는 방법과 이미 發電爐에서 高燃燒度까지 照射한 연료봉에 새 熱電對를 再計裝하는 방법이 있다.

3. FP가스 放出

펠릿에서 연료봉내로의 FP가스방출은 안전평가상 만일의 사고시에 연료 플리넘 등에 축적된 방사성가스가 연료과손과 함께 로내에 방

(그림 1) 燃料中心溫度에 미치는 燃燒度の 效果

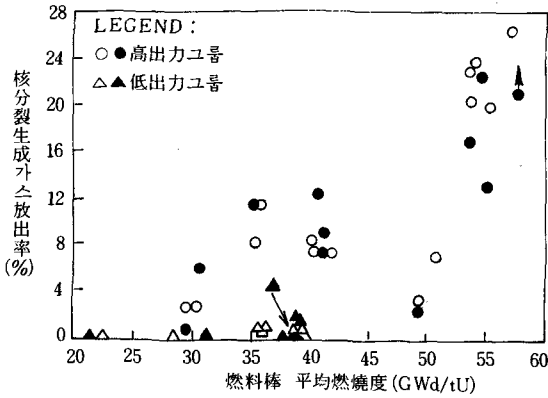


출되므로 사고시의 被曝量評價에 중요하며, 연료설계상 燃料棒 內壓增加에 따른 被覆應力이나 歪의 증가와 펠릿과 被覆管사이의 열전달에 영향을 미치기 때문에 중요하다. 또 PWR 燃料設計에서는 內壓은 外壓을 넘지 않게 하고 있다.

FP가스방출에 영향을 미치는 주된 因子는 溫度 즉, 燃料出力, 펠릿의 結晶粒徑이나 氣泡分布 등의 연료특성 및 燃燒度가 있다. 燃燒度の 효과에 대해서는 高速爐의 우라늄-플루토늄연료에서는 현저하게 認知되어 있으며, 美國의 核規制委員會에서는 이들로 부터 경험적으로 유도한 관계식에 의해 輕水爐에서도 20,000MWd/t 이상에서의 燃燒度에 의한 방출을 고려하도록 요구하고 있다.

최근 發電爐에서 高燃燒度까지 사용한 연료의 FP가스 방출율이 다수 측정되었다. 高燃燒度까지 사용한 PWR燃料棒에서 측정한 放出率을 그림 2에 표시했다. 이 경우 FP가스방출율에는 燃料出力과 燃燒度の 兩因子가 주로 영향을 미치고 있다. 즉 출력이 낮은 그룹 130~220 W/cm의 방출은 낮고 燃燒度の 효과도 40,000M

(그림 2) Zorita (PWR) 爐에서 使用한 高燃燒度燃料
料부터의 FP가스放出率測定데이터



Wd/t부근에서 약간 나타날 정도인데, 출력이 높은 그룹 170~320W/cm에서는 燃燒度の 영향이 현저하다(그림 3). 연소가 진행되면 FP가스 방출율은 대체로 증대하는 것 같이 보이나 出力依存에 의해 설명할 수 있다고 하고 있다. 그림 2의 PWR棒의 경우도 燃燒度依存의 영향과 같이 보여지는 것도 어느정도는 出力依存으로서 설명할 수 있다. 이들의 보기는 연료를 發電爐에서 사용했을 경우와 高燃燒度까지 보통으로 사용한 후 出力急昇試驗에서 다시 높은 출력으로 상승시켰을 경우에는 방출율에서 燃燒度效果가 명백해지는 경우가 많다. 그림4에 그 보기를 나타냈다. 즉 1사이클(約10,000MWd/t)照射에서 4사이클(約45,000MWd/t)로 燃燒度가 증가하면 방출율은 높아진다는 것을 알 수 있다.

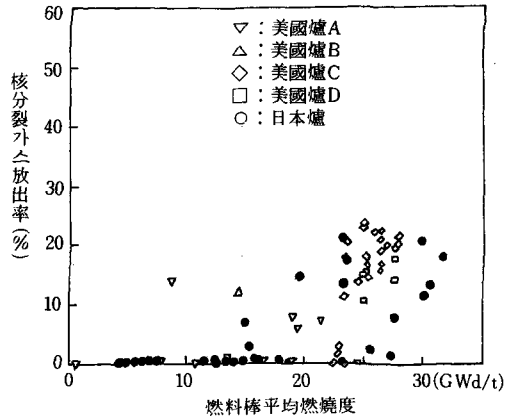
出力急昇 등 과도시의 FP가스방출에 대해서는 다음의 점을 고려할 필요가 있다.

- ㄱ) 출력과도에 의해서 생긴 熱應力이나 結晶粒界氣泡의 압력상승에 의한 粒界의 微細크랙 등에 기인하는 급격한 FP가스의 방출
- ㄴ) 結晶粒成長에 따르는 방출

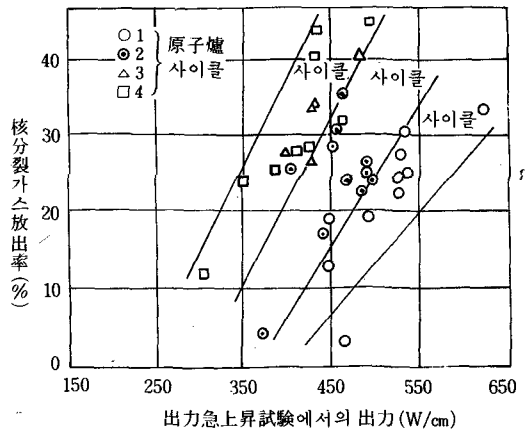
4. 燃料變形

照射下에서의 연료봉에 생기는 주된 변형은 燃料棒成長, 燃料棒灣曲, 크립다운 등이다. 燃料

(그림 3) 日本에서의 BWR信賴性 實證試驗 및 美國發電爐에서 얻어진 가스放出率 測定值



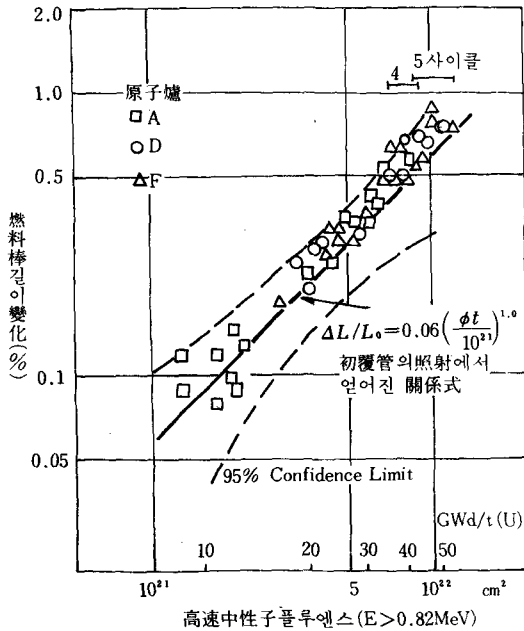
(그림 4) 發電爐 1사이클(10,000MWd/t)에서 4사이클(45,000MWd/t)照射後의 出力急上昇에 의한 FP가스 放出暴動



棒成長의 대표예로서 그림 5에 KWU社 PWR燃料棒에 관한 것을 표시했다.

질리카로이관은 異方性이 있으므로 照射下에서 照射成長이 생기며 高燃燒度에서의 棒成長은 照射成長보다 약간 큰 데, 이것은 펠릿·被覆力學的 상호작용의 영향으로 여겨지고 있으므로 燃燒度を 伸長시킬 경우 설계에서 성장을 고려해 둘 필요가 있다. PWR에서는 燃料棒에 灣曲이 생기는 것이 있다. 그 주된 원인은 燃料棒과 制御棒 案内管의 照射成長差에 의해 燃料棒에는 支持格子의 탄력으로 軸方向으로 壓縮應力이 작용하여 휘어지는 것이다. 支持格子의

〈그림 5〉 고속중성자照射量과 관련된 PWR 燃料棒길이의 변화

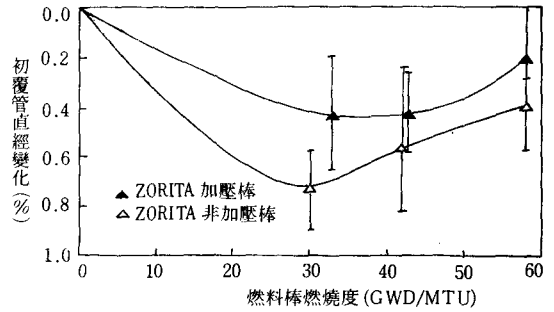


拘束력은 照射量增大와 함께 탄력의 완화 및 크립다운에 의한 燃料棒의 직경감소로 인해 서서히 저하한다. 이로 인해 灣曲의 진행은 약 10,000 MWd/t 정도에서 飽和의 경향을 보인다. 즉 高燃燒度에서 燃料棒의 灣曲은 문제가 되지 않는다.

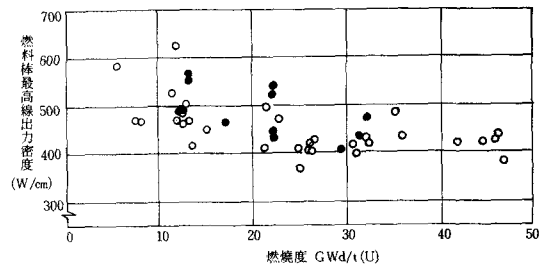
크립다운이란 펠릿과 被覆管사이의 갭이 있는 상태에서 外壓이 內壓보다 높은 경우 被覆管의 단면이 거의 원형을 유지한 채 크립에 의해 外徑이 감소하는 현상을 말한다. 그림6에 PWR의 크립다운 보기를 실었는데 30,000MWd/t 과 40,000MWd/t에서 펠릿과 피복관이 접촉하여 被覆管徑은 增大된다. 이것은 펠릿의 스웰링에 의한 현상이다. 현재 사용하는 PWR燃料는 加壓型이며, 크립다운 되는 경우는 적다. 그리고 UO₂ 펠릿의 燃料棒內 體積은 사용초기에 燒結에서 감소한 후 스웰링이 증가한다.

發電爐의 통상 사용조건에서 스웰링율은 10,000MWd/t當 1%이하이며, 30,000~40,000MWd/t程度의 照射에서 제조시의 체적으로 되돌아간다. 高温에서의 스웰링율은 크나 펠릿과 被

〈그림 6〉 PWR 燃料棒의 크립다운예



〈그림 7〉 出力急上昇時 燃料棒의 燃燒度 및 最高線出力密度의 破損에 대한 影響



覆管의 力學的 相互作用이 있으면 被覆管에 구속되어 低温 스웰링정도로 되는 것으로 알려져 있다.

5. PCI (펠릿·被覆相互作用)

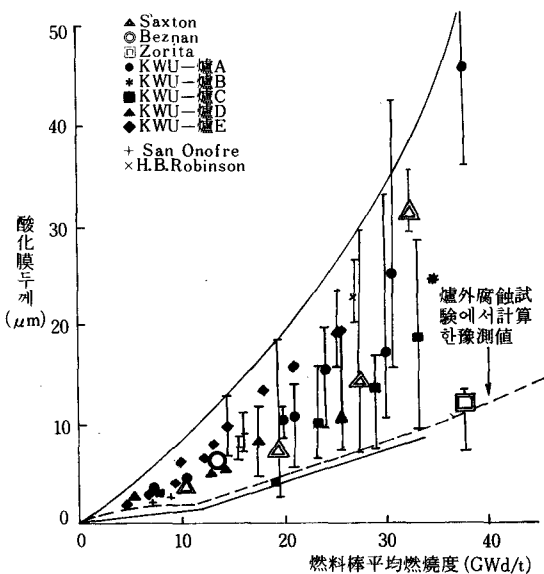
輕水爐에서는 장기간 낮은 출력으로 사용한 소위 베이스照射한 연료봉을 설계출력범위라 해도 급격히 출력상승시키면 파손되는 경우가 많다. 이것은 출력급상승시에 펠릿과 被覆管의 역학적 상호작용에 의해서 생긴 應력과 연료봉내에 방출된 沃素化合物을 주로 하는 腐蝕性物質에 의해 갈라짐이 생기기 때문이 아닌가 라고 생각되고 있다. 이와 같은 종류의 파손을 PCI破損이라고 불려지고 있다.

PCI에 미치는 燃燒度의 효과를 나타내는데는 그림7에서와 같이 縱軸에 急上昇時 出力을 橫軸에 燃燒度を 취하여 출력상승에 의한 연료파손의 경계, 즉 파손문턱치의 燃燒度依存성을 나

타내는 것이 보통이다. 파손문턱치는 20,000~30,000MWd/t까지는 燃燒度와 함께 저하하는 경향을 나타내나 이 이상에서는 문턱치의 저하가 진행되는 일이 없다. 40,000MWd/t를 넘는 燃燒度에서의 실험이 스웨덴, 프랑스에서도 진행중이다. 出力急上昇幅에 대해서도 최고 출력과 같은 경향이 보여지고 있으며, 이와 같은 PCI 파손문턱치는 出力急上昇後 長時間, 즉 10시간에 걸쳐 保持했을 경우의 것이나 短時間保持의 경우도 燃燒度 및 출력급상승조건에 따라서는 被覆内面に 未貫通크랙이 생긴다. 스웨덴에서는 약 30,000MWd/t에서 照射한 燃料봉을 最高 480 W/cm로 出力急上昇시켰던 바 10초 정도의 保持時間에서 被覆内면에 未貫通크랙의 발생이 보여졌다.

發電爐에서는 운전시의 이상한 過度變化時에서도 이와 같은 높은 출력에 이르는 일은 없으나 高燃燒燃料의 過渡時에서의 被覆損傷의 가능성과 그 過渡를 경험한 燃料의 계속사용시 健全성에 대해서는 스웨덴이나 벨기에 등에서 국제계획이 진행중에 있다.

(그림 8) PWR 燃料棒 最高腐蝕두께와 燃燒度의 關係



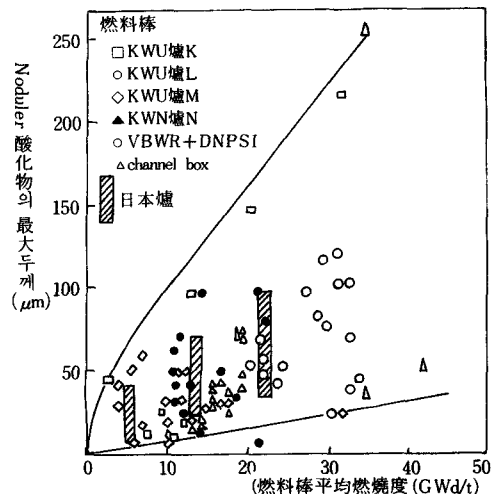
6. 腐蝕

지르칼로이被覆管의 腐蝕은 수질이나 사용조건에 영향을 강하게 받는데, 사용시간과 함께 腐蝕量은 증대되기 때문에 伸長燃燒度에서 燃料수명을 제한하는 因子로 평가되고 있다.

爐内에서의 지르칼로이의 腐蝕은 PWR의 경우 균일한 두께의 酸化膜이 表面을 덮는 형태의 腐食이다. 發電爐 燃料棒腐食의 燃燒度依存性を 그림 8에 표시했다. 爐마다 또는 同一爐에서도 일정하지 않은데 1차냉각수의 수질이나 수온 등으로는 설명할 수 없다고 하고 있다. 또 圖中 點線으로 표시한 것은 爐外試驗에서 얻어진 것으로 爐内에서는 腐蝕에 加速效果가 있음을 알 수 있다.

水素吸收에 대해서는 약 50,000MWd/t로 사용한 燃料봉의 水素含有率이 最高 約 400ppm이며, 水素吸收에 의한 脆化는 문제가 되지 않는다. BWR의 경우는 noduler腐蝕이라 칭하는 것이 주인데, 작은 렌즈모양의 腐蝕生成物이 생긴다. BWR發電爐의 燃料봉에서 측정된 noduler腐蝕의 燃燒度依存性を 그림 9에서 표시한다. PWR의 경우와 마찬가지로 고르지못하나 그 원인은 아직 정확히 규명되지 않았다. noduler腐蝕은 爐外에서는 500°C程度 以上の autoclave 시

(그림 9) Noduler腐蝕의 最大두께



힘에서 爐內와 유사하게 발생시킬 수 있으며, 被覆管 製造時의 열처리에 의해서 개선할 수 있음이 확인되고 있고, 爐內에서의 개량효과에 대해 實證이 추진되고 있다.

7. 燃料改良

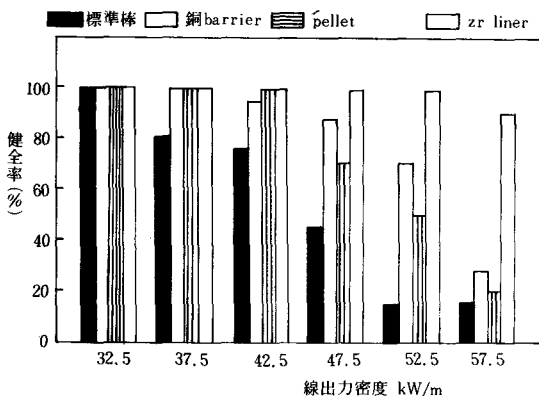
BWR에서는 대별해서 3종류의 改良型이 있다. 즉 美國 GE社나 일본의 연료메이커에 의한 Zr라이너燃料, 西獨 KWU社 등에 의한 9×9型 集合體, 스웨덴 아세아 아톰社에 의한 水十字型 集合體이다.

PWR에서는 美國 WH社, B&W社, CE社 등에 의해 中性子吸收를 작게하기 위한 支持格子의 Zr化, 燃料集合體의 軸方向變形을 작게하기 위한 燒鈍 Zr制御棒 安內管의 사용, 再組立型 燃料體設計의 最適化가 추진되어 왔는데, 최근 WH社에서는 高燃燒化를 더욱 지향하는 VANTAGE 5型이라 칭하는 集合體를 研究하고 있다.

(1) Zr라이너 燃料

PCI대책으로서 개발되어 온 것으로 GE社에서는 Zr라이너연료와 내면에 구리를 도금한 銅배리어연료의 시험을 행하였고, 일본 메이커에서는 이들 외에 中空 펠릿연료도 함께 시험하고 있다. 이들의 시험연료봉은 약40,000MWd/t

〈그림 10〉 燃燒度 15~39GWd/t 燃燒한 燃料棒의 出力急上昇試驗에서의 健全率 比較 (非破損棒數/總數)



까지 發電爐에서 베이스照射한 후 試驗爐에서 出力急上昇試驗이 행해지고 있다. 이 결과를 그림 10에 표시했는데 急上昇時의 線出力이 높아짐에 따라 Zr라이너연료 이외의 健全率은 저하되었다.

GE社에서는 이미 美國 Quad Cities 2號의 연료의 48%를 이 Zr라이너연료로 하고 있으며, 爐內에서의 出力急上昇試驗도 행하여 연료의 健全性을 실증하고 있다. 燃燒度에 대해서는 1986년까지 38,000MWd/t를 달성할 계획을 세우고 있다.

(2) 9×9 燃料集合體

9×9設計의 기본적인 잇점은 線出力密度의 감소에 의한 연료온도의 저하와 棒表面積의 증가에 의한 冷却上 臨界出力의 증가이다. 따라서 爐運轉의 彈性性, 高燃燒度對應, 연료의 有效 이용 등을 도모할 수 있다고 하고 있다. 특히 高燃燒度化를 위해서는 標準燃料에 비해 FP가스 放出을 적게 억제할 수가 있고 表面熱流束도 약 11% 적어지므로 高燃燒時의 腐食도 억제할 수 있다고 한다. KWU社에서는 KBR-II에 約200體의 9×9燃料를 사용해서 實證을 추진하고 있다.

(3) SVEA 燃料

스웨덴의 아세아 아톰社에서는 BWR燃料格子內에 十字型의 water gap을 설치하여 SVEA라고 칭하는 연료를 개발했다. 갭內의 물은 沸騰하지 않으므로 減速材가 중래연료에 비해 보다 균일하게 분포하게 된다. 따라서 peaking 因子는 적어지고 濃縮度의 종류도 적어지며, 우라늄 비용이나 농축비가 각각 약 10% 저감된다고 한다. 또 그 구조상 연료채널의 크립變形이 극히 적어져서 재사용도 가능하다고 하고 있다.

이것은 폐기물의 감소에 도움이 되며 現在 116體의 SVEA燃料가 사용중에 있으며, 最高 燃燒度는 約18,000MWd/t이다.