

放射線 및 放射性同位元素

— 生産, 利用 및 防禦① —

金 載 祿 (韓國에너지研·同位元素室長)

1930年以來 原子爐나 粒子加速器를 이용하여 여러 種類의 放射性同位元素 (Radioisotope, RI) 를 人工的으로 生産하게 됨에 따라 1960年代부터는 人工 RI를 여러 分野에서 이용하게 되었고, 우리나라에서도 상당량의 RI 및 그 標識化合物들을 生産 또는 輸入하여 利用함으로써 우리 生活과 密接한 關係를 갖게 되었다. 더구나 天然資源이 不足한 우리나라는 原子力發電을 통하여 그 突破口를 찾지 않을 수 없게 됨에 따라 原子力은 우리 앞에 성큼 다가왔고 여러 가지 RI 및 放射線에 對한 關心도 높아졌다. 卽, 우리는 이제 原子力時代에 살고 있어 이와 關聯한 基本知識을 외면하는 것은 곧 現實을 외면하는 것이 되었다. 最尖端 巨大科學, 그 한 쪽 分野를 살펴 보기로 하자.

1. 放射性同位元素의 生産

RI利用이 一般化되기는 1946年 Oak Ridge의 原子爐에서 ^{131}I , ^{14}C 등이 生産 供給되면서 부터이다.

一般的으로 原子爐內 中性子束 密度(neutron flux)는 加速器의 粒子束 (particle flux)보다 월등히 크고 낮은 에너지의 中性子, 卽 熱中性子 (thermal neutron)는 다른 粒子들보다 原子核反應을 일으키는 確率, 즉 核反應斷面積 (nuclear reaction cross section) 또한 월등히 크다. 따라서 原子爐는 加速器보다 低廉한 價格으로 많은 量의 RI를 生産할 수 있으며, 현재 利用되고 있는 RI

의 90% 이상이 原子爐에서 製造된 것이다.

(1) 原子爐 利用 生産

표적(target)물질을 원자로의 中性子 照射孔에 넣어 일정시간 중성자를 照射한 다음 꺼내어 화학적방법으로 표적과 생성 RI를 분리 정제하며, 사용목적에 따라 品質管理方法을 달리하여 供給한다.

1) 표적의 中性子 照射

原子爐內 中性子照射에 의해 生成하는 放射能은 다음 式으로 표시된다.

$$A = N\Phi\sigma(1 - e^{-\lambda t})$$

A : 生成방사능 (dps)

N : 표적원자數

Φ : 中性子束 密度 ($\text{n}/\text{cm}^2 \cdot \text{sec}$)

σ : 核反應 斷面積 (barn, $1\text{barn} = 10^{-24}\text{cm}^2$)

λ : 生成 RI核種의 崩壞常數 (sec^{-1})

t : 中性子 照射時間 (sec)

즉, 生成 RI의 방사능 세기는 原子爐의 中性子束密度와 照射時間에 比例함을 알 수 있다.

대표적인 연구용 原子爐의 中性子束密度를 소개하면 表 1 과 같다.

2) 核反應

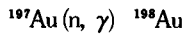
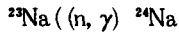
原子爐內 中性子照射로 일어나는 核反應은 (n, γ), (n, p), (n, α), (n, f) 등으로 分類할 수 있다. 中性子は 帶電되지 않았기 때문에 p, d, α 등 荷電粒子들에 比하여 월등히 核反應斷面積이 크다. 특히, (n, γ)反應에서는 一般的으로 熱中性子

〈表1〉 原子爐出力과 中性子束 密度

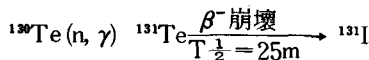
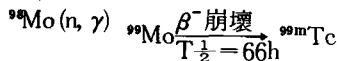
原子爐	出力	最高中性子束密度 (n/cm ² ·sec)
TRIGA II (韓國)	250kW	1×10 ¹³
TRIGA III (韓國)	2MW	6.5×10 ¹³
JMTR (日)	50 "	5×10 ¹⁴
JRR (日)	10 "	2×10 ¹⁴
DIDO (英)	15 "	2×10 ¹⁴
ORR (美)	30 "	5×10 ¹⁴
HFIR (美)	100 "	5×10 ¹⁵

의 核反應斷面積은 中性子の 速度, 즉 中性子の 에너지의 平方근에 逆比例한다. (n, p) 反應이나 (n, α) 反應에서는 核反應결과 p, α 같은 荷電粒子를 방출하기 때문에 처음부터 높은 에너지의 中性子, 즉 速中性子が 要求되며 反應斷面積은 一般的으로 (n, γ) 反應에 비해 작다.

○ (n, γ) 反應例 :



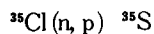
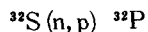
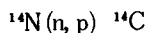
○ (n, γ) 反應後 daughter 核種 生成 例 :



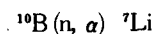
○ Szilard-chalmer 過程

(n, γ) 反應에 의해서도 매우 比放射能인 높은 RI를 생성하는 한가지 方法이다. 즉, ⁵⁰Cr (n, γ) ⁵¹Cr의 核反應에서 표적으로 K₂CrO₄를 使用하면 核反應結果 생긴 높은 에너지狀態의 ⁵¹Cr核이 Cr(VI)O₄⁻²의 Cr-O結合을 끊고 遊離된 Cr(III)³⁺이 은狀態로 되며 표적물질로 부터 化學적 分리가 可能하여 比放射能인 높은 ⁵¹Cr을 얻게 된다.

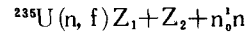
○ (n, p) 反應例 :



○ (n, α) 反應例 :



○ (n, f) 反應例 :



(n, p), (n, α), (n, f) 反應으로 생긴 RI는 無擔體 (carrierfree)이다. 一般的으로 核反應에 의해 生成된 RI는 遮蔽施設內에 運搬되어 이온交換法, 溶媒抽出法, 蒸溜法, 沈澱法, 電氣泳動法, 크로마토그래피 等 여러가지 方法으로 分離精製되며 物理, 化學的 品質管理下에 出荷된다. 특히 RI나 그 標識化合物들이 醫療的으로 利用될 경우에는 無毒性試驗, 無菌試驗, 無發熱性試驗 等 生物學的 品質管理를 附加하여 施行한다.

産業用 放射線源(¹⁹²Ir 等)은 照射된 표적을 化學處理없이 그대로 stainless steel capsule에 넣어 argon arc로 熔接한다. 線源은 부피가 작으면서 放射能인 높기 때문에 그 熔接에는 slave master hand(遠隔操作器)를 使用해야 한다.

(2) 加速器利用 生産

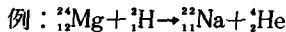
原子爐를 使用하기 이전에는 加速器가 唯一한 RI製造裝置였으나 原子爐를 利用하게 되면서 부터 加速器利用生産이 原子爐利用生産에 비하여 生産量이 적고 高價인 관계로 한동안 利用하지 않았었다. 그러나 近來에 와서 短半減期RI의 醫療的利用이 活潑해 지면서 小型加速器(compact cyclotron)를 이용하여 p, d, α 등을 加速해 原子爐로는 生産하기 어려운 核種(一般的으로 短半減期の 陽子過多核種)을 생산하여 即席에서 利用하는 方法이 開發됨으로써 現在 世界的으로 약 200基의 加速器가 醫療機關에서 운영되고 있다.

사이클로트론을 利用하여 생산하는 陽子過剩核種이 醫療用으로 各광받는 理由는 短半減期이어서 人體에 대한 放射線損傷(radiation damage)을 적게 준다는 사실 以外에 陽電子消滅(positron annihilation)에 의한 同時計數法(coincidence counting)으로 훨씬 正確한 診斷이 可能하기 때문이다. 即 體內에 投與된 陽電子放出 RI에서 放出되는 陽電子消滅放射線을 同時計數함

로써 두 개의 檢出器 사이에 存在하는 RI位置에 관한 像이 作圖되어 精교한 imaging을 얻음으로써 内科疾患診斷效果의 向上이 可能하기 때문이다.

사이클로트론에 의한 RI生産方法自體는 根本的으로 原子爐利用 生産方法과 大差없으나 粒子加速을 위해서는 高에너지를 必要로 하며 RI生産效率을 높이기 위해 enriched target(濃縮표적)을 加速器利用生産에 使用하기도 한다. p, d, α等 加速粒子가 표적에 충격된 직후 몇개의 粒子가 나감으로써 過量的 勵起에너지를 除去하고 放射性核種이 生成된다. 즉 이때 陽荷電粒子를 捕獲하고 中性子를 放出함으로써 安定 RI에 비해 中性子過少(또는 陽子過多)인 核種이 生成된다.

또 한가지 特異한 것은 사이클로트론에 의한 RI生産에서는 生成核種이 표적과는 同位元素關係가 아니므로 표적물질에 의해 희석되지 않고 높은 比放射性能生成物을 얻게 한다는 것이다.



原子爐를 利用하는 (n, f)反應에서도 核分裂生成物의 種類가 많으며 모두가 放射性이어서 이들을 分離하면 역시 (n, γ)生成物들 보다 높은 比放射能核種들을 얻을 수가 있지만 核分裂生成物로부터 어떤 特定核種을 分離해낸다는 것은 그리 단순치 않다. 한편, RI는 加速器나 原子爐에서 만든 放射性核種의 daughter nuclide(娘核種)로부터도 얻을 수가 있다. (放射平衡 및 RI generator 參照).

加速器 및 原子爐에 의한 RI生産의 特徵을 要約하면 表2와 같다.

(3) 生産方法 決定因子

어느 RI를 어떤 方法에 의해 生産하느냐 하는 것은 다음의 몇가지 因子들을 檢討하여 決定한다.

- (1) 生産場所에서 利用場所까지의 距離
- (2) 分離精製에 所要되는 時間

〈表2〉 原子爐 및 加速器利用 RI生産 및 生成RI의 特徵

		原子爐利用生産	加速器利用生産
生 産	日常生産 生産經費 표적照射	용이한 편 낮은 편 數個표적 同時照射 可能	용이치 않은 편 높은 편 同時照射 不可能
	生成 RI	核 子 主崩壞形式 比放射能	中性子過多(陽子過少) 陽子過多(中性子過少) n → p + e ⁻ + ν, γ p → n + e ⁺ , EC (n, r) 낮다 높다 (n, f) 높다

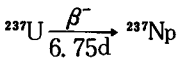
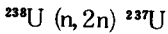
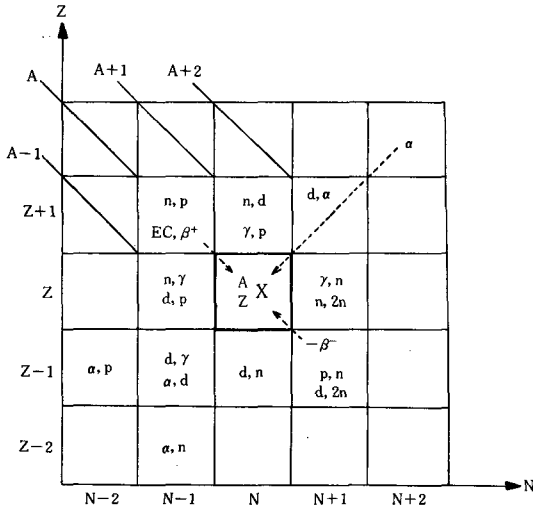
- (3) RI의 崩壞半減期 및 에너지
- (4) 實驗 및 取扱器具의 種類
- (5) 比放射能

예를 들면 數週間이 걸리는 어느 實驗用으로 Na tracer가 必要하다면 原子爐利用生産 ${}^{24}\text{Na}$ ($T_{1/2} = 15\text{h}$)는 不適하며, 사이클로트론 利用生産 ${}^{22}\text{Na}$ ($T_{1/2} = 2.6\text{y}$)가 適合하다. 또 어느 實驗에 高比放射能追跡자가 必要하다면 역시 사이클로트론利用生産 RI 또는 核分裂生成物 RI가 必要할 것이다.

그러나 비록 이와같은 因子들이 고려된다 하더라도 그러한 核種의 生産可能性은 極히 制限된다. 그 制限點은 主로 施設問題이다. 즉, 原子爐나 加速器의 beam 또는 단순히 核反應斷面積 (nuclear reaction cross section)이다.

그림 1은 Isotope chart의 一部分을 나타낸 것이며 生成核種 ${}^A_Z\text{X}$ 는 ${}^A_Z\text{X}$ 에서 (n, γ) 또는 (d, p) 反應에 의해 만들어지거나 ${}^A_Z\text{X}$ 에서 (d, α) 反應에 의해 生成된다. 그와 같은 核反應의 選擇은 特定核種의 availability, projectile의 에너지, 核데이터에 명시된 核反應斷面積 등에 의해 決定된다. 生成 RI는 또한 放射性崩壞 (radioactive decay)에 의해 다른 放射性核種으로 옮겨 가기도 한다. 즉 (n, 2n) 反應으로 ${}^A_Z\text{X}$ 를 만드는데 그것은 β⁻放出로 ${}^{A-1}_{Z+1}\text{X}$ 로 넘어간다. 다른 예를 들면 다음과 같다.

〈그림1〉 Isotope chart의 一部分



(4) 照射收率 (Irradiation yield)

原子爐나 加速器에서 RI를 生産할때 다음 式처럼 요약 表現할 수 있다.

$$X_{\text{proj}} + X_{\text{targ}} \xrightarrow{k} X_1 \xrightarrow{\lambda_1} X_2 \xrightarrow{\lambda_2} X_3 \dots \dots \dots (1)$$

앞의 式에서 k는 X_1 生成速度 (rate)이며 X_1 도 放射性崩壞하는 것이라면 生成核種 X_1 의 시간 t 에 있어서의 原子數 N_1 은 全體生成原子數에서 시간 t에서의 崩壞數를 뺀 差와 같아 아래 微分方程式으로 表示된다.

$$dN_1 = kdt - \lambda_1 N_1 dt \dots \dots \dots (2)$$

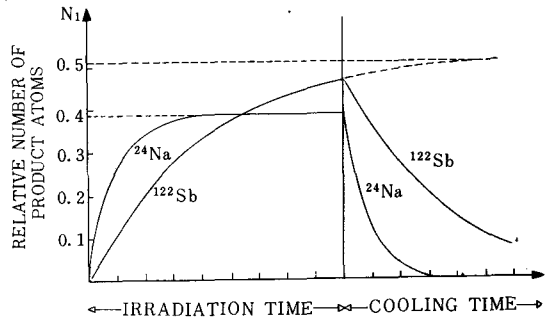
$N_1 = 0$ (初期에는 放射性原子가 없는 것으로 함)에서 N_1 (照射時間 t_{irr} 에 있어서 生成된 放射性原子數) 까지를 積分하면,

$$N_1 = \frac{k}{\lambda_1} (1 - e^{-\lambda_1 t_{\text{irr}}}) \dots \dots \dots (3)$$

즉, N_1 은 指數函數的으로 最大值까지 增加하는데 最大值는 $\lambda_1 t_{\text{irr}} \gg 1$ (즉 $t_{\text{irr}} \gg T_{1/2}$) 인 때이다. 따라서

$$N_{1(\text{max})} = \frac{k}{\lambda_1} \dots \dots \dots (4)$$

〈그림2〉 照射時間에 따르는 生成RI核의 增加 및 照射後의 減少



그러나 $t_{\text{irr}} \ll T_{1/2}$ 인 때에는 指數를 Mc Laurin 의 定理에 따라 展開하여

$$e^{-\lambda_1 t_{\text{irr}}} \approx 1 - \lambda_1 t_{\text{irr}} \text{ 이므로}$$

$$(3) \text{式은 } N_1 = k t_{\text{irr}} \quad (t_{\text{irr}} \ll T_{1/2}) \dots \dots \dots (5)$$

만약 照射時間을 半減期尺度로 켜다면

$$a = t_{\text{irr}} / T_{1/2} \text{ 인 때,}$$

$$N_1 = N_1(\text{max}) \cdot (1 - 2^{-a}) \dots \dots \dots (6)$$

1 半減期만큼 (즉 $a=1$) 照射 : $N_1 = \frac{1}{2} N_1(\text{max})$

2 半減期만큼 (즉 $a=2$) 照射 : $N_1 = N_1(\text{max}) \cdot (1 - 2^{-2}) = N_1(\text{max}) \cdot 0.75$

즉, $N_1(\text{max})$ 의 75%가 生成된다.

照射가 끝나면 生成RI는 그 半減期에 따라 崩壞하므로 照射後 崩壞時間을 冷却時間 (cooling time) 이라 한다.

生成 RI 原子數 N_1 을 t_{irr} 과 t_{cool} 의 函數로 나타내면

$$N_1 = \frac{k}{\lambda_1} (1 - e^{-\lambda_1 t_{\text{irr}}}) \cdot e^{-\lambda_1 t_{\text{cool}}} \dots \dots \dots (7)$$

두 核種에 對한 t_{irr} 및 t_{cool} 에 의한 N_1 의 상대적 값을 그림 2에 나타내었다.

$$\text{相對速度 } k (\approx \Delta N / t_{\text{irr}}) \text{ 는 } k = \Phi \sigma N_t \dots \dots \dots (8)$$

(中性子束 속에서 얇은 표적에 대해) 로 표시된다.

$$\text{한편 방사능은 } A = \frac{\Delta N}{\Delta t} = \lambda N \text{ 이므로}$$

$$A_1 = k (1 - e^{-\lambda_1 t_{\text{irr}}}) \cdot e^{-\lambda_1 t_{\text{cool}}} \dots \dots \dots (9)$$

이것은 RI 生産 基本式이다. (다음호에 계속)