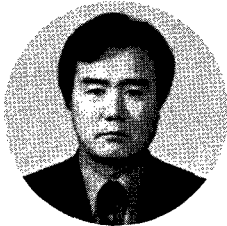


# 重水爐 核燃料의 國産化 開發現況

Status of Localization Program for HWR Fuel Technology in Korea



徐 庚 壽

(韓國에너지研 · 重水爐核燃料事業部長)

## I. 序 言

重水爐核燃料의 國産化事業은 國內의 原子力發電에 關聯된 技術, 特히 核燃料週期技術中에서 가장 먼저 國産化를 爲한 研究開發을 試圖한 課題로서, 그 研究開發의 結果에 對한 實證試驗을 거쳐 成功을 確認하였으며 現在 確立된 研究開發技術에 依해서 量産化를 눈 앞에 두고 있는 實情이다.

1978年末, 核燃料加工技術의 開發과 次後 量産時 必要한 技術人力의 養成을 目的으로 核燃料加工試驗施設이 完工되었으며, 1980년까지는 同 施設을 利用하여 輕水爐用 및 重水爐用 核燃料加工技術에 關聯된 基礎研究를 遂行하였다.

1981年 政府는 輕水爐用 核燃料는 外國으로 부터의 技術導入에 依해서 國産化하기로 하고 重水爐用 核燃料加工은 自體技術 開發에 依해서 遂行하기로 하는 政府方針을 決定하였다.

1981年 政府特定研究開發課題로 採擇된 月城 爐用 核燃料 製造技術 開發事業은 核燃料 設計, 安全性 解析, 核燃料 製造技術, 性能評價,  $UO_2$  變換 및 照射後試驗 等の 分野로 構成된 Task Force Team에 依해서 遂行되었다.

1983년에는 研究開發에서 確立된 核燃料 製造

技術의 實證過程으로서 核燃料試製品을 캐나다 原子力公社 所有 材料試驗爐인 NRU原子爐(NRU Reactor, Chalk River National Laboratory, Atomic Energy of Canada Limited)에서 爐內性能試驗을 무사히 마치고 照射된 試料核燃料는 照射後核燃料 性能試驗을 實施하였다. 이와 並行하여 韓國에너지研究所에서 自體設計 建造한 爐外性能 試驗施設을 利用하여 熱水力學的 및 機械的 性能試驗을 實施한 結果에서도 아무런 異常이 없음이 立證되었다.

이와 같이 國産核燃料의 性能 및 安全性을 確認한 後, 1984년에 24個의 試製核燃料 다발을 月城 原子力發電所에 裝填한 結果 異常없이 燃燒를 마쳤으며 이어서 1985년에도 24다발을 裝填하여 現在 燃燒中에 있다.

또한 1986년부터는 確立된 重水爐核燃料의 量産技術에 對한 實證段階에 돌입하므로써 매년 점차적으로 그 공급량을 증가시켜 나가도록 하며, 1988년부터는 月城 原子力發電所에 要所되는 核燃料의 全量을 製造, 供給할 計劃으로서 現在 計劃에 蹉跎없이 進行되고 있다.

本稿에서는 研究開發 및 實證試驗의 後續事業으로서 推進中인 月城 爐用 核燃料의 量産化事業의 推進現況에 對해서 記述하고자 한다.

## II. 月城爐用 核燃料 및 製造技術

### 1. 月城爐用 核燃料

月城爐用 核燃料集合體(Fuel Bundle)는 37個의 稠密하게 排列된 核燃料棒이 2個의 接合板에 依해 兩端이 銲接된 圓桶型 核燃料 다발로 이루어진다(그림 1). 이 核燃料集合體의 構成 要素로는

- 核燃料物質로서 天然 二酸化우라늄 燒結體 (UO<sub>2</sub> Pellet),
- 內部가 黑點으로 塗布된 지르칼로이被覆管 (Graphite-coated Zircaloy-4 Tube),
- 燒結體를 被覆管에 裝填한 後 棒端銲接을 하기 爲한 棒端마개(Zircaloy-4 End-cap),
- 燃料棒사이의 一定間隔을 維持시키기 爲한 間隔體(Zircaloy-4 Spacer Pad),
- 集合體의 外環棒 外部로 附着되는 支持體 (Zircaloy-4 Bearing Pad),

- 燃料棒을 集合體化하는데 必要한 兩端接合板(Zircaloy-4 Endplate)

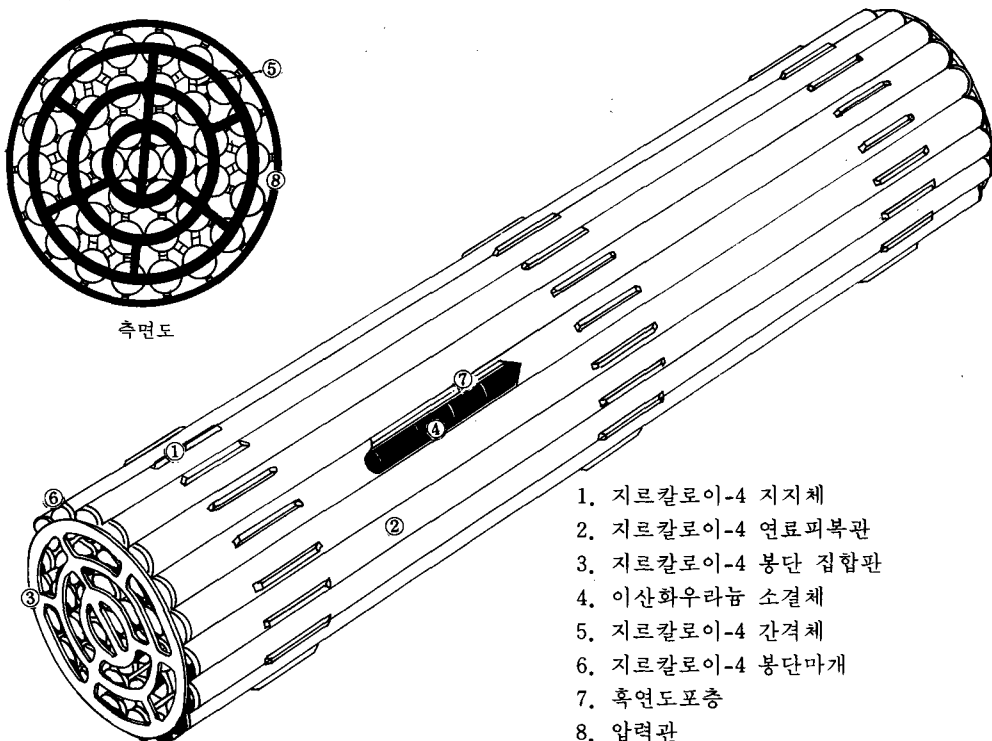
等으로서 主要物質은 UO<sub>2</sub>와 Zircaloy-4이다. 그 밖에 副資材로써 黑鉛塗布를 爲한 黑鉛콜로이드 相 溶液, 間隔體 및 支持體의 被覆管 경납땀을 爲한 金屬베릴륨이 있다.

### 2. 核燃料 製造工程

月城爐用 核燃料를 製造하는데 必要한 主要 工程은 다음과 같다.

- 이산화우라늄粉末에서 密度, 길이 및 直徑이 큰 燒結體를 製造하기 爲한 燒結體 製造工程,
- 附着物(間隔體 및 支持體)이 경납땀되고 內部에 黑鉛이 塗布된 被覆管에 燒結體를 裝填, 棒端마개를 銲接하는 核燃料棒 製造工程,
- 製造된 核燃料棒으로부터 集合體로 組立하

〈그림 1〉 月城爐用 核燃料다발



는 核燃料集合體 組立工程 등으로 나누어지며, 附隨的으로 間隔體, 支持體 및 棒端마개 製造工程, 黑鉛塗布 및 베릴륨塗布 工程, 경남맹工程이 追加된다.

이들 主要工程은 56個의 單位工程으로 構成되어 있으며, 이는 17個의 品質檢査點을 包含한다. 39個의 單位工程은 대부분 各各의 機器나 裝置를 必要로 하며, 이들 中 一部는 重水爐核燃料 製造用 專用裝置로서, 예컨대 燃料棒 加工 工程의 경남맹裝備나 봉단마개 鎔接裝備 등이 그것이다.

各 主要工程別 所要裝備를 살펴보면,

1) 燒結體製造工程에서는,  $UO_2$ 壓粉體 製造用 壓粉機,  $UO_2$ 壓粉體의 燒結을 爲한 燒結爐(~1700°C, 還元分圍氣) 및 研削을 爲한 無心研磨機와

2) 燃料棒 製造工程에서는 黑鉛塗布機, 部品の Be塗布機, 點鎔接機, 경남맹裝備 및 봉단마개 鎔接機가 있으며,

3) 燃料棒을 集合體로 만드는 集合體 組立機가 있다.

4) 그 밖에 部品(봉단마개, 間隔體, 支持體 및 兩端接合板)加工을 爲한 프레스와 旋盤 등이 있다.

### III. 月城型 核燃料 技術의 實用化

#### 1. 核燃料 製造技術의 量産化

基本的인 製造工程 및 技術은 研究開發段階와 量産段階에서 生産規模에 관계없이 거의 동일하다. 그러나 研究開發段階에서는 少量의 試製품을 製造하기 때문에 多量의 生産過程을 거쳐야만 確立될 수 있는 變數, 特히 原資材의 品質이 製造工程에 미치는 影響 등을 充分히 檢討할 수

\* 月城爐用 核燃料 및 製造工程의 仔細한 內容은 “韓國의 重水爐核燃料 製造技術 開發經驗,” 原子力 産業 第五卷, 11號 p. 30~32를 參照바람.

없다. 또한 研究開發段階에서는 製品에 對한 全數檢査가 遂行되지만 量産段階에서는 샘플링計劃에 따라 製品檢査를 하는 것이 바람직하며 이를 위해서는 샘플링計劃에 높은 信賴度를 부여할 수 있도록 工程의 安定化가 이루어져야 한다.

工程의 安定을 維持하기 위해서는 精密한 工程管理技術이 開發되어야 함은 물론 開發된 工程技術의 標準化가 遂行되어야 한다.

開發된 工程技術은 標準化에 의하여 管理·維持되며 技術情報가 統一되고 따라서 製品의 品質向上 및 工程의 安定이 可能해진다.

月城型 核燃料의 量産을 위하여 遂行된 工程技術의 標準化 內譯은 다음과 같다.

#### 가) 工程흐름圖 作成

工程흐름圖는 製造工程, 檢査工程, QC Release點 등을 포함한 核燃料製造에 대한 基本的인 工程의 흐름을 나타낸 것으로서, 各 工程에 要求되는 部品 및 材料와 製品의 品質을 만드는데 必須的인 工程의 흐름을 한눈에 볼 수 있다.

#### 나) 工程示方書 作成

工程示方書는 核燃料 製造工程에 대한 細部的인 工程要件을 記述한 것으로서, 使用되는 材料의 要件, 基本的인 製造方法, 工程品質要件 등을 明示하며 月城型 核燃料 製造에 대해서 9種의 工程示方書를 作成하였다.

#### 다) 購買示方書 作成

購買示方書는 核燃料 製造에 使用되는 原·副資材의 要件을 記述한 것으로, 材料의 物理的 및 化學的 性質, 機械的 性質, 치수 등을 明示하며 지르칼로이 및  $UO_2$ 粉末 등에 대하여 11種의 購買示方書를 作成하였다.

#### 라) 作業工程圖 作成

作業工程圖는 各 製造工程에 대한 치수要件, 使用裝備 및 工具, 工程內譯 등을 記述한 것으로, 作業者가 工程作業을 遂行하는데 必要한 모든 情報를 提供한다. 月城型 核燃料의 경우 10種의 作業工程圖를 作成하였다.

마) 作業指針書 作成

作業指針書는 各 核燃料 製造工程에 대한 標準作業節次를 記述한 것으로 品質 및 生産性이 一定하게 유지되도록 工程 및 裝備를 가동하는 節次를 明示하며 21種의 作業指針書를 作成하였다.

2. 工程裝備의 量産化

月城型 原子爐 1機를 稼動하기 위해서는 年間 約 100Ton·U의 核燃料가 所要되며 이는 核燃料 集合體로 約 5,300個에 該當한다. 年間 100Ton·U의 燃料를 生産하기 위한 核燃料 部品の 數量은 表 1 과 같다.

研究開發 過程에서 使用한 核燃料 試驗 施設의 裝備 및 機器의 生産規模는 年間 10Ton·U로서, 機器 및 工程裝備의 量産化가 不可避하였다. 이를 위하여 凡用裝備(例: 燒結爐)는 外國의 專 <表 1> 年間 100Ton·U의 燃料를 생산하기 위한 核燃料 部品

단위: 個

부 품 명	수 량
집 합 체	5,300
UO <sub>2</sub> 소 결 체	6,050,000
연 료 봉	203,500
봉 단 마 개	407,000
봉 단 접 합 관	11,000
지 지 체	297,000
간 격 체	858,000

門 製作業體로부터 導入하였고, 月城型 核燃料 製造用 專用機器는 自體 設計하여 國內 專門製作業體와 共同開發·製作하였다.

研究開發 過程에서 使用한 機器와 量産을 위하여 導入 또는 製作한 裝備의 容量 및 特性은 表 2 와 같다.

특히, 月城型 核燃料 製造用 專用機器는 카나 다의 CANDU型 核燃料 製造會社들 만이 自體 開發, 製作하여 使用하고 있으며 이들 會社로 부터 專用機器를 輸入할 경우 國內製作費의 약 8~10倍의 經費가 소요되며, 이러한 機器는 原子力 關聯 裝備로서 核燃料 製造技術과 密接하게 關聯되어 機械만의 輸入은 容易하지 않은 實情이다. 따라서, 이들 專用機器는 自體 設計하여 國內 專門製作業體와 共同으로 開發, 製作하였으며 그 工程裝備는 다음과 같다.

- 自動 tack 銲接機
- 誘導體(Susceptor)를 利用한 경납땜 裝置
- 眞空蒸着式 베릴륨塗布機
- 管流式 黑鉛塗布機
- 自動 組立銲接機

이들 國內 製作 工程裝備中 代表的인 實例로서 自動 tack 銲接機 및 誘導體를 利用한 경납땜 裝置에 대해 紹介한다.

<表 2> 核燃料 製造用 工程裝備 容量 및 特性 比較

구분	연구 개발 용 기기		양 산 용 기기	
	제 조 처	용량 및 특성	제 조 처	용량 및 특성
공정장비 소결체연마기 장 입 장 치	외 산	수동장입 50kg UO <sub>2</sub> /day	국내제작	자동장입, 배출 및 건조 500kg UO <sub>2</sub> /day
베릴륨 도 포 장 치	외 산	Sputtering방식 2 bundle분/day	국내제작	진공증착식 30bundle분/day
점 용 접 치	국내제작	수 동 80tubes/day	국내제작	자동장입 및 점용접 520 tubes/day
경 납 땜 치	외 산	고주파직접가열식 (80tubes/day)	국내제작	고주파 2차 유도 가열식 (400 tubes/day)
흑 연 도 포 장	국내제작	Coating & Drying겸용 (duttom flooding) 100tubes/day	국내제작	Bottom flooding방식 600tubes/day (발명특허 획득)
핵연료집합체 조립 장 치	외 산	저항용접식 수동 5 bundle/day	국내제작	전자식 Control자동방법 30bundle/day)설계중) (

#### 가) 自動 택(tack) 銲接機

tack 銲接工程은 核燃料 被覆管 外面에 附着物을 경납땜하기 爲하여 被覆管의 一定한 位置에 베릴륨이 塗布된 附着物을 假銲接(tack welding) 하는 工程으로서 附着物이 被覆管에 附着되는 位置 및 附着物의 種類에 따라 5가지의 燃料棒 形態를 銲接하며, 이때 燃料集合體 1개에 銲接되는 附着物의 數는 210개이다.

이와 같은 工程作業을 遂行하는 自動 tack 銲接機(사진 1)는 5가지 形態의 銲接作業을 選擇的으로 遂行할 수 있고, 附着物(支持體, 보통 間隔體, L型間隔體)의 選別 및 供給, 銲接條件의 自動制御, 銲接位置의 決定 等은 PC(Programmable Controller)에 依해서 遂行된다. 被覆管은 手動으로 銲接機에 裝填 및 除去하며, 附着物은 매거진에 裝入된 狀態로 銲接機에 裝填된다.

이 銲接機로는 1시간에 80개 程度의 被覆管에 附着物을 銲接할 수 있다.

#### 나) 경납땜(brazing) 裝置

附着物이 tack 銲接된 被覆管을 眞空 狀態에서 一定한 溫度로 加熱하면 附着物에 塗布되어 있는 베릴륨과 지르코늄이 Zr-Be 共晶合金을 形成하여 diffusion brazing이 되므로써 附着物과 被覆管이 一定한 接着強度를 갖게 된다.

이와 같은 경납땜工程은 從來에는 被覆管 外部에 直接 誘導코일을 設置하는 高周波 誘導加

熱 方法이 使用되었다. 이 方法으로는 1回加熱 作業에 1개의 被覆管을 경납땜하거나 이러한 裝置를 여러개 並列로 連結하여 경납땜 數量을 增加(6개 정도)시켰다.

이와 같은 方式의 경납땜作業工程은 많은 作業時間이 所要되기 때문에 量産 工程에 適用이 困難하고, 作業回數가 많아지므로 均一한 品質을 維持하기가 어렵다. 이와 같은 問題點들을 解決하기 爲하여 2次 誘導電流를 利用한 加熱 方法을 自體 開發하여 多量의 被覆管을 同時에 경납땜 할 수 있는 裝置를 製作하였다.

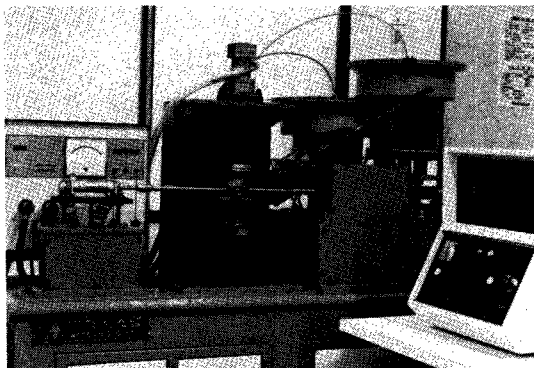
本 裝置는 1次 誘導코일과 被覆管 사이에 誘導體(Susceptor)를 使用하는 것으로, 誘導體에는 被覆管이 裝入될 수 있는 多數의 구멍이 加工되어 있고 각 구멍들은 誘導體 外部와 좁은 홈으로 連結되어 있다. 誘導體의 材質은 電氣 抵抗이 적은 銅을 使用하였다. 本 裝置에서 1次 誘導코일에 高周波 電流를 供給해 주면 그 電流는 誘導體 表面으로 誘導되어 誘導體에 加工된 各 구멍 및 홈을 따라 흐르게 된다. 이 電流는 다시 誘導體의 구멍에 裝入되어 있는 被覆管 外部로 誘導되어 흐르게 되며 이 誘導電流에 의하여 被覆管이 加熱되므로써 경납땜 작업이 遂行되도록 되어 있다(사진 2).

이 裝置는 이러한 誘導體의 原理를 利用하여 1回 加熱作業으로 30개의 被覆管을 경납땜할 수 있다.

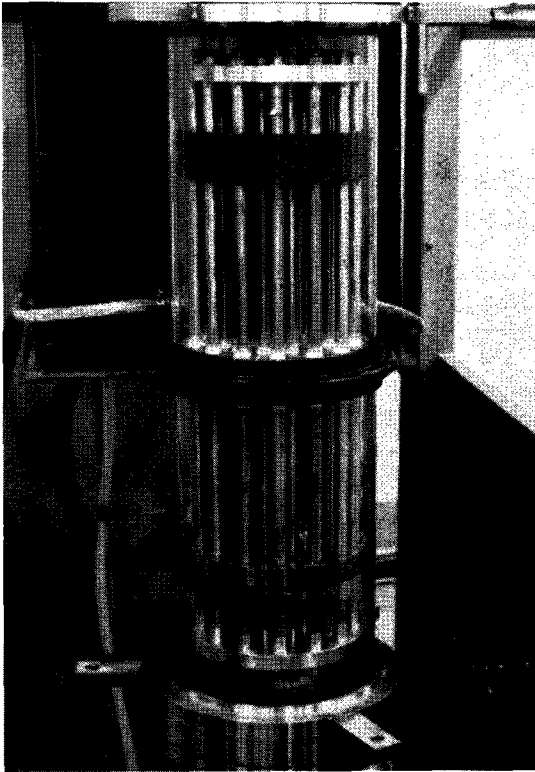
### 3. 量産化에 必要한 品質保證體制의 確立

研究開發(R & D)段階에서는 基本設計要件에 맞게 製品이 生産되었는지를 確認하기 爲한 檢査業務 爲主로 品質管理가 行하여져 왔다. 品質檢査에 依한 製品의 評價는 小量生産이나 R & D段階에서의 製造技術 및 工程確立을 爲해서는 가장 效果的인 方法이라고 할 수 있다. 그러나 生産工程의 確立이 完了되고 生産規模가 量産化됨에 따라 製品에 對한 結果의 評價라는 小極的인 品質管理보다는 製品의 品質을 事전에 豫見

〈사진 1〉 量産用 自動 tack 銲接機



〈사진 2〉 量産用 경납땜裝置



하거나 管理해서 不良品이 나오지 않도록 制度的이고 體系的인 시스템을 樹立하는 이른바 品質保證體制의 確立이 必要하게 되었다.

品質保證體制의 確立에 있어 主要한 事項은 다음과 같다.

- 1) 檢査에 所要되는 人力과 時間의 消耗을 줄이기 위한 샘플링檢査技術의 開發 및 導入,
- 2) 生産LINE 爲主의 品質管理로부터 設計業務, 原資材 購買業務, 契約關聯事務 等を 包含하는 廣範圍한 事業組織의 構成 및 運營,
- 3) 設計要件이 製品의 生産에 이르기까지 제대로 反映될 것을 保障하기 爲한 諸般 品質 및 製造文書의 作成 및 管理,
- 4) 主要工程의 資格化 및 特別管理를 包含한 生産工程의 段階別 管理,
- 5) 不適合 資材·部品에 對한 發見, 處理方案 決定, 是正措置 및 再發防止對策의 樹立 및 適用,

6) 試驗·檢査用 計測機器의 檢較正 및 管理,  
7) 品質保證 記錄의 體系的인 確保 및 維持 方案의 樹立 및 實行,

8) 全體의 品質保證制度에 對한 定期的인 評價·改善을 爲한 品質監査의 遂行,

9) 品質管理要員 및 製造作業者에 對한 教育 訓練 및 資格附與 制度의 樹立 및 實施,

現在 重水爐核燃料事業部의 品質保證體制은 原子力法 施行令 第 139條 및 同 施行規則 第 10條 및 59條의 規定에 의거하여 確立되었으며, 內容의으로는 美聯邦法 10 CFR 50, APP. B의 原子力事業者의 品質保證體制 要求事項을 參考로 하여 作成되었다.

이와 같은 制度的인 品質保證體制의 確立은 앞으로 生産, 供給될 核燃料에 對한 品質의 安定한 維持를 爲하여 必須不可缺한 要件이 되며, 이로써 對外的으로 品質의 信賴度를 提高함은 물론, 對內的으로 一貫性있는 業務機能의 確保와 함께 生産性 向上과 原價節減에 寄與하게 될 것이다.

#### IV. 結 言

月城爐用 核燃料의 國産化 製造供給이 實現될 경우, 이는 研究開發에 依해서 確立된 技術이 自體的으로 實用化되는 代表的인 事例가 될 것이므로 그 귀추가 자못 期待되고 있다.

現在까지의 推進狀況으로서는 確立된 量産技術에 依해 1988년부터는 月城發電所에 所要되는 核燃料 全量을 供給한다는 當初의 目標達成에 큰 蹉跎이 없을 것으로 豫想된다.

이 밖에 月城爐用 核燃料에 對한 先行核週期 技術 確立으로 에너지供給 自立化에 寄與하게 되었으며, 여기에서 얻어진 經驗과 技術은 現在 外國으로부터의 技術導入으로 推進되고 있는 輕水爐用 核燃料 製造技術의 消化·吸收에도 寄與하게 될 것이다.