기 술 논 문

世界最初 商業用FBR 試運轉經驗

프랑스의 Creys-Malville에 있는 1,200MWe級 高速增殖爐(FBR)의 所有者이며 運転者인 Nersa의 理事長은 이 발전소 試運転中의 경험으로 심각했던 문제는 연료저장드럼에서 발생한 나트륨의 누출 사고였다고 하였다.

프랑스의 Creys-Malville에 위치한 세계최초의 상업용 규모 고속증식로에 대한 試運轉은 일반적으로 순조롭게 진행되었다. 그러나 이 발전소 연료저장드럼의 主容器內에서 최근에 심각한 누출이 발생하였는데 이는 전혀 예상치 못했던 問題였다.

試驗計劃

1981년 초에 주요 순환계통과 장비의 설치가 마무리될 때까지 Creys-Malville에서의 시험은 다른 원자력발전소에서와 매우 동일한 형태로 수행되었다. 그때부터 1986년 12월까지 시운전 시험이 3단계로 수행되었다.

◎ 원자로계통의 주요 시스템과 BOP에 대한 개별시험. 이 시험은 系統별로 竝行하여 實施되었다. 모든 조립과정과 시험단계 동안의 주요 관심사는 청결이었다.

◎ 나트륨을 채우기 前과 後에 핵증기공급계통과 BOP내 시스템의 전반적인 시험과 온도상승시험은 주펌프로 부터 발생되는 열동력을 사용하여 이루어졌고, 터빈의 증기는 보조보일러로 부터 공급하여 정상가동중의 조건과 동일한 형태로 모든 순환계통과 장비를 시험할 수 있게 하였다.

◎ 핵연료장전, 중성자시험과 출력증가.

核燃料 裝塡準備

1981년 초부터 1985년7월 사이에 수행된 1, 2단계 시험은 발전소가 健全하며 核燃料를 장전할 준비가 되었다는 확신을 주었다. 모든 검사는 계획된 순서에 따라 수행되었고, 冷却材로 나트륨을 사용함으로써 특수한 安全檢査를 수반하였지만 이로 인하여 어떤 특별한 난점도 발생하지 않았다.

나트륨 5,650톤이 2년여의 기간동안 敷地內로 인도되었으며, 1984년6월부터 12월 사이에 연료저장드럼, 원자로용기 및 4개의 中間나트륨Loop에 순차적으로 채워졌다. 1982년 봄에 原子爐에는 실제 爐心과 같은 모의핵연료집합체가 장전되었다. 이 집합체는 원자로용기의 뚜껑이 덮혀지지 않았을때에 지붕을 통하여 집어넣어졌다.

온도상승시험동안 펌프의 수와 속도를 변화시켜 나트륨의 유속을 달리하였을때 원자로내 상부의 얇은 열차폐벽에서 진동이 발생하였다. 이 문제는 내부구조물의 움직임과 노심내 고온 및 저온 나트륨의 수위차로 인한 원인으로 판명되었다. 상대적으로 저온의 나트륨은 노심과 主容器의 벽사이에 열장벽을 생성한다.

모의시험후에 핵연료집합체를 개조하여 나트륨의 유속을 증가시켜 열장벽면적의 높이를 올림으로써 이 문제를 해결하였다. 해결책을 찾아내고 보완하는데에 3주간이 걸렸으며, 上記의 한가지 방법으로만 해결이 될 수 있었다.

온도상승시험동안에 해결한 다른 NSSS문제는 나트륨 배출밸브와 나트륨 누출검사장비 및 配管지지대에 대한 것들이었다. 주용기와 안전용기 사이의 공간을 원격으로 검사하는데 사용되는 裝備(MIR)에 의해서 우연히 용기내부의 결함이 발견되어 8일 동안 결함을 원상태로 수선하는데 성공하였다.

核燃料裝塡과 全出力

1985년 7월16일부터 9월7일까지 동안에 自動핵연료장전장비에 의해서 모의핵연료집합체가 혼합산화물 핵연료집합체로 대체되었다. 325개의 핵연료집합체가 장전되고 순환회로의 온도가 180℃에 다다른 후에 9월7일 臨界에 도달했다. 원자로의 출력증가를 위한 爐心상태를 확인하기 위하여 제한된 中性子試驗이 수행되었는데, 이때 爐心은 358개의 핵연료집합체로 증가되었고 18개의 희석용 집합체가 증가되었다.

低出力에서 상세한 중성자시험후에 蒸氣發生器는 물과 나트륨으로 채워졌으며, 原子爐는 12월 초까지 출력증가를 위한 준비가 갖추어졌다. 최초로 터빈發電機가 1986년1월14일 系統에 併入되었다.

이 획기적인 系統併入 이후에 수행해야 할 일은 장비들이 정해진 운전조건하에서 작동되는 가와 全出力에 도달할 때까지 새로운 문제의 발생없이 순조롭게 진행되는 가를 검사하는 것이었다. 1986년 1년동안은 이 "工學的 試運轉"에 전력을 기울였다. 이 작업은 신중하게 행하여졌으며, 系統으로의 出力은 주요 고려대상이 아니었다.

이 작업은 공학적 요구사항(열균형과 중성자 시험의 결과를 얻는 기본적인 인자를 검사하는 것)과 안전당국의 요구사항으로 정의된 각 단계별로 수행됐다. 全出力은 다음과 같은 특성치를 나타냈으며, 1986년 12월 9일에 최초로 도달했다 : (열출력)3,041MWt, (전기출력)1,205 MWe, (노심출구온도) 549℃.

問題와 解決策

全出力에 도달하기 위해 몇개의 시스템과 장비를 개조하였고 여러 번 원자로가 운전중지되었지만, 이것들은 핵심부품들도 아니었고 어떤 기본적인 결함도 아니었다.

핵연료저장드럼에서 누출이 발견된 1987년 3월까지는 試運轉의 진행과정을 방해할 만한 중대한 사고는 발생하지 않았다.

Superphenix爐心의 규모는 LMFBR技術에서 세계최대이며, 서로 다른 출력수준에서의 시험들이 수행되어 계산된 값과 실제적으로 얻은 값을 비교하였는데 결과치는 예상치와 매우 유사하였다.

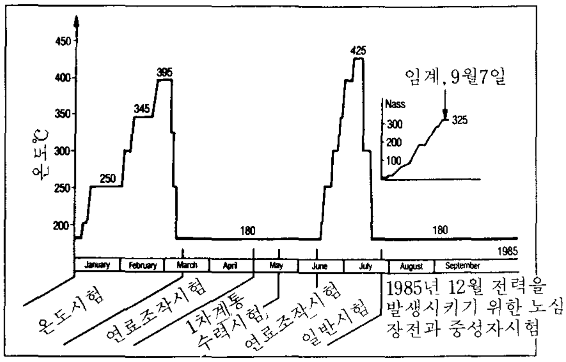
몇가지 문제점들과 이에 대한 해결책은 다음과 같다.

爐 心

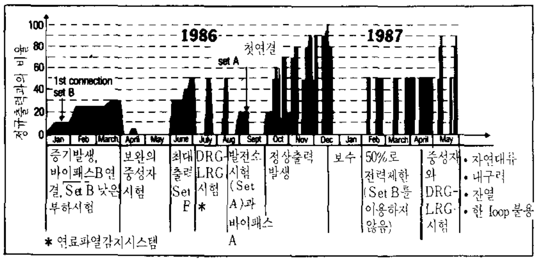
試運轉에서 들어난 유일한 새로운 因子는 노심영역 가장자리의 핵연료집합체와 블랑키트 핵연료의 출구온도에서 일어나는 국부적인 파동의 발견이었다. 이 파동은 핵연료집합체 출구에서 분출에 의한 혼합과 高溫콜렉터內의 나트륨 재순환효과에 기인한다. 이 현상은 온도

〈表1〉 Superphenix 工程

1974	Nersa가 형성됨(EdF51%, Enel33%, RWE 후에 SBK 16%)
1976. 12~	
1981. 중반	토목공사
1977. 4	NSSS계약이 Novatome과 Nira와 이루어짐
1980/1981	NSSS부품을 발전소에 부착
1985	온도상승시험,연료장전,임계에 도달함
1986	전력망에 연결, 전출력작동
1987. 3	연료저장드럼의 누출



〈그림1〉 Superphenix試驗日程



〈그림2〉 Superphenix의 出力상승

감시기인 溫度測定熱電對가 짧은 반응시간을 나타냄으로써 발견되었다. 이에 대한 해결책은 핵연료집합체의 측정절차를 변경함으로써 발전소의 운전에 영향을 미치지 않고 진동을 감소시킬 수 있었다.

核燃料취급계통

핵연료취급계통은 저장드럼의 누출에 의해 조작이 중단될 때까지는 대체적으로 만족스럽게 작동되었으므로 여러가지 性能試驗을 수행할 수 있었다. 照射된 핵연료집합체 1개를 원자로 내에서 교체하는 데는 평균적으로 2시간이 소요되었다.

모니터링시스템을 개선하고, 나트륨 에어로솔이 모일 수 있는 곳을 없애기 위해 原子爐루프슬랩의 차가운 곳을 단열시키고, 예열시스템을 확장함으로써 原子爐 회전플러그의 성능을 증진시켰다.

나트륨의 循環系統

저장드럼의 누출을 제외하고는 나트륨의 순환계통과 그에 연관된 設備는 試運轉中 특별한 문제를 일으키지 않았다. 그러나 잔류열제거순환계통을 지지하는 시스템에서 配管의 움직임이 예상했던 것과 다르게 나타나 이를 수정하였다. 이 문제는 LMFBR技術의 고온특성을 고려하여 설계된 얇은 配管의 유연성과 관련이 있었다.

計裝과 制御

計裝과 制御系統에 대해서 제한된 수정작업이 요구되었지만, 정상상태로 부터 벗어나지는 않았다. 그러나 세개의 Back-up 안전봉에 대한 시험시스템의 수정이 필요하였다. 왜냐 하면 초기단계에서 모니터링시스템이 필요없이 릴레이를 작동시킴으로써 棒의 가상낙하를 발생시켰다. 따라서 네번째 Back-up봉의 설치를 고려해야 했는데, 이것을 결정하는 자료는 全出力 240일에 상당하는 원자로운전 후의 결과에 좌우된다.

전반적인 出力調整系統은 運開 初期동안에 개선되어야 하였다. 특히, 증기발생기로의 급수공급제어(순조로운 運轉에 기본적인 사양)는 정상운전중의 안정된 반응과 급수펌프의 교환 등에 의한 과도현상중에 나타나는 빠른 반응과의 절충을 위하여 수정되어야 했다.

蒸氣循環系統

약간의 증기누출사고가 발생하여 이를 보수하기 위해 운전정지를 했었고, 증기발생기 출구에 있는 기동분리기판을 재조립하여 새로운 보호막을 부착해야 했다.

1987년 2월에 예정된 두번째 증기발생기를 재가동하였을때 격렬한 스팀햄머현상이 발생되어 몇주동안 발전소의 ½가량이 운전중단되었다. 이로 인해서 몇개의 지지대가 빠졌으며, 기동시스템중 低壓蒸氣配管의 용접연결부가 손상되었다.

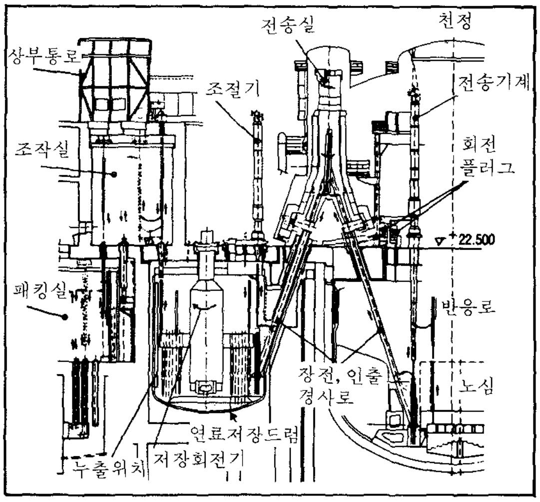
수분분리기의 재가열기로 인해서 터빈발전기의 운전이 여러번 중단되었다. 과도상태가 발생한 동안에 물이 배관부의 상부에 모여 재가열기로 역류하였다. 이 현상으로 터빈보호시스템을 가동시켰는데, 이 문제는 배수시스템을 개조하여 해결하였다.

터빈 A의 蒸氣바이패스系統은 PWR발전소에서 축적된 경험을 기반으로 하여 수정되었고, 터빈 B의 것도 개조된 후에야 사용이 허가되었다.

核燃料貯藏드럼의 漏出

핵연료저장드럼은 原子爐容器 밖에 위치한다. 이 드럼은 노심속에 핵연료집합체를 장전하기 전과 인출한 후의 연료를 저장하는데 사용된다. 이 드럼은 9.5m 직경과12.5m 높이로 약 200℃의 나트륨 720톤을 내장하고 있다. 이 드럼의 主容器는 외부적으로 단열된 보호용기에 의해 둘러싸여 있고, 이 두용기 사이의 150mm의 간격에는 질소가 채워져 있다.

1987년 3월에 두용기 사이의 간격내에 위치한 4개의 나트륨 감지장치에 연결된 경보기가 울리기 시작하였으며, 드럼내 나트륨의 양과 상태를 측정함으로써 저장드럼의 주용기내에서 누출이 발생하였다는 것을 확인하였는데, 漏出量은 약 20litres / h에 달하였다. 누출된 나



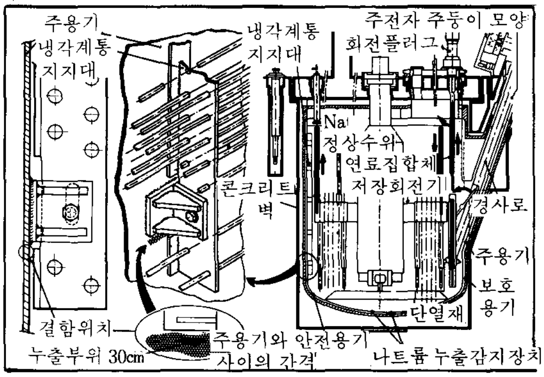
〈그림3〉 연료저장드럼

트륨은 질소에 의해서 화재가 발생하지 않았고, 사고 당시에는 방사능을 띠지 않았다. 원자로의 안전가동에는 영향을 미치지 않았으며, 이 저장드럼은 일년에 단한번 核燃料 再裝塡作業 동안에만 사용하도록 설계되었으므로 즉시 가동을 중단할 필요는 없었다.

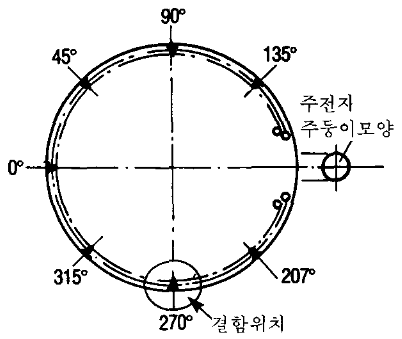
핵연료집합체는 드럼의 상부나 하부에 저장될 수 있으며, 정상적으로 사용할 때 저장드럼은 노심의 반(약 200개의 연료집합체)을 수용하도록 설계되었으나 全爐心分(409개 저장위치)의 핵연료집합체수 이상의 저장도 임시로 할 수 있다. 누출사고 당시에 저장드럼에는 試驗期間中에 사용된 약 300개의 모의핵연료집합체와 중성자시험중에 사용된 10개 가량의 핵연료집합체가 저장되어 있었는데, 이들의 붕괴열은 가장 높을때 100W 이하였다.

누출사고가 발생한 후에 다음과 같은 비상조치가 취해졌다 : 핵연료저장드럼의 배출시스템이 필요하다면 사용이 가능함을 확인, 보호용기 下部 피트內의 나트륨감시계통 개선, 용기사이의 간격에 배출시스템 준비, 드럼내에 저장된 핵연료집합체의 인출을 위한 준비 등이다.

또한 동시에 진행된 연구에서는 핵연료저장드럼을 사용하지 않고 1년 동안 정상출력으로



〈그림4〉 연료저장드럼의 상세도

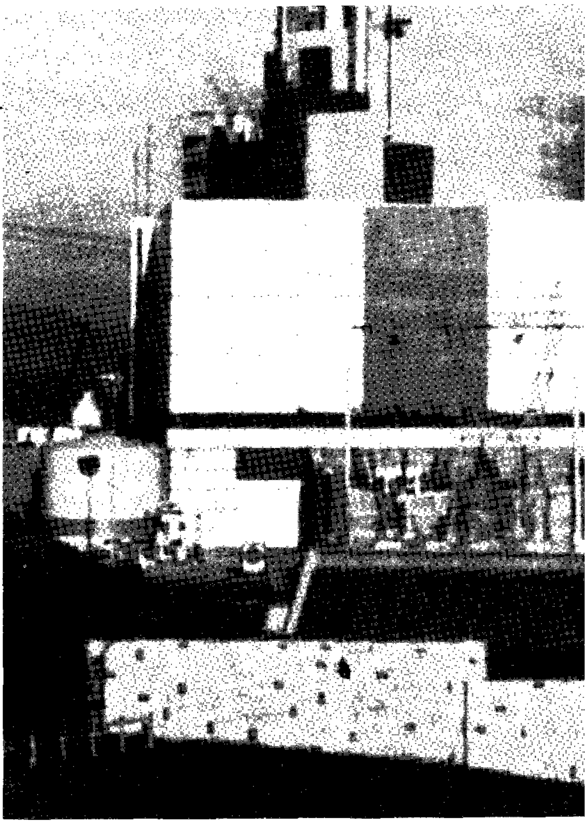


〈그림5〉누출위치

원자로를 가동할 수 있음을 보여주었는데, 이것은 한 핵연료주기 동안 필요한 제어봉과 연소된 핵연료집합체를 위한 추가적인 내부저장시설을 갖추어야 가능하다. 이러한 모든 작업이 1987년 7월 말에 완료되었고, 드럼의 배출도 개시되었다.

핵연료저장드럼과 나트륨저장조 사이의 나트륨배관노즐, 정제시스템, 2차 Ramp Shroud와 드럼의 연결부 등을 광섬유투시경과 카메라를 사용하여 조사하였으나 어떠한 결함도 발견하지 못하였다.

다음은 콘크리트벽의 피트를 통과하여 보호용기의 외곽쪽으로 조사가 이루어졌다. 단열재가 제거된 후에 드럼 하부의 누출예상지점이 열감지 카메라와 온도계를 이용하여 발견되었다. 정확한 누출지점은 드럼 내부의 나트륨 상



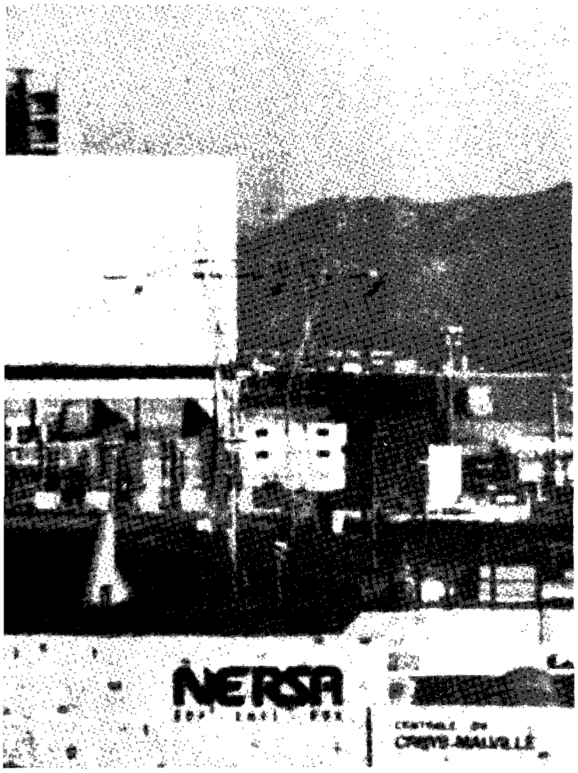
▲ 프랑스 Creys-Malville에 위치한 Super phenix의 전

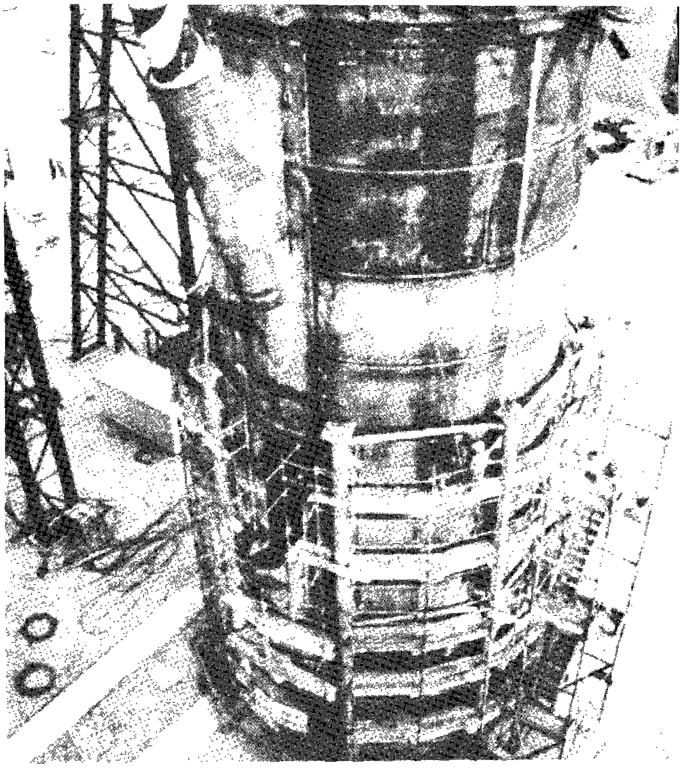
부 공간에 헬륨과 방사성 제논가스를 채우고 나트륨의 수위를 낮추면서 누출부위를 통하여 가스가 새는 것을 감지하여 확실히 찾을 수가 있었으며, 드럼 외부에 위치한 Accelerometer 장치도 사용되었다. 영국제 음향누출감지시스템이 설치되었으나 이것을 사용하기 전에 누출지점을 발견하였다.

방사선투과검사를 이용한 조사에서 냉각배관들을 지지하기 위해 저장드럼 주용기의 내부 표면에 용접된 금속선반중 (Metal Bracket) 한 개의 밑부분에서 30cm 가량의 균열이 존재한다는 것이 밝혀졌으며, 또한 같은 높이에서 다른 유사한 결함들이 발견되므로해서 같은 류의 문제점이 지적됐다(그러나 이 결함들은 용기벽을 관통하지는 못했다).

1988년 1월 누출근방의 결함부위에서 80mm 직경의 금속시료를 채취하였으며, 3월에 균열 그 자체를 포함해 더 큰 試料가 비파괴시험과 최종적인 파괴시험을 위해 채취되었다.

한편 3월16일의 회의에서 Nersa의 책임자가





▲ 건설중인 핵연료저장탱크

저장드럼문제의 해결을 위해 전략적인 선택을 발표했다. 즉, 보수하는 대신에 이 드럼의 기능을 貯藏에서 원자로와의 단순한 연료전달기능으로 변환시키는 것이었다. 아르곤가스가 나트륨 대신에 사용되고, 主容器가 제거되어 보호용기 단독으로 전달기능을 담당하게 될 것이다.

이 계획에 따르면 發電所를 3년 가량 가동시킨 후에 연료를 노심내에서 냉각시킨 다음 노심에서 연료를 꺼내기 위해 몇달 동안 가동을 중단한다. 그때 연료는 개조된 드럼을 통하여 사용후핵연료 저장시설로 이송된다.

현재 이와 같은 제안에 대해서 안전당국이 심의중이며, 이것이 허가된다면 발전소는 연료제거작업에 사용될 적절한 시간인 앞으로 2년에 걸쳐 개조될 드럼(비용 3억프랑)과 함께 곧 재가동을 할 수 있을 것이다.

1987년 12월 안전당국은 저장드럼을 사용하지 않는다는 조건하에서 발전소 가동요구에 합의했다고 Nersa에 통보하였다. 그러나 안전당국은 원자로의 주용기에 대한 가동중의 주기적인 검사와 다음에 계획된 원자로 운전정지 이전에 수행해야 될 다른 연구를 요구하여 현재 원자로는 운전정지되어 있으며, 안전당국이 요청한 검사가 행하여지고 있다. 원자로의 건설중에 주용기와 1차 순환계통에 대해서 행해진 약 20,000건의 방사선투과검사의 결과를 재검토하고 있고, 이들 중 약 15건 정도가 좀더 정확한 해석을 해야 한다고 밝혀졌다. 原子爐容器에 대한 로보트를 이용한 검사도 5월에 시작되었다.

固有의 安全性

Creys-Malville 發電所 NSSS의 전반적인 熱慣性은 발전소의 균형중에 생긴 과도현상을 흡수하는 것으로 나타났고, 負反應度 Feedback에 기인하는 노심의 고유안전성은 원자로를 쉽게 제어할 수 있게 해 준다. 그러나 유사한 크기의 PWR과 비교해 본 주요 부품(펌프, 밸브 등)들의 고장가능확률은 더 큰 것 같다.