

日本 核燃料週期 完結을 向한 接近方向

日本 原子力 R&D의 搖籃 日本原研·動燃 訪問記



徐 引 錫
(韓國에너지研·核化工部長)

1985年 4月 9日~ 4月 11日 까지 日本 東京에서 開催된 第18回 日本原子力産業會議 年次大會에 필자는 韓國原子力産業會議와 필자가 소속된 研究所의 配慮德澤으로 韓國參加團(22名)의 一員으로 參席할 機會를 얻었다. 大會性格은 每年 春季에 日本原産이 開催하는 原子力國際會議로서 今年 會議는 「原子力産業의 完熟을 指向해서」라는 基調테마를 가지고 發表, 討論을 가졌다. 參加者는 3個 國際機構와 29個國에서 온 外國人 200餘名, 日本人 600餘名으로 大規模 會議였다.

會議場 분위기는 아주 진지했으며, 原子力の 研究·開發 및 利用技術 分野에서도 自信感이 넘치는 日本人들을 볼 수 있었다. 印象인 것은 聽衆 大部分이 50~60代 壯年層으로서 우리나라에서의 學術大會나 Workshop, 세미나 등에 形成하고 있는 年令層과 다른 분위기였다. 會議 도중 Coffee Break이 없는 것도 日本人다운 자세였다.

本 筆者는 會議가 끝난後 4月 12日 日本原産의 주선으로 日本 原子力研究機關을 訪問할 機會를 얻었다. 訪問團은 日本原産 안내인을 포함하여 韓國인 4명 등 모두 10餘名이었다.

단 하루의 日程으로 極히 制限된 施設만을, 그것도 皮相的으로 走馬看山式으로 훑어본 후 訪問記를 쓴다는 것이 不充分하고 無理임을 自認하는 바이다. 서울의 東大門을 하루에도 數없이 往來하면서도 東大門의 正式名이 崇禮門임을 아는 사람이 많지 않은 것 처럼 짧은 一瞥일지언정 實狀을 정확히 전달하는 것이 重要하다고 나름대로 생각하면서 本 訪問記를 쓰는 바이다.

1. 日本原子力研究所

日本原子力研究所(JAERI)는 1956년에 창설되어 原子力の 基礎研究와 특히 核에너지生産系統研究(多目的高温가스冷却爐, 核融合), 核安

全研究, 放射線應用研究에 主力하고 있다. 一般現況을 보면 현재 職員數는 2,500餘名이고, '84年度 豫算은 108億엔(356億원)이었다. 組織은 本部에 理事長, 2인의 副理事長 및 8名の 理事로 構成된 理事會와 12개의 執行部署가 位置하고 있다. 研究部署는 크게 나누어 6個의 單位로서,

- 東海研究所
- Takasaki Radiation Chemistry Research Establishment
- Radioisotope Center
- O-arai Research Establishment
- Naka Fusion Research Center
- 原子力船 Mutsu

安全센터는 東海研究所에 附設되어 있다. 重要研究分野 및 機關의 現況을 要約하면 다음과 같다.

《東海研究所》

1957년에 Tokai-mura에 設立되었으며, 主要施設로서는

(1) 原子爐

JRR(Japan Research Reactor)-2, JRR-3, JRR-4가 位置하고 있으며, 1個의 JPDR(Japan Power Demonstration Reactor)이 있다. 이들 研究爐 및 試驗爐에서 여러종류의 研究, 實驗, 照射試驗 등을 遂行한다. JRR-3은 出力을 높혀 實驗領域을 확장할 豫定이다. JPDR은 日本에서 最初의 電力生産 實證任務를 完遂하고 앞으로는 廢爐 技術開發 對象으로 活用한다.

(2) 安全 R&D 施設

原子爐安全과 關聯된 시설로서는 LOCA時 Emergency Core Cooling System(ECCS)의 實驗을 위한 Large Scale Test Facility(LSTF)가 있다.

Reactivity-initiated事故時 核燃料의 舉動研究를 위한 Nuclear Safety Research Reactor(NS-RR)가 1975년부터 稼動中이다.

- 出力은 定出力, 맥동出力 兩用이며 定出力

은 300KW, 맥동出力은 最大 23,000MW로 여러 形態의 實驗Capsule을 가지고 있다.

○ 그동안 NSRR은 미국 PBF, 프랑스 PHEBUS, 서독 PNS 등과 國際共同研究를 遂行했다.

(3) 多目的高温가스冷却爐 R&D 施設

○ 多目的高温가스冷却爐(Very High Temperature Gas-Cooled Reactor, VHTR)는 Nuclear Process熱을 製鐵工業, 化學工業, 石炭, 水素 液化 및 電力生産 目的으로 利用하기 위하여 設計되었다.

○ VHTR을 實現키 위해서 50MWt VHTR 實驗爐를 詳細設計해왔고, 出口冷却가스 溫度를 950℃로 定했고, 이에 關聯한 核燃料, 構造物, 原子爐 엔지니어링, 高温構造, 大型部品에 關한 R&D를 계속했다.

○ 熱水力 試驗施設로서 Helium Engineering Demonstration Loop(HENDEL)를 約半정도 設置하였다.

○ VHTR의 設計研究를 위한 Critical Assembly를 운영하고 있으며,

○ 高温爐의 研究·開發에 서독, 미국과 國際協力を 進行中이다.

(4) 關聯研究 및 基礎研究 施設

○ FBR開發과 關聯한 實驗裝置로서 Fast Critical Assembly

○ 材料研究用 高壓電子顯微鏡

○ 中性子 測定用 LINAC

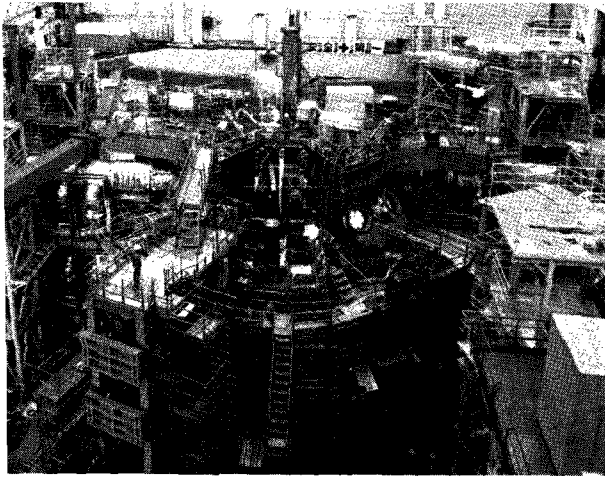
○ Heavy Ion Tandem Accelerator와 Neutron Scattering Facility

《Naka Fusion Research Center》

○ 1975년부터 核融合研究를 國策課題로 수행했다. 本 프로그램의 主目標은 核融合爐의 Breakeven Plasma條件을 達成하는데 있다.

○ Naka-machi에 JT-60 건설에 着手하여 거의 完工되었다.

○ JT-60은 世界的으로 봐서 4大 Tokamak로서 EC의 JET, 미국의 TFTR, 소련의 T-15 등



〈플라즈마實驗裝置 JT-60〉

과 비교할만한 규모이다.

○ JT-60의 設置 운영목적은 核融合의 임계플라즈마조건달성, 핵융합로의 실용성 實證으로 요약되며, 主要 構成은 toroidal field coils, poloidal field coils, 진공용기, 플라즈마를 精製하기 위한 magnetic limiter, neutral beam injection, radio - frequency 加熱裝置 等이다.

○ '78년부터 現在까지 약6,300億원을 投入했고, '85년 4月 8日 水素플라즈마의 發生에 成功했다.

〈Oarai Research Establishment〉

1967년에 設立되었으며, 主要시설로서는

○ JMTR은 日本内에서 中性子束이 가장 높은 50MW 材料試驗爐로서 材料와 核燃料를 照射하고, 附設되어 있는 照射後試驗施設에서 試驗을 한다.

○ JMTR의 中心部에는 VHTR의 開發과 관련된 In-Pile Gas Loop가 裝着되어 있다.

○ Plutonium Fuel Research Laboratory에서는 플루토늄카바이드와 우라늄카바이드 混合核燃料를 研究·開發해서 FBR의 advance fuel로 사용할 예정이다.

○ 放射性廢棄物의 處理施設도 이곳에 位置하고 있다.

〈Takasaki Radiation Chemistry Research Establishment〉

1963년에 Takasaki-shi에 設立되었고, 放射線化學의 研究·開發을 專門的으로 遂行한다. 4基의 Co-60 照射施設이 있고, 2機의 電子加速器, 1機의 X線發生裝置가 있으며, 이들을 利用하여 放射線處理加工, 物質에 對한 放射線損傷研究를 한다. 應用放射線化學의 基礎研究를 促進하기 위하여 1967년에 Osaka에 分所를 設立하였다.

研究內容을 살펴보면 放射線加工에 依하여 高分子重合體를 合成하거나, 排氣氣體, 廢水, 下水 찌꺼기 等を 放射線으로 處理하여 깨끗이 하거나 소독한다. 의료제품이나 食品을 방사선으로 멸균하기도 한다. 原子爐에 사용되는 電線의 品質을 試驗하는 方法을 研究하고 있다.

〈Radioisotope Center〉

放射性同位元素의 生産은 原子爐에서 製造할 수 있는 RI의 종류를 擴張하는데 主力하고 있다. 加速器에 의한 RI의 제조와 品質改良에도 노력하고 있다. 核融合에 사용될 H-3의 製造方法을 開發하고 있으며, Cf-252가 中性子源으로 사용될 수 있도록 應用을 위한 연구를 하고 있다.

〈原子力船 Mutsu〉

原子力船의 研究·開發은 原子力船 Mutsu를 사용한 試驗研究와 船舶用 原子爐의 研究·開發로 나누워진다. 原子力船 Mutsu는 현재 아오모리현의 무쓰시에 定박중이고, 本格的 試驗을 遂行하기 위해서 항만을 건설중이다.

原子力船 Mutsu의 成果를 活用하여 經濟性, 신뢰성이 우수한 船舶用 原子爐의 研究·開發을 위해 試驗設計를 추진하고 있다. Mutsu의 主要한 諸元을 보면

○ 길 이 : 130m, 폭 : 19m, 깊이 : 13.2m

○ 총 톤 수 : 8,242톤, 적재무게 : 2,430톤

○ 출 력 : 10,000馬力

- 原子爐型：加壓輕水冷却型 1基
열출력：36,000KW
燃 料：低濃縮 酸化우라늄
- 航海速度：16.5노트
- 航續거리：145,000海里 等이다.

2. 動力爐·核燃料開發事業團

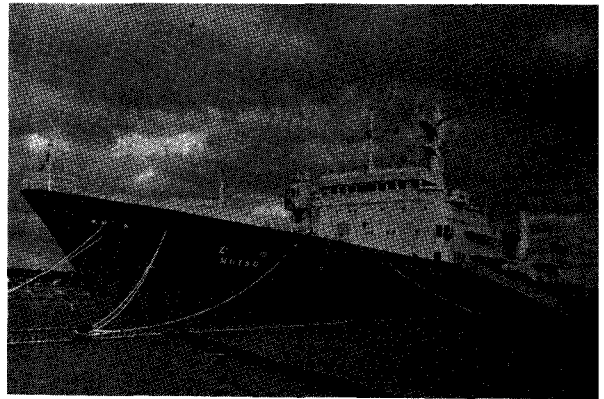
一般現況으로서 動力爐·核燃料開發事業團(PNC)의 最近資料를 入手치 못하였으나, 1983年 末 자료에 依하면 人員은 約2,900名, 豫算은 1,700億엔에 이르고 있다.

JAERI, PNC의 年間 豫算을 合算하면 大략 1조원정도로서 10億달러에 육박한다. 우리와 日本의 GNP를 對比해 보아도 韓國의 原子力研究費와 日本의 그것은 너무나 격차가 벌어져 있음을 알 수 있다. 부존된 에너지자원이 없는 프랑스, 日本 等은 확실한 代替에너지로 原子力을 선택한 후 原子力發電計劃의 推進은 勿論 여기에 결말는 R&D에도 充分히 效果가 나타나도록 投資를 하고 있는 原子力開發에의 意志와 戰略을 엿볼 수 있다.

JAERI와 PNC의 R&D는 核先進國에서 遂行하고 있는 모든 分野에 손을 대고 있음을 알 수 있다. 美國은 富強한 나라이기 때문에 原子力 R&D를 獨自의로 遂行하고 있으나, 좀 힘이 딸리는 유럽의 나라들은 共同으로 遂行하고 있음을 익히 아는 바이다. 그러나 아시아의 強國 日本도 週邊 아시아國家와 너무 水準差가 있다고 判斷해서인지 유럽처럼 共同으로 R&D를 遂行하고자 提議한 적이 없다.

JAERI는 大體로 基礎 R&D 性格이 強하고, PNC는 半工業 規模의 核燃料사이클 R&D를 주로 다루고 있다. PNC 本部 아래에 基幹組織單位로서

- Ningyo Toge Works
- Chubu Exploration Office
- O-arai Engineering Center



〈原子力船 Mutsu〉

- Tokai Works
 - Fugen Nuclear Power Station
 - Monju Construction Office
- 等이 있고, 各 單位 組織이 遂行하는 R&D 또는 業務內容은 다음과 같이 要約된다.

〈Ningyo Toge Works〉

○ 정련시험공장이 位置하고 있으며, 우라늄原鑛에서 부터 Yellow Cake製造工程을 거치지 않고 直接 原子爐 品位級 UF₆製造法을 開發하였다.

○ 1972년부터 PNC Tokai Works에서 遠心分離方法에 依한 우라늄濃縮技術의 開發이 이루어졌고, 1977년에 7,000遠心分離單位의 Pilot Plant가 Ningyo Toge Works에 建設을 着手하여, 1982년 完全稼動을 하였다. 이 Pilot工場에서 얻은 試製品이 이미 FUGEN 原子爐에 使用되었다.

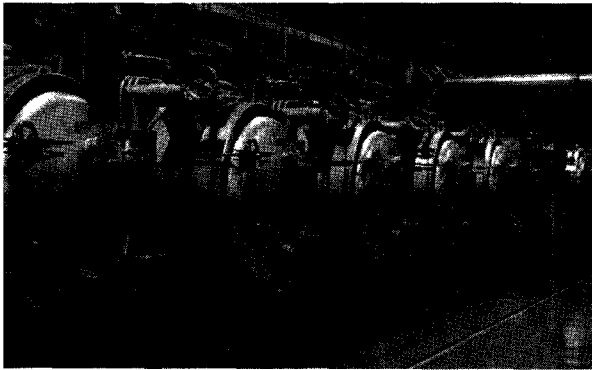
〈Chubu Exploration Office〉

○ 日本 原子力發電計劃에 따르면 2,000년까지 必要한 U₃O₈量은 310,000톤이며, 現在 日本 內 保有가 확실한 量은 10,000톤 정도이다.

○ 不足한 量의 輸入方式은 “探查 및 輸入”으로서, 이를 위해 PNC探查팀이 아프리카, 캐나다, 호주 等地에서 활약중이다.

〈Tokai Works〉

- 核燃料사이클技術의 R&D 센터로서
- 遠心分離方法에 依한 우라늄濃縮技術 開發



(Tokai Works 우라늄濃縮施設)

- 使用後核燃料 再處理 技術
 - 變換技術 開發
 - 高準位 放射性廢棄物의 固化技術
 - 高速增殖爐에 關聯한 核燃料사이클技術開發
 - 플루토늄 核燃料 製造
 - 核燃料 및 核物質 檢査 및 化學分析
- 等의 業務를 遂行하고 있으며 特記할만한 것은 다음과 같다.

○ 1979년 核擴散의 위험이 없는 技術로서 우라늄/플루토늄 混合 질산용액에 microwave 直接加熱方法으로 탈질하여 酸化물을 만드는 共變換技術을 개발.

○ 1966년부터 Tokai Works에서 Pu을 취급했고, Pu核燃料의 製造와 高速增殖爐 JOYO와 新型轉換爐 FUGEN에 裝填用 核燃料를 製造했다.

1981년 10月에는 PNC 再處理工場에서 分離된 Pu으로 核燃料를 製造하여, FUGEN爐에 燃燒시키고 있다.

○ 高速增殖爐에서 使用後核燃料 再순환과 관련한 研究로서 laser beam을 이용하여 核燃料集合體를 解體하는 技術, 溶解된 排氣中 核分裂生成가스 除去, 차폐 cell內에서의 원격조작기술 등을 개발하고 있다.

○ Chemical Processing Facility는 JOYO 使用後核燃料 再處理 試驗施設로서, 1982년에 Chemical flow sheet 確認試驗을 完了했고, 120kg/日 용량의 再處理 Pilot工場 建設을 계획하고 있다.

○ 0.7톤/日의 再처리공장이 1971년 建設을 着手하여 blank test, chemical test, hot test를 거쳐, 1981년 稼動을 했다.

재순환 技術중 再처리가 가장 重要하고 敏感技術로 分類되어 있기 때문에 hot test를 하기 前에 美國과의 交渉에 많은 난관이 있었으나, 마침내 美國의 소위 事前同意를 얻은 바 있다.

2年前 높은 溫度와 酸度 때문에 용해조에 심각한 부식이 있어 잠시 조업이 中斷되었으나, 日本 國內에서 製作한 용해조로 代置하여 지난 2月에 檢査運轉을 개시하였다.

《O-arai Engineering Center》

1967年 PNC는 O-arai에 JOYO, FUGEN-HWR의 새로운 爐型 開發에 着手했다. O-arai의 主要 施設로는

- JOYO 關聯施設
 - FUGEN-HWR R&D 施設
 - 一般技術施設 支援
- 等 모두 18개 建物로 構成되어 있다.

JOYO는 PNC가 FBR에 關한 國家 프로젝트로서 着手했으며, 同時에 實際 크기의 mock-up 시험시설을 設置하여 R&D를 併行했다. JOYO를 建設함으로써 日本은 世界에서 5번째 FBR 保有國이 되었다.

○ JOYO를 利用한 R&D 내용은 核燃料 및 核物質 照射試驗, 運轉 維持·補修의 經驗蓄積 設計運營費의 最適化.

○ 1970年 建設을 着手하여 1978년 50MWt 出力을 얻었고, 1980年 75MWt, 1983년에 100MWt 出力을 얻었다.

- JOYO 爐心 核特性은
- 核燃料는 U/Pu 混合酸化물
- U濃縮度: 約12%
- 裝填量: Pu 約220kg, U-235 約60kg
- 最大中性子束: $5.1 \times 10^{15} \text{n/cm}^2 \cdot \text{sec}$
- 平均中性子에너지: 250Kev
- 最大燃燒度: 50,000MWD/톤

〈FUGEN Nuclear Power Station〉

PWR 使用後核燃料에는 아직도 未燃燒 U-235 와 生成된 Pu-239 등이 모두 대략 1.6% 정도 있다. 이를 다시 사용하는, 즉 재순환시키면 우라늄資源을 效率적으로 利用하게 되므로 海外 依存 輸入量을 輕減시킬 수 있다.

이런 目的으로 日本이 獨立的으로 開發한 것이 FUGEN 原型爐(165MWe)로서 1979년 稼動이 되었으며, 여기서 얻은 經驗을 토대로 實證 爐(600MWe)를 設計하고 있다.

日本 東海電力, 關西電力의 輕水爐에서 排出된 使用後核燃料를 Tokai Works PNC에서 再處理, 變換, 混合酸化物燃料 製造工程을 거쳐 1981年 10月에 FUGEN爐에 裝填하여 연소시키고 있다. 自體開發한 核燃料週期施設에서 하나의 사이클을 이루면서 混合酸化物燃料를 연소시킬 수 있다는 것에 對하여 日本의 關聯當事者들은 대단한 자부심을 가지고 있다.

〈Monju Construction Office〉

○ JOYO에서 蓄積된 技術을 바탕으로 Monju FBR을 建設中이며, 이는 原型爐로서 약280MWe 電力을 生産하게 된다.

○ 현재는 주로 부지의 환경조사를 완료했고, Safety Licencing中이다.

3. 맺는말

日本은 石油 위기가 닥치기 前에 이미 原子力을 實質的 代替에너지로 利用할 것을 決定하여 原電事業을 推進하였고, 이를 뒷받침하고 있는 原子力의 R&D에도 莫大한 投資를 계속했다.

○ 現存하는 輕水爐의 發電에 必要한 先行核燃料週期技術, 即 우라늄探査, 開發·輸入, 精鍊, 變換, 濃縮, 核燃料加工 등의 技術開發과 事業에 曄목할만한 成果가 있었다.

○ 後行核燃料週期技術開發을 위하여 그동안 PNC에서 再處理, 再變換, 混合酸化物燃料, 高速增殖爐 또는 新型轉換爐에서 연소시키고, 이를

다시 再處理하는 이른바 재순환 技術을 確立하였다. 日本은 全核燃料週期技術을 하나의 사슬로 完結한 나라가 되었으며, 이런 R&D實績을 바탕으로 아오모리젠에 1990년 중반까지 商用規模의 再處理工場, 濃縮施設, 放射性廢棄物 저장시설 등을 建設하는 原動力이 되었다. 실제로 民間 事業者가 PNC에서 부터 關聯技術을 移轉받게 되었으며, 人的交流까지도 考慮하고 있다. 日本은 프랑스와 비슷하게 政府, 事業者, R&D 集團間에 役割分擔이 아주 잘 되어 있고, 相互協力體制가 구축되어 있다.

○ 現在 進行中인 R&D는 核分裂에너지系統 뿐만아니라 未來의 에너지인 核融合에너지라든가, 多目的가스冷却爐, 安全性研究, 研究用原子爐를 利用하는 研究, 加速器 등을 利用하는 中性子物理, 高速臨界裝置, 放射線加工, 放射性同位元素, 原子力船 등 原子力의 全研究 및 利用分野에 걸쳐 投資하고 있다.

○ 日本의 原子力事業이나 R&D에 從事하는 사람들이 한결같이 부르짖는 것은 “에너지自立” “海外依存性 脫皮 또는 輕減” “에너지供給의 安定” 등으로 要約할 수 있다. 에너지自立은 獨立國家로 存續하는 하나의 要件으로 理解하고 있으며, 自國의 生存權에 결부하여 이야기를 하기도 한다. 이런 생각이 폭넓게 이해되어 있고, 광범한 合議에 이르러 있음을 엿볼 수 있다.

○ 근래 日本은 富強한 나라가 되어 世界主義的인 색채를 많이 띄고 있다.

일본과 같은 先進國이 原子力發電에 置重하고 더 나아가서는 有限한 우라늄資源의 利用을 極大化하는 재순환 技術로 發電하는 것과 같이 어렵고도 技術集約的인 原電方式을 追求하는 것이 開發途上國을 爲한 길로서 日本의 義務라는 것이다.

왜냐하면 日本의 이런 原電利用은 開途國에 손쉬운 化石燃料의 利用機會나 비순환식 原電機會를 더 줄 수 있어 도움을 준다는 것이다.