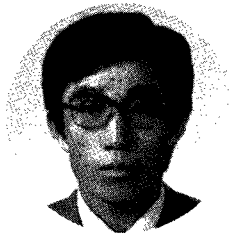


發電所現場에서의 核燃料檢査技術評價(Ⅲ)

Evaluation of On-Site Inspection Technique for Nuclear Fuel



姜 熙 東 (韓國에너지研·電子光學研究室長)

(承 前)

ㄷ. 測量檢査

貯藏槽에서의 測量檢査는 使用後核燃料集合体나 核燃料棒의 길이, 휨, 뒤틀림 등과 같은 物理量의 變化를 測定하여 核燃料의 開發 및 改良에 使用되는 設計 및 電算코드評價에 반영토록 하고 있다. 따라서 貯藏槽에서의 測量檢査는 利用者 보다는 核燃料供給者에게 더 關心을 갖게 하는 分野라 하겠다.

貯藏槽에서의 測量檢査에서 주로 測定되는 物理量은 表3에서 보는 바와 같으며 이들 대부분의 量들은 原子爐停止期間의 Critical Path에 영향을 주지 않도록 時間, 人力을 줄이기 위해 核燃料集合体에서 직접 測定할 수 있는 方向으로 檢査裝置가 開發되어 가고 있다.

이 檢査에 利用되는 裝置는 表3에서 보는 바와 같이 CCTV나 Periscope를 利用한 光學裝置, LVDT(Linear Variable Differential Transformer) 및 Strain Gage 등이 이용되고 있다.

光學裝置는 CCTV나 Periscope와 같은 觀測裝置를 통해 얻은 像을 잘 補正되어 있는 尺度와 比較하여 測定하는 것으로 測定部位에 直接 物理的인 접촉이 없어 核燃料의 損傷을 막을 수 있는 利點이 있으나, 다른 測定技術에 비해 낮

은 精密度를 가지며 檢査者의 訓練程度에 따라 精密度가 달라질 우려가 있다.

LVDT Gage는 인접한 두개의 獨立된 코일과 中間에 한개의 可動型 鐵心으로 되어 있어 電子的으로 두개의 코일 사이의 임피던스차를 測定하도록 되어 있다. 전기신호는 두개의 코일사이를 鐵心이 움직인 거리에 比例해서 生成되며, 이 方法으로 10^{-3} mm까지 測定可能하다. 이 Gage는 溫度에 민감하게 변하기 때문에 精密度를 유지하기 위해서는 작은 補正이 要求된다.

한편 核燃料集合体에서 核燃料棒사이의 間격을 측정하기 위해 特別히 考案된 Probe를 利用하기도 한다. 이 裝置는 平板으로 되어 있는 構材위에 Strain Gage가 설치되어 있는 薄膜型스프링을 설치하여 核燃料棒사이에 삽입할때 스프링의 휨을 측정하도록 한 장치이다.

測量檢査에 利用되는 各 裝置들의 測定精密度는 表4에서 보는 바와 같다.

光學裝置는 檢査時 核燃料과 裝置사이에 있는 冷却水에 의해 영향을 받게 되며 像의 선명도, 장치의 視差, 補正技術, 像의 확대, 시력 등이 測定精度를 저하시키는 要因이라 하겠다.

한편 變換器를 이용하는 경우에는 장치가 核燃料에 접촉하거나 주위의 온도에 따라 많은 誤

〈表3〉 Fuel Bundle and Rod Mensuration

Fuel	Parameter	Mensural Tool
Fuel Bundle	• Length	- Visual gage consisting of a periscope and background scales - CCTV and background scales - Dial indicator and fixed gage length
	• Bow	- CCTV and background scales - Periscope and background scales - LVDT gage and large anvil channel
	• Twist	- Angle encoded fuel bundle platform and visual alignment with periscope
	• Water Channel	- Special probe consisting of leaf spring and strain gage - Visual gage consisting of a periscope and background scales
Fuel Rod	• Length	- Optical gage consisting of a length standard - Depth micrometer and anvil - LVDT and anvil system with calibrated standard
	• Profile	- LVDT gage and calibrated standard
	• Bow	- Periscope and background scales

차를 유발시키게 된다. 예를 들면 직경이 12.7 mm, 길이가 3.81m인 Zircaloy관은 溫度가 5°F 만 변한다고 해도 직경이 1.91×10^{-4} mm, 길이가 5.72×10^{-2} mm가 변하기 때문에 測定誤差를 유발하게 되며, 이 경우 주위의 冷却水溫度測定만으로는 核燃料集合体内에서의 測定은 곤란하게 된다. 이 밖에도 電氣的인 雜音, 濕度, 放射線 등이 장치조작이나 測定過程上的 制限要素로 나타나고 있다.

정밀측정을 요하는 경우 광학간섭계와 같은 장치들은 방사선이나 冷却水의 透明度 등에 영향을 받기 때문에 Strain Gage나 LVDT와 같은 전자적인 變位測定을 하는 裝置를 利用하는

〈表4〉 Common Mensural Tools and Their Gaging Accuracies

Mensural Tool	Accuracy
• Periscope with bifilar eye piece	$\pm 0.51\text{mm} (\pm 0.020 \text{ in.})$
• CCTV with enhance roster and encoder position readout	$\pm 0.13\text{mm} (\pm 0.005 \text{ in.})$ Bias (a)
• Rotary table encoder and periscope	$\pm 1/2 \text{ degree}$
• Strain gage probe (b)	$\pm 0.051\text{mm} (\pm 0.002 \text{ in.})$ (c)
• Dial indicator/depth micrometer	$\pm 0.64\text{mm} (\pm 0.025 \text{ in.})$
• Linear voltage differential transformer (LVDT)	$\pm 0.0051\text{mm} (\pm 0.0002 \text{ in.})$

(a) Precision (one sigma level) is $\pm 0.023\text{mm} (\pm 0.0009 \text{ in.})$

(b) Probe accuracy is $\pm 0.0051\text{mm} (\pm 0.0002 \text{ in.})$

(c) Includes analysis of measurements

것이 바람직하다고 하겠다. 測量技術이나 測定裝置들은 精密度를 向上시키고 시간과 비용을 절감하기 위해 현재 꾸준히 개선되고 있다.

□. 渦流檢査

核燃料의 渦流檢査는 Zircaloy被覆材에 渦流를 誘起시켜 이 電流의 흐름이 被覆材内에 存在하는 異質性에 의해 일으키는 變化를 전기적으로 測定함으로써 核燃料의 健全性을 檢査 및 評價하는 비파괴 검사법이다. 여기서 異質性이라 함은 核燃料被覆材의 龜裂, Pit, 변형 등과 같은 物理的인 性質變化나 熱處理, 硬化, 化學成分 등과 같은 處理工程上的 變化를 뜻한다.

渦流檢査裝置는 核燃料被覆材의 表面에 渦流를 生成시키고 여기서 유도되는 信號의 檢出裝置와 檢出信號를 判別하기 위한 電子處理裝置 및 資料의 記錄裝置로 구성되어 있으며 그림 6은 貯藏槽에서의 渦流檢査施設의 한가지 例를 보여주고 있다.

貯藏槽에서의 渦流檢査裝置는 주로 單一周波數인 Sine波를 利用한 微分型코일 Probe를 사용하고 있으나, 單一周波數를 이용하는 裝置는 資料分析이 늦고 分析自体가 檢査者의 主觀

이 介入되는 난점이 있다. 近來에는 核燃料被覆材와 Pellet사이의 相互作用에 기인되는 初期缺陷을 糾明하기 위해 2重周波數 및 맥동波를 利用하는 裝置가 開發되고 있으며, 이 裝置는 아직까지 Hot Cell에서 이용되고 있는 단계이다.

核燃料棒의 漏洩에 대한 健全성을 評價하기 위한 渦流信號는 被覆材와 Pellet의 接合, 被覆材의 응기, 산화피막에 의한 被覆材의 透磁率의 變化 등의 影響으로 측정의 재현성이 좋지 않아 解析이 복잡해지게 된다. 한편 渦流檢出信號와 금속조직시험사이의 상관연구가 불충분하여 損傷度의 규명에 불확실성이 내재되고 있다. 따라서 核燃料의 健全성을 규명하기 위해 視覺檢査 및 초음파檢査法을 보조적으로 利用하고 있다.

渦流檢査에 대한 標準化가 아직까지 이루어져 있지 않으며, 檢査時 장치의 補正用으로 사용자가 자체로 개발한 標準結합시험편을 利用하고 있다.

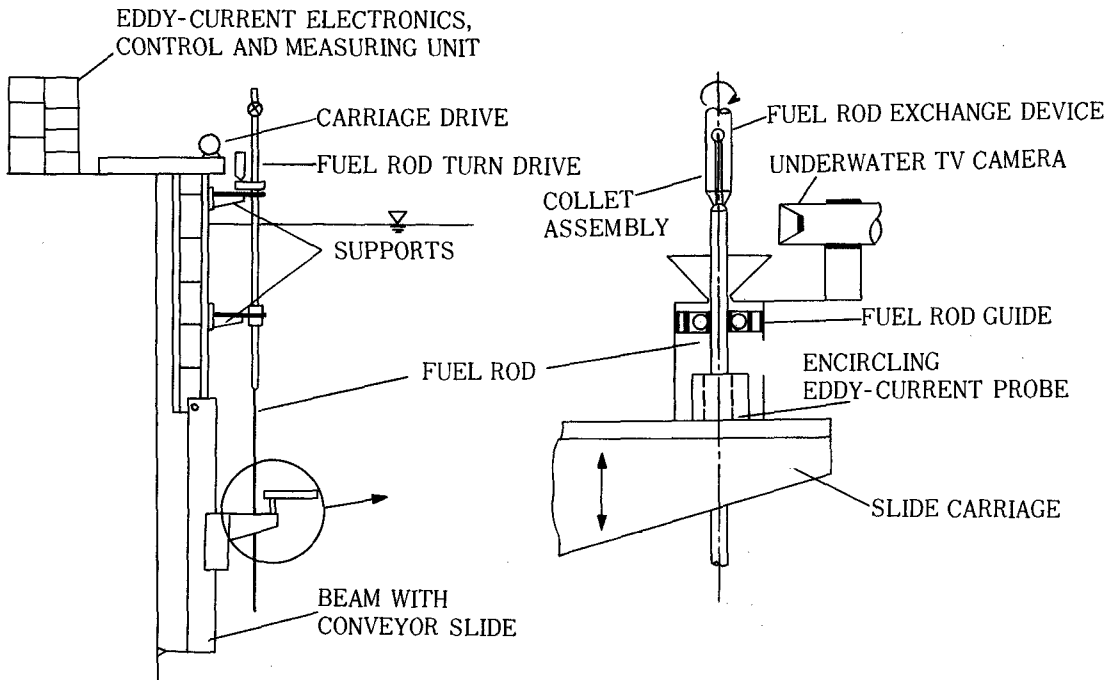
다. 이 시험편은 인공적으로 被覆材의 表面内外부에 電氣放電에 의한 여러 형태의 흠과 동공을 만든 것으로 이것에 의해 장치의 감도 및 반응도를 산출하게 된다.

와류검사시 검출신호가 표준결합시험편에서의 특정결합이상에 해당되는 핵연료봉을 파손연료봉으로 간주하여 방출하게 된다. 그러나 파손핵연료봉을 평가할때 단지 와류검사에만 의존하지 않고 視覺檢査, 초음파 및 測量檢査 등에 의한 資料를 종합하여 평가하는 것이 상례이다.

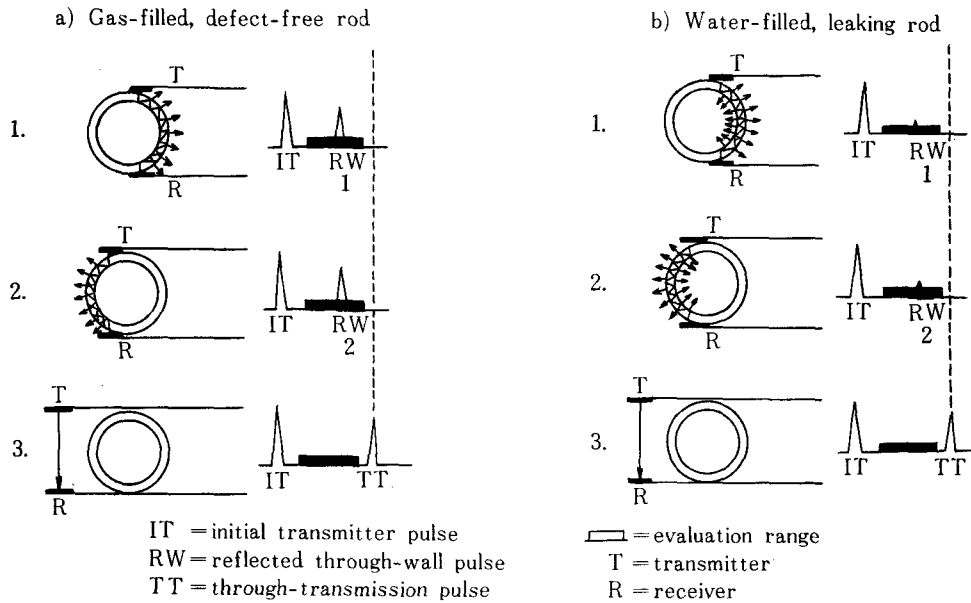
貯藏槽에서의 渦流檢査는 漏洩核燃料棒을 檢査하는 신속하고 主된 檢査법이기는 하지만, 核燃料集合體를 分解하여 個個의 核燃料棒에 대해 檢査하여야 하는 제한성이 있다. 따라서 核燃料檢査를 全體의 핵연료에 대해서 遂行하는 것이 아니라 Sipping 檢査로 漏洩核燃料集合體에 대한 기초정보를 가지고 遂行하는 것이 일반적이다.

渦流檢査裝置, Probe, 標準缺陷試片, 檢査過程,

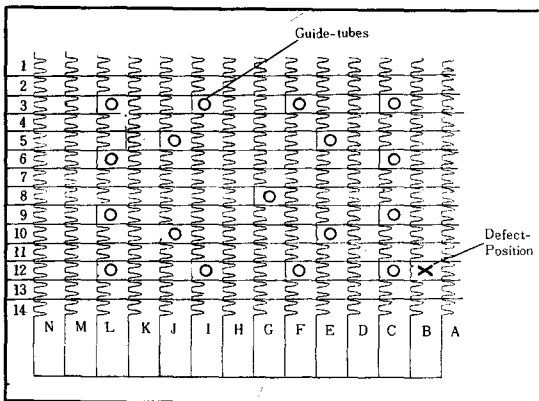
〈그림 6〉 Example Eddy-Current Inspection Station at Poolside



<그림 7> The Ultrasonic Technique of the Failed Fuel Rod Detection



<그림 8> Typical Plots of Fuel Assembly With Defective Rod



評價基準 등이 사용자에 따라 서로 다르기 때문에 와류검사결과가 一樣하지 않아 資料의 比較에 어려움이 따르게 된다.

Ⅱ. 超音波檢査

使用後核燃料에 대한 貯藏槽에서의 超音波檢査는 核燃料棒의 漏洩試驗, 被覆材內的 缺陷檢出 및 被覆材와 Pellet의 接合現象調查 등을 遂行할 수 있는 비파괴검사기술이다.

核燃料漏洩檢査의 原理는 被覆材의 内部表面에서 부터 超音波가 反射되는 強度의 變化를

利用하는 것이다. 만일 核燃料棒內에 물이 들어 被覆材 内部表面에 접촉하게 되면 被覆材를 통해서 입사한 초음파에너지가 被覆材 내부 표면에서 물을 통해 Pellet으로 전달된다. 따라서 초음파신호의 強度가 熱料棒内部的 물에 의해 산란됨으로서 감소하게 될 것이며 그림7에서 보는 바와 같이 파손핵연료봉을 검출할 수가 있게 된다.

초음파에 의한 재래식 핵연료봉 누설검사는 핵연료집합체를 분해하여 개개의 연료봉에 대해 누설검사를 하여 왔으나, 근래에 와서는 핵연료집합체를 분해하지 않고 집합체내에서 누설핵연료봉을 검출할 수 있는 장치가 개발되어 이용되고 있다. 그림 8은 이 장치를 이용하여 PWR 핵연료집합체내를 검사한 결과로서 파손핵연료봉의 위치까지 정확하게 판별할 수 있음을 볼 수 있다.

이 장치는 파손연료봉의 검출효율이 재래식 Sipping에 비해 훨씬 높아 99%를 상회하고 있으며, 집합체의 검사시간이 5~7분정도로 빠른 것으로 발표되어 있다. 被覆材와 Pellet의 接合현상을 검출하는 方法도 누설검사와 마찬가지로

〈表5〉 Summary of Fuel System Parameters Observed and/or Measured in Each Inspection Technique and Ranges for Approximate Number of Persons Needed Per Shift and the Approximate Throughput of Fuel Rods, Fuel Bundles, and BWR Channel Boxes

FUEL SYSTEM	PARAMETER		ONSITE INSPECTION TECHNIQUE					
			VISUAL	GAMMA SCANNING	SIPPING	MENSURAL	EDDY CURRENT	ULTRA-SONIC
PWR FUEL CHANNEL BOX	BOWING		•			•		
	CORNER WEAR		•			•		
	DISPLACEMENT					•		
	FLATNESS					•		
	TWIST					•		
CRUD ON FUEL BUNDLE, FUEL ROD AND BWR CHANNEL BOX FUEL BUNDLE	CONDITION AND PATTERN		•					
	THICKNESS					•	•	
	BOWING		•			•		
	CORNER FUEL RODS	ACTIVE FUEL COLUMN	AXIAL GAPS		•			
			HEIGHT		•			
			RELATIVE POWER		•			
	PROFILE (OD)					•		
	FUEL ROD-TO-FUEL BUNDLE UPPER END FITTING GAP					•		
	FUEL ROD CLADDING END PLUG AND WELD INTEGRITY (a) (b)		•		•			
	FUEL ROD-TO-FUEL ROD (a) SPACING (i, e WATER CHANNEL WIDTH)		•			•		
	FUEL ROD (a) -TO- GUIDE TUBE SPACING (i, e WATER CHANNEL WIDTH)		•			•		
	FUEL ROD (a) WITHDRAWAL FORCE					•		
	HOLDDOWN SPRING FORCE					•		
	IDENTIFICATION		•					
	LENGTH					•		
WEIGHT					•			
FUEL ROD	ACTIVE FUEL COLUMN	AXIAL GAPS		•				
		HEIGHT		•				
		RELATIVE POWER		•				
	CLADDING	CORROSION VARIATIONS (a)	•			•	•	•
		DEGRADATION (a)	•			•	•	•
		DIAMETER (a)	•			•	•	
		FRETTING WEAR (a)	•			•	•	
		FUEL-TO-CLADDING BONDING						•
		HYDRIDING (a)					•	•
		INCIPIENT DEFECTS (a)					•	•
		INTEGRITY (a) (b)	•				•	•
	END PLUG	QUALITY (a)				•		
		REDGE HEIGHT (a)				•		
		IDENTIFICATION (a) (FOR ENRICHMENT IN FUEL RODS)	•					
	INTEGRITY (a) (b)		•					
	IDENTIFICATION (a)		•					
	LENGTH (a)							
MOISTURE INSIDE FUEL ROD (a)							•	
GUIDE TUBE	STRUCTURAL INTEGRITY		•				•	
	INSIDE DIAMETER					• (c)	•	
	WEAR		•			•	•	
SPACER GRID	STRUCTURAL INTEGRITY		•					
	POSITION		•			•		
	SPRING FORCE					•		

FUEL SYSTEM	ONSITE INSPECTION TECHNIQUE					
	VISUAL	GAMMA SCANNING	SIPPING	MENSURAL	EDDY CURRENT	ULTRASONIC
PERSONNEL/SHIFT (d) (10-12HR. SHIFT. TYPICAL)	2-6	2-4	3-10	2-6	2	2
TIME FOR FUEL ROD INSPECTION	V3-3HR / ROD	-1 HR / ROD (d)	NA (e)	3-4 HR / ROD	CAN RANGE 1MIN/ROD (d) TO SEVERAL HOURS / ROD	-1 MIN/ROD (d) FOR LEAK-ER TEST A FEW MIN /ROD (d) FOR DEFECT AND BOND TEST
TIME FOR FUEL BUNDLE INSPECTION	2-17HR / BUNDLE	4 (CORNER RODS ONLY)	0.05-1.2 HR/ BUNDLE	TO-1 DAY/ BUNDLE WITH NO DI SASSEMBLY TO 10 DAYS/ BUNDLE WITH DI SASSEMBLY FOR INDIVIDUAL ROD INSPECTION	NA	NA
TIME FOR BWR CHANNEL INSPECTION	NO STANDARD TIME STATED (DEPENDS ON DETAILS)			2 HR/ CHANNEL WITH OLD SYSTEM 0.25-1HR/ CHANNEL WITH NEW SYSTEM		

- (a) ALSO APPLIES TO BURNABLE POISON RODS
- (b) SPECIFICALLY LEAK TIGHT INTEGRITY
- (c) ON ONLY PART OF THE GUIDE TUBE
- (d) EXCLUDES FUEL HANDLING TIME (i, e FUEL BUNDLE DI SASSEMBLY/REASSEMBLY AND FUEL ROD HANDLING TIME)
- (e) NA-NOT APPLICABLE

로 접합된 部位에서는 초음파에너지의 일부가 Penetrometer로 전달됨으로서 피복재 내부표면에서의 반사강도를 변화시키게 된다.

한편 被覆材內에 軸方向으로 발생된 缺陷을 발견하기 위해서는 剪斷波를 이용하여 缺陷에서 反射되는 超音波를 時間-振幅走査法 (A-Scan)으로 測定하게 된다. 缺陷의 크기는 人工적으로 만든 標準缺陷에 대한 결과와 比較하여 評價하게 된다.

貯藏槽에서의 超音波檢査는 核燃料棒檢査에 所要되는 시간과 경비문제 때문에 초음파장치보다 장치조작이 쉬운 와류검사가 더 유리하다고 보겠으나, 核燃料被覆材가 破損되어 있는 누설점사에는 超音波檢査가 보다 신속하고 적절하다고 하겠다.

超音波檢査에서 被覆材上的 크러드는 입사하는 음파와 간섭을 일으켜 측정자료해석을 복잡하게 하며 핵연료봉에 변형이 일어난 경우엔 탐촉자의 정확한 위치설정이 곤란해 짐으로서 초음파 검사의 기술적인 문제점을 제기하기도 한다.

3. 貯藏槽와 Hot Cell에서의 檢査技術의 差異點

Hot Cell에서의 核燃料檢査는 核燃料의 수송이나 폐기물처리문제로 그 기능이 축소되고 있는 반면에 저장조에서의 檢査기능은 확대되고 있는 실정이다.

시각검사는 光學的인 條件이 Hot Cell에서 훨씬 편리하기 때문에 저장조에서 보다 정밀하게 세부결함을 관측 또는 촬영할 수 있다. 근래에는 核燃料棒의 缺陷이나 異狀의 原因糾明이 主眼點이 되고 있어 Hot Cell에서의 檢査는 관측 부위의 색깔이나 細部缺陷檢出의 技術的인 向上을 기하고 있다.

γ -線 走査法은 Hot Cell과 貯藏槽에서 많은 差異點을 볼 수 있다. Hot Cell에서의 γ -線 走査法은 裝置의 조작을 보다 정밀하게 할 수 있고 集束Slit를 이용해서 高分解能을 갖지만, 走査時間의 測面에서 보면 貯藏槽에서 훨씬 빠름을 볼 수 있다. 3次元영상재현이나 核燃料棒의 구간주사법 등은 아직까지 Hot Cell에서만 시

도되고 있을 뿐 저장조에서 이 기술이 이용되지 못하고 있다.

저장조에서의 측량검사는 Hot Cell에서와 비슷한 정밀도를 갖도록 개발되고 있다.

貯藏槽에서의 渦流檢査는 연속Sine波를 이용하는 裝置만 使用되고 있으나 Hot Cell에서는單一連續波, 二重複合波, 脈動波 등을 이용하는 장치를 모두 사용하고 있다. 二重連續波 및 脈動波渦流檢査는 現在 研究開發段階의 技術이다.

超音波檢査는 貯藏槽에서 主로 核燃料漏洩檢査에 이용되고 있으며, 核燃料損傷 및 被覆材 - Pellet의 接合部位檢査는 開發中인 技術이기 때문에 널리 遂行되고 있지 않는 실정이다. Hot Cell에서는 被覆材두께의 10% 이내의 初期缺陷을 檢出하기 위한 檢査技術이 활발히 進行되고 있다

4. 結 論

發電所現場에서 遂行되는 核燃料檢査技術에 대한 全般的인 要約은 表5에서 보는 바와 같다. 使用者의 立場에서 볼때 貯藏槽에서의 核燃料檢査가 核燃料再裝填期間에 遂行되는 많은 作業中에 아주 큰 비중은 차지하지 못한다.

따라서 再裝填期間의 Critical Path를 피하기 위하여 일부 檢査計劃을 修正하거나 省略하는 경우도 있다. 또한 原子爐가 正常的으로 運轉되어 冷却材나 Off-gas의 放射能이 基準値以下일때 再裝填期間의 核燃料精密檢査는 不必要하다고 하겠다.

한편 核燃料供給業者들은 核燃料의 精密檢査를 費用과 人力問題로 全體的 發電所에서 遂行하지 않고 年間 몇 基의 發電所를 택해서 遂行하고 있는 실정이다. 실제적으로 再裝填期間에 貯藏槽에서의 核燃料檢査가 一部檢査技術(視覺檢査, 測量檢査, Sipping檢査 등)을 제외하면 얼마만한 經濟的인 도움을 주는가는 생각해 볼 만한 것이다.

核燃料供給者나 使用者들로부터 제공되는 저장조에서의 核燃料檢査結果는 缺陷核燃料에 대한 定義나 異狀核燃料의 基準이 一定하지 않아 서로 比較檢討하는데 어려움이 따르고 있다. 즉, 視覺檢査는 檢査主眼點이 다르고, Sipping檢査는 相對測定을 하기 때문에 比較가 힘들어진다. γ -線 走査法은 一般的으로 標準을 利用하는 技術이 아니며 測量檢査, 渦流檢査, 超音波檢査 등도 標準이 統一되어 있지 않아 標準에 대한 補正이 一定하지 않다.

核燃料棒의 漏洩檢査에 가장 정밀한 技術은 Sipping檢査技術과 超音波檢査技術이라 하겠다. Sipping檢査는 最近 核燃料週期에 일어난 核燃料被覆材의 破損을 檢出하기 때문에 정확한 진단기술이라 할 수는 없으며, 檢出 效率역시 試料의 相對測定으로 인해 사용자나 發電所에 따라 서로 달라지게 된다.

이에 비해 超音波漏洩檢査는 全體的 核燃料週期에 걸쳐 일어난 피복재의 파손을 검출할 수 있으며, 검출효율역시 99%를 상회하는 가장 적합한 技術이라 하겠다.

(참 고 문 헌)

1. M. Reier, F. Keneshea and J. Younger DOE-ET-47906-2 (1979)
2. W. J. Bailey, C. J. Morris, F. R. Reich, K. L. Swinth, NUREG/CR-1380 (1981)
3. J. T. A. Roberts, The 3th Inter. Conf. on Nondestructive Evaluation in the Nucl. Industry (1980) Feb. 11-13, Salt Lake City, Utah
4. D. R. McClintock, T. A. Vizzini, Proc. of 20th Conf. on Remote System Tech. ANS (1972)
5. T. A. Green, Power Vol 122, (8) 55-58 (1978) McGraw-Hill, Inc.
6. H. Knaab, IAEA Consultant's Meeting on Non-destructive Tech. for Reactor Fuel Characterization and Repair (1977) Nov. 17. Vienna
7. H. B. Patel, A. Ditschson, A. E. Hunton. AECL-4655 (1973) CRNL/AECL