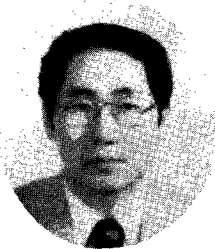


核燃料製造와 開發에 關하여



韓國에너지研究所 大德工學센터

核週期開發部長 徐 引 錫
核燃料加工室長 徐 庚 壽



1. 序 論

原子力發電의 燃料은 使用하는 核分裂性物質 (우라늄 및 플루토늄)을 高度의 技術과 施設을 필요로 하는 몇 단계의 過程을 거쳐 連鎖反應에 의한 核分裂에너지를 얻을 수 있도록 알맞는 形態로 設計·加工하여 原子爐心部에 裝填하여야 한다. 즉, 鑛山에서 採鑛을 한 原鑛을 精鍊, 變換, 濃縮을 거쳐서 製造된 二酸化우라늄을 加工하여 原子爐에 使用하게 되는데 이를 先行核燃料週期라고 부른다.

이 先行核燃料週期에서 核燃料加工은 原子爐에 裝填하는 核燃料集合體를 製造하는 마지막 工程으로서 다른 核燃料週期要素와 相互 密接한 關係를 갖고 있는 主要工程이다.

核燃料은 原子爐內에서 核分裂에 의한 막대한 에너지를 放出하여 發電함과 동시에 核分裂生成物에 의한 放射線의 放出源도 되기 때문에 核燃料의 性能은 原子力發電의 安全性 및 發電 價에 직접적인 影響을 미치게 된다. 따라서 核燃料은 原子爐內의 高温 多量의 冷却水 및 高放射線 霧圍氣속에서 燃燒期間동안 核分裂生成物의 流出없이 安全하게 원하는 에너지를 생산해

야 하므로 核燃料加工은 高度의 技術과 엄격한 品質管理를 要한다.

우리나라의 原子力發電所 建設計劃에 의하면 1983년 現在 稼動 및 建設중인 發電所 數는 總 9基이며, 1991년까지는 11基의 原子力發電所가 稼動된다. 이중 重水爐型原子力發電所인 月城發電所 1基를 제외한 10基가 加壓輕水爐이므로 소 요되는 核燃料도 加壓輕水爐用 核燃料가 주 종을 차지하게 될 것이다.

本文에서는 우리나라 核燃料需要의 주종을 이 를 加壓輕水爐用 核燃料를 대상으로 하여 輕水 爐型核燃料의 構造 및 設計規格과 核燃料 加工 技術 內譯 등을 간략히 說明하고 先驗外國의 例 를 소개한 후 우리나라의 核燃料事業의 現況에 대하여 언급하겠다.

2. 加壓輕水爐(PWR)用 核燃料 및 加工技術

1) PWR用 核燃料 構造

PWR型 核燃料은 初期에는 核燃料棒을 14× 14의 正方構造로 支持構造帶(grid assembly)에 의하여 고정시켜 棒間의 간격을 유지하도록 設

計되었으나, 核燃料의 효율적인 燃焼 및 安全性 向上을 目的으로 15×15, 16×16 및 17×17 등 의 단계로 변경되어 棒直徑은 적어지고 棒配列 數가 증가하는 추세로 改良되고 있다.

支持構造帶는 核燃料棒을 支持하기 위하여 s-pring 및 dimple과 冷却水를 혼합하기 위한 mixing vane 등으로 構成된 금속 strape들을 바둑판 配列로 맞물리도록 組立되었다. 核燃料棒은 圓기둥型 低濃縮(約 3%의 235-U) 二酸化우라늄燒結體를 裝填한 Zircaloy피복관의 양단을 Zircaloy棒端으로 막고 鎔接하는데 이 核燃料棒 内部에는 核燃料의 波勞壽命을 연장하기 爲하여 strain 및 stress가 감소되도록 高压의 He가스가 充填되어 있다. 制御棒(Control rod)의 案内管(guide thimble)에 一定 간격으로 지지구조대가 부착되었고, 上下양단에 nozzle이 부착되었다. 下部 nozzle은 상자모양의 구조로 되어 있으며 集合體에 冷却水흐름의 방향을 정하는 역할을 하며, 上部 nozzle은 制御棒 및 다른 部品の 지지역할을 한다.

現在 實用化되고 있는 어떤 世界的 大메이커社 製品의 PWR핵연료 종류별 基準設計規格은 表 1과 같다.

2) 核燃料 加工技術

PWR核燃料加工은 일반적으로 濃縮UF₆에서 核燃料集合體 製造까지와 이에 필요한 品質管理 및 검사를 포함한다. 아울러 핵연료가공은 燃焼度와 직결되므로 이에 관련된 核 및 熱水力設計, 炉心管理까지 포함하는 경우도 있다.

여기서는 濃축UF₆에서 UO₂粉末로 제조하는 變換技術, UO₂燒結體製造, 核燃料棒製造, 集合體組立 및 각 工程에 필요한 QA/QC에 相關된 技術內譯 및 개발추세에 關해서 說明하겠다.

가. UF₆-UO₂ 變換

濃縮工程을 거친 우라늄은 氣體狀態의 UF₆로서 이 UF₆를 發電用核燃料로 使用하기 爲해서는 일단 變換工程에 의하여 二酸化우라늄 粉末形態로 製造하게 된다.

UF₆에서 UO₂로의 變換方法에는 크게 나누어

乾式法과 湿式法이 있으며 湿式法에는 AUC法과 ADU法이 실용화되고 있다. 그림 1은 각 變換方法의 工程度이다.

乾式法은 技術이 간단하고 連續工程이며 廢液發生이 없으며, 核臨界調節이 용이한 것이 長点이나 UO₂粉末의 壓粉性이 나쁘며 폐기물의 처리를 爲한 별도의 施設과 찌꺼기 回收施設이 追加되어야 하는 短点이 있다.

이에 比하여 湿式法은 UO₂粉末의 壓粉性이 좋고 廢棄物을 自体處理할 수 있다는 것이 利点이며, 폐액의 처리, 核臨界로 인한 施設用量을 제한해야하는 점 등의 短点이 있다. 각 變換方法別 UO₂의 特性비교는 表 2와 같다.

특히, AUC工程에 의해서 제조된 UO₂粉末은 他 方法에 比해서 粉末의 流動度가 크므로 壓粉性이 良好하여 豫備壓粉 造粒化工程이 필요없으며, 粉末의 比表面積이 월등히 커서 燒結性이 우수하다. 그러므로 UO₂燒結體 製造工程의 단순화로 인한 비용, 시설 및 인원의 절감등을 고려할 때 AUC방법이 技術적으로 유리한 轉換方法으로 간과될 수 있다.

나. UO₂ 燒結體 製造

UO₂ 燒結體 製造는 現在 UO₂粉末을 壓粉하여 製造된 圓기둥형의 壓粉體를 水素霧圍氣에서 1700℃ 이상의 高温으로 約 4시간 燒結하여 理論密度 95%이상 고밀도의 燒結體를 제조하는 還元소결방법을 사용하고 있다. 이 소결체는 設計에서 要求한 規格으로 無心鍊磨機에 의하여 直徑, 偏心率 및 表面粗度 등을 조절한다.

최근에 독일에서는 低温酸化燒結方法을 開發中인데, 이 方法은 CO/CO₂ 분위기에서 1100℃로 1시간 소결한 후, H₂/N₂분위기에서 1시간 還元하는 方法으로써 gas費, 電力費, 生産性 및 시설비 등의 절감을 꾀하고 있다. 現在 開發추세로 미루어 보아 이 方法은 1985년경에는 實用化될 것으로 전망된다.

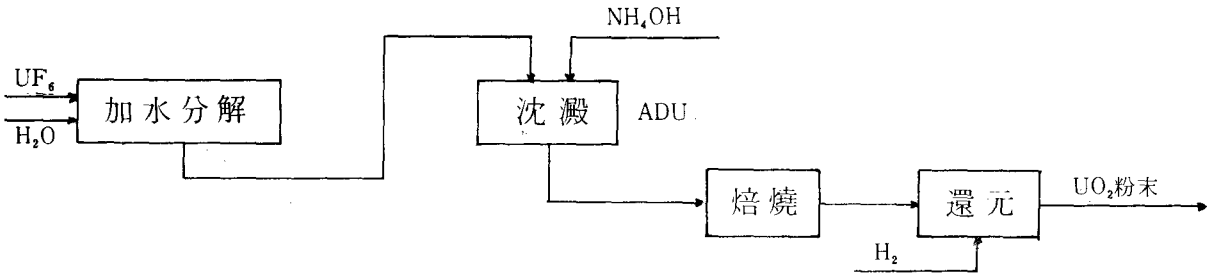
다. 핵연료봉 製造

핵연료봉 製造는 UO₂소결체를 Zircaloy-4 tube에 裝填한후 燒結體의 流動을 막기 爲한 용수철을 끼우고 Zircaloy-4 材質로 된 棒端을

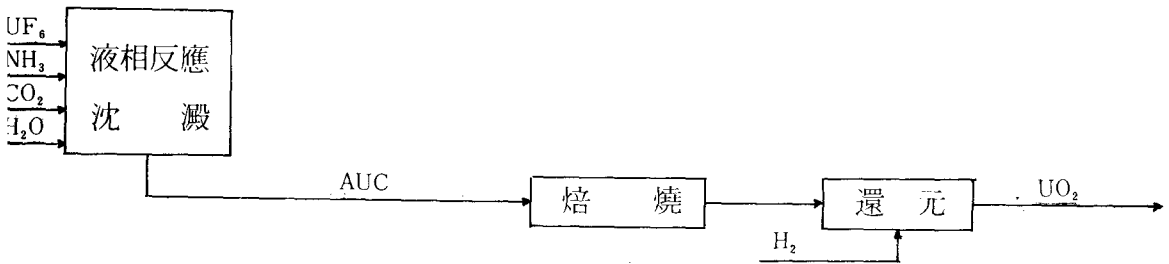
표 1. NUCLEAR FUEL SPECIFICATION

FUEL TYPE	KORI-1 14x14 FUEL ASSEMBLY	KORI-2 16x16 FUEL ASSEMBLY	KORI-5 & 6 17x17 FUEL ASSEMBLY
ITEM			
FUEL ASSEMBLIES			
NUMBER	121	121	157
ROD ARRAY	14x14	16x16	17x17
UO ₂ RODS PER ASSEMBLY	179	235	264
ROD PITCH (cm)	1.412	1.23	1.260
OVERALL DIMENSION (cm)	19.71802x19.718	19.718x19.718	21.402x21.402
LENGTH OF ASSEMBLY (cm)	405.06		
FUEL WEIGHT (AS UO ₂) (kg)	55202.127	56292.951	81596.611
ZIRCALOY WEIGHT (kg)	11949.234	12862.935	17202.810
NUMBER OF GRIDS PER ASSEMBLY	7-L TYPE	8-TYPE F	8-TYPE R
MASS OF BUNDLE			
PELLET WEIGHT PER ASSEMBLY (kg)	456.216		
ZIRCALOY WEIGHT PER ASSEMBLY (kg)	98.754		
FUEL PELLETS			
MATERIAL	UO ₂ SINTERED	UO ₂ SINTERED	UO ₂ SINTERED
DENSITY (% T. D)	95	95	95
FUEL ENRICHMENT W/O	2.10	2.10	2.10
REGION 1	2.10	2.10	2.10
REGION 2	2.83	2.60	2.60
REGION 3	3.20	3.10	3.10
PELLET DIAMETER (cm)	0.929386	0.81915	0.81915
PELLET LENGTH (cm)	1.524	1.13426	1.3426
PELET WEIGHT g	10.403-10.49		
FUEL RODS			
NUMBER	21659	28435	41448
OUTSIDE DIAMETER (cm)	1.072	0.950	0.950
INSIDE DIAMETER (cm)			
LENGTH OF FUEL ROD (cm)	385.65 ± 0.1	0.016	0.019
DIAMETRAL CAP (cm)	0.019	0.016	0.019
CLAD THICKNESS (cm)	0.617	0.572	0.572
CLAD MATERIAL	ZIRCALOY-4	ZIRCALOY-4	ZIRCALOY-4

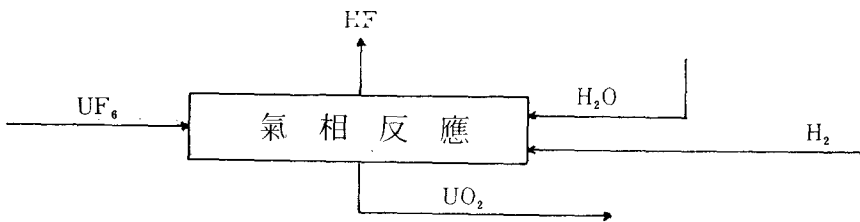
○ADU (AMMONIUM DI-URANATE) PROCESS: WESTINGHOUSE (美)



○AUC (AMMONIUM URANATE CARBONATE) PROCESS: KWU/RBU (獨)



○IDR (INTEGRATED DRY ROUTE) PROCESS: BNFL (英)



○FRENCH DRY PROCESS [GECO (GENERAL ELECTRIC CONVERSION) PROCESS] CEA/FRAMATOME (佛). G. E (美)

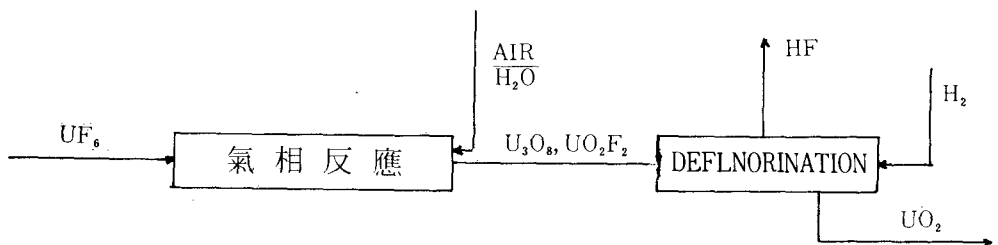


그림 1 各變換方式別 工程圖

표 2. UO₂ Product Specifications

Process Spec. Content	AUC Process (RBU, West Germany)	ADU Process (Westing House) UO ₂ powder	IDR Process (BNFL) UO ₂ powder	Dry Process (Framatome) UO ₂ Powder	
U content	-	-	> 87.7%	87.79%	87.7%
Water content	-	1.000 ppm	< 500 ppm	1.200 ppm	< 1.000 ppm
F ₂ content	500 ppm	40 ppm	< 200 ppm	60 ppm	≤ 10 ppm
Ratio O/U mol.	-	2.10-2.15	2.08±0.05	2.05	< 2.1
Specific Surface Area	0.2m ² /g	6m ² /g	2.5-4.5m ² /g	2.7m ² /g	2-4m ² /g
Bulk Density	1.0-1.5g/cm ³	2.3g/cm ³	-	-	2-2.4g/cm ³
Tap Density	1.2-1.7g/cm ³	-	*1.6-2.1g/cm ³	1.72g/cm ³	-
Pour Density	-	-	*1.3-1.7g/cm ³	0.77g/cm ³	-
Particle size	25 μm	10 μm	0.5-1.5 μm	2.44 μm	0.8-1.1 μm

* J. Appl. Chem., 12, 421 (1962)

막고 高圧의 He가스를 充填한 후 용접한다. 이때 용접은 放射線漏出의 一次的인 防護壁 역할을 하므로 核燃料安全面에서 가장 중요한 作業中 하나이다. 일반적으로 TIG용접방법이 가장 많이 사용되었으나 최근에 와서는 生産性 및 신빙성면에서 유리하다고 알려진 磁力抵抗鎔接法 (magnetic force resistance welding method) 으로 바뀌는 경향이 있으며 電子빔 (electron beam) 용접법을 사용하는 경우도 있으나 이 방법은 용접성은 좋으나 施設費 및 生産性면에서不利하여 일반화되지 못하고 있는 實情이다.

라. 核燃料 集合体 組立

핵연료 집합체조립은 일정간격의 7~8개의 制御棒 案内管 (control rod grid tube) 을 끼워서 固定한 후, 下端 nozzle을 부착하고 核燃料棒을 끼운후, 上端 nozzle을 組立하는데 대부분의 作業이 鎔接이다. 材質은 機械的 特性이 우수한 inonel을 사용해 왔으나, 최근에는 核燃料의 효율적인 연소를 위하여 中性子吸收가 적은 Zircaloy로 바꾼 optimized fuel assembly가 개발되고 있다.

마. 品質 管理

核燃料은 高溫·高壓의 原子炉内에서 長時間 연소하여야 하며 이 기간동안 조그마한 누출도

허용되지 않으므로 엄격한 品質管理가 要求된다. 핵연료 品質檢査는 各 製造工程別로 수행하며 重要內容은 다음과 같다.

○UO₂ 소결체 제조공정

-UO₂粉末의 특성검사 즉 不純物含量, 粉末의 比表面積, 流動度, O/U比 측정

-UO₂소결체의 특성검사 즉 불순물함량, 칩수검사, 表面粗度, 密度 및 金相學的 조직검사

○연료봉 製造工程

-Zircaloy-4管的 초음파 결함검사

-Zircaloy-4管的 化學的成分 및 機械的 性質검사

-He누출검사, X-선검사, 현미경 조직검사,

용접부 결함검사

-연료봉 및 UO₂ 소결체의 全長검사

○연료집합체 제조공정

-重量검사

-眞直度, 직각도, 휨, 뒤틀림, 늘어짐 등의 칫수검사

-연료봉 사이의 간격검사

-nozzle, grid의 칫수 및 強度검사

3) 核燃料加工事業의 經濟性

핵연료가공사업의 경제성에 관해서는 일반적

으로 原子炉型, 관련 핵연료週期, 가공공장의 생산규모, 채택한 핵연료가공기술 등 여러가지 因子가 관련되기 때문에 일률적으로 거론하기 어려운 문제이다. Judkins와 Olsen에 의하여 生産容量 2MTU/day의 PWR 핵연료가공공장으로써 工場壽命을 20년, 매년 투자의 20% 회수 등의 조건하에서 評價한 核燃料加工事業의 경제성에 대한 研究結果에 의하면 工場建設面積은 약 3,000坪이 필요하며 부지매입, 조성 및 建物建設費가 1978년도 가격으로 3,200萬弗 소요되고 機器費는 3,400萬弗로 資本金 총 6,600萬弗이 었다.

또한 인건비, 운영비, 재료비 및 utility 등의 年間運營費가 3,650萬弗이 필요하다. 이경우 핵연료가공비(우라늄 가격은 제외)는 \$132/KG HM(\$ 63,600/Assem)로 算出되었다.

3. 外國의 核연료가공산업

1982年末 現在 原子力發電을 하고 있는 22個 國家중 16個國이 핵연료가공을 하고 있으며 이

들 國家의 핵연료가공산업의 經營형태를 보면 그림 2에서와 같이 民間主導型과 國家主導型의 두 종류로 구분된다.

民間주도형에는 美國, 西獨 및 日本의 경우로 민간회사에 의해서 核燃料加工産業이 수행되고 있다. 國家主導型에는 核燃料設計 및 炉內 핵연료 管理部門은 國營研究機關에서 수행하고 핵연료제조는 별도기관이 담당하는 英國, 캐나다, 프랑스 등의 國家들과, 국영기관에서 핵연료가공 産業을 모두 담당하는 아르헨티나, 브라질, 대만 인도 등과 같은 國家들로 구분된다.

外國의 核燃料加工産業의 예로서 민간주도형인 日本과, 완전 국영연구기관주도형인 아르헨티나를 살펴보고자 한다.

먼저 우리나라와 같이 資源貧國인 日本의 경우를 보면 1982년말 現在 22基의 原子力發電所가 稼動되고 있으며, 日本原子力研究所 및 動力炉·核燃料開發事業團을 주축으로 활발한 研究開發이 행해지고 있다. 핵연료加工分野는 민간주도로 부품을 완전 國產化하여 새로운 수출시장으로 부상시킬 계획이며, 또한 독자적인 핵연

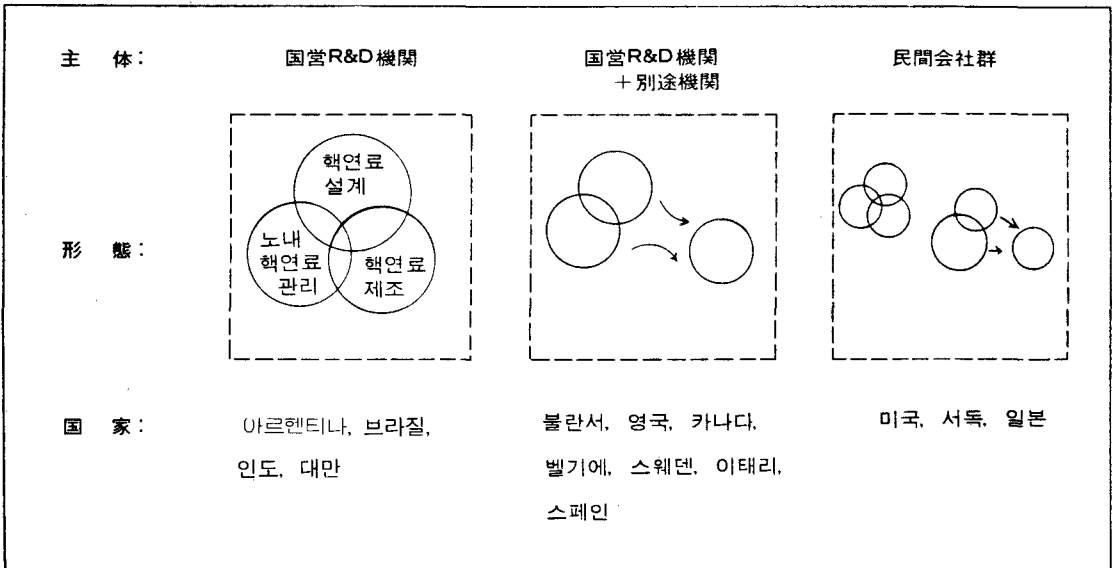


그림 2. 核燃料加工産業 經營形態

료설계를 시도하고 있고 製造工程의 標準化를 기하기 위한 노력도 하고 있다.

日本の 原子力발전소의 炉型에는 加圧輕水炉(PWR)와 沸騰輕水炉(BWR)가 거의 비슷한 비율로 設置, 運轉되고 있으며 三菱原子燃料(株)가 PWR, 日本Nuclear Fuel(株)가 BWR의 핵연료를 공급하고 있다. 三菱原子燃料(株)는 三菱金屬鑛業(株)가 51%, 三菱重工業(株)가 15%, 美國웨스팅·하우스社가 34%의 出資로 1971년 12월에 設立되어 초기에 年産能力 100MTU 규모로 稼動을 시작한후 2次에 걸친 增設로 現在는 年産能力 420MTU의 규모가 되었다. 또한 燃料棒製造를 위한 Zircaloy 피복관은 三菱金屬鑛業(株)에서 공급받고 있으며 獨自의인 PWR用 핵연료설계를 위하여 三菱重工業(株)계열로 三菱原子工業(株) 부설研究所를 設立·運營하고 있다.

日本 Nuclear Fuel(株)는 1966년에 美國 General Electric社 40%, 日立 30%, 東芝 30%의 出資로 設立되어 現在 年産能力 490MTU 규모에 달하였고 Zircaloy 피복관은 住友金屬 및 神戶製鋼에서 공급받고 있다.

한편, 아르헨티나의 경우 自國內에 우라늄資源이 풍부하여 핵연료주기의 完全自立을 위하여 重水炉型, 핵연료주기를 채택하고 아르헨티나原子力委員會(CNEA)의 주관하에 原子力事業을 하고 있다.

핵연료가공분야를 보면, 핵연료가공 시험시설의 운영에 의해서 독일형 重水炉에 대한 핵연료를 自体 개발하여 1974년 6월부터 가동중인 A-tucha 1號機에 대한 재장진 핵연료를 生産·供給하고 있다.

카나다형 重水炉인 Embalse발전소에 대해서는 초기장진시부터 아르헨티나에서 핵연료를 제작·공급코자 하였으나 原子炉性能, 安全性 保障 등의 문제로 재장진시부터 공급케 될것으로 展望된다. 핵연료가공을 위한 商用工場으로는 1977년부터 年産 400MTU규모로 건설중에 있어 1982년 3월 1次 준공되면 독일형 중수로에 핵연료공급이 가능하게 되고 1985년 完工후에는 카나

다형 중수로에 대한 핵연료도 공급하게 될 것이다.

또한 아르헨티나의 核燃料週期技術은 原子炉 도입시 일괄도입된 것이 특징이기도 하다.

4. 우리나라의 核燃料加工事業

原子力발전소 건설계획에 따른 우리나라의 핵연료수요는 1988년에 約 144TON에 달하며 原子力發電 11기가 稼動되는 1991년에는 約 298TON에 이를 것으로 展望되고 있다. 원자력발전소의 증가추세로 보아 핵연료가 앞으로 主중 에너지源이 될 것은 明確한 事實이다.

一般的으로 핵연료가공을 위한 商用工場의 最小경제규모는 年産能力 150TON 정도인 것으로 알려지고 있는바, 우리나라에서의 핵연료加工事業은 1988년에 핵연료의 공급을 목표로 하여 상용공장건설을 推進하여야 할 것이다.

PWR用 핵연료가공기술은 현재 先進諸國에서 開發完了되어 실용화되고 있으며 技術의 국제間 移轉에 대해서도 제약이 없는 실정이며 핵연료의 성능이 발전소의 發電率 및 安全性에 对 大 한 影 响을 미치는 PWR型발전소의 특수성을 감안할 때 이미 開發을 완료하여 실용화하고 있는 선진기술을 早期에 도입하여 핵연료를 國産化하면서 도입된 技術을 소화, 改良하여 餘他의 핵연료주기기술에 波及되도록 하는 것이 우리나라의 실정에 有利할 것이다.

기술을 도입할 경우 도입기술의 범위는 핵연료의 제조를 위한 know-how는 물론, 核燃料設計, 安全性解析技術 등의 soft-ware기술도 포함되어야 할 것이다. 또한 가능하면 外國의 技術導入線과 合作에 의한 經營으로 國産核연료의 信賴性을 높이고 外 國持分을 감소시키며 아울러 外國合作先으로 하여금 핵연료의 國산화율을 提高시키도록 契約條件으로 保障하여야 할 것이다.

核燃料加工工場의 施設規模는 우리나라의 핵연료需要展望과 핵연료가공공장의 最小 경제규모 등을 고려할 때 年産 200MTU 규모로 시작하여 수요증가에 맞추어 증설하는 것이 타당할

것으로 보여지며 外國의 예를 참고하면 공장건설은 400MTU 규모까지 擴張이 가능하게 建設하고 機器 lay out은 400MTU 규모에 맞게 設計하되 핵연료수요에 맞추어 機器를 증설하는 方法으로 추진하는 것이 通例이다.

原子力發電爐의 연구개발 및 핵연료기술이 기타 다른 핵연료週期技術과의 관련성을 고려할 때 핵연료사업은 반드시 연구개발기능을 갖춘 기관과 밀접한 관계를 가져야 할 것이다. 장차 주종에너지원인 核燃料의 生産供給을 담당할 핵연료가공사업은 國家에너지정책에 미치는 重要性을 고려할 때 政府의 國策事業으로 국가기관에서 수행하는 것이 타당할 것으로 생각된다.

核燃料加工工場을 1988년 稼動目標로 建設한다면 工場의 建設所要期間 및 技術導入, 合作등의 所要期間을 감안할 때 1983년중에 設立된 核燃料加工會社는 기술도입 및 合作을 推進하여 늦어도 1984년에는 工場設計와 海外訓練을 시작하여야 1987년에 竣工이 될 것이다.

5. 結 論

1) 핵에너지가 앞으로 우리나라의 주종에너지

資源이 될 展望으로서 國家에너지政策에 直結되므로 核燃料加工事業은 政府主導의 國策事業으로 推進되어야 한다.

2) 電源개발계획에 의한 原子力發電의 급증기에 대비하여 核燃料의 安全供給을 위해서 核燃料量産化는 適期에 추진되어야 한다.

3) 核燃料加工事業은 기술 및 노동집약사업이므로 우리나라 실정에 적합한 사업이다.

4) 核燃料의 性能은 原子力發電所의 安全性 및 經濟性에 직결되며 先進外國에서도 핵연료의 安全性 提高 및 效率的 利用을 위해서 加工技術의 改良에 관한 研究가 계속되고 있는 實情으로 보아 핵연료가공사업은 技術開發技能과 밀접한 관련을 갖고 병행해야 한다.

5) 核燃料加工事業은 초기에는 先進外國 기술의 도입에 의하여 수행하되 가급적 조속한 時日內에 도입기술을 吸收하여 完全 土着化하도록 하여야 한다.

6) 1990年代 實用化될 전망으로 研究開發을 수행하고 있는 高速增殖爐의 開發추세를 고려할 때 PWR 핵연료 가공기술은 高速增殖爐의 핵연료가공기술개발의 土가 되므로 원자력 연구기관이 積極的으로 참여하여야 할 것이다.

이달의 到着資料

- ▲Nuclear Industry<美國> 3月号
- ▲AIF Info<美國> 3月, 4月号
- ▲Nuclear News<美國> 3月, 4月号
- ▲ANS News<美國> 1月, 2月号
- ▲ATOM<英國> 3月号
- ▲BULLETIN<英國> 2月, 3月号
- ▲Nuclear Engineering International
<英國> 3月, 4月号
- ▲原子力産業新聞<日本> 1168, 1169, 1170,
1171, 1172, 1173, 1174, 1175, 1176, 1177号

- ▲原子力工業<日本> 3月, 4月号
- ▲原子力文化<日本> 3月号
- ▲ATOMS IN JAPAN<日本> 2月, 3月号
- ▲KORT NYT<덴마크> 2月, 3月, 4月号
- ▲Swedish Nuclear News<스웨덴> 3月号
- ▲Nuclear Canada Yearbook 1982<캐나다>
- ▲Nuclear Power Plants in the World
(1982年 12月31日 現在)<日本>
- ▲原子力포켓북(1983年版)<日本>
- ▲第16回 日原産年次大會 發表論文 全文