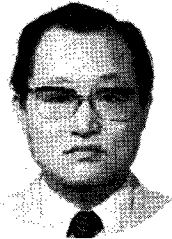


# 原子爐材料의 開發動向



崔 淳 弼

(韓國에너지研·原子爐材料研究室長)

## 1. 序 論

現在 우리나라는 原子力을 利用하여 에너지의 自給自足を 이룩하고 原子力發電所를 우리의 힘으로 設計, 建設하는 한편 原子力産業을 輸出産業으로 까지 發展시키려는 目標아래 많은 努力을 傾注하고 있다. 한편 最近 관심이 고조되고 있는 原子力發電所의 安全性은 原子力發電所를 이루는 主要 構造材가 使用環境에서 전 수명기간중 제 機能을 다하느냐 못하느냐에 左右된다고 볼 수 있으므로 이미 9基의 原子力發電所가 稼動 혹은 建設되고 있는 지금 原子爐環境下에서의 材料特性變化를 把握하고 나아가 必要한 原子爐材料들을 獨自的으로 開發·生産한다는 것은 既 稼動中인 發電所의 安全性과 經濟性을 向上시키고 우리가 目標로 하는 輸出産業으로서의 原子力産業을 이루는 첫걸음이라 할 수 있다.

그러나 새로운 材料를 開發하는데는 많은 豫算과 人力, 研究施設이 필요하므로 지금까지는 소수의 原子力先進國에서만 國家的 次元에서 遂行되어 왔다. 따라서 우리가 原子力先進國으로 발돋움하고 高度의 原子力産業을 이룩하기 위하여서는 「素材産業」으로서의 原子爐材料開發을 政府次元에서 적극 추진하여야 할 것이며, 이러한 努力의 結果는 나아가 相關산업의 技術向上에도 크게 기여할 것이다. 이러한 觀點에서 本稿에서는 지금까지 開發되었거나 進行中인 原子爐材料開發動向을 소개함으로써 관심있는 분들께 참고가 되고자 한다.

## 2. 原子爐材料의 分類

通常 原子爐材料를 分類·說明할 때는 種類보다는 그 材料가 使用되는 環境에서의 役割(機能)을 고려하여 分類한다.

核分裂爐의 경우에는 機能上 크게 核燃料, 減速材, 反射材, 制御材, 冷却材, 遮蔽材 및 構造材로 나눌 수 있고, 構造材는 다시 核燃料被

覆管等 爐心을 構成하는 爐心構造材와 格納容器, 壓力容器, 配管等 爐의 周邊部를 構成하는 構造材로 나눌 수 있다. 그러나 모든 爐에 대하여 이와 같은 分類가 適用되는 것은 아니다. 예를 들면 輕水爐에서는 冷却材가 減速材를 兼하고 있지만 高速增殖爐에서는 減速材가 必要치 않는 등 爐型에 따라 그 分類가 약간씩 다를 수 있다.

한편 核融合爐의 경우에는 Tokamak를 例로 들면 第1 壁材料, Blanket構造材, 冷却材, 反射材, 中性子增殖材, T增殖材, 遮蔽材, 斷熱材, 超電導Magnet線材, 超電導安定化材, Magnet 構造材 등으로 나눌 수 있는데, 이들 각 機能別材料에는 다시 여러 종류의 材料가 爐型에 따라 使用되고 있어서 여기에 使用이 고려되고 있는 候補材料까지 포함하면 그 種類는 무려 100여가지를 넘는다.

따라서 이들 모든 材料에 대한 개발현황을 살펴본다는 것은 紙面關係上 不可能한 일이므로 本稿에서는 이들 材料가운데서도 最近 研究·開發이 活潑한 高速增殖爐와 核融合爐의 主要構造材와 Blanket構造第1 壁材料, 그리고 輕水爐

構造材料로써 특히 중요한 加壓輕水爐의 壓力容器 및 蒸氣發生器材와 지금까지 널리 紹介가 되지 못한 새로운 CANDU(PHWR)壓力管材料인 Excel의 開發現況에 대하여 알아보기로 한다.

### 3. 高速增殖爐 構造材料(LMFBR)

天然우라늄資源의 99.3%를 占有하는  $U^{238}$ 을 100% 利用할 수 있다는 高速增殖爐는 21세기의 새로운 動力爐로서 기대되고 있으며, 현재 프랑스를 필두로 미국, 일본, 독일 등에서 開發이 한창 進行되고 있다. 現在 世界各國에서 原型爐段階 高速增殖爐의 主要構造材料로서 선택, 使用되고 있는 材料들은 表1과 같다.

#### 3.1 原子爐容器材料

輕水爐와는 달리 LMFBR의 原子爐容器는 가동중 高温( $350^{\circ}\sim 560^{\circ}C$ ), 低壓(Loop型의 경우 약 $1MPa$ )의 액체Na과 장시간(설계수명 30년  $\times$ 가동율  $75\sim 80\%$ 인 경우 약 $2\times 10^5hr$ ) 接觸하게 되며, 輕水爐에 비하여 많은 量의 高速中性子를 받게 된다(表2 참조).

따라서 原子爐容器材料에 대하여는 액체Na과의 접촉하에서 腐蝕 및 質量移行에 대한 저항

〈表1〉 世界各國의 原型爐段階의 高速增殖爐 主要構造材料

構造名		爐名	CRBR (미국)	몬 주 (일본)	PFR (영국)	SNR-300 (독일)	Phenix (프랑스)	BN350(소련)	BN600(소련)
爐 容 器	鋼種		S/S304	S/S 304	S/S 321	S/S304	S/S 316	S/S 304相當	S/S 304 相當
	온도(K) 출구/입구		808/661	802~670	$\left. \begin{matrix} 833 \\ 673 \end{matrix} \right\}$ 858/693	819/650	842/661	773/573	853/683
1 차계주배관강종 Hot leg/Cold leg			S/S316/ S/S304	S/S 304	S/S 321	S/S 304	S/S 316	S/S 304相當	S/S 304 相當
중간열교환 기 전열관	鋼 種		S/S304	S/S304	S/S321	S/S304	S/S316L	S/S 304 相當	S/S 304 相當
	외경/두께 (mm)		22.2/1.1	21.7/1.2	19.0/1.0	21.0/1.4	14.0/1.0	28.0/2.0	16.0/1.4
2차계주배 관 Hot leg /Cold leg	鋼 種		S/S304	S/S 304	S/S321	S/S304	S/S321/ S/S304	S/S 304 相當/ 2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo相當	S/S 304 相當/ 2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo相當
	온도(K)		775/617	약 778/ 약598	805/643	793/608	823/623	723/543	793/593
증기 발생기 과열기 전열관			2 $\frac{1}{4}$ Cr- 1Mo	S/S 321	S/S 316	2 $\frac{1}{4}$ Cr- 1Mo-Nb -0.5Ni	S/S321	2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo相當	S/S 304 相當
증기 발생기 증발기 전열관			2 $\frac{1}{4}$ Cr- 1Mo	2 $\frac{1}{4}$ Cr- 1Mo	2 $\frac{1}{4}$ Cr-1 Mo-Nb 0.5Ni	2 $\frac{1}{4}$ Cr1Mo -Nb-0.5Ni	2 $\frac{1}{4}$ Cr-1 Mo-Nb	"	2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo相當

(表2) 核分裂爐材料의 使用條件

環境		爐型	輕水爐	高速增殖爐	高温gas爐
化學環境			물, 水蒸氣	液體 Na.	He
材料의 最高 溫度(℃)	爐心材	300-400	600-700	750-1,000	
	構造材	260-300	400-600	450-800	
放射線環境			주로 熱中 性子	주로 高速 中性子(1M eV程度)	주로 熱中 性子
中性子照射 量(n/cm <sup>2</sup> )	爐心材	10 <sup>20</sup> ~10 <sup>21</sup>	10 <sup>22</sup> ~10 <sup>23</sup>	10 <sup>20</sup> ~10 <sup>21</sup>	
	構造材	10 <sup>18</sup> ~10 <sup>20</sup>	10 <sup>20</sup> ~10 <sup>21</sup>	10 <sup>18</sup> ~10 <sup>19</sup>	

성이 우수하고 中性子照射脆化에 대하여서도 저항력이 우수한 高温材料가 필요하게 되는데, 현재까지는 Austenite系( $\gamma$ ) Stainless Steel이 사용되고 있다.  $\gamma$ -系 Stainless Steel중에서도 초기에는 Type321 또는 347에 해당하는 炭化物安定鋼이 검토되었는데 溶接에 따른 問題點때문에 현재에는 보다 안정된 溶接接合部를 얻을수 있는 炭化物非安定鋼인 Type304 또는 316 鋼이 주로 사용되고 있다. 그러나 Type304 및 316 鋼으로 製作된 原子爐容器는 장기간 가동중 環境의 영향으로 다음과 같은 問題點이 나타나고 있다.

- 高温(500℃以上)環境에서의 Cr炭化物 및  $\sigma$ 相의 析出에 의한 脆化 및 粒界腐蝕現象.
- 액체Na에 의한 腐蝕, 表面變質層形成, 浸炭 및 脫炭에 의한 強度低下現象.
- 高速中性子照射에 의한 強度增加 및 延性低下(約3/4~1/2減少) 등의 照射脆化, Creep破斷強度低下 等.

이외에도 高速增殖爐 爐心部에서는 冷却材의 溫度上昇이 매우 커서(約130~150℃) 緊急爐停止時 出力降下速度가 크게 되는 한편 액체Na의 熱容量이 작고 熱傳導度가 좋기 때문에 原子爐는 激甚한 溫度變化를 겪게 될 確率이 매우 높게 된다. 이때 이러한 熱荷重에 의하여 發生하는 熱應力을 흡수하기 위하여서는 熱傳導度가 좋고 熱膨脹率이 작은 構造材料가 要求되는데, 이러한 점에서 본다면 Type304 및 316과 같은

$\gamma$ -系 Stainless Steel은 만족스러운 材料라고 할 수 없다.

그러나 이와 같은 단점에도 불구하고 中性子照射特性에 대한 資料가 많은 점 등의 장점때문에 지금 현재 特別히 原子爐容器材料에 대한 새로운 材料開發 움직임은 보이고 있지 않다. 그러나 앞으로 이들 재료에 대한 사용중 새로운 材料開發이 필요하게 된다면, 이는 앞에서 언급한 問題點을 해결하는 방향에서 추진되어야 할 것이다.

### 3.2 蒸氣發生器材料

高速增殖爐 蒸氣發生器의 傳熱管材料에 대하여는 高温強度, Na環境 및 水-水蒸氣環境과의 共存性, Wastage現象에 대한 저항성 그리고 우수한 加工性 및 溶接性이 要求된다.

이와 같은 점을 고려하여 지금까지 선택되어 온 材料로서는 耐熱材料로서 使用實績이 있는 低合金鋼(2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo 等),  $\gamma$ -Stainless steel (Type304, 316, 321 等) 및 Incoloy800 등이 있는데, 전열관으로서 주를 이루는 低合金鋼과  $\gamma$ -Stainless Steel의 장·단점을 비교하여 보면 대략 다음과 같다.

- 高温強度에서는 Stainless Steel이 우수하나 水-水蒸氣環境에서 應力腐蝕龜裂이 없다는 점에서는 低合金鋼이 좋다.
- 액체Na環境에서 脫炭에 의한 強度低下를 비교하여 볼때 stainless steel이 보다 우수하다. 脫炭防止를 위하여 低合金鋼은 化學性分の 조정(Nb 또는 Nb-Ni 첨가) 및 열처리방법 개선에 의한 炭化物安定化가 필요하다.

현재 各國에서 사용되고 있는 蒸氣發生器材料는 表3과 같다. 表3에서 보듯이 현재 2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo 鋼 및  $\gamma$ -Stainless Steel이 주로 사용되고 있지만, 앞에서 언급한 단점을 개선하여 보다 높은 信賴性을 갖는 재료를 求하기 위하여 各國에서는 계속적인 研究·開發이 進行되고 있다. 프랑스에서는 SPX-1의 전열관에 Incol-

〈表 3〉 世界各國의 高速增殖爐 蒸氣發生器材料

국 명	서 북				프 랑 스				영 국			미 국		소 련				일 본			
원자로명	SNR-300				Phenix		SPX-1		PFR			CRBR		BN-350		BN-600		몬-쥬			
전기출력 (MWe)	327				250		1200		250			375		350		600		280			
loop수	2		1		3			4	3			3		6				3			
구 성	EV	SH	EV	SH	EV	SH	RH	-	EV	SH	RH	EV	SH	EV	SH	EV	SH	RH	EV	SH	
전열관 재료	2¼ Cr 1Mo	좌동	좌동	좌동	2¼ Cr 1Mo Nb	S/S 321	S/S 321	Alloy 800	2¼ Cr 1Mo Nb	S/S 316	좌동	2¼ Cr-1Mo	좌동	좌동	좌동	좌동	Feritic Steel	Austenitic Steel	좌동	2¼ Cr 1Mo	S/S 321

oy 800을, 영국에서는 S·H(Super Heater) 및 R·H(Reheater) 전열관에 9Cr-1Mo鋼을 사용하고 있다.

기타 현재 사용이 검토되고 있는 재료로서는 9Cr-2Mo鋼 및 12Cr鋼 등이 있다.

#### 4. 核融合爐材料(Tokamak)

高速增殖爐와 함께 21세기의 에너지源으로 기대되는 核融合爐는 現在 Tokamak型의 實驗爐 建設이 現實적으로 具體化되고 있다. 核融合爐 材料에서 共通적으로 問題가 되는 것은 역시 中性子照射脆化, Swelling 및 照射Creep에 의한 치수변화 등 高温과 높은 에너지(14.1MeV)의 中性子照射에 의한 材料의 特性變化이다.

다음은 현재 연구·개발이 가장 많이 전척되고 있는 Blanket構造第1壁材料의 開發現況에 대하여 기술하기로 한다.

##### 4.1 스테인레스 스틸(Type 316)

Type316 Stainless Steel은 高速增殖爐의 核燃料集合體材料로서 研究開發 및 使用 結果 中性子照射에 의한 材料特性變化가 가장 잘 알려진 唯一한 材料이다. Tokamak爐가 動力爐로서 成立되기 위하여는 構造材料가 3~4MW/m<sup>2</sup>의 中性子負荷에서 10~20MW·Y/m<sup>2</sup>을 견딜 수 있어야 하는데, 高速增殖爐 核燃料集合體의 現實的인 開發目標가 ~130dpa까지 견딜 수 있는 燃料集合體임을 감안할때 같은 材料인 Type316 Stainless Steel은 核融合爐에서 10MW·Y/m<sup>2</sup>

의 使用期間中에 예상되는 100dpa정도의 照射 損傷을 충분히 견딜 수 있을 것으로 판단된다.

한편 HFIR(High Flux Isotope Reactor: 美 ORNL)을 이용하여 Type316 Stainless Steel의 照射溫度 및 加工方法(熱處理)에 따른 照射脆化 및 swelling에 의한 치수변화를 研究調査한 結果에 의하면, 溶體化處理材보다는 20%冷間加工材가, 그리고 照射溫度는 450℃以下가 照射脆化 및 Swelling에 대한 저항성에서 우수한 것으로 밝혀졌다. 특히 最近에는 Ti을 첨가한 改良型 stainless Steel이 100dpa에서도 Swelling에 의한 체적변화가 2%이하로 예측되어 주목을 받고 있으며, He에 의한 Swelling 및 延性低下도 아울러 極小化시킬 수 있는 것으로 밝혀졌다.

따라서 Blanket構造第1壁材料로서는 Ti을 첨가한 冷間加工된 改良型 Stainless Steel이 使用될 것으로 기대되고 있다. 그러나 Stainless Steel이 앞으로 Blanket構造第1壁 材料로서 使用되기 위하여서는 아직 상당한 研究開發이 필요한데 이를 要約하면 다음과 같다.

- 冷間加工材의 溶接, 溶接接合部의 健全性 確保(특히 열영향부위의 고온균열방지).
- 高温水에서의 응력부식균열 방지.
- 장기간의 중성자 조사에 대한 저항성 시험.
- 중성자 조사에 의한 折出촉진 및 이에 따른 局部的인 化學成分變化(편석). 그리고 이러한 現象과 He과의 상관관계 규명 등.

## 4.2 Ferritic Steel

역시 高速增殖爐의 核燃料集合體材料로서 사용키 위하여 연구개발되어온 10%Cr을 함유하는 Ferritic鋼은 Stainless Steel에 비하여 S-welling 및 照射Creep에 의한 체적변화가 작은 반면 熱傳導가 크고 熱膨脹率이 작아 熱流動이 심한 Blanket 第1 壁材料로서의 使用이 검토되고 있으나, 強磁性體이고 中性子照射에 의하여 延性脆性遷移溫度(DBTT)가 室溫以上으로 上昇하고 Stainless Steel에 비하여 加工性, 溶接性, 冷却水와의 共存性 등이 뒤떨어진다는 점이 단점으로 되고 있다.

특히, 延性脆性遷移溫度는 HT-9(Fe-12Cr-1Mo-V-W)材의 경우 430°C,  $1 \times 10^{26} \text{n/m}^2$ 에서 100°C나 되는 것으로 밝혀졌다. 따라서 현재에는 熱處理 및 새로운 원소의 첨가 및 조정등의 방법에 의하여 Ferritic鋼의 材料特性을 改良하려는 研究가 進行되고 있다.

## 4.3 高融點金屬

現在 開發이 進行되고 있는 高融點金屬 으로서는 V과 Mo 合金이 있다.

V合金은 冷却材에 不純物로서 포함되어 있는 산소 및 질소에 의하여 材料特性이 크게 나빠지므로 使用환경은 冷却材가 액체Li인 경우에 한하여 고려되고 있다. 또한 이 合金은 액체Na과의 共存性이 나빠 高速增殖爐材料로서 使用치 않았기 때문에 照射特性에 대한 資料가 거의 없다는 것이 단점으로 지적되고 있다.

Mo合金은 冷却材와의 共存性 및 工業材料로서 使用한 실적이 있다는 점에서 V合金에 비해 우수하지만, 核融合構造材로 使用되기 위해서는 接合性 및 照射脆化에 대한 改善이 필요하므로 中性子照射試驗의 평가를 포함, 이에 관한 시험연구가 필요하다.

## 5. 加壓輕水爐 構造材料

1957年 美國의 Shippingport原子爐(PWR, 9

만KWe)가 商業發電을 始作한 以來 지금까지 約30年동안 輕水爐構造材料는 끊임없이 改良되어 現在 使用되고 있는 主要構造材料는 PWR 環境에서 전 수명기간중 비교적 安全하게 使用될 수 있을 것으로 기대된다.

다음은 壓力容器 및 蒸氣發生器 傳熱管材料에 대한 지금까지의 開發動向과 現在 先進各國에서 추진중인 輕水爐 技術高度化計劃과 관련하여 앞으로 研究·改善되어야 할 事項에 대하여 기술한다.

### 5.1 壓力容器材料

壓力容器는 1次壓力境界 가운데에서도 核燃料 및 高溫·高壓의 冷却材를 내장하고 있고, 大型이며 構造가 복잡하고, 가동중에는 보수·교체가 현실적으로 어렵기 때문에 전 수명기간중 高度의 安全性이 유지되지 않으면 안된다. 따라서 壓力容器製作에 사용되는 材料 또한 이러한 壓力容器의 特殊性 때문에 다음과 같은 性質이 갖추어져야만 한다.

- 材料의 조직·성질의 均質·等方性
- 높은 파괴인성.
- 우수한 가공성 및 용접성.
- 中性子照射脆化에 대한 저항성.

이와 같은 性質을 만족하기 위한 지난 30年 間의 開發動向을 살펴보면, 初期에는 그때까지 보일러用으로 使用되었던 Si-Mn系 저합금강(SA 212B 등)이, 그후 1956年 以後에는 Si-Mn系에 高溫強度向上을 위하여 Mo이 첨가된 SA302B (Mn-Mo系)가 使用되었다.

그러나 1960年代 후반부터 輕水爐의 大型化에 따라 壓力容器의 두께가 두꺼워지기 시작하였는데, SA302B는 100mm以上の 두께에서는 인성(Toughness)의 確保가 어려워 1964년에는 이에 Ni을 첨가한 Mn-Mo-Ni系의 改良型 SA 302 B가 나타나게 되었다.

그후 계속된 발전소의 大型化 추세에 따라 두께는 더욱 두꺼워지게 되었는데, SA302B 개량

형도 두께가 두꺼워지면 Austenite화 온도(~900℃)로 부터 어느 정도 이상의 冷却速度가 되지 않으면 強度 및 인성의 확보가 곤란케 되어 마침내 1965년에 종래의 개량형 SA302B의 熱處理方法인 Annealing-Tempering으로 부터 Q-enching-Tempering으로 바꾼 SA533B가 개발되었다. 鍛造鋼의 경우에도 앞에서 언급한 바와 같은 開發過程을 거쳐 SA150→SA336→SA508로 開發되었다.

한편 1974년부터는 Cu 및 P이 中性子照射脆化에 큰 영향을 미친다는 사실이 밝혀져 이들 원소에 대한 규제가 ASTM의 A533B 등의 規格에 추가되기 시작하였다(表4 참조). 그후 中性子照射脆化에 관한 研究 및 鋼材製造技術의 發展에 따라 이들 元素에 대한 제한은 1983년에는 表5와 같이 되었다.

製鋼技術의 發展 및 熱處理方法의 改善에 따라 현재에는 불순물 함량이 적고, 내부조직이 균일하며 強度와 靱성이 좋은 高品質의 壓力容器用鋼材가 生産되고 있다. 그러나 最近 輕水爐技術高度화와 관련하여 壓力容器의 大型化 및 一體化가 主要 原子力先進國에서 推進中인데, 이에 따라 더욱 品質이 向上된 高強度, 高靱성의 壓力容器材料가 요청되고 있다.

〈表4〉 Mn-Mo-Ni系鋼(A533B)의 Cu 및 P 함유량 제한(1974년 ASTM규격)

원소명 \ 분석	Heat Analysis	Product Analysis
Cu(%)	0.10	0.12
P(%)	0.012	0.017

〈表5〉 Mn-Mo-Ni系鋼의 Cu, P 및 S 함유량 제한(1983년 ASTM규격)

원소명 \ 분석	A533B Cl.1		A509 Cl. 3	
	Heat Analysis	Product Analysis	Heat Analysis	Product Analysis
Cu(%)	0.10	0.12	0.10	0.10
P(%)	0.012	0.015	0.012	0.015
S(%)	0.015	0.018	0.015	0.018

## 5.2 蒸氣發生器 傳熱管材料

輕水爐 蒸氣發生器는 壓力容器와 함께 1次壓力境界를 이루는 主要 構造物로서 稼動中 高度의 安全性이 確保·維持되어야 한다. 蒸氣發生器의 構造 및 使用環境에 비추어 特別히 傳熱管材料가 갖추어야 할 性質은 다음과 같다.

- 應力腐蝕龜裂에 대한 抵抗性이 우수할 것.
- 全面腐蝕에 대한 抵抗性이 우수할 것.
- 加工性, 溶接性, 製管性이 우수할 것.
- 熱傳導度가 좋을 것.

現在까지 使用된 材料는 주로 Nickel 베이스의 Inconel 600(Ni60.5%, Cr23.0%, Fe14.1%, C 0.08%, Ti1.4%)이었는데, 지금까지의 使用經驗을 整理하여 보면 應力腐蝕龜裂, Denting, Fretting 등이 問題點으로 나타났다. 따라서 이러한 問題點을 해결하기 위하여 構造設計變更(Tube Support Plate), 水質環境改善, 새로운 材料開發 등이 進行되어 왔는데 다음에 研究·開發되어온 材料를 간단히 소개코자 한다.

T.T(Thermally Treated) Inconel 600은 傳熱管製作에 따른 잔류應력을 제거하고 粒界의 炭化物 析出樣相을 變化시켜(Semicontinuous Precipitate로) 應力腐蝕龜裂에 대한 抵抗性을 높이기 위하여 기존의 熱處理方法을 改善한 材料인데 많은 實驗結果 龜裂傳播에 필요한 應力이 增加하고 龜裂傳播速度는 크게 감소하는 것으로 나타나 현재 널리 使用되고 있다. Incoloy 800(Alloy 800) (Ni34%, Cr21%, Fe43%)은 독일에서 1972년 이래 使用하여온 材料로서 지금까지의 使用經驗을 Inconel 600과 비교하여 보면 전면부식이 다소 크다는 점 외에는 모든 면에서 우수하여 미국에서도 이 재료의 使用를 검토하고 있다. Inconel 690(Ni60%, Cr30%, Fe 9.5%)은 Alloy 800의 耐腐蝕性과 Inconel 600의 熱的, 機械的 性質을 갖도록 設計된 安定化 Austenite조직의 材料로서 高溫水中에서 Alloy 800, Inconel 600 및 Type 304S/S보다 우수한 腐蝕 및 龜

裂抵抗性を 나타내는 것으로 밝혀졌다.

일본에서 개발된 SCR-3(Ni25~26%, Cr 24%, V1.3%, C0.02%, Si1.7~2%)은 實驗結果 Standard media(Chlorinated water, Caustic polution, Phosphate solution 등)내에서 應力腐蝕龜裂에 대한 예민성이 Type304, Inconel 600 및 Alloy800보다 작은 것으로 나타나 앞으로 使用이 검토되고 있다.

지금까지 傳熱管材料의 開發現況을 간단히 살펴보았는데 실험결과를 재료의 상태 및 실험조건에 따라 큰 差異를 보이기 때문에 앞으로 보다 광범위하고 체계적인 시험조건하에서 앞에 언급한 재료들에 대한 장기간의 재료특성 변화가 비교·검토되어야 할 것이다.

## 6. CANDU壓力管材料(Excel)

1970年代初까지 建設된 初期의 CANDU爐(例를 들면 NPD, Douglas point, Pickering 1·2, RAPP 等)에서는 20% 冷間引撥(cold drawing)한 Zircaloy-2材를, 그후부터 현재까지는 強度 및 耐腐蝕性에서 Zircaloy-2보다 우수한 Zr-2.5% Nb材(27% cold work)를 사용하고 있다. 1983年 8月 1日 발생한 Pickering Unit-2, G-16 壓力管破斷事故 以後 다시 한번 確認된바이지만 분명 Zr-2.5%材는 Zircaloy-2材보다 腐蝕 및 수소흡수(Hydrogen pick up)에 있어 우수한 것은 틀림없는 사실같다.

그러나 Zircaloy-2材보다 Zr-2.5%Nb材가 強度 및 耐腐蝕性에서 우수함에도 불구하고 최근 문제시 되고 있는 것은 첫째, Zr-2.5%Nb材에 대한 爐內特性資料가 약12年정도 밖에 없어서 그 以後의 腐蝕 및 수소흡수거동이 어떻게 될지 현재로서는 예측할 수 없다는 점이고, 둘째로는 Creep 및 Sag에 의한 爐內체적불안정(In-Reactor dimensional instability)문제이다. 즉, 현재 壓力管의 設計수명은 30年인데 Zr-2.5% Nb材도 30年 以前에, Zircaloy-2와 같이, 길이

로는 약100mm~150mm 늘어나고 약25mm~50mm Sagging되는 것으로 예측되었다(Zr-2.5%Nb材의 強度가 Zircaloy-2보다 우수하여 壓力管設計時 두께는 Zr-2.5%Nb材가 Zircaloy-2 材보다 1mm 얇게 되어있음).

Excel은 이와 같이 Zr-2.5%Nb材의 불안정한 爐內變形問題와 관련하여 爐內Creep特性을 向上시키기 위하여 개발되었다. 지금까지 밝혀진 Excel소둔재의 特性을 기존의 Zircaloy-2 및 Zr-2.5%Nb材와 비교하여 보면 表6과 같다. Excel材로 처음 시험용 壓力管이 製作된 것은 1973年度이었는데, 그 以後 壓力管加工方法 및 熱處理條件 等에 따른 爐內特性이 차차 밝혀지게 되었다. 한편 Excel의 표준조성은 Zr-3.5% Sn-0.8%Mo-0.8%Nb으로서 Sn은  $\alpha$ -相(C. P. H)의 安定化 및 固溶體強化元素로, Nb 및 Mo은  $\beta$ -相(B. C. C)의 安定化元素로 선택되어 2相조직(Two-phase micro structure)의 形成과  $\beta$ 相의 強度向上을 목적으로 하였지만, 현재까지 이들 元素들이 Excel의 爐內特性에 미치는 효과는 완전히 밝혀지지 않아 이에 관한 연구가 진행중에 있다.

表6에서 보듯이 분명 Excel은 지금까지의 壓力管材보다 우수한 爐內Creep特性을 보여주고 있고(기존재료의 약50%) Hydride의 재배치에 필요한 응력 또한 높아 앞으로 새로운 壓力管材로 선택될 가능성이 매우 높다. 그러나 비록 단기간의 실험결과이긴 하지만 정상가동 조건에서 부식율이 높다는 점과 D. H. C(Delayed Hydride Cracking)에 의한 균열 Initiation 以後 균열진전속도가 매우 크다는 점이 앞으로 해결해야 할 과제로 남아 있다. 따라서 앞으로 장기간에 걸친 爐內特性實驗 等을 통한 연구가 필요하다.

## 7. 結 論

지금까지 最近 활발히 研究되고 있는 主要原

〈表6〉 Comparison of annealed Excel with cold-worked Zr-2.5%Nb and Zircaloy-2

Property	Annealed Excel	Modified c. w. Zr-2.5%Nb	Cold-worked Zr-2.5% Nb	Cold-worked Zircaloy-2
Neutron capture cross section cm <sup>2</sup> /cm <sup>2</sup> average over 30y service	0.00915	0.00916	0.00916	0.00870
UTS at 575K.MPa, axial-front end	499±11*	543±24*	515±26*	365±27*
Corrosion allowance(based on shortterm stest)	0.20mm	0.10mm	0.10mm(appe-ars adequate)	0.10mm(probably low)
Hydrogen isotope pick-up after 85,000h in CANDU-PHW(Pickering) ppm		5	5	200
Dimensional changes after Diameter	0.7-1.7%	2.2%	2.3%	1.5%
30yr in CANDU PHW Length	0.5-%	<0.5%	1.8%	1.9%
Stress to re-orient hydrides into radial/axial plane(MPa)	400	300	300	150
Delayed hydride cracking stress to initiate crack at a 0.1-mm notch at 525K	500	250	250	250
Relative crack velocity at 525K	60	6	6	1
Critical crack length at 295K and 120MPa hoop stress(100ppm H)	>45mm	>50mm	45mm	30mm

\*95% confidence limit.

子爐構造材料의 開發動向에 關하여 간략하게 소개하였다. 여기에서 한가지 지적하고 싶은 것은 素材産業으로서의 原子爐材料開發은 우리가 目標로 하는 輸出産業으로서의 原子力産業을 이룩하는데 뿐만 아니라 國內의 關連産業을 크게 發展시킬 수 있다는 차원에서 이해되어야 한다는 것이다. 즉, 소개한 재료들은 비단 원자력 産業분야에서만 使用될 수 있는 것은 아니며 또한 장차 우리가 이들 재료를 開發코자 한다면 그 過程에서 發生되는 高度의 材料關係技術은 關連産業분야에 광범위하게 應用될 수 있을 것이다. 이러한 점에서 政府, 原子力關係會社, 材料生産業體 關係자들의 관심을 촉구하는 바 이다.

〈參 考 文 獻〉

(1) 加納茂機 等, 原子力工業 第30卷 第2號, pp. 36~42(1984)  
 (2) 田中良平, 極限に挑む 金属材料, 工業調査會, pp. 306(1985)  
 (3) 長谷川正義, 三島良績, 原子炉材料ハンドブック 日刊工業新聞社, pp. 695~701(1977)

(4) 二瓶勲, 丸山等, 環境條件からみた 材料の腐食問題—高速増殖炉 原子力工業, 第28卷, 第3號, pp. 25~29(1982)  
 (5) 福田達, ‘高速増殖炉用蒸気發生器’, 原子力工業, 第31卷 第1號, pp. 66(1985)  
 (6) E. E. Bloom, et al, Temperature and Fluence Limits for a Type 316 Stainless controlled Thermonuclear Reactor First wall, Nucl. Technol. Vol. 31, pp. 115~122(1976)  
 (7) 白石健介, 改良ステンレス鋼(PAC)の研究開發. 日本原子力学会誌, 25卷 8號, pp. 617~621 (1983)  
 (8) R. E. Gold, et al, Materials Technology for Fusion; Current Status and Future Requirements, Nucl. Technol./Fusion, Vol 1. pp. 169~237(1981)  
 (9) G. P. Airey, Optimization of Metallurgical Variables to improve the Stress Corrosion Cracking Resistance of Inconel 600, EPRI. NP. Final Report, project 621-1(1980)  
 (10) J. T. Adrian Roberts, Structural Materials in Nuclear Power systems plenum press, New York, pp. 351-353(1981)