

技術情報

FBR 燃料貯蔵設備의

臨界安全性

FBR燃料集合체는 그 使用 前後에 原子炉 補助建物内に 일시적으로 저장된다. 이 때 그 臨界管理는 주로 LWR에서의 경험에 의해 행해지는데, FBR에서는 플루토늄燃料라는 점과 저장 분위기가 다르기 때문에 새로 확립되어야 할 技術分野이다. 여기서는 먼저 核燃料사이클 문제에서 야기되는 여러가지 事情에 대해 記述하고 계속해서 本題인 臨界安全性評價時에서의 基本的인 思考方式을 정리하기로 한다. 더욱이 貯藏系의 主要安全因子인 中性子実効増倍率의 解析評價에 관련해서 解析手法과 그 實驗的檢證의 現狀을 정리해서 앞으로의 저장설비의 設計合理化 方向을 명백히 하기로 한다.

I. 使用한 燃料貯蔵問題

약 4년전부터 미국을 중심으로 核燃料사이클政策의 再檢討作業이 행해졌으며 이에 관련하여 商業用 再処理工場 건설 지연도 명백한 사실이 되었다. 이에 따라 우선 급한 것은 現存하는 原子力發電所의 사용한 연료를 장기간 저장해야 할 필요성이 요구되고 있다. 그 対応策으로 검토되어 온 것이 현존하는 설비의 저장용량을 增大시켜 再利用을 도모하거나, 새로운 설비를 增設하는 방법이다. 그러나 後者의 방법에 대해서는 立地問題등이 복잡하게 연관되므로 檢討의 방향은 대체로 現설비의 再設計쪽으로 기울어지고 있다.

앞에서 말한 使用한 연료저장은 주로 輕水炉發電所에 관계되는 것으로 여기서의 재처리 의미를 그대로 고속증식로(FBR)에 사용할 경우에는 큰 영향을 받게 된다. 즉, 增殖이라는 概念이 거의 현실적인 의미를 갖지 못하게 될지도 모를을 뜻하는 것이다. 이

와 같은 核燃料사이클政策을 둘러싼 정세는 작년엔 끝낸 國際核燃料사이클評價(INFCE)의 최종보고와 새로운 미국대통령 취임이라는 사실을 발판으로 앞으로는 새로운 展開가 일어날 것으로 전망되나 再處理 遲延이라는 현상은 확실히 波及效果를 가져올 것이다.

그러나, 그동안 輕水炉에서 사용한 燃料에 대해서 現存 저장시설을 中心으로 검토가 진행되어 왔던 対応策은, 결국은 저장 rack를 再設計하여 그 저장밀도를 최대한 높이려는 데로 歸着된다. 이와 같은 여러가지 아이디어와 이를 실현하기 위한 구체적 방안은 FBR 연료설비에 대해서도 크게 참고해야 할 것이라고 생각되었다.

具體策을 정리하면 다음과 같다.

1. 저장용량을 결정하고 있는 설계기준을 재검토하여 그 여유를 최소로 한다.
2. 臨界安全評價에서 사용한 解析手法의 精度나 模擬實驗데이터의 축척등 그 후의 知見 向上을 도입하여 誤差余裕를 최소로 한다.
3. Boron을 혼합한 吸收體를 설비내에 설치하여 저장밀도를 높인다. (compact rack의 導入)
4. 計劃裝置를 새로 導入, 설비 Parameter의 감시 시스템을 설치하여 安全因子의 不確實性幅에 대해 配慮하고 있었던 여유를 최소로 한다.

다만 이와 같은 아이디어가 R&D를 포함해서 코스트평가없이 具體化되는 것은 아니다. 吸收體導入등은 재료문제를 포함해서 대체적으로 코스트가 높기 쉬우며 이를 구체화하기 위해서 最適化를 위한 상당한 검토가 행해져 왔다.

II. 貯藏零囤氣

사용한 연료의 장기저장 문제를 別途로 한다면 FBR연료저장(FBR Plant 시설에서의)설비의 개념은 새로운 연료를 받아들일 때부터 사용한 연료의 재처리를 위해 공장으로 보낼때까지의 연료취급방식과는 밀접하게 관련되어 있다. 연료 교환기간이라든가 FBR에서의 특유한 燃料倍增時間등을 통해서 소위 플랜트 코스트에 관계가 깊기 때문이다. 臨界管理 問題를 별도로 하더라도 輕水炉의 연료와 비교했을 경우 특히 FBR 연료에 대해서 배려해야 할 문제는 플루토늄 同位元素의 自然崩壞등에 起因하는 中性子線레벨이 높다는 점, 炉운전중의 出力密度가 극히 높다는 점에 対応해서 사용한 연료의 分裂生成物에 起因하는 伽馬線 레벨도 높으며 또 崩壞熱도 크므로 이들에 대한 차폐 및 除熱기능이 중요한 사항이 되는 것이다. 이와같은 점을 유의하여 다음에 FBR연료저장 분위기에 대해 검토의 대상이 되어 왔던 것의 개요를 정리, 기술한다.

1. 空氣中貯藏(dry저장)

주로 새로운 연료를 받아들일때 채택되고 있다. 사용한 연료의 저장방식으로는 除熱 및 차폐 면에서 코스트가 높게 된다. 저장용량은 일회 연료교환 本數 정도이다. 臨界管理面에서는 저장분위기가 공기라 하더라도 水沒事故 또는 低密度水 분위기 조건하에서의 臨界安全評價의 필요성이 있다.

2. Na중 저장

연료집합체를 비롯해서 炉心構成要素의 炉心裝荷 前後의 일시적 저장을 목적으로 하는 것으로 통상 炉外연료저장설비(EVST)라 불려지고 있다. 저장용량은 炉心구성 요소의 交換方法과 밀접하게 관련되어 있으며 상당한 여유를 갖고 있다. 臨界관리상 유의

점은 순저장용량을 모두 연료집합체가 占하고 있을 경우를 想定하는 것이다. 여기에는 교환방식이라는 점에서 보아 回轉저장 rack 방식이 있으며 이들은 集合体 配列의 幾何形狀이 다르다. 즉, 炉心설계에서 잘 알려진 「集合体cell」이라는 解析計算上の 개념이 반드시 성립되지 않을때도 있다. 이와 같은 경우에는 어떠한 配置의 对称性を 명확히 정의하는 Parameter를 설정할 필요가 있다.

3. 水中貯藏

이것은 앞에서 말한 FBR Plant에서 本質的인 의미를 갖지 않는 설비나 再処理까지의 貯藏이 長期化할 경우에 그 중요성이 부각된다. 臨界管理의 面에서는 輕水炉의 경험이 크게 참고가 되는 貯藏방식이다. 다만, 우라늄연료와 플루토늄연료와의 차이 때문에 새로운 문제가 생기지 않을까 하는 점이 하나의 유의사항이다.

Ⅲ. 臨界安全評價上の 留意点

FBR은 아직 개발도상에 있으며 安全性評價技術도 完全하게 확립되어 있는것은 아니다. 그러나 여러나라의 프로젝트에서의 실적과 또한 주로 輕水炉에서의 경험에 기초를 둔 명확한 가이드라인은 존재한다. 여기서 이것을 더욱 일반적인 논의로 정리해 본다.

1. 臨界安全評價基準에 대해서

核分裂生成物の 臨界管理上 基本的인 사고방식은 이전부터 잘 알려져 있듯이 事故時 臨界 防止, 二重偶發性的의 考慮(double contingency), 安全因子와 그 規制値 設定이라는 순서로 표시할 수 있다. 여기서 말하는 安全因子라 함은 核分裂性物質의 質量, 体積 또는 錫수, 형상등 단순한 量이다. 그러나 原子炉Site에서의 燃料集合体 貯藏体

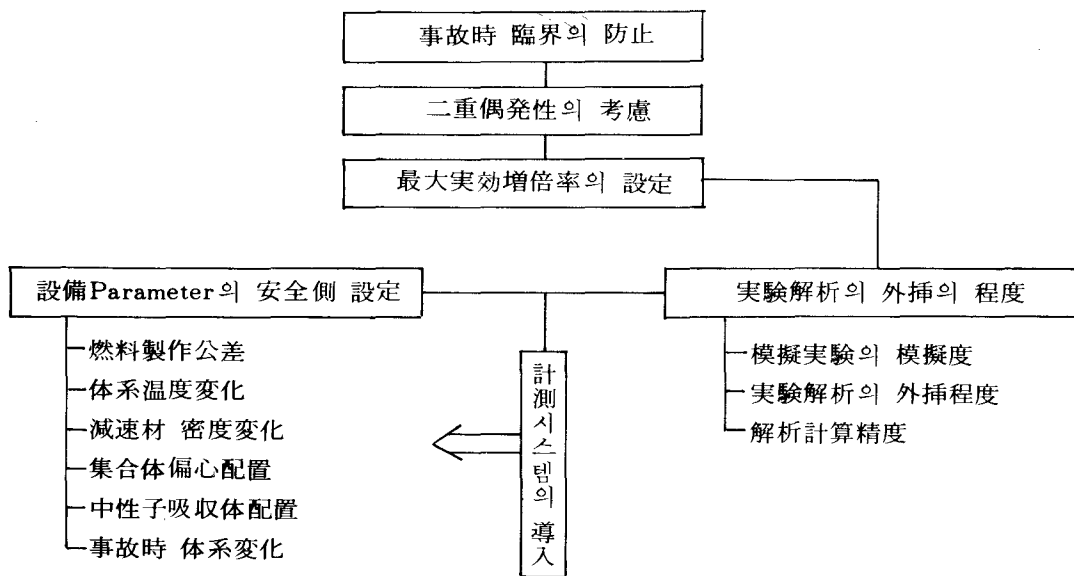


表 1 燃料貯藏体系의 臨界安全評價의 思考方式

系の 경우처럼 간단한 단위로서 취급하는 것이 곤란할 때는 規制해야 할 安全因子로서 別途의 量(또는 表現)을 사용하지 않을 수 없다. 그 代表的인 例가 貯藏体系의 中性子 実効増倍率(Keff)이다. 이 安全因子를 채택했을 경우 臨界安全評價에서 그 기본적인 사고방식을 図形化한 것이 表 1이다.

여기서 最大実効増倍率値의 实例로는 0.98, 0.95, 0.90등이 있다. 이 値의 레벨은 臨界 또는 未臨界實驗등을 통해서 개발되어 왔다. 実効増倍率 解析方法의 信賴度에 의해서 판단하게 된다. 혹은 想定하는 사고 상태의 정도에 따라 판단될 때도 있다. 設備 Parameter의 安全測 설정에 대해서는 개개의 貯藏体系의 설비계획 조건을 상세하게 반영시켜 설정한 解析条件에서 구체화 해야 할 것이다. 計測시스템의 導入은 設備Parameter의 安全側設定을 보다 合理的인 것으로 하는것을 목적으로 하는 것이다. 예를들면 사용한 연료의 核分裂性物質의 量은 새로운 연료에 비하면 적으며, 일반적으로 実効増倍率을 작게 하는 방법의 효과를 가지나 炉 운전 기간중의 燃燒度 分布 算定의 不確實性을 배려하여 저장연료 전부가 새로운 燃料組成으로 된다고 생각하는 것이 통상적인 방법이다. 그래서 어떠한 計測·監視시스템을 설치하여 이 不確實性을 除去하는 것이 가능하다면 사용한 연료에 관한 限 核分裂性物質의 量에 관한 안전여유를 최소한도로 절약할 수가 있게 된다. 이 경우, 안전평가의 원칙을 조금이라도 변경한 것은 아니다. 실제로 実効増倍率이 최대가 되는것은 想定한 사고상태에서이므로 이에 대한 hard의인 의미에서의 対応策을 준비하는 것은 安全性確保라는 점에서나 또 코스트面에서나 동시에 극히 有効한 것이 된다.

그리고, 実効増倍率의 解析評價는 사고시 또

는 사고상태에 대해서 行하면 된다고도 생각할 수 있으나, 일반적으로 말해서 이 것으로 충분하다고는 할 수 없다. 즉, 통상시의 평가가 모든 기준이 되며 이 기준체계의 대해 생각할 수 있는 모든 설비 Parameter의 變動이 実効増倍率에 대해서 어느 정도의 효과를 가지며 어떠한 拳動을 하는가를 명확히 알아 둘 필요가 있다. 이때 처음으로 최종적인 사고상태 設定의 의미가 생기게 되기 때문이다.

2. 解析手法에 대해서

앞에서의 저장분위기 体系를 解析의 대상으로 할 경우, 통상의 FBR 및 LWR의 炉心設計 解析手法이 그대로 도움이 될 때도 있으나 臨界安全解析의 경우에는 다시 플러스 알파가 요구된다. 그 하나로는 実効増倍率에 대해 중요한 구실을 하는 中性子에너지의 범위가 炉心の 경우에 비하면 극히 幅이 넓다는 것이며, 다른 하나는 저장体系의 境界조건 설정 방법이 体系에 따라서 여러 가지로 變한다는 것이다. 이와같은 不確實性으로 인해 誤差余裕 또는 安全余裕를 비교적 크게 잡지 않을 수 없을 뿐만 아니라 그 계산 자체도 상당한 코스트 增加가 된다. 그래서 臨界安全解析 手法中에서 그 특징적인 面만을 구체적으로 정리해 본다.

가. 貯藏体系의 境界条件

実効増倍率評價의 第 1 Step은 먼저 解析 모델(体系model)의 設定이다. 하나의 着眼點은 全体系의 크기와 그 中性子 balance이며, 특히 体系로부터의 中性子漏洩의 비율을 어떻게 평가하는가가 문제가 된다. 이것은 境界条件의 설정방법에 관한 것이다. 이것은 통상 연료집합체의 配列모델로서 표현한다. 즉, 無限長無限配列, 有限長無限配列, 無限長有限配列 및 有限体系로 분류할 수 있다. 앞의 두 모델은 cell 境界条件모델

이다. 中性子漏洩에 대해서는 安全側の 評價를 하여 無限増倍率을 求하게 된다. 有限体系의 경우는 配列을 둘러싼 콘크리트벽에 의한 中性子反射의 효과도 많이 고려해야 한다. 일반적으로 상당히 큰 体系의 中性子漏洩項을 精度가 좋게 평가하려면 계산 코스트가 너무 많이 든다. 이러한 경우에는 그 項을 안전여유로 보고 完全反射(즉 cell 境界条件)을 채택하게 된다. 或은 통상상태에 대해서는 無限増倍率을 평가해서 그 안전성을 확인한 다음 극히 작은 確率로 想定될 수 있는 사고상태에서만 有限体系의 취급이 合理的인 사고방식의 하나라고 생각된다. 다만 이 경우, 設備設計上 이와같은 사고에 대한 対応策이 충분히 取해져 있는것을 前提로 한다.

나. 多群中性子断面積library

中性子에너지를 70群에서 200群정도로 群分類하여 각각 群마다의 断面積데이터를 준비한 것을 일반적으로 多群 中性子断面積 library라고 부르고 있다. 이것은 中性子核 데이터·화일의 내용을 처리하여 작성한 것이다. 미국의 統一核 data file, ENDF/B 나 일본의 JENDL 등이 이들 보기이다. 熱中性子 炉의 경우는 4群, 高速炉의 경우에는 25群정도의 library로부터 출발한 때도 있으나 貯藏体系의 경우에는 보다 多群의 것을 사용할 때가 많다. 극히 多様하게 변화하는 体系中の 中性子스펙트럼에 대해 少数群으로서의 対応할 수 없는 사정이 있기 때문이다. 여기에 다시 附言하면 종래의 多群library에는 熱中性子 炉用이라든가 高速炉用이라든가 하는 特定の 体系專用으로서 준비되어 있는 경우가 많기는 하나 臨界安全 解析用으로서의 그 어느 体系에 대해서도 適用성을 갖는 library가 필요하다. 이와같은 것은 또 library中에서 고려해야 할 核種에 대

해서도 말할 수 있다. FBR의 경우, 플루토늄을 처음으로 하는 燃料核種은 물론 나트륨(Na), 다시 水素元素(H)에 대한 配慮도 필요하게 된다. 現在로서는 이와같은 點을 특별배려한 多群library는 극히 드물므로 熱中性子用, 혹은 高速炉用의 것을 대상으로 하는 体系에 맞추어서 분류하여 사용하는 것도 不得已한 段階라 할 수 있다. 다만, 後述하는 Monte Carlo法에서의 入力데이터로서의 多群library에는 統一된 취급을 하려고 하는데 주로 미국에서 몇개의 例를 볼 수 있다. 가장 유명한 것이 Monte Carlo法 code KENO의 16群library가 있다. 이 library는 상당히 폭이 넓은 貯藏体系에 適用성을 갖도록 배려되어 있기는 하나 本題에서 대상으로 하고 있는 燃料集合體에 대해서는 약간 문제가 있다고 말하고 있다.

다. 多群非均質cell計算

이 단계의 계산은 두가지 목적으로 행해진다. 하나는 無限増倍率 계산이고 다른 하나는 FBR 燃料pin 格子領域에서의 均質化 実効定數를 作成하여 다음 단계에서의 有限体系 実効増倍率 計算用の 入力데이터로 하는 것이다. 이러한 경우에는 에너지群數에 대해서도 少数群까지 縮約될때가 많다. 臨界安全 解析을 할때는 특히 이 단계에서의 계산이 중요하다. 통상의 炉心集合體 cell model 과는 달리 燃料pin 配列領域의 外側을 둘러싼 減速材領域이 圧到的으로 크다. 이를 위해서는 이 減速材(또는 冷却材)의 밀도변화에 따르는 体系의 中性子스펙트럼變化에 대해 충분히 対応할 수 있는 計算이어야 하기 때문이다. Na 貯藏분위기의 경우 中性子스펙트럼은 炉心の 것에 비하면 상당히 soft 한 것으로 되어 있기 때문에 共鳴領域에서의 中性子束分布의 微細構造가 보다 강조된다. 이에 対応할 수 있는 計算手法로서는

微分型 또는 積分型 輸送近似가 일반적인데 이와같은 종류의 계산code로는 이미 잘 알려져 있는 LEOPARD(미국)이나 WIMS(영국)가 있어서 잘 공개되고 있다. 이 code들은 熱中性子用인데 Na분위기를 대상으로 하는 高速炉体系에 대해서도 같은 취급이 가능하다.

라. Monte Carlo計算

臨界安全分析에 대해 가장 적합한 계산手法로 海外에서의 適用例는 극히 많다. 入力断面積library의 群數로도 2000群 以上の 것이 사용될 때도 있다. Monte Carlo 法은 実効増倍数와 같은 積分量을 평가하는 case에서 그 에너지群數의 多少가 직접적으로 그 계산코스트에 영향을 주지 않으므로 복잡한 中性子스펙트럼의 효과를 適確하게 하는데 最適이다. 또, 다른 數值解法(예컨대 Sn法)에 비하면 복잡한 幾何形狀의 体系로의 適用性도 충분하다. 최근 大型컴퓨터의 급속한 발전에 의해 종래에는 코스트增加로 인해 敬遠되기 쉬웠던 Monte Carlo 계산도 지금은 비교적 손쉽게 사용되고 있다. 다만 이 계산수법에 관한 留意點은 그 解의 誤差表示에 관한 것이다. 즉, 그 解 및 誤差는 体系内에서의 中性子 拳動을 Sampling한 결과를 최종적으로 統計處理한 것이므로 그 Sampling의 통계에 관한 기본적인 假定을 前提로 하고 있다. 통상, 이것은 正規分布에 관한 가정이다. 따라서 이 가정에 대한 아무런 檢定없이 그 解의 誤差幅을 信用할 수는 없다. 이와같은 종류의 code에서 가장 잘 알려져 있는것은 앞에서의 KENO code(公開)인데 여기서는 그래프에 의한 방법으로 판단하도록 되어 있다. 그러나 이것은 또한 통상의 統計學의 방법에 따라서 數值的으로 檢定 結果를 표시하는 것도 가능하다. 그리고 참고로 体系의 形狀(境界條件)이 복잡해

질 수록, 혹은 空間的인 次元數가 많아질 수록 Monte Carlo法은 그 계산코스트의 면에서도 유리하다고 생각된다. 우리나라에서도 이와 같은 code의 개발이 있기를 바란다.

IV. 解析手法의 實驗的 檢證

FBR燃料인 플루토늄 연료저장에 관한 실험데이터에서 공표된 것은 극히 소수이다. 그 少數例의 대부분이 bench mark 실험이다. 이 bench mark 실험은 解析手法의 精度를 가장 강하게 좌우한다고 생각된다. 中性子断面積 library, 혹은 사용하는 계산code의 妥當性을 확인하는 것을 목적으로 하고 있으며 되도록이면 단순한 幾何形狀의 實驗体系에서 行해진다. 前者의 目的을 위해서는 解析的인 近似的의 制約이 없는 Monte Carlo法을 사용하여 계산하는 것이 가장 바람직한 방법일 것이다.

FBR燃料을 Na속에 저장하는 경우에는 炉心설계를 위한 炉心模擬 臨界실험의 데이터가 蓄積되어 왔으므로 이들 데이터를 解析함으로서 高速炉 体系에 대한 解析手法의 근사적인 適用性을 확인하는 것이 가능하다. 그러나 이것들만으로 실제의 貯藏体系의 특성을 모두 cover할 수는 없다. 앞에서의 FBR의 Na속에서의 貯藏体系EVST에서의 燃料集合體 cell의 경우, Na의 體積率은 80~90%정도가 된다. 이에 대해 炉心cell의 경우는 40% 정도이다. 따라서 貯藏体系의 中性子스펙트럼은 상당히 낮은 에너지 領域으로 떨어지게 된다. 이와같은 体系에 關한 断面積 library 및 計算code의 檢證은 아직도 그다지 잘 행해지고 있지는 않다. 직접 저장体系를 模擬하는 것을 목적으로 한 실험으로는 미국의 ZPPR/FTR Experiment No. 1~130이 있으며 이 실험体系의 立面圖를

表 2 에 표시하였다. 이 解析도 Monte Carlo 法 code KENO-II 를 사용해서 행해지고 있다. 16群의 Hansen-Roach library 에 의한 解析結果에서는 実効増倍率에 대해서 2%의 過大評價로 되어 있다. FBR原型炉級 炉心体系의 경우, 그 実効増倍率의 予測精度는 1% 이하라고 말하고 있으나 Soft Spectrum의 저장체계에 대해서는 2~3%의 오차 폭은 현단계에서는 불가피한 것이다.

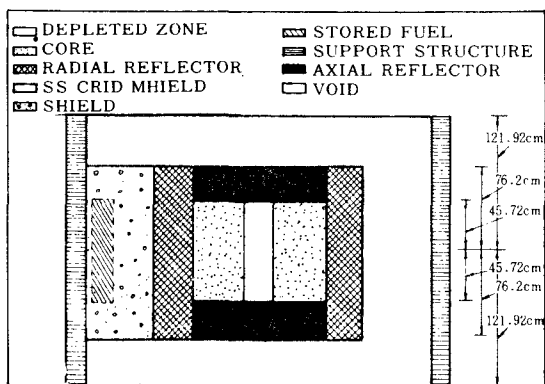


表 2 .ZPPR/FTR No.1-130 실험체계의 立面圖

또, 한편 dry저장 및 水中저장 경우는 水零囲気体系를 模擬한 실험이 필요하다. 플루토늄연료의 輕水炉에서의 사용이라는 관점에서 행해진 bench mark 실험 解析의 報告例에 의하면, 미국의 核 Data library ENDF/B-IV 및 V를 入力데이터로 한 Monte Carlo 解析의 結果 実効増倍率에 대해 우라늄-235 연료의 경우 1% 이내, 한편 플루토늄 연료의 경우는 2~3%의 精度로 實驗値를 再現하고 있다. 실제의 原型炉級 FBR燃料pin을 模擬한 燃料棒을 사용한 bench mark 실험도 극히 최근에 미국에서 행해지고 있다. 이것은 FTR에서의 플루로늄燃料 水中저장 실험이며 이 실험体系의 断面을 表 3 에 표시하였다. 이것은 플루토늄·우라늄 混合酸化物로 되는 燃料pin의 正方格子配列과 이를 둘러싼 콘크리트벽으로 되는 体系이며 Monte

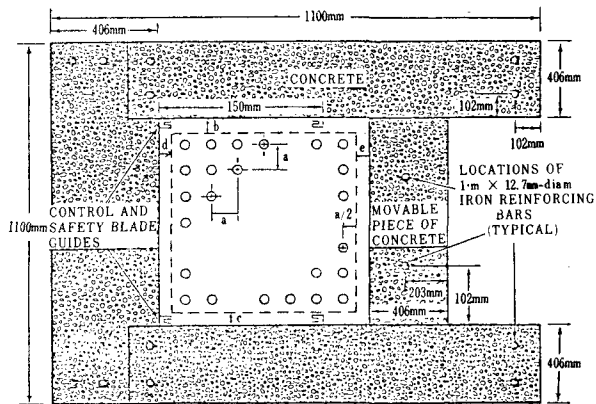


表 3 FTR臨界實驗体系圖(平面圖)

Carlo法 뿐만 아니라 통상의 炉心核設計手法에 대해서도 그 檢証에 충분히 제공할 수 있는 것이다.

dry저장의 경우, 이미 저장분위기項에서 기술한 바와 같이 그 사고상태의 想定에서 水沒 또는 低密度水分의 분위기도 함께 고려할 것이 요구된다. 이때, 系의 実効増倍率이 最大가 된다. 즉, 最適減速상태가 존재한다. 이 상태는 水密度가 0.15정도일때 出現한다는 보고의 예가 많다. 이것은 水密度變化에 수반하는 中性子の 흡수, 増倍, 漏洩에 관한 밸런스로부터 생기는 현상이므로, 물론 体系에 依存하는 挙動을 한다. 이 最適減速狀態를 模擬하는 실험은 실제로는 극히 곤란함이 예상된다.

그렇더라도 저장설비 實機에서 이러한 상태는 극히 想定하기 어려운 것이며 또, Monte Carlo法을 비롯해서 熱中性子炉体系, 혹은 高速炉体系에 대해 충분히 檢証된 解析手法을 적용함으로써 충분히 対応할 수 있는 것으로 생각되고 있다.

FBR의 개발단계는 이미 實証炉로 진행되고 있으나 原子炉Site에서 燃料取扱과 저장 시스템이 全 Plant에서 占하는 역할은 보다 큰 것으로 될 傾向이 있다.