

小型液體金屬原子爐의 開發狀況

GE Nuclear Energy는 美國에너지省(DOE)의 改良型液體金屬原子爐計劃의 일환으로 標準화된 멀티플블록發電所의 基本發電유닛인 PRISM(Power Reactor, Inherently Safe Module)을 開發하고 있다.

GE Nuclear Energy는 美國에서 長期原子力發電計劃에 대한 論難이 여러 地域에서 있던 1981년부터 液體金屬原子爐計劃을 혁신적으로 추진하였다.

그 當時 原子力事業은 첫째로 엄격한 原子力基準에 따른 設計, 建設 및 試驗을 거쳐야 하는 現行의 數많은 복잡한 安全系統에 의해서 建設費가 增加하고 建設工期가 長期化되었다. 두번째는 現場에서 品質保證記錄의 유지가 要求되었으며, 따라서 原電 建設現場의 作業量이 지난 15年間 대폭 늘어났다. 세번째는 認許可에 필요한 要求項目이 자주 변경되어 現場에서의 作業量 증가와 더불어 建設工期의 지연으로 인해서 建設費와 간접비가 대폭 상승됨으로써 財政上의 위험부담과 不確實性이 增大되어 더이상 原子力發電所의 利點이 인정받지 못하게 되었다.

이와 같은 장애요인에 의하여 美에너지省(DOE)은 液體金屬原子爐(LMR) 概念設計 프로그램을 추진하게 되었다.

몇가지 基準은 다음과 같다.

- 發電所의 設計概念은 原電의 높은 建設費를 減少하여 經濟性의 면에서 石炭火力發電과 경쟁할 수 있어야 한다.

- 發電所는 최대 5年内로 建設될 수 있어야

한다.

- 商業用 發電所는 換熱변동의 영향을 최소화시킬 수 있도록 小型 또는 규모에 융통성을 부여하여 發注할 수 있어야 한다.

- 標準設計에서 原子力安全과 관련된 部分은 認證을 받음으로써 財政上의 위험부담을 실질적으로 경감시켜야 한다.

- 原子力安全과 관련된 部門은 自體防護原子爐内部에 收容하고, 蒸氣 및 發電部門 등 非原子力級은 재래식 高品質로 건설할 수 있어야 한다.

- 原子力安全 關聯部品은 工場에서 가공, 조립을 하여 敷地로 운반함으로써 建設現場에서 신속하게 設置할 수 있도록 規格화되어야 한다.

- 충분한 시간적 여유가 있으므로 이 概念의 技術的, 經濟的 및 安全上의 특성을 立證하는데 實規模의 原子爐試驗을 채택할 수 있어서 實證試驗費用을 수십억달러에서 수백만달러로 節減할 수 있어야 한다.

이러한 目標들은 原子力發電所를 재래 化石燃料을 사용하는 發電所와 대등하게 建設할 수 있도록 設定된 것이다.

原子力安全과 관련된 設備들을 표준화하여 工場에서 製作함으로써 本社와 現場의 費用을 대폭 절감할 수 있을 것이며, 또한 現場의 作業

량과 資材量에도 상당한 영향을 줄 것이며, 모듈화와 敷地밖에서의 조립에 의해서 더욱 감소될 것이다.

革新的 LMR 인 PRISM

PRISM (Power Reactor, Inherently Safe Module)은 GE Nuclear Energy 주도하에 Bechtel, Borg-Warner, Foster Wheeler, Stearns-Roger 및 United Engineers & Constructors 등이 참여한 産業界팀이 아르곤國立研究所, 에너지技術工學센터, 한포드技術開發研究所, Oak Ridge國立研究所 등의 개발지원을 받은 3年間的 DOE概念設計 프로그램으로써 革新的인 液體金屬原子爐이다.

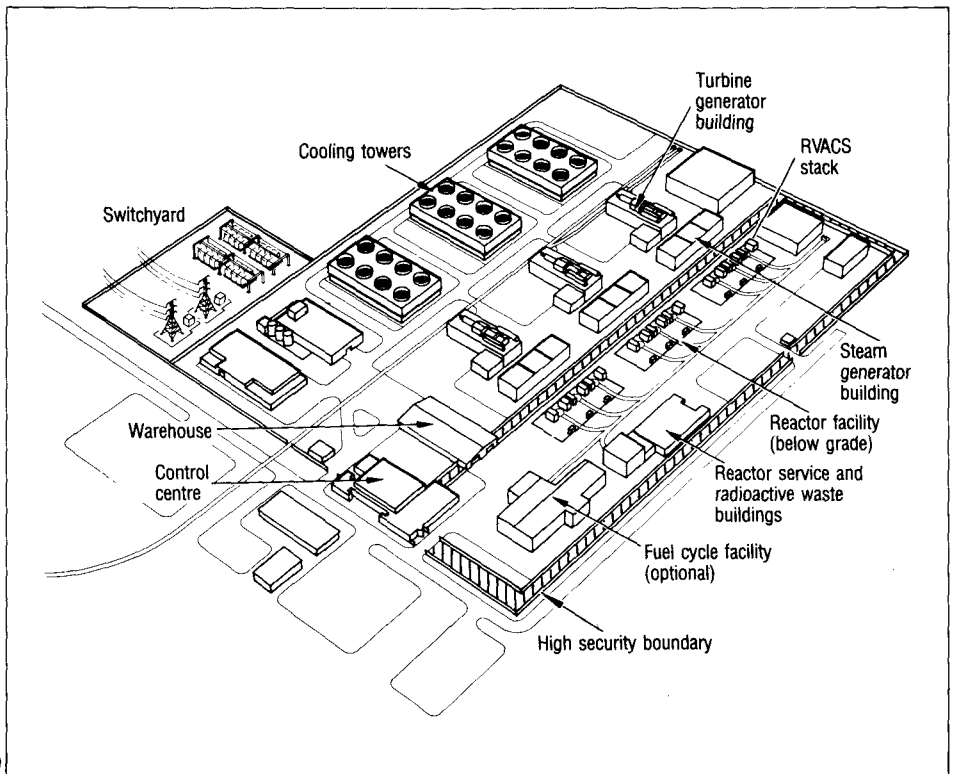
PRISM은 138MWe級 정도의 나트륨冷却原子爐모듈이며, 蒸氣發生器와 함께 發電所規模에 따라 標準化된 멀티블록으로 설치된다. 建設

現場에서 原子力安全과 관련된 建設作業을 최소화시키기 위하여 原子爐모듈은 工場에서 유니트로 製作되어 육로 또는 바지(Barge)편으로 敷地로 운반된다.

PRISM은 一般公衆의 安全 增進과 投資保護를 위하여 재래의 爐停止 및 붕괴열제거계통은 물론 PRISM 특유의 固有한 爐心停止 및 별도의 조작이 필요없는 붕괴열제거특성을 갖추고 있다. 또한 原子爐모듈이 비교적 소형이므로 實規模의 原型爐로 試驗을 할 수 있으며, 設計의 認許可過程에서 이와 같은 특성을 實證할 수 있다.

모듈設計

PRISM發電所는 여러 개의 파워블록으로 이루어지는데, 각 파워블록에는 각각 1대의 나트륨蒸氣發生器를 갖는 138MWe級 原子爐모듈 3



PRISM 플랜트 配置圖
(合計 1,245MWe)

기가 설치된다. 그리고 파워블록에 있는 3대의 증기발생기는 1대의 415MWe 터빈발전기와 연결된다. 대형발전소의 경우에는 맨먼저完工된 파워블록을 운전하여 전력을 생산·판매하면서 다음의 파워블록을 건설 또는 계획할 수 있다.

각 파워블록은 技能面에서 다른 파워블록과 독립되어 있으며, 한 파워블록내의 원자력모듈도 각각 獨自적으로 운전할 수 있게 되어있다. 원자력안전과 관련된 系統 및 建物들은 防護地域内에 位置하며, 이 防護地域밖에 설치되는 나머지 部門, 즉 증기발생기, 制御室, 터빈발전기, 부속 건물 등은 非原子力級이다. 원자력안전과 연관된 원격조정 운전정지계통과 事故後 모니터링施設은 원자력建物内 원자력모듈에 設置된다. 敷地面積은 약 44에이커이다.

核蒸氣供給系統(NSSS)은 원자력모듈, 증기발생기系統 및 中間熱傳達系統(IHTS) 등으로 이루어지는데, IHTS는 원자력 中間熱交換器와 증기발생기를 연결하는 非放射性의 나트륨回路이다. 원자력모듈은 全體가 地下 사일로에 內藏

되며 耐震裝置의 보호를 받는다. IHTS 배관과 증기발생기設備의 대부분도 地下에 設置되며, 원자력容器 보조냉각계통(RVACS)의 덕트에 의해서 원자력모듈 주위의 공기가 자연순환된다.

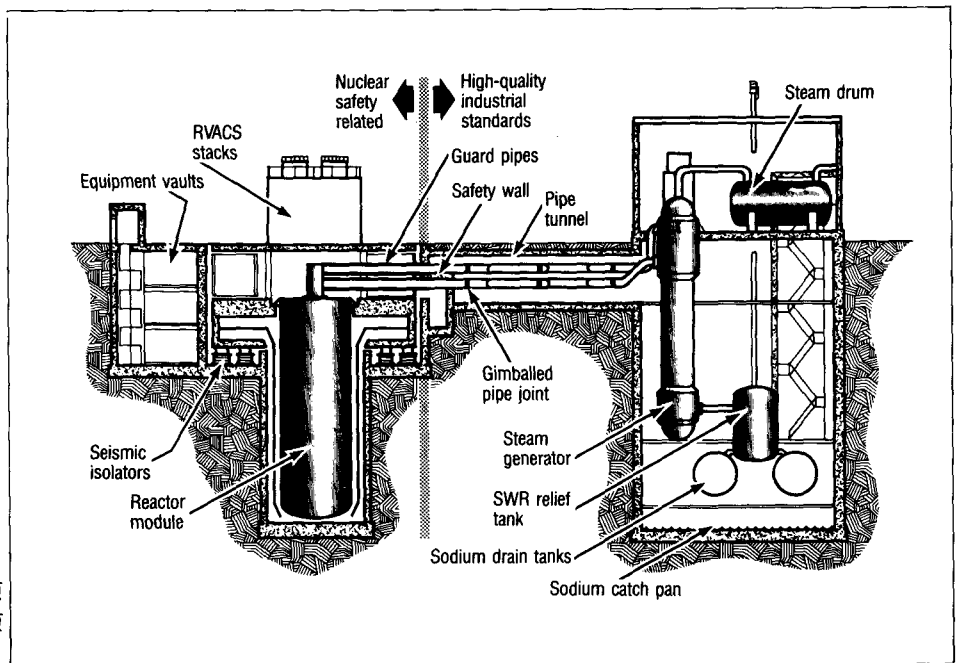
核蒸氣供給系統(NSSS)에 필요한 안전기능은 원자력모듈 内部와 사일로 및 vault 設備에 갖추어지는데 모두 原子力級이고, 地下 IHTS 배관터널이 시작되는 NSSS의 나머지 部門은 非原子力級이다.

IHTS配管에는 열팽창에 대비한 접합부가 있는데, 이는 원자력모듈의 耐震設計에 따른 微動을 완화하기 위함이다.

耐震設計

모든 원자력발전소 敷地에 대해서 標準設計를 적용하는데는 각 敷地마다 각기 다른 地震特性을 갖으므로 어려움이 따른다.

PRISM 원자력모듈設計는 設計에 분리된 耐震裝置를 도입함으로써 이 문제를 극복하였다.



NSSS配置圖(原子力級과 非原子力級)

이 분리장치는 原子爐構造物과 內藏物에 대한 수평방향의 地震負荷를 현격하게 감소시킨다. 따라서 設計余裕度가 증가하고 原子爐部品을 단순화시킬 수 있다.

이 耐震裝置는 原子爐데크構造物과 原子爐容器補助冷却空氣吸入口 아래에 위치하고 있어서 安定된 地盤과 필요시 檢査와 交替를 위해 접근이 용이하다.

2重壁 튜브

1기의 原子爐모듈에 1대씩 있는 蒸氣發生器는 2 $\frac{1}{4}$ Cr-Mo鋼으로 製造된 튜브型 熱交換器이다. 最大限의 信賴性 確保를 위하여 튜브는 지난 21年間 성공적으로 運營된 Idaho 國立工學研究所의 EBR-II 액체금속시험원자로 증기발생기와 유사한 2중벽 구조이다. 漏洩探知器를 갖춘 나트륨·水反應防護系統, 壓力放出系統, 格納 및 블로우다운系統 등에 의해서 蒸氣發生器에서 나트륨·水反應事故가 發生하더라도 原子爐모듈의 中間熱交換器(IHX)는 損傷을 받지 않는다. 또한 原子爐IHX는 前記의 防護系統이 고장날 경우에도 손상없이 全壓力負荷에 견디도록 설계되어 있으므로 原子爐를 나트륨·水反應으로부터 보호한다.

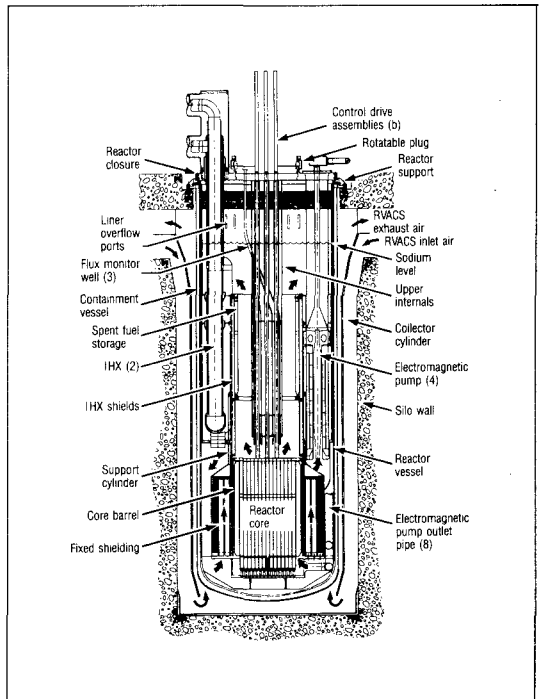
原子爐모듈은 콤팩트한 풀형 原子爐로서 原子爐容器와 内部構造物은 스테인리스鋼이다. 1차나트륨은 10,000gal/min 용량의 電磁式(EM) 펌프 4대에 의해서 爐心에서 IHX의 側面으로 순환되며, 이때 熱이 IHX의 튜브에서 非放射性인 IHTS의 나트륨으로 전달된다. 爐心出口에서의 나트륨溫度는 全出力時 875°F (468.3°C)이다.

放射性인 1차나트륨系統은 原子爐容器內에 완전히 수용되며, 정상운전시 약 1기압에서 밀폐된다. 또한 原子爐容器에 결함이 생겨 나트륨이 原子爐容器에서 漏洩되더라도 格納容器內에 가두어진다. 이 두 容器의 크기는 항상 原子

爐 爐心을 수용할 수 있는 정도로서 爐心을 충분히 冷却시킬 수 있는 능력을 보유하고 있다. 原子爐容器와 格納容器의 사이에는 不活性 가스로 充填되며, 계속해서 漏洩의 징후가 모니터링된다.

使用後核燃料은 한번의 核燃料交換週期 동안 모듈內 爐心 上部 랙에 저장되어 核燃料의 熱發生率을 낮추는데, 이는 그후 容器밖으로 移送하여 별도의 冷却裝置없이 액체나트륨보다 不活性가스中에서 저장할 수 있도록 하기 위함이다.

PRISM의 核燃料로는 原子爐設計의 변경없이 혼합산화물연료나 금속우라늄연료 두가지를 모두 사용할 수 있는데, 核燃料과 블랭킷集積體를 방사형으로 배열하는 방법을 채택한 U-Pu-Zr 금속핵연료가 표본으로 선택되었다. 그 결과 爐心特性의 向上과 核燃料週期費의 잠재적인 개선을 가져왔다. 各 原子爐모듈의 核燃料交換週期는 20個月로서 爐心の 약 30%를 교환한



原子爐모듈

다. 발전소에서 금속핵연료로심을 사용하는 것은 아르곤國立研究所가 開發하고 있는 技術을 기반으로 하여 敷地内에 함께 位置하고 있는 施設에서 核燃料을 再處理하는 어프로치와 관련이 있다.

崩壞熱 除去

터빈이 作動하지 않을때 原子爐의 붕괴열은 바이패스라인을 통해서 콘덴서로 정상적으로 전달된다. 보수시와 같이 이 경로를 이용할 수 없는 경우에는 보조냉각계통(ACS)을 이용한 蒸氣發生器셀의 자연대류 공기냉각에 의해서 붕괴열을 제거할 수 있다. 原子爐 壽命期間中 한번 일어날까 말까한 IHTS에 의한 原子爐모듈의 냉각이 이루어지지 않는 사고시에는 별도의 조작이 필요없는 原子爐補助冷却系統(RVACS)이 作動된다.

정상출력운전중 RVACS를 통한 熱損失은 全出力時 약 9.2%이다. 그러나 IHTS에 의한 정상적인 冷却이 안될 경우 原子爐의 나트륨溫度가 상승하게 되며, 이에 따라 RVACS에서의 복사 및 대류 열전달도 原子爐의 붕괴열과 RVACS의 冷却이 평형을 이룰때까지 증가한다.

에너지 보존법칙을 이용하여 流量喪失事故時 RVACS 단독의 冷却溫度와 全出力條件에서 스크램하여 IHTS에 의한 原子爐의 冷却溫度를

계산한 결과 最高溫度는 30시간후 1,200°F (650°C)였다. 이 가혹한 조건은 거의 發生될 가능성이 없으나, 이와 같은 非常事態에서도 충분히 견딜 수 있다. 즉, 格納리스크(1,300°F, 704°C)나 나트륨의 沸騰溫度(~1,800°F, 982°C)에 대한 安全余裕度가 크다.

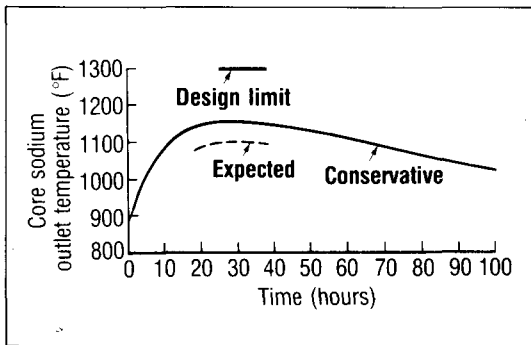
RVACS는 단순한 구조와 그 성능이 외부의 영향을 거의 받지 않으므로 PRISM에서 安全한 運轉停止熱除去系統으로 평가받고 있다.

6 개의 主制御棒이 爐心出力을 조정하며, 스크램도 시킨다. 또한 PRISM은 一般公衆의 安全을 더한층 도모하기 위해서 液體金屬冷却 原子爐가 갖는 固有의 爐停止特性을 최대한 活用하도록 설계되었다. 따라서 제어봉의 탈락, IH-TS에 의한 냉각능력 상실 등 重大事故時 스스로 熱除去能力에 맞추어 出力을 제한하게 된다.

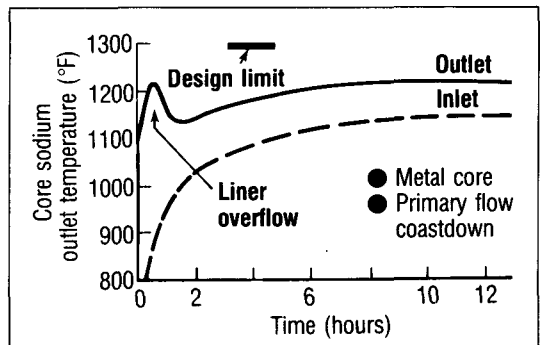
敷地밖에서의 組立製作

최근의 높은 原電 建設費를 극복하기 위하여 PRISM에서는 原子爐와 BOP모듈을 敷地밖 工場에서 조립제작하는 등 색다른 어프로치를 시도하고 있다. 이 모듈화 어프로치의 主目的은 現場의 作業費를 줄이고, 建設工期를 短縮하기 위함이다.

工場에서 製作되는 原子爐모듈은 직경이 20ft (6.1m), 높이가 60ft (18m) 이내이고, 무게는



全出力에서 中間熱傳達에 의한 냉각상실후 原子爐 溫度 (스크램有)



全出力에서 中間熱傳達에 의한 냉각상실 후 原子爐 溫度 (스크램 無)

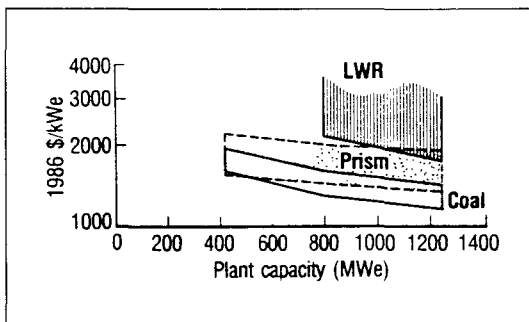
나트륨과 核燃料을 제외하면 약 1,100 톤, 펌프와 熱交換器를 제외하면 800 톤 이내이다.

工場에서의 組立 및 試驗이 끝나면 各 原子爐 및 BOP모듈은 철도, 육로 또는 바지편중 가장 경제적인 방법으로 發電所 現場으로 수송된다. 모듈이 建設現場에 도착하면 크레인으로 수송차량에서 제 위치로 옮긴다. 이와 같은 어프로치에 의해 現場에서 조립 및 결합하는데 要하는 時間을 短縮할 수 있고, 또 現場의 作業量을 줄일 수 있으므로 現場 作業費를 節減하고 建設工期를 短縮한다는 目的을 달성할 수 있을 것으로 기대된다.

建設費 節減效果

일반적으로 原子力發電所 建設에 적용되는 經濟規模에 있어서 小型原子爐의 어프로치는 建設費의 상승을 가져온다고 한다. 그러나 PRISM에서는 파워블록과 복수의 동일한 原子爐 및 증기발생기 구조로 모듈화 어프로치가 최적화되고 있다. 美國原子力規制委員會(NRC)가 標準發電所를 認可함에 따라 現場의 建設作業을 최소로 하는 모듈을 工場에서 반복생산함으로써 生産性과 經濟性의 利點이 명백해질 것이다.

PRISM 設計에 대한 資本費를 算定하여 앞으로 10~20年內에 系統併入될 전형적인 석탄화력 발전소에 대한 DOE의 데이터와 비교하였다. PRISM 原子爐모듈을 工場生産함으로써 얻어지



資本費 比較

는 높은 生産性과 經濟的 利益은 小型原電의 建設에 따른 經濟的 不利함을 상쇄하고도 남는다.

PRISM 코스트曲線의 모양은 400MWe에서 1,245MWe 규모의 化石燃料發電所 曲線과 같이 평탄한데, 開發段階에서는 이것이 KW當 몇달 러라는 절대적인 수치보다 더 중요하다. 이와 같은 曲線의 형태는 原子力모듈의 반복생산효과와 原子力安全級 部門을 축소함으로써 이루어진다.

앞으로의 展望

PRISM은 政府에서 수행하는 原型爐의 安全試驗을 기반으로 하여 認可될 것이며, 따라서 기존의 시설과 전문인력을 최대한 활용함으로써 開發費를 최소로 줄일 수 있다. 증기발생기를 포함한 非原子力級 部門은 NRC의 認可를 받을 필요가 없으므로 實規模의 標準原子爐모듈은 熱덤프와 연결하지 않은 상태로 試驗될 것이다. 液體金屬原子爐(LMR)는 충분한 運轉經驗을 갖고 있지 않으므로 중전의 分析에 의한 認可方法보다 試驗에 의한 認可方法이 더 빠르고, 費用도 절감되며 또한 公衆의 호응도 더 받을 수 있다.

이 프로젝트의 스케줄은 概念設計를 끝낸 다음 1988년에 LMR概念으로 DOE의 검토를 받은 후 NRC의 承認試驗을 거쳐 PRISM固有의 特性을 확인하기 위한 原型爐프로젝트의 設計作業을 1989년에 시작하는 것이 目標이다.

建設은 1990年代 初에 될 것이며, 安全性試驗은 1990年代 末에 完了될 것인데, 이 安全性試驗에 이은 發電의 實證에는 증기발생기, 터빈발전기 등 에너지전환설비가 추가된다. 138MWe 플랜트가 核燃料週期를 實證하는데도 이용될 것이다. 또한 이 프로젝트가 開發되는 全過程에서 重要 部品과 系統에 대한 시험도 프로젝트의 日程에 맞추어 적합한 國立研究所에서 수행될 것이다.