

核燃料貯藏設備의 合理化

1. 現存의 貯藏方法

原子力發電所에서 사용되기 前後의 核燃料, 즉 新核燃料集合體와 使用後核燃料集合體는 일시적으로 혹은 장기간에 걸쳐 저장된다. 현재 여러 외국에서 채택되고 있거나 혹은 계획중인 저장방식은 再處理政策과 밀접하게 관련되어 선택되고 있다.

現存하는 貯藏設備概念을 表 1 에 정리하였다.

表中에 나와있는 저장분위기는 核燃料體系의 臨界安全性과 크게 관련이 있는 설비 파라미터이다. 이중 水풀貯藏方式 이외에는 모두 乾式貯藏이다. 일반적으로 말해서 건식저장은 水管理의 필요가 없고 장기저장에 적합하다고 생각되나, 면적이 커지는 불리함이 있다. 水풀저장은 냉각상의 문제도 적고 보다 稠密한 저장이 가능하다고 생각되고 있다.

핵연료저장코스트는 그 貯藏密度만으로 결정되는 것은 아니나, 중요한 因子임에는 틀림없었다. 그리고 그 密度는 臨界安全性의 면에서 제약을 받는다.

II. 集合體配列의 合理化

表 1 에 나타낸 저장방식중 使用後核燃料의 수송과 저장이라는 두 가지 목적을 동시에 달성하려는 캐스크저장방식을 제외하고는 구조상의 한계범위내에서 집합체의 간격을 가능한한 작게 한다. 그러나 한편에서는 이 간격을 기계적으로 일정간격이상으로 유지하게 함으로서 體系의 臨界安全性을 보장해야만 한다.

二體間 간격외에 저장밀도에 관한 것에 配列形狀이 있다. 캐스크內配列을 별도로 하면 거의 대부분의 경우 正方 또는 矩形配列이다. 二體間 間隔은 동일하더라도 三角配列로 하면 보다 稠密化가 가능해지며, FBR核燃料의 경우에 그 예를 볼 수 있다.

기계적 또는 구조적인 면에서 集合體貯藏密度增大의 制約條件이 되는 것으로는 다음과 같은 것을 들 수 있다.

- 배스킷, 캐니스터 등 집합체 취급 유니트의 구조

- 저장 랙 등 집합체 지지구조

- 연료체 보호·수납을 목적으로 하는 收納管構造

- 中性子吸收體의 존재

- 使用後핵연료체의 灣曲 등에 의한 집합체 취급상의 제약

그러나 이들 모두가 저장밀도를 저감시키는 방향으로 작용하는 것은 아니며, 일반적으로 기계적조건에서 유래하는 배치한계보다 臨界安全確保를 위한 제약의 경우가 엄격할 때가 많다.

III. 臨界安全基準

體系의 未臨界性を 확보하기 위한 안전기준은 輕水爐 등 實用爐의 實例에 따라 오늘날에는 이미 그 가이드 라인이 확립되어 있다. 未臨界性的의 확립은 실험적으로 檢證된 계산코드를 사용해서 燃料體系의 實効増倍率(K_{eff})을

〈表 1〉核燃料集合體 貯藏設備概念(現存)比較

貯藏方式	雰圍氣	冷却方式	乾・濕式
新燃料貯藏	大氣	—	乾式
使用後核燃料			
캐스크貯藏	密封가스	自然冷却	乾式
vault 貯藏	密封가스	自然對流	乾式
사일로貯藏	密封가스	外氣對流	乾式
水풀 貯藏	水	強制冷却	濕式(水中)

〈表 2〉發電用原子爐 燃料集合體仕様(代表例)

플랜트 仕様	BWR	PWR	FBR實證爐
燃料핀			
外徑mm	12.3	10.75	6.5
被覆管	Zircaloy-2	Zircaloy-4	SUS316
燃料物質	UO ₂	UO ₂	(Pu, U)O ₂
濃縮度	3.5 ^w /o ²³⁵ U	3.5 ^w /o ²³⁵ U	20 ^w /oPuO ₂
燃料集合體			
핀本數	8×8-2 ¹⁾	16×16-20 ¹⁾	217
配列形狀	正方	正方	三角
피치mm	17.5	14.3	7.87
正方形mm	140	230	124 ²⁾
全長mm	約4,500	約4,850	約4,300

- 1) 負의 數字는 制御棒位置의 數를 나타냄. 단, 實効增倍率計算에서는 制御棒을 考慮하지 않음.
- 2) FBR燃料에서는 六角形狀外對面巾을 표시.

구해서 계산오차를 고려하더라도 그 값이 制限値를 하회할 것을 보장함으로써 행해진다.

설비의 通常狀態(公稱사이즈)에 대한 實効增倍率외에 偶發的臨界事故防止를 위해 異常事象에 대응한 實効增倍率을 평가할 필요가 있다. 설비의 배열은 이 이상상태에 대한 규제에 의해 설정되어 있다고 할 수 있다. 臨界安全確保를 목표로 한 制限値를 다음에 표시하였다.

- 1) 新燃料 뿐만아니라 사용후핵연료에 대해서도 新燃料의 그것을 사용한다(通常狀態: $K_{eff} \leq 0.9$).
- 2) 乾式貯藏의 경우, 冠水事故時(水密度 $\rho =$

〈表 3〉反應度特性比較用 貯藏設備파라미터

貯藏파라미터	BWR	PWR	FBR
(乾式貯藏)			
配列形式	正方 1段	正方 1段	正方 1段
簡易收納管(SUS304) ¹⁾	角파이프 두께 6 mm	角파이프 두께 6 mm	등근파이프 두께 6 mm
密閉收納管(SUS304) ²⁾	同上	同上	同上
二體間間隔 mm	170以上	260以上	180以上
(水中貯藏)			
配列形狀	正方	正方	正方・三角
二體間偏心量 mm	25以下	25以下	50以下
中性子吸收體(SUS304)	角파이프 두께 6 mm	角파이프 두께 6 mm	등근파이프 두께 6 mm
二體間間隔 mm ⁴⁾	160以上	260以上	160以上

- 註 1) 大氣에 對해 氣密性保持, 冠水時 水密性없음.
- 2) 冠水時 水密性保持, 收納管外部관 水密度 $\rho > 0$.
- 3) 集合體支持構造의 製造・設置誤差에서 由來.
- 4) BWR 및 FBR의 경우, 裸貯藏(吸收體없음)도 考慮.

1; $K_{eff} \leq 0.95$)를 고려하며 또 反應度最大가 되는 最適減速狀態($0 < \rho < 1$; $K_{eff} \leq 0.99$)의 가능성도 체크한다.

3) 濕式(水中)貯藏의 경우, 집합체 배치오차의 효과(偏心配置余裕; $K_{eff} \leq 0.95$)를 고려한다.

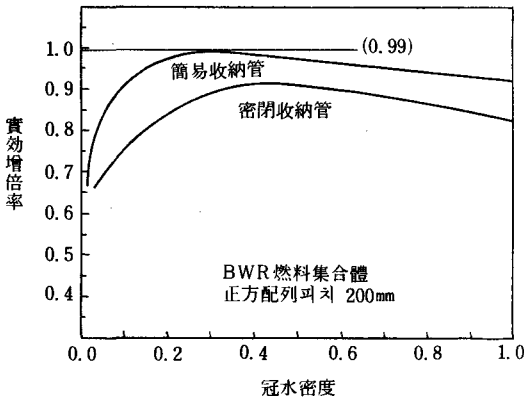
고려해야할 異常事象의 구체적 크기는 저장설비의 사양에 의존하는 것은 물론이다.

IV. 稠密化 對應策

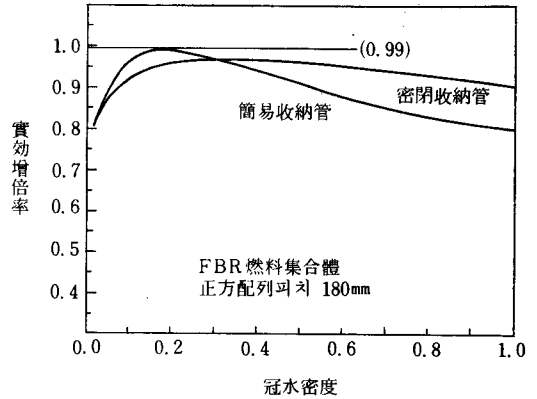
1. 貯藏設備파라미터

효과적인 設備合理化策을 강구하기 위해서는 먼저 구체적인 설비사양에 따라서 그 臨界安全確保의 매카니즘을 명백히 하는 것이 선결이다. BWR, PWR 및 FBR實證爐 燃料集合體仕様の 대표적인 것을 表 2에 나타내었다. 오늘날 이들 원자로의 핵연료체는 조금씩 개량이 가해진 것이 사용되고 있으나, 그 反應度特性은 거의 변하지 않는 것으로 생각되며 이들 집합체를

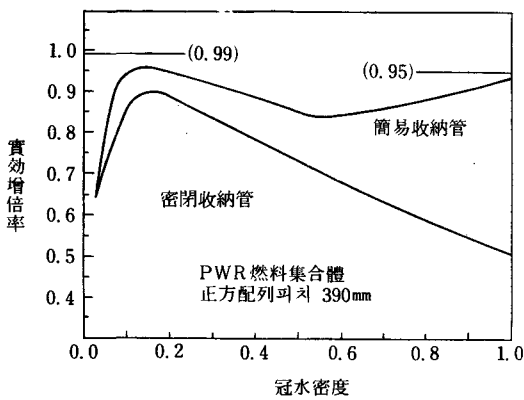
〈그림 1〉 密閉收納管效果



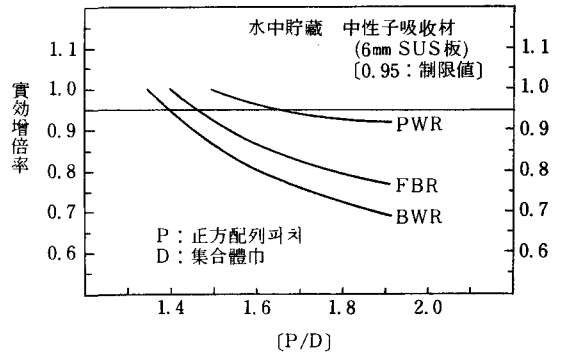
〈그림 3〉 密閉收納管效果



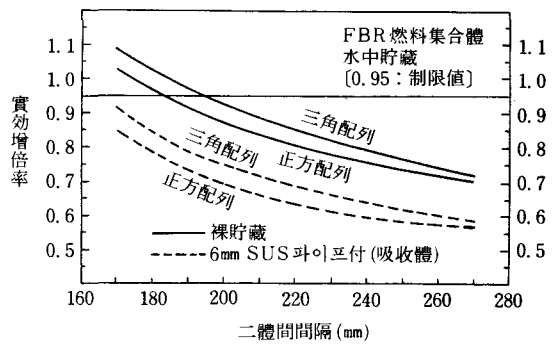
〈그림 2〉 密閉收納管效果



〈그림 4〉 各種集合體의 水中貯藏(P/D) - 比의 比較



〈그림 5〉 FBR集合體水中貯藏에서 配列ピッチ 合理化



저장하는 설비의 사양을 表 3에 정리하였다.

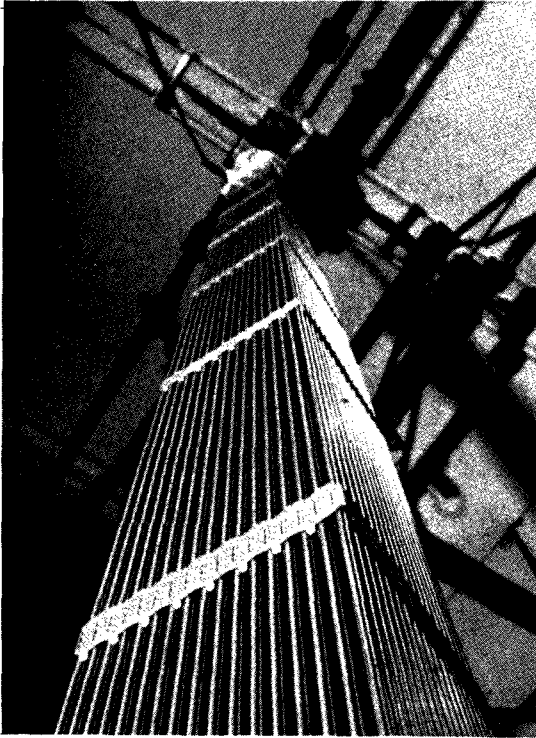
이들 설비사양은 貯藏體系의 實効増倍率의 거동을 고찰하기 위한 파라미터로서 역할을 갖는 동시에 稠密化를 위한 보다 현실적인 대응책을 제시하는 것이다. 현존하는 저장시설의 형상·사이즈는 表 3에서와 같이 整然하지는 않지만 대체로 그 反應度特性을 模擬할 수 있다고 생각된다.

新燃料貯藏設備를 포함한 乾式의 경우, 일반적으로 燃料집합체는 燃料보호 혹은 放射能隔離을 위한 收納管에 수납된다. 이때는 冠水事故時에 물의 침입을 막는다. 즉, 水密性을 갖는지 여부가 중요한 점이다. 또, 수중자장의 경우에는 稠密化方法으로 SUS角 파이프·또는 둥근 파이프를 집합체 1체당 裝荷하는 것을 표준적

인 대응책으로 한다. SUS板의 두께는 모두 6mm로 하는데, 그 단면은 각각의 집합체 크기에 따라 다르다.

2. 解析方法

각 貯藏體系의 實効増倍率을 계산하고, 그 反應度特性을 해석하는 방법에 대해서 알아본다.



계산은 연료핀, 클러스터, 셀(집합체 셀)계산 코드 WIMS를 사용해서 행한다. 따라서 實効增倍率은 집합체의 무한배열에 대한 것이다. 단 각 집합체의 燃料有効길이에 따르는 軸方向 버클링을 사용해서 축방향의 중성자 漏洩를 고려한다. 이 방법은 한층 더 엄밀한 Monte Carlo법과 비교하더라도 큰 차이가 없는 값을 얻는다.

3. 解析計算의 結果

주요한 계산결과를 그림 1에서부터 그림 5까지에 표시하였다. 그림 1에서부터 그림 3까지에 표시한 것은 冠水密度가 0에서 1까지 변화했을 때의 實効增倍率 값의 변화이다. 密閉收納管의 경우, 收納管内는 항상 水密度는 0이다. 簡易收納管의 경우, 그 内外 모두 水密度는 동일하다. 그림 3의 FBR의 경우를 제외하고는 密閉收納管의 효과가 크며 實効增倍率은 저감한다. 특히, PWR燃料體의 低減效果는 현저한 것이 있다.

다음에 水中貯藏方式에 대해서 正方配列 피치를 파라미터로 해서 각 저장계의 實効증배율 변화의 양상을 표시한 것이 그림 4이다.

여기에서 배열피치는 각각의 집합체폭을 단위로 한 값(P/D比)으로 표시하고 있다. 이때 모든 집합체의 주위에는 中性子吸收體로 6mm 두께의 SUS角 또는 동근 파이프가 裝荷되어 있다. 이 그림 4에서 각 저장설비에서의 吸收體效果를 직접적으로 비교할 수 있게 된다. 또 피치의 변화에 대한 實効增倍率의 變化率 차이도 볼 수 있다.

SUS吸收體의 效果를 나타내는 대표적인 예로서 FBR燃料의 경우를 그림 5에 나타내었다. 이상의 결과를 定性的으로 비교한 것이 表 4이다.

密閉收納管의 效果는 건식 및 습식 모두 P-WR연료에 대해서 가장 크다. 흡수체가 없는 집합체민의 水中貯藏은 코스트적으로 유효하다고 생각되나, PWR燃料의 경우는 實効增倍率制限值의 제약이 엄격해진다. 偏心效果는 배열 피치변화에 대한 반응도의 感度を 나타내는 것인데, 表 4의 결과는 表 3의 二體間偏心量設定值를 반영시킨 것이다. FBR燃料集合體의 경

〈表 4〉 各種集合體貯藏時 反應度特性 比較

項 目	BWR	PWR	FBR
(乾式貯藏)			
最適減速效果	中	小	大
密閉管效果	○	◎	△
(水中貯藏)			
P / D 比	小	大	中
裸 貯 藏	○	△	◎
6mm SUS板 吸收體效果	大	小	中
偏 心 效 果	中	小	大
密閉管效果	○	◎	×

◎ 매우 效果的

○ 效果的

△ 適用은 疑問

× 適用은 意味가 없음

〈表 5〉貯藏스페이스合理化 對應策

設 備	對 應 策	貯藏스페이스縮小率 %			備 考	
		BWR	PWR	FBR		
新燃料	乾 式	簡易收納管→密閉收納管	20	30	-	水密性 코스트 小
使用後 核燃料	乾 式	乾 式→水中(密閉管)	-	35	-	플 增設
	濕 式 (水中)	裸 貯 藏→SUS파이프	30	*	30	SUS重量增大 *裸貯藏은 不適
		SUS파이프→密閉收納管	10	45	-	水密性 코스트大
		濕式(SUS파이프)→乾式	25	20	-	플 設備除去 密閉管追加

(縮小率%는 概略值)

우, 그림 3에서와 같이 密閉收納管的 효과는 거의 유효한 것이라고 할 수 없다.

4. 對應策의 整理

이 解析檢討의 整理로서 稠密化로의 대응책을 보다 구체적으로 나타낸 것을 表 5에 나타내었다. 이 表의 數値는 表 3의 設備파라미터에 대한 설정치를 전제로 하고 있으며, 각 저장설비의 개념선정을 위한 목표가 되는 것이다. 表 5에 비교에 기재한 사항 등을 고려한 다음에 저장코스트의 最適化를 도모할 필요가 있을 것이다. 그러나 저장의 稠密化가 지상명령인 경우에는 그대로 유효한 정보를 주는 것으로 생각된다. 表 5에 표시한 결과를 종합적으로 평가하면 다음과 같은 결론을 유도할 수가 있다.

1) 密閉(水密)收納管的 概念은 PWR燃料集全體에 대해서 가장 효과적이고 PWR燃料에도 유효하나, FBR燃料에 대해서는 그다지 기대할 수 없다.

2) FBR燃料水中貯藏의 경우, SUS吸收體의 裝荷는 비교적 효과적인 대응책이다.

3) 密閉收納管을 전제로 하는 乾式貯藏은 검토의 가치가 있는 개념이다. 이것은 모든 연료체에 대해서 말할 수 있는 것이다.

V. 中性子計裝의 導入

현행 臨界安全性設計方法에서는 연료조성에 대해서 가장 安全側의 설정에 의할때가 많다. 즉, 사용후핵연료의 조성을 新燃料의 그것과 같

다고 한다. 이것은 특히 輕水爐燃料의 경우에는 상당히 큰 設計余裕이다. 또 FBR의 다른 조성의 연료중 最大Pu富化度の 연료조성만을 사용해서 實効增倍率을 계산한다. 그 외에 저장설비로의 집합체 裝荷順序·運用法의 면에서도 불확실함을 고려하여 安全側에 여유를 취한다. 따라서 과대한 설계여유가 될때가 많다.

이와 같이 과대한 여유를 제거하고 보다 현실적인 설계와 설비의 운용을 할 수 있게 하는 것이 中性子計測의 도입 목적이다. 이것은 일반적으로 未臨界面도미터라고 불리며 저장설비의 반응도를 감시·운용을 함으로서 설비의 노말설계를 실현시킬 수가 있다.

未臨界面의 측정법은 臨界實驗裝置를 사용하는 경우 등 실험실 규모에서는 이미 확립되어 있다고 생각되는데, 貯藏設備實機에서와 같이 일반적 체계에 대한 것은 아직 연구단계에 있다고 할 수 있다. 또 체계의 臨界近傍에서의 反應度較正實驗의 필요성이나 연료조성을 필요로 하는 것 등도 보다 넓은 적용으로의 제약조건이 되고 있다.

近年 美國 ORNL에서는 ²⁵²Cf中性子線源을 사용한 爐雜音解析方法이 反應度較正實驗을 필요로 하지 않는 未臨界面도미터로 유망하다고 하고 있다. 이와 같이 모니터의 적용한계는 아직 명확하지 않으나, 보다 넓은 응용을 목표로 하여 未臨界面도미터로서 보다 간편한 測定原理에 따르는 것의 開發에 노력하고 있다.