

《해 설》

中 性 子 라 디 오 그 라 피

徐 庚 壽

韓國原子力研究所

1. 머 리 말

航空 및 兵器産業에 의해서 주로 開發되고 應用되어 오던 非破壞檢査技術이 1960年代에 들어와서는 原子力産業이 主導하게 되었다.

原子力發電所의 建設 및 運轉過程에서 品質管理가 安全性 및 經濟性에 絶對的인 影響을 미치기 때문에 더욱 正確하고 신빙성이 있는 非破壞檢査技術의 開發이 要求되었으며 따라서 새로운 非破壞檢査技術의 開發을 위한 研究를 強力히 推進하게 되었다.

中性子라디오그라피(neutron radiography)는 1960년대부터 原子爐의 實用과 並行하여 本格的인 研究開發이 推進되어 應用되기 시작한 非破壞檢査技術이다¹⁾. 특히 中性子라디오그라피는 放射性物質의 非破壞檢査法에서 가장 有利한 方法으로 알려져 있고 또한 中性子線源이 原子爐나 혹은 放射性同位元素 등에서 얻을 수 있으므로 原子力과의 相互密接한 關係가 있다.

中性子라디오그라피는 과거 數十年間 産業分野에서 非破壞檢査法으로 널리 活用해 왔고 그 技術이 이미 確立된 X線라디오그라피의 역할을 代置 할 수는 없으나 X線라디오그라피로서 解決하지 못하는 問題들을 遂行할 수 있다는 長點을 갖고 있어 近年에 와서 그 技術開發이 急進步하고 있으며 利用分野도 多樣化되고 있다.

本稿에서는 中性子라디오그라피의 原理, 試驗方法, 利點 및 應用分野 등을 要約하여 紹介하고자 한다.

2. 中性子라디오그라피와 X線라디오그라피의 差異

X線라디오그라피와 中性子라디오그라피는 原理에 있어서는 類似하다 즉, 對象物體에 放射線을 照射하여 物

體를 透過한 放射線을 測定하고 吸收狀態를 觀察함으로써 物體内部의 결함有無를 檢査하는 것이다. 고로, 라디오그라피에서는 吸收가 重要な 意味를 갖고 있는데 X線과 中性子は 物質内에서 吸收機構(absorption mechanism)가 현저히 다르다. X線の 吸收는 原子의 外殼電子의 作用으로 일어나는데 原子番號가 클수록 吸收가 커지는 反面에 中性子は 原子核과의 作用에 의해 일어나므로 그 吸收는 中性子の 에너지와 核種의 構造에 關係된다. 그림 1에 熱中性子和 X線(120KV)의 吸收係數를 各 元素의 原子番號에 대해서 表示하였다²⁾.

그림 1에서 보면 X線の 吸收係數는 原子番號가 增加함에 따라 連續的으로 增加하나 中性子の 경우는 吸收係數가 元素에 따라 完全히 不規則하게 分布된다. 實際로, X線の 경우 비슷한 原子番號를 갖는 物質들은 吸收가 類似하므로 X線라디오그라피로는 그 識別이 不可能하지만, 中性子の 경우는 吸收가 原子番號에 無關하므로 識別이 可能하다. 더우기 中性子は 同一元素에서 原子量이 다른 同位元素間에 있어서도 吸收係數의 差異가 뚜렷하여 區別이 可能한데 그 例로서, 原子爐의 稼動時 制御棒內의 Cd^{113} 은 中性子를 吸收하여 Cd^{114} 로 變換하는데 中性子라디오그라피는 Cd^{113} 과 Cd^{114} 를 區別할 수 있어 原子爐制御棒의 燃焼狀態를 測定할 수 있다.

또, X線은 低密度의 物質은 쉽게 透過하나 高密度物質의 透過는 어렵다. 反面에, 中性子は 물, 고무, plastic과 같은 水素化合物에서는 吸收가 크고 납이나 우라늄과 같은 高密度物質에서는 透過가 용이하다. 例를 들면, 中性子라디오그라피에서는 重金屬으로 된 발브(valve)內의 고무 seal의 狀態를 쉽게 檢査할 수 있으나 X線으로는 不可能하며, 反對로 발브가 물속에 있을 경우 中性子로는 발브 狀態를 檢査할 수 없으나 X線은 可能하다.

中性子라디오그라피의 特性中에서 가장 重要的 長點은 γ線에 無關하게 像을 얻을 수 있다는 점이다. 即,

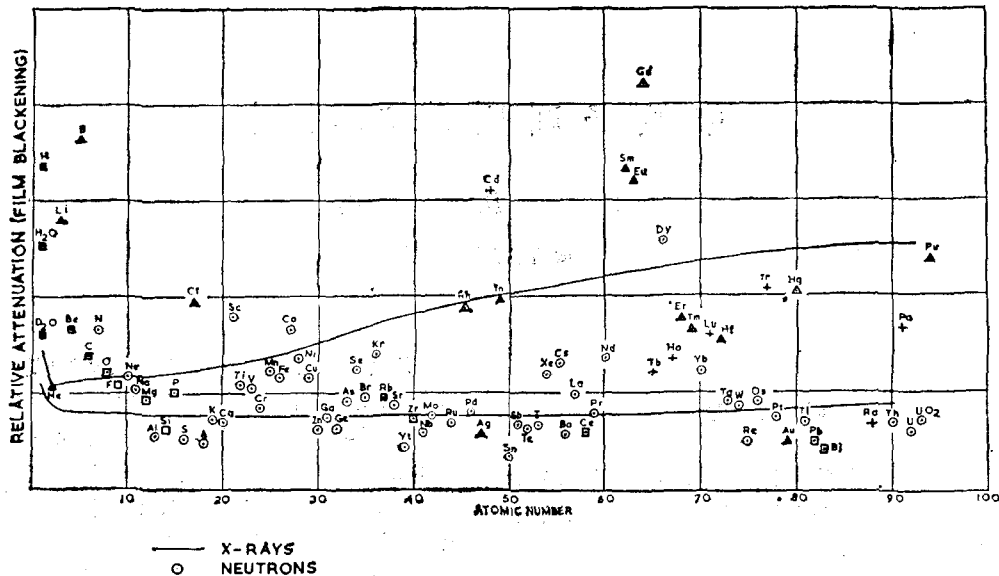


Fig. 1. The Relative Attenuation of Neutrons & X-Rays for the Elements

放射線物體를 라디오그래피에 의하여, 非破壞檢査를 할 경우 x線은 放射性物體에서 나오는 γ 線에 의한 autoradiography 像이 x線라디오그래피像에 겹치므로서 欠陷檢査가 어렵다. 반면에 中性子라디오그래피의 경우는 γ 線에 無關하므로 좋은 라디오그래피像을 얻을 수 있다. 이 特性은 核燃料의 研究開發에서 放射線照射試驗 혹은 放射線照射後性能試驗에서 非破壞檢査法으로 有利하기 때문에 近來에 와서 많이 사용되고 있다.

以上에서 언급한 바와같이 中性子라디오그래피의 長點들이 x線라디오그래피의 短點을 補充할 수 있어 이 두 方法을 結合하므로써 라디오그래피의 活用範圍를 넓힐 수 있고 더 正確하고 신뢰할 수 있는 非破壞檢査를 할 수 있다.

3. 中性子라디오그래피技術

3.1 中性子の 에너지

(1) 熱中性子 (thermal neutron: $0.01 \sim 0.3 \text{ eV}$): 中性子라디오그래피에서 가장 많이 사용되는 中性子이다. 即, 熱中性子は 減速劑를 使用하여 풍부한 線量을 얻기가 용이하며 이 에너지領域의 中性子에 대한 吸收係數가 큰 物質이 많이 있어 檢出이 便利하다. 또한, 元素에 따라 吸收係數差가 심하여 元素들을 쉽게 識別할 수 있다. 이러한 熱中性子の 特性들이 中性子라디오그래피에서 가장 많이 사용되는 理由이다. 故로 여기에서 論議하는 大部分의 內容도 熱中性子에 대한 것이다.

그러나 熱中性子以外的 에너지 領域에 있는 中性子도 重要한 特性들을 갖고 있어 앞으로 그 實用可能性의 展望이 밝다. 그림 2에 中性子の 에너지와 몇가지 元素의 吸收斷面積曲線을 表示하였다.

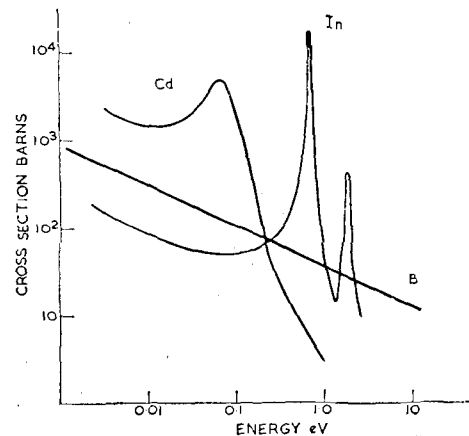


Fig. 2. Cross-Section/Energy Curves for Cadmium, Indium & Boron

(2) 冷中性子 (cold neutron: 0.01 eV 以下): 이 領域의 에너지를 갖는 中性子は 原子爐에서 나오는 中性子를 filtering 하여 얻는데 大部分의 物質에 대하여 吸收斷面積이 커서 像의 檢出이 용이하다. 特히 0.005 eV

以下の 에너지를 갖는 冷中性子は 鐵에 대하여 透過力이 크고 散亂이 적어도 두꺼운 鐵板의 래디오그라피에 적당하다³⁾.

(3) 共鳴中性子(resonance neutron): 熱中性子보다 약간 높은 에너지領域의 中性子에 대해 많은 元素들이 큰 共鳴斷面積(resonance cross section)을 갖고 있는데 元素에 따라 그 共鳴에너지는 다르다. 따라서 共鳴中性子の 特性은 混合物中에서 어느 特定共鳴에너지를 갖는 元素를 檢出하는데 便利한 利點이 있다.

共鳴中性子は 原子爐에서 나오는 中性子를 單結晶體에 의한 廻折法에 의해서 얻는다.⁴⁾

(4) 熱外中性子(epithermal neutron: 0.3~10,000 eV): 이 領域의 에너지를 갖는 中性子は 原子爐에서 나오는 中性子에 filter(例 Cd foil)를 사용하여 低에너지 中性子를 除去하프로서 얻을 수 있다. 熱中性子보다 透過力이 强하다는 것이 長點인데 例로서, 水素 含有量이 많아서 熱中性子は 透過가 어려운 生物組織의 래디오그라피에는 熱外中性子가 적당하다⁵⁾. 近來에 와서는 高濃縮의 플루토늄과 우라늄을 含有한 高速增殖用核燃料의 래디오그라피에서 熱外中性子를 사용한다⁶⁾.

(5) 高速中性子(fast neutron: 10Kev—20Mev): 高速中性子の 래디오그라피에 관한 研究는 比較的 關心이 적은 實情이다. 그러나 高速中性子は 點線源을 얻을 수 있다는 點과 減速과 collimation이 必要없으며 特히 線源의 移動이 可能하다는 利點이 있다. 또한 透過力이 강하여 납 혹은 減損우라늄과 같은 物質로 된 차폐체의 래디오그라피가 可能하다. 그러나, 現在로는 高速中性子래디오그라피像의 檢出法에 限界가 問題로 남아 있다⁷⁾.

3.2 中性子の 減速

中性子에서 나오는 中性子에너지는 10^{-4} 에서 10^6 eV에 이르나 大部分의 中性子は 高速中性子여서 래디오그라피에 적당한 에너지(약 0.025 eV)의 熱中性子로 減速해야 한다. 高速中性子를 熱中性子로 減速하기 위해서는 散亂時 에너지損失과 散亂斷面積이 크고 吸收斷面積이 적은 減速物質을 사용하는데 물, 重水, 炭素 및 Be 등이 主로 많이 사용되고 있다. 이들 減速劑의 特性을 表1에 表示하였다.

3.3 中性子線의 Collimation

中性子래디오그라피에서는 減速劑內에서 不規則하게 運動하는 中性子들을 collimation하여 平行한 中性子線束을 使用하는데 그 이유는 collimation程度가 中性子래디오그라피像의 선명도(sharpness)에 絶對的인 影響을 주기 때문이다.

表 1. 減速劑의 特性⁸⁾

質物	cm ³ 當 原子 혹은分子數 ($\times 10^{19}$)	吸收斷 面 積 (barns)	散亂斷 面 積 (barns)	衝突當 平均에 너지損 失對數	熱中性子 化에 必要 한 平均 衝突數
H ₂	3	0.62	120	1.0	18
D ₂ O	3,300	0.62	124	0.971	19
H ₂ O	3,300	0.002	16	0.567	32
Be	12,000	0.009	6.1	0.203	89
C	8,100	0.005	4.8	0.163	110
O ₂	3	0.003	8.2	0.120	150

中性子線束의 collimation은 collimator의 길이에 대한 半徑의 比가 클수록 collimation은 잘되나 中性子線量의 損失이 커지는데 그 關係는 다음 式에 의한다.

$$\phi = \frac{1}{16} \left(\frac{L}{D} \right)^2 \phi_0$$

ϕ_0 : collimator 內表面에서의 中性子線束量 ($n \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$)

ϕ : collimator 外表面에서의 中性子線束量 ($n \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$)

L : collimator의 길이

D : collimator의 直徑

collimator의 形式에는 simple straight collimator⁹⁾와 soller slit collimator¹⁰⁾ 및 divergent collimator¹¹⁾ 등이 있는데 이중에서 divergent collimator가 가장 많이 使用되고 있다.

3.4 中性子發生裝置

(1) 原子爐: 放射性同位元素 및 加速器에 의해서는 $10^8 n/\text{cm} \cdot \text{sec}$ 이상의 熱中性子線量을 얻기가 어려우나 原子爐에서는 보통 $10^8 \sim 10^9 n/\text{cm}^2 \cdot \text{sec}$ 정도는 쉽게 얻을 수 있기 때문에 中性子래디오그라피의 線源으로서 原子爐의 中性子が 가장 많이 使用되고 있다. 여러 종류의 原子爐가 中性子래디오그라피에 使用되는데 그 대표적인 原子爐를 表 2에 表示하였다.

(2) 加速器: 加速器로서 陽子나 重陽子를 加速하여 標的物質(target material)에 衝突할 때 生成되는 中性子를 中性子래디오그라피의 線源으로 使用한다. 即, $\text{Be}^9(d, n)\text{B}^{10}$, $\text{H}^3(d, n)\text{He}^4$, $\text{H}^2(d, n)\text{He}^3$, $\text{Li}^7(p, n)\text{Be}^7$ 및 $\text{H}^2(p, n)\text{He}^3$ 등의 陽子反應인데 이중에서 d-T反應法은 약 150kV~400kV의 낮은 加速電壓으로 比較的 큰 中性子線量을 얻을 수 있어 높은 加速電壓이 要求되는 다른 反應보다 經濟的으로 有利하다. 그러나 d-T反應의 短點은 生成中性子の 에너지가 높아 減速과 collimation

表 2. 中性子래디오그래피에 사용되는 원자로의 예

原子爐	所在地	熱出力 (HW)	Collimator 形式	線源에서 試料까지 의 거리 (cm)	Collimator in put 內徑 (cm)	熱中子線 源의 線 束量 n/cm ² sec	照射部位에 서 中子線 束量 n/cm ² . sec
Juggernaut	Argonne (美國)	0.2	Simple Straight Collimator	254	10.1×6.35	2×10 ¹¹	2×10 ⁷
SILOE	Grenoble (불란서)	30	Divergent Collimator	187	1.4	7×10 ¹³	2×10 ⁸
BEPO	Harwell (英國)	8	Soller Collimator	710	—	1.3×10 ¹²	10 ⁶
DiDo	Harwell (英國)	22	Divergent Collimator	292	2	1.4×10 ¹³	9×10 ⁷
TRIGA mark I	Gulf General Atomic Co. (美國)	0.25	Conical Collimator	488	12.7	6×10 ¹¹	1.2×18 ¹
NRX	AECL (캐나다)	40	Stepped line Collimator	270	4	1×10 ¹³	2×10 ⁷

과정에서 中性子線 量의 損失과 反應時 사용하는 absorbed-gas target tube의 壽命이 짧아서 中性子線 量의 變化에 따른 노출보정과 자주 교체하여야 하는 어려움이 있다.

이 以外의 中性子生成反應으로는 (x, n) 反應이 있는데 中性子를 生成하기 위한 大部分의 標的物質의 x-線 發端에너지 (threshold energy)는 8Mev 이상이다, 그러나 Be과 Ir의 경우는 각각 1.60Mev 및 2.20Mev의 X線에너지로 中性子를 生成할 수 있어 中性子래디오그래피에 주로 사용된다. 이 反應에서 生成되는 中性子線 量은 電子의 加速電壓과 標的物質의 x線吸收에 따른다 그러므로 原子番號가 적은 標的物質일 경우에는 高에너지 x線에 대한 吸收이 적기 때문에 부피가 큰 標的物質을 사용해야 하는데 이때 標的物體는 減速劑의 역할도 하게 된다. 예를들면 100μA의 電子線速을 Au 標的에 衝突시켜 發生한 x線을 9 inch 立方體의 Be 標的에 反應시킬 경우 8×10⁷n/cm²-sec의 中性子線 量을 얻을 수 있다¹²⁾. 이 방법에 의한 中性子は 강한 x線 background 때문에 直接法에 의한 中性子래디오그래피에 使用하기는 적당하지 못하다.

(3) 放射性同位元素

放射線同位元素에 의한 中性子生成은 (α, n) 및 (γ, n) 反應에 의한다. (γ, n) 反應의 경우 berllium이나 deuterium에서는 2~3Mev 에너지의 γ線으로 中性子를 얻을 수 있으나 다른 標的物에서는 最少限 6Mev 이상의 γ線에너지가 必要하므로 實用性이 없다. 中性子래디오그래피에 사용가능한 放射線源을 表 3에 表示하였다.

表 3. Radioisotopic Neutron Sources

Source	反應式	半減期	표준중성자 생성량 10 ⁴ n/sec-ci (lg at 1cm)
Sb-Be	σ. n	60d	1.0×10 ⁶
Am-Be	α. n	433y	2.2×10 ⁶
Ra-Be	α. n	1622y	1.3×10 ⁷
Ac-Be	α. n	22y	1.5×10 ⁷
Th-Be	α. n	1.9y	2.0×10 ⁷
Ro-Be	α. n	138d	2.5×10 ⁶

이 중에서 가장 注目되는 放射線源으로는 Sb-Be인데 比較的 낮은 에너지의 中性子(25Kev)가 生成되며 線 量도 크다. Warman은 10¹⁰n/sec의 Sb-Be線源으로 잘 collimation된 10⁶n/sec²-sec의 熱中子線束을 얻었다¹³⁾.

放射線源에 의한 中性子發生裝置의 利點은 휴대가 可能하다는 것이고 短點으로는 높은 γ線 background와 半減期가 짧다는 點이다. (α, n) 反應의 경우도 γ線 background가 높는데 이것은 高에너지의 中性子が 減速過程에서 (n, γ) 反應에 의해서 나오는 γ線 때문이다.

californium-252는 自體崩壞에 의해서 中性子를 生成하는 有一한 放射性同位元素로서 半減期가 2.2년이며 30mg의 Cf에서 10¹¹n/sec의 中性子를 얻을 수 있어 放射線同位素에 의한 中性子線源으로 關心이 쏠리고 있

는데 現在로는 經濟的인 問題點 때문에 實用化가 되지 않고 있다.

3.5 像의 檢出法

中性子は X線과는 달리 사진 film의 silver halide에 感光作用을 거의 하지 않는다. 故로, 中性子래디오 그라피에서 像을 사진 film에 檢出하기 위해서는 中性子の 衝突에 의해 放射線을 放出하는 變換 foil을 film에 부착하는 方法을 使用하는데 이와 같은 像의 檢出法에는 直接法(direct method)과 間接法(transfer method)이 있다.

(1) 直接法

이 方法은 中性子 照射時 순간적으로 放射線을 放出하는 gadolium과 같은 變換 foil에 film을 附着하여 이 變換 foil에서 나오는 放射線에 의해 像을 檢出하는 方法이다. 얇은 Gd 金屬板(두께, 약 0.1mm)은 中性子の 衝突에 의해 순간적으로 原子(75Kev)를 放出하고 이 電子는 사진 film에 感光作用을 한다. 이때 像의 質은 同一한 film을 使用하여 얻은 x線 래디오그라피의 像과 比較할 수 있을 정도로 우수하다. 直接法에서 變換 foil이 얇고 電子의 飛程距離가 짧을수록 像의 definition은 좋아진다.

이와 다른 直接法에는 像의 増感板(image intensifying screen)을 使用하는 경우가 있는데 이 方法은 lithium fluoride或 zine sulphide의 粒子들이 칠해진 얇은 板을 film에 附着시켜 中性子が lithium에 吸收되어 α粒子를 放出하고 이 α粒子는 zine sulphite에 에너지를 주어 光을 發生하여 film에 像을 増感시키는 方法이다. 이 方法은 中性子の 照射時間을 단축시킬 수 있으므로 中性子線량이 弱한 경우에 많이 使用되는데 一般的으로 像의 質이 좋지 못하다.

直接法은 中性子線束에 γ線이 많이 包含되었을 경우 γ線의 background 때문에 像이 흐려지며 또 檢査對象物體가 放射線을 放出하는 物體인 경우는 對象物體에서 放出하는 放射線으로 인하여 film에 antoradiographic image를 만들기 때문에 中性子만에 의한 선명한 像을 얻기가 곤란하다. 이러한 결점을 解決할 수 있는 方法이 間接法이다.

(2) 間接法

이 方法은 γ線에는 無關하고 中性子에만 反應되되 半減期가 적당히 짧은 物質을 變換 foil로 使用한다. 即 中性子를 照射하여 變換 foil을 activation 시킨후 이 activation된 變換 foil을 다시 film에 附着시켜 變換 foil의 崩壞에서 나오는 放射線에 의해서 像을 檢出하는 方法이다.

中性子の 照射와 變換 foil의 activation과의 關係는 다음式에 의한다.

$$S = \frac{\Phi \sigma}{6 \times 10^{10} A} (1 - e^{-0.693 t / T})$$

여기서 S: 比放射能(Ci g⁻¹)

Φ: 中性子線量(n cm⁻² sec⁻¹)

σ: 熱中性子吸收斷面積(barns)

T: 半減期(min)

t: 照射時間(min)

A: 原子番號

이 式에서 보면 activity는 中性子線束과 吸收斷面積에 關聯된다. 그러나, 中性子線량이 10⁴cm⁻² sec⁻¹ 以下인 경우 에너지가 부족하여 明確한 像을 얻기에는 不可能하다. 間接法에서 film의 密度는 變換 foil의 中性子 照射時間과 activation된 foil을 film에 노출하는 시간에 의해서 定해지는데 그 關係는 그림 3에 表示하였다.

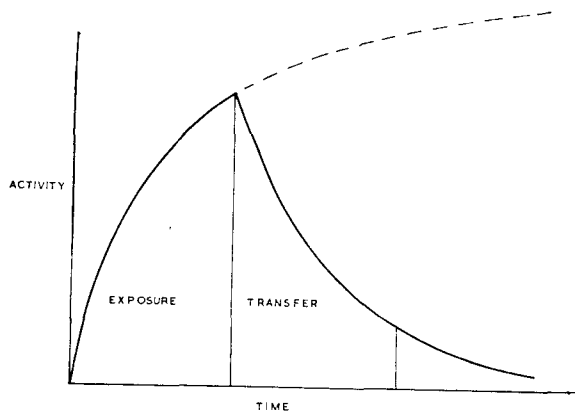


Fig. 3. Exposure/Transfer Curves

變換 foil로는 In이 많이 使用되는데 In은 中性子와 作用하여 電子를 放出하며 半減期는 54分이다.

間接法은 γ線에 無關하므로 核熱料의 放射線照射試驗 및 照射後性能試驗에서 非破壞檢査法으로 널리 使用되고 있다.

사진법 以外の 中性子래디오그라피像 檢出法으로는 track etching method¹⁴⁾, xerographic method¹⁵⁾, television method¹⁶⁾ 등의 應用이 試圖되고 있다.

4. 中性子래디오그라피의 應用

(1) 核熱料의 放射線照射試驗 및 照射後性能試驗에서

a) 核熱料 pin의 Swelling 測定(精密度±0.01 in.)

b) 核熱料 pellet의 균열, slumping 및 demension

change 등을測定

(2) 原子爐의 制御棒의 減損部位와 狀態의 定期的 檢査¹⁸⁾.

(3) titanium 및 zirconium 合金物質의 水素化 現象 檢出¹⁹⁾.

(4) 中性子 차폐체의 결합檢査.

(5) 組立體內部的 rubber O ring 이나 plastic 으로 된 部品の 位置 및 結合 檢査.

(6) 暴發物內의 暴發充填狀態檢査²⁰⁾

(7) 接着濟의 分布 및 接着狀態檢査

(8) 電子部品の 微細回路의 結合檢査

(9) 윤활유의 分布狀態檢査

(10) 鑄物內部 構造의 異狀有無檢査

(11) 金屬管內에 有機物質의 狀態調査

(12) cadium 板의 均一性 및 連續性 檢査

(13) 動植物의 組織檢査에 의한 醫學 및 生物學分野에 應用²¹⁾

5. 結 論

中性子라디오그래피는 새로운 非破壞檢査法으로 그 位置가 公告히 되었으나 아직도 技術적인 分野에 研究 開發 및 改良할 問題들이 많이 남아 있다. 即 中性子라디오그래피의 標準化, 中性子像의 檢出法, 中性子線束의 減速과 collimation 技術의 改良, 熱外中性子, 共鳴中性子 및 高速中性子라디오그래피技術의 研究開發 및 中性子線源의 開發等이다. 特히, 移動이 可能한 中性子線源의 開發은 中性子라디오그래피의 活用度를 넓힐 수 있는 關鍵이 되고 있다.

參 考 文 獻

- 1) H. Berger, Neutron radiography, Elsevier Publishing Co., the Netherland, 1-8, (1965)
- 2) R.S. Matfield, Atom No. 174, (1971)
- 3) J.P. Barton, Br. J. Appl. Phys., 16, 1833 (1965)
- 4) J.P. Barton, J. Sci. Instr., 42, 540 (1965)
- 5) A. Atkins, Mat. Eval., 23, 453 (1965)
- 6) A.R. Spowart, Nondestructive Testing 1, 151 (1968)
- 7) E. Tochilin, Phys. Med. Biol., 10, 477 (1965)
- 8) B.J. Feld, Experimental Nuclear Physics, Vol. 2, Edited by E. Segré, Wiley, New York, 228 (1953)
- 9) H. Berger, Neutron Radiography, Elsevier publishing Co., 24~38 (1965)
- 10) B.C. Blank, et.al., Proc. Fifth Int. Conf. on Nondestructive Testing, Montreol, 242 (1967)
- 11) J.P. Barton, Mater. Evaluation 25.45A (1967)
- 12) C.W. Wagner, et al., Nucl. Instrum. Meth. 6. 238 (1960)
- 13) E.A. Warman, Ion Age, 190. 72 (1962)
- 14) H. Berger, Br. J. Non-dest. Test; 10, 26 (1968)
- 15) G.M. Taylar, Non-dest. Test., 13, 6 (1955)
- 16) G. Farny, et al., Report DPE/SPE/68-452, Centre Detudes Nucléasres Scalay, France 452, (1968)
- 17) W.A. Carbiener, Nucle Applic., 2, 468. (1966)
- 18) H. Berger, et, al., Nucl. Sci Eng., 18, 226 (1964)
- 19) K. Chountas, et. al., Adomkernenerg. 13, 444 (1968)
- 20) F.B. Burkdoll Space/Aeronaut. 49, 5, 117.
- 21) M. Brown & P.B. Parks, Am.J. Roentg, 106, 472 (1969)