

# 방사선 피폭 (mSv)

2014.12.22

원자력및양자공학과

조 규 성

# 목 차

1. 동위원소 & 방사선
2. 방사선 피폭 & mSv
3. 방사선 피폭 사례
4. 자연피폭 & 의료피폭
5. 방사선 피폭 영향
6. 방사선량 제한 기준치



퀴리 (1898 Ra)



뢴트겐 (1895 X선)

# 1. 동위원소 & 방사선

# 주기율표(Periodic Table)

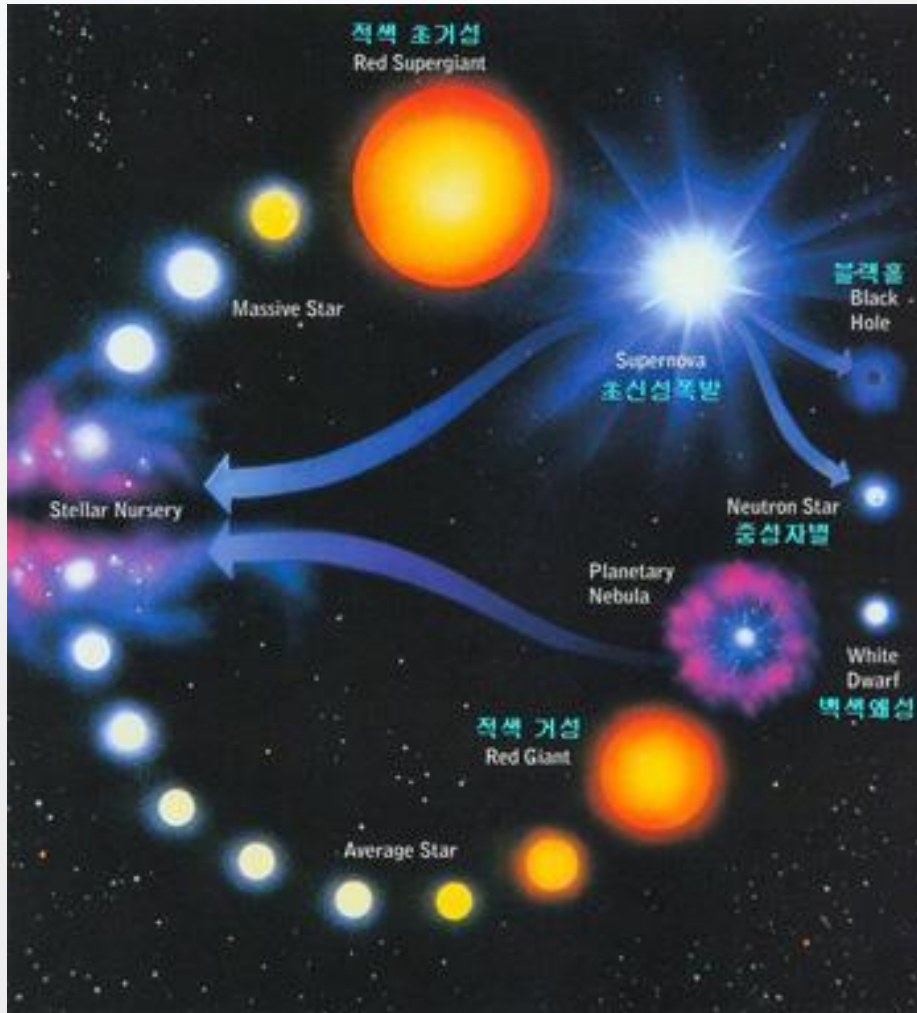
| Group IA                                                       |  |                                                       |  |                                                                        |  |                                                                                           |  |                                                                                        |  |                                                                                        |  |                                                                                       |  |                                                                                     |  |                                                                                        |  | VIII                                                                                   |  |                                                                                    |  |                                                                                        |  |                                                                                                         |  |                                                                                                    |  |                                                                                                        |  |                                                                                                      |  |                                                                                                      |  |                                                                                                   |  |
|----------------------------------------------------------------|--|-------------------------------------------------------|--|------------------------------------------------------------------------|--|-------------------------------------------------------------------------------------------|--|----------------------------------------------------------------------------------------|--|----------------------------------------------------------------------------------------|--|---------------------------------------------------------------------------------------|--|-------------------------------------------------------------------------------------|--|----------------------------------------------------------------------------------------|--|----------------------------------------------------------------------------------------|--|------------------------------------------------------------------------------------|--|----------------------------------------------------------------------------------------|--|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|----------------------------------------------------------------------------------------------------|--|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|---------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| 1<br>1.0079<br>H<br>1s<br>Hydrogen                             |  |                                                       |  |                                                                        |  |                                                                                           |  |                                                                                        |  |                                                                                        |  |                                                                                       |  |                                                                                     |  |                                                                                        |  | 2<br>4.003<br>He<br>1s<br>Helium                                                       |  |                                                                                    |  |                                                                                        |  |                                                                                                         |  |                                                                                                    |  |                                                                                                        |  |                                                                                                      |  |                                                                                                      |  |                                                                                                   |  |
| 3<br>6.941<br>Li<br>1s <sup>2</sup> 2s <sup>1</sup><br>Lithium |  | IIA                                                   |  |                                                                        |  |                                                                                           |  |                                                                                        |  |                                                                                        |  |                                                                                       |  |                                                                                     |  |                                                                                        |  | 5<br>10.81<br>B<br>1s <sup>2</sup> 2s <sup>2</sup> 2p <sup>1</sup><br>Boron            |  | 6<br>12.011<br>C<br>1s <sup>2</sup> 2s <sup>2</sup> 2p <sup>2</sup><br>Carbon      |  | 7<br>14.007<br>N<br>1s <sup>2</sup> 2s <sup>2</sup> 2p <sup>3</sup><br>Nitrogen        |  | 8<br>16<br>O<br>1s <sup>2</sup> 2s <sup>2</sup> 2p <sup>4</sup><br>Oxygen                               |  | 9<br>19.00<br>F<br>1s <sup>2</sup> 2s <sup>2</sup> 2p <sup>5</sup><br>Fluorine                     |  | 10<br>20.180<br>Ne<br>1s <sup>2</sup> 2s <sup>2</sup> 2p <sup>6</sup><br>Neon                          |  |                                                                                                      |  |                                                                                                      |  |                                                                                                   |  |
| 11<br>22.990<br>Na<br>[Ne]3s <sup>1</sup><br>Sodium            |  | 12<br>24.31<br>Mg<br>[Ne]3s <sup>2</sup><br>Magnesium |  | 13<br>26.98<br>Al<br>[Ne]3s <sup>2</sup> 3p <sup>1</sup><br>Aluminum   |  | 14<br>28.09<br>Si<br>[Ne]3s <sup>2</sup> 3p <sup>2</sup><br>Silicon                       |  | 15<br>30.974<br>P<br>[Ne]3s <sup>2</sup> 3p <sup>3</sup><br>Phosphorus                 |  | 16<br>32.066<br>S<br>[Ne]3s <sup>2</sup> 3p <sup>4</sup><br>Sulfur                     |  | 17<br>35.453<br>Cl<br>[Ne]3s <sup>2</sup> 3p <sup>5</sup><br>Chlorine                 |  | 18<br>39.948<br>Ar<br>[Ne]3s <sup>2</sup> 3p <sup>6</sup><br>Argon                  |  |                                                                                        |  |                                                                                        |  |                                                                                    |  |                                                                                        |  |                                                                                                         |  |                                                                                                    |  |                                                                                                        |  |                                                                                                      |  |                                                                                                      |  |                                                                                                   |  |
| 19<br>39.098<br>K<br>[Ar]4s <sup>1</sup><br>Potassium          |  | 20<br>40.08<br>Ca<br>[Ar]4s <sup>2</sup><br>Calcium   |  | 21<br>44.96<br>Sc<br>[Ar]3d <sup>1</sup> 4s <sup>2</sup><br>Scandium   |  | 22<br>47.88<br>Ti<br>[Ar]3d <sup>2</sup> 4s <sup>2</sup><br>Titanium                      |  | 23<br>50.94<br>V<br>[Ar]3d <sup>3</sup> 4s <sup>2</sup><br>Vanadium                    |  | 24<br>52.00<br>Cr<br>[Ar]3d <sup>5</sup> 4s <sup>1</sup><br>Chromium                   |  | 25<br>54.94<br>Mn<br>[Ar]3d <sup>5</sup> 4s <sup>2</sup><br>Manganese                 |  | 26<br>55.85<br>Fe<br>[Ar]3d <sup>6</sup> 4s <sup>2</sup><br>Iron                    |  | 27<br>58.93<br>Co<br>[Ar]3d <sup>7</sup> 4s <sup>2</sup><br>Cobalt                     |  | 28<br>58.69<br>Ni<br>[Ar]3d <sup>8</sup> 4s <sup>2</sup><br>Nickel                     |  | 29<br>63.55<br>Cu<br>[Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>1</sup><br>Copper                |  | 30<br>65.39<br>Zn<br>[Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup><br>Zinc                      |  | 31<br>69.72<br>Ga<br>[Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>1</sup><br>Gallium                    |  | 32<br>72.61<br>Ge<br>[Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>2</sup><br>Germanium             |  | 33<br>74.92<br>As<br>[Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>3</sup><br>Arsenic                   |  | 34<br>78.96<br>Se<br>[Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>4</sup><br>Selenium                |  | 35<br>79.904<br>Br<br>[Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>5</sup><br>Bromine                |  | 36<br>83.80<br>Kr<br>[Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>6</sup><br>Krypton              |  |
| 37<br>85.47<br>Rb<br>[Kr]5s <sup>1</sup><br>Rubidium           |  | 38<br>87.62<br>Sr<br>[Kr]5s <sup>2</sup><br>Strontium |  | 39<br>88.91<br>Y<br>[Kr]4d <sup>1</sup> 5s <sup>2</sup><br>Yttrium     |  | 40<br>91.22<br>Zr<br>[Kr]4d <sup>2</sup> 5s <sup>2</sup><br>Zirconium                     |  | 41<br>92.91<br>Nb<br>[Kr]4d <sup>4</sup> 5s <sup>1</sup><br>Niobium                    |  | 42<br>95.94<br>Mo<br>[Kr]4d <sup>5</sup> 5s <sup>1</sup><br>Molybdenum                 |  | 43<br>95.94<br>Tc<br>[Kr]4d <sup>5</sup> 5s <sup>2</sup><br>Technetium                |  | 44<br>101.1<br>Ru<br>[Kr]4d <sup>7</sup> 5s <sup>1</sup><br>Ruthenium               |  | 45<br>102.91<br>Rh<br>[Kr]4d <sup>8</sup> 5s <sup>1</sup><br>Rhodium                   |  | 46<br>106.4<br>Pd<br>[Kr]4d <sup>10</sup><br>Palladium                                 |  | 47<br>107.87<br>Ag<br>[Kr]4d <sup>10</sup> 5s <sup>1</sup><br>Silver               |  | 48<br>112.41<br>Cd<br>[Kr]4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup><br>Cadmium                  |  | 49<br>114.82<br>In<br>[Kr]4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>1</sup><br>Indium                    |  | 50<br>118.71<br>Sn<br>[Kr]4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>2</sup><br>Tin                  |  | 51<br>121.76<br>Sb<br>[Kr]4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>3</sup><br>Antimony                 |  | 52<br>127.60<br>Te<br>[Kr]4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>4</sup><br>Tellurium              |  | 53<br>126.90<br>I<br>[Kr]4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>5</sup><br>Iodine                  |  | 54<br>131.29<br>Xe<br>[Kr]4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>6</sup><br>Xenon               |  |
| 55<br>132.91<br>Cs<br>[Xe]6s <sup>1</sup><br>Cesium            |  | 56<br>137.33<br>Ba<br>[Xe]6s <sup>2</sup><br>Barium   |  | 57<br>138.91<br>La<br>[Xe]5d <sup>1</sup> 6s <sup>2</sup><br>Lanthanum |  | 72<br>178.49<br>Hf<br>[Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>2</sup> 6s <sup>2</sup><br>Hafnium     |  | 73<br>180.95<br>Ta<br>[Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>3</sup> 6s <sup>2</sup><br>Tantalum |  | 74<br>183.85<br>W<br>[Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>4</sup> 6s <sup>2</sup><br>Tungsten  |  | 75<br>186.21<br>Re<br>[Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>5</sup> 6s <sup>2</sup><br>Rhenium |  | 76<br>187.2<br>Os<br>[Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>6</sup> 6s <sup>2</sup><br>Osmium |  | 77<br>192.2<br>Ir<br>[Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>7</sup> 6s <sup>2</sup><br>Iridium   |  | 78<br>195.08<br>Pt<br>[Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>9</sup> 6s <sup>1</sup><br>Platinum |  | 79<br>197.0<br>Au<br>[Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> 6s <sup>1</sup><br>Gold |  | 80<br>200.59<br>Hg<br>[Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> 6s <sup>2</sup><br>Mercury |  | 81<br>204.38<br>Tl<br>[Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> 6s <sup>2</sup> 6p <sup>1</sup><br>Thallium |  | 82<br>207.2<br>Pb<br>[Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> 6s <sup>2</sup> 6p <sup>2</sup><br>Lead |  | 83<br>208.98<br>Bi<br>[Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> 6s <sup>2</sup> 6p <sup>3</sup><br>Bismuth |  | 84<br>209<br>Po<br>[Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> 6s <sup>2</sup> 6p <sup>4</sup><br>Polonium |  | 85<br>210<br>At<br>[Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> 6s <sup>2</sup> 6p <sup>5</sup><br>Astatine |  | 86<br>222<br>Rn<br>[Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> 6s <sup>2</sup> 6p <sup>6</sup><br>Radon |  |
| 87<br>223<br>Fr<br>[Rn]7s <sup>1</sup><br>Francium             |  | 88<br>226<br>Ra<br>[Rn]7s <sup>2</sup><br>Radium      |  | 89<br>227<br>Ac<br>[Rn]6d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup><br>Actinium     |  | 104<br>261<br>Rf<br>[Rn]5f <sup>14</sup> 6d <sup>2</sup> 7s <sup>2</sup><br>Rutherfordium |  | 105<br>262<br>Db<br>[Rn]5f <sup>14</sup> 6d <sup>3</sup> 7s <sup>2</sup><br>Dubnium    |  | 106<br>266<br>Sg<br>[Rn]5f <sup>14</sup> 6d <sup>4</sup> 7s <sup>2</sup><br>Seaborgium |  | 107<br>264<br>Bh<br>[Rn]5f <sup>14</sup> 6d <sup>5</sup> 7s <sup>2</sup><br>Bohrium   |  | 108<br>269<br>Hs<br>[Rn]5f <sup>14</sup> 6d <sup>6</sup> 7s <sup>2</sup><br>Hassium |  | 109<br>268<br>Mt<br>[Rn]5f <sup>14</sup> 6d <sup>7</sup> 7s <sup>2</sup><br>Meitnerium |  | 110<br>271<br>111<br>272<br>112<br>277                                                 |  | 114<br>285                                                                         |  | 116<br>289                                                                             |  |                                                                                                         |  |                                                                                                    |  |                                                                                                        |  |                                                                                                      |  |                                                                                                      |  |                                                                                                   |  |

Lanthanide series

|                                                                                            |                                                                                  |                                                                               |                                                                                |                                                                              |                                                                             |                                                                                                |                                                                             |                                                                                 |                                                                               |                                                                             |                                                                                |                                                                                |                                                                                               |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| 58<br>140.12<br><b>Ce</b><br>[Xe]4f <sup>1</sup> 5d <sup>1</sup> 6s <sup>2</sup><br>Cerium | 59<br>140.91<br><b>Pr</b><br>[Xe]4f <sup>3</sup> 6s <sup>2</sup><br>Praseodymium | 60<br>144.24<br><b>Nd</b><br>[Xe]4f <sup>4</sup> 6s <sup>2</sup><br>Neodymium | 61<br>144.91<br><b>Pm</b><br>[Xe]4f <sup>5</sup> 6s <sup>2</sup><br>Promethium | 62<br>150.36<br><b>Sm</b><br>[Xe]4f <sup>6</sup> 6s <sup>2</sup><br>Samarium | 63<br>152.0<br><b>Eu</b><br>[Xe]4f <sup>7</sup> 6s <sup>2</sup><br>Europium | 64<br>167.25<br><b>Gd</b><br>[Xe]4f <sup>7</sup> 5d <sup>1</sup> 6s <sup>2</sup><br>Gadolinium | 65<br>158.93<br><b>Tb</b><br>[Xe]4f <sup>9</sup> 6s <sup>2</sup><br>Terbium | 66<br>162.50<br><b>Dy</b><br>[Xe]4f <sup>10</sup> 6s <sup>2</sup><br>Dysprosium | 67<br>164.93<br><b>Ho</b><br>[Xe]4f <sup>11</sup> 6s <sup>2</sup><br>Holmium  | 68<br>167.25<br><b>Er</b><br>[Xe]4f <sup>12</sup> 6s <sup>2</sup><br>Erbium | 69<br>168.93<br><b>Tm</b><br>[Xe]4f <sup>13</sup> 6s <sup>2</sup><br>Thulium   | 70<br>173.04<br><b>Yb</b><br>[Xe]4f <sup>14</sup> 6s <sup>2</sup><br>Ytterbium | 71<br>174.07<br><b>Lu</b><br>[Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>1</sup> 6s <sup>2</sup><br>Lutetium |
| 90<br>232.04<br><b>Th</b><br>[Rn]7s <sup>2</sup> 6d <sup>2</sup><br>Thorium                | 91<br>231.04<br><b>Pa</b><br>[Rn]7s <sup>2</sup> 5f <sup>2</sup><br>Protactinium | 92<br>238.03<br><b>U</b><br>[Rn]7s <sup>2</sup> 5f <sup>3</sup><br>Uranium    | 93<br>237<br><b>Np</b><br>[Rn]7s <sup>2</sup> 5f <sup>4</sup><br>Neptunium     | 94<br>244<br><b>Pu</b><br>[Rn]7s <sup>2</sup> 5f <sup>6</sup><br>Plutonium   | 95<br>243<br><b>Am</b><br>[Rn]7s <sup>2</sup> 5f <sup>7</sup><br>Americium  | 96<br>247<br><b>Cm</b><br>[Rn]7s <sup>2</sup> 5f <sup>8</sup><br>Curium                        | 97<br>247<br><b>Bk</b><br>[Rn]7s <sup>2</sup> 5f <sup>9</sup><br>Berkelium  | 98<br>251<br><b>Cf</b><br>[Rn]7s <sup>2</sup> 5f <sup>10</sup><br>Californium   | 99<br>252<br><b>Es</b><br>[Rn]7s <sup>2</sup> 5f <sup>11</sup><br>Einsteinium | 100<br>257<br><b>Fm</b><br>[Rn]7s <sup>2</sup> 5f <sup>12</sup><br>Fermium  | 101<br>258<br><b>Md</b><br>[Rn]7s <sup>2</sup> 5f <sup>13</sup><br>Mendelevium | 102<br>259<br><b>No</b><br>[Rn]7s <sup>2</sup> 5f <sup>14</sup><br>Nobelium    | 103<br>262<br><b>Lr</b><br>[Rn]7s <sup>2</sup> 5f <sup>14</sup> 6d <sup>1</sup><br>Lawrencium |

Actinide series

# 별의 진화

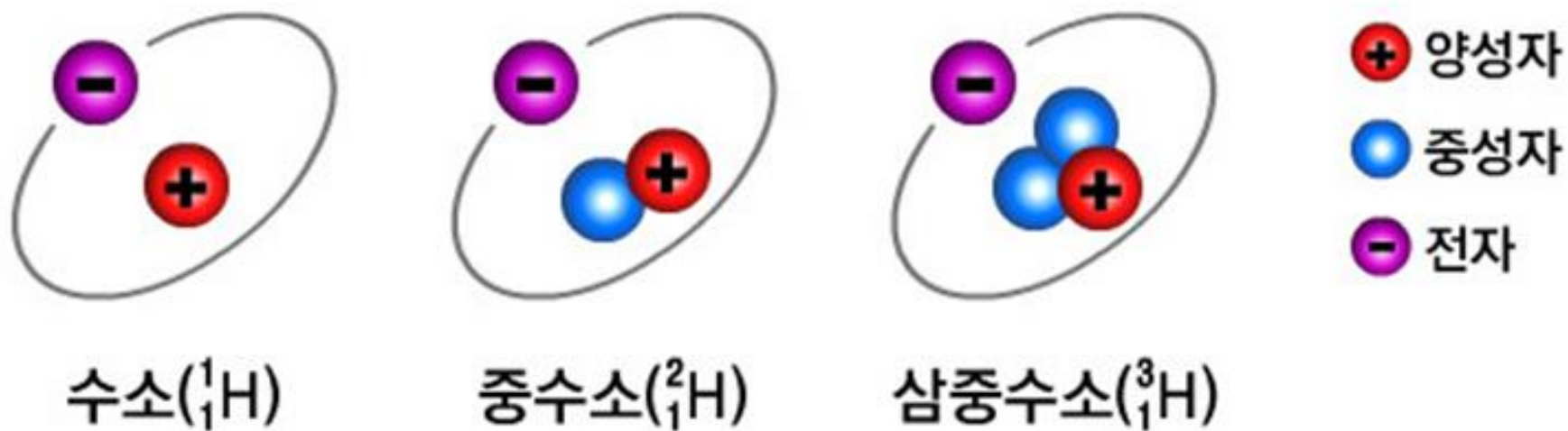


- 초기 :  ${}_1\text{H} \rightarrow {}_2\text{D} \rightarrow {}_4\text{He} \rightarrow {}_6\text{C} \rightarrow {}_{12}\text{Mg}, {}_{13}\text{Al}, {}_{14}\text{Si} \rightarrow {}_{28}\text{Fe}$
- 초신성 폭발후: Fe 보다 무거운 모든 중금속 (U, Pu 까지) 생성
- 우주먼지(Stardust)에는 모든 원소가 존재함.

※ 질량에 따라 별의 운명이 나뉨.

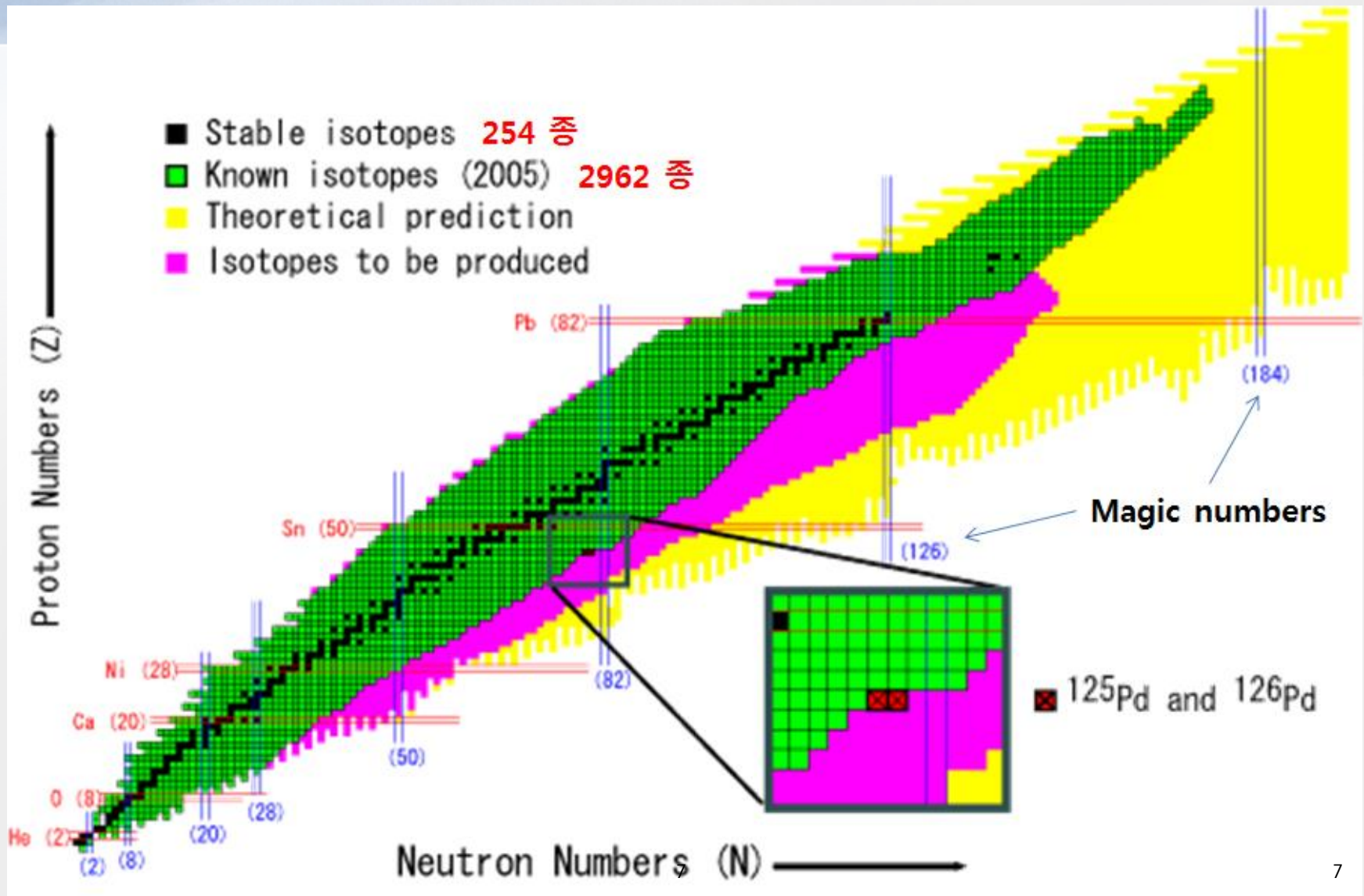
- 큰별 → 수퍼노바 → 블랙홀
- 작은별 → Nebula → 난장이별

# 수소의 동위원소



수소의 경우 특별하게 중수소와 삼중수소를 D 와 T으로 쓰기도 함.  
삼중수소는 불안정한 방사성 동위원소임.

# 핵종 차트 (Nuclear Chart)



# 방사성동위원소 (RI)

- RI : 불안정한 구조의 원자핵을 가진 동위원소
- 방사선을 방출하면서 안정된 동위원소로 변화
- 반감기 특성을 가짐

※ 안정동위원소 254종

– 자연방사성동위원소(~300종) : 별, 우주, 자핵종

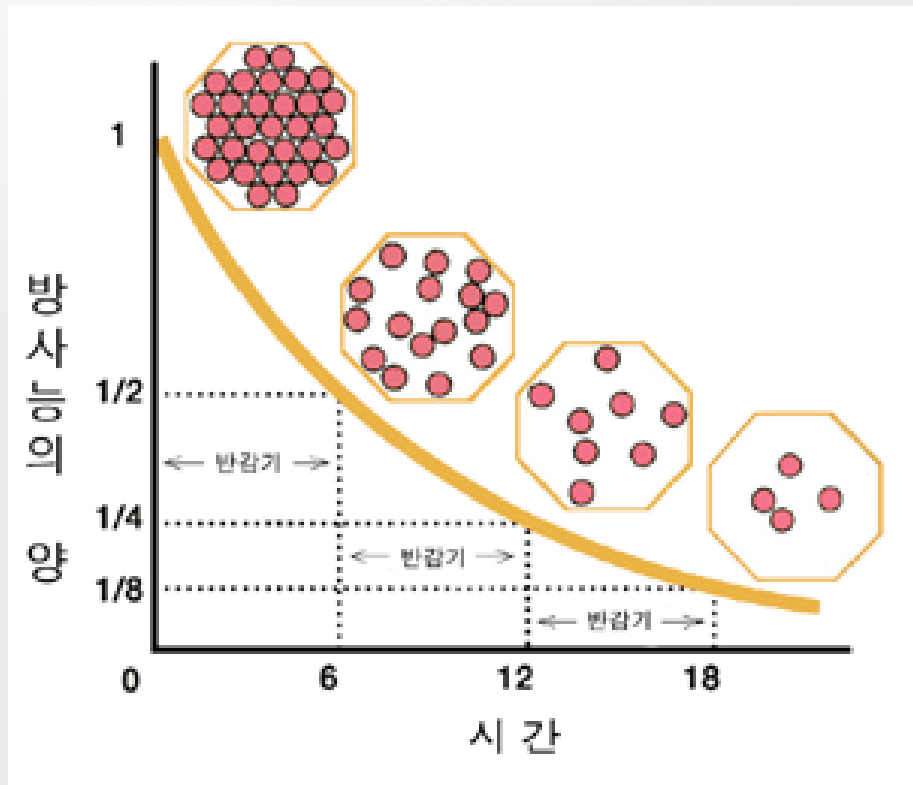
| 자연RI | $^{14}\text{C}$ | $^{40}\text{K}$ | $^{235}\text{U}$ | $^{238}\text{U}$ | $^{226}\text{Ra}$ |
|------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|-------------------|
| 반감기  | 5700년           | 12.8억년          | 4억년              | 44억년             | 1600년             |

– 인공방사성동위원소(>2600종) : 원자로, 가속기, 원폭생성물

| 인공RI | $^{137}\text{Cs}$ | $^{90}\text{Sr}$ | $^{131}\text{I}$ | $^3\text{H}$ | $^{99\text{m}}\text{Tc}$ | $^{18}\text{F}$ |
|------|-------------------|------------------|------------------|--------------|--------------------------|-----------------|
| 반감기  | 30년               | 29년              | 8.4일             | 12.3년        | 6시간                      | 110분            |

# 반감기

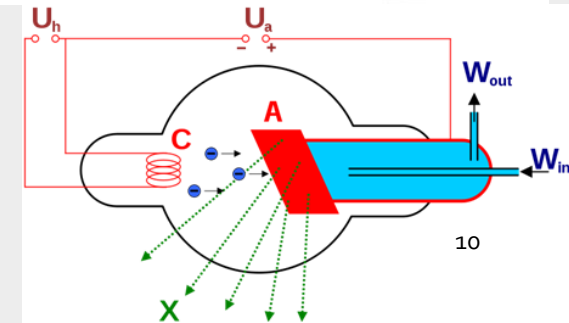
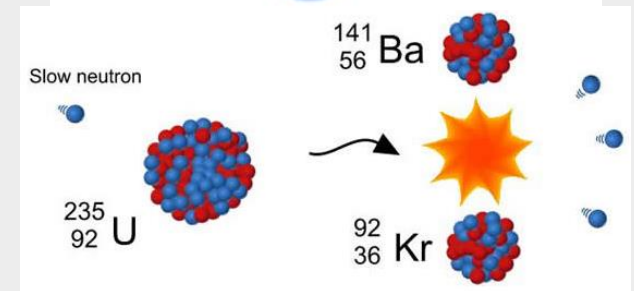
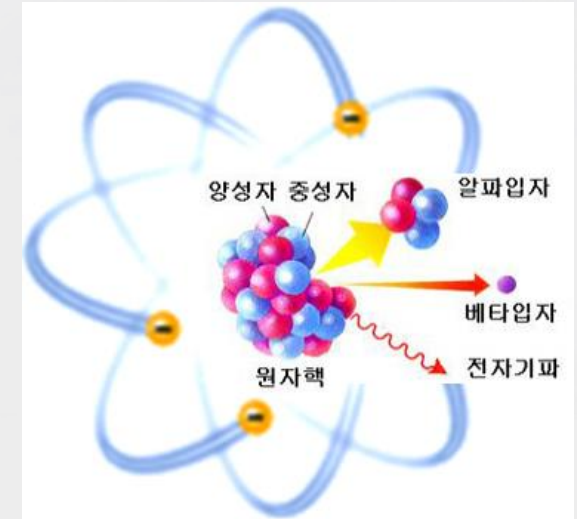
- 방사성 물질의 절반이 안정물질로 붕괴하는 시간



| 방사성 원소        | 반감기           |
|---------------|---------------|
| <b>F-18</b>   | <b>110분</b>   |
| <b>Tc-99m</b> | <b>6시간</b>    |
| <b>Rn-222</b> | <b>3.8일</b>   |
| <b>I-131</b>  | <b>8일</b>     |
| <b>Co-60</b>  | <b>5.3년</b>   |
| <b>H-3</b>    | <b>12.3년</b>  |
| <b>Cs-137</b> | <b>30년</b>    |
| <b>Ra-226</b> | <b>1600년</b>  |
| <b>C-14</b>   | <b>5700년</b>  |
| <b>U-235</b>  | <b>4억년</b>    |
| <b>K-40</b>   | <b>12.8억년</b> |
| <b>U-238</b>  | <b>45억년</b>   |
| <b>Th-232</b> | <b>139억년</b>  |

# 방사선의 종류

- 알파선 ( $\alpha$ )
  - 동위원소( $U$ ,  $Ra^{226}$ ,  $Rn^{222}$ ,  $Am...$ ) 핵에서 자연 방출되는 입자
  - $He$ 의 원자핵과 동일한 2개의 중성자와 2개의 양성자
- 베타선 ( $\beta$ )
  - 동위원소( $T$ ,  $C^{14}$ ,  $I$ ,  $Sr...$ ) 핵에서 방출되는 고에너지 전자
- 감마선 ( $\gamma$ )
  - 동위원소 ( $Co$ ,  $Cs...$ ) 핵에서 방출되는 전자기파
- 중성자 ( $n$ )
  - 핵물질( $U$ ,  $Pu$ )의 핵분열에 의해 생성되는 중성입자
- 엑스선 ( $X$ )
  - 엑스선관/가속기에서 전자가 금속을 때려 발생하는 전자기파

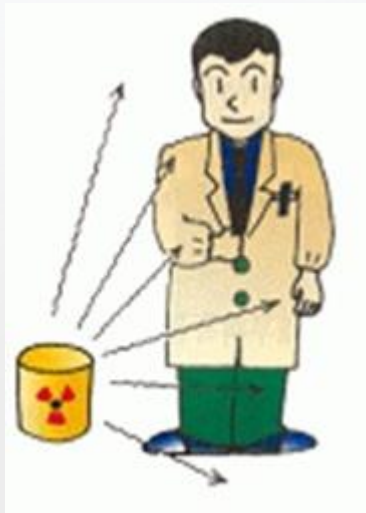


## 2. 방사선피폭 & mSv

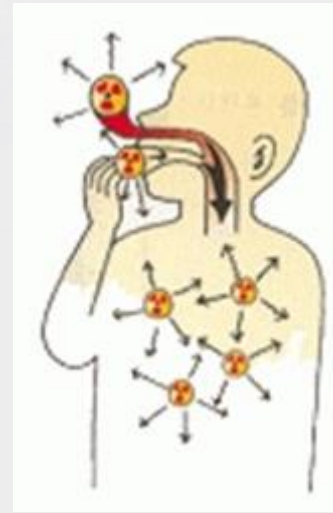
---

# 방사선 피폭의 2 종류

## Ⅴ 외부피폭



## Ⅴ 내부피폭

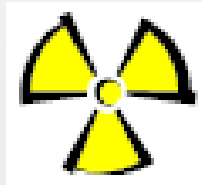


- 호흡 : 28.8 k-Liter air/day
- 물 : 2.2 Liter water/day
- 음식 : 1~2 kg food/day

# 방사선 피폭

방사선원 (물질, 물체)

피폭자 (사람)



방사선



방사능  
(Bq)

방사선에너지  
(keV)

방사선량  
(mSv)

# mSv

- mSV : 방사선량의 단위
- $1 \text{ mSv} = 1/1000 \text{ Sv}$
- $1 \text{ Sv} = 1 \text{ Joule/Kg} \times W_r$
- $W_r$  : radiation weighting factor
  - X-ray, gamma ray, beta-ray, fast electron ;  $W_r = 1$
  - For alpha particle, neutrons ;  $W_r = 5 \sim 20$

|          |   |      |
|----------|---|------|
| 선량률      | x | 노출시간 |
| (mSv/hr) |   | (hr) |

# mSv

- 물 1 k g 의 온도를 1도 올리는 데 필요한 에너지는 ?

$$4200 \text{ J} \rightarrow 4200 \text{ J/kg} \rightarrow 4200 \text{ Sv} \rightarrow 4,200,000 \text{ mSv}$$

- 물 1 g 의 온도를 1도 올리는 데 필요한 mSv 는?

$$4.2 \text{ J} \rightarrow 4.2 \text{ J/g} \rightarrow 4200 \text{ J/kg} \rightarrow 4,200,000 \text{ mSv}$$

- 여러분이 전신에 **1 mSv** 피폭을 받는다면 체온은 몇 도 상승할까요?

→ 0.00000024 도 (백만분의 2.4도)

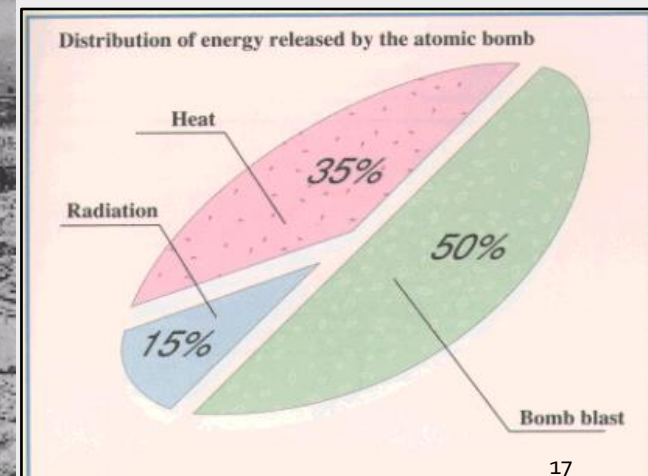
### 3. 방사선피폭사례

---

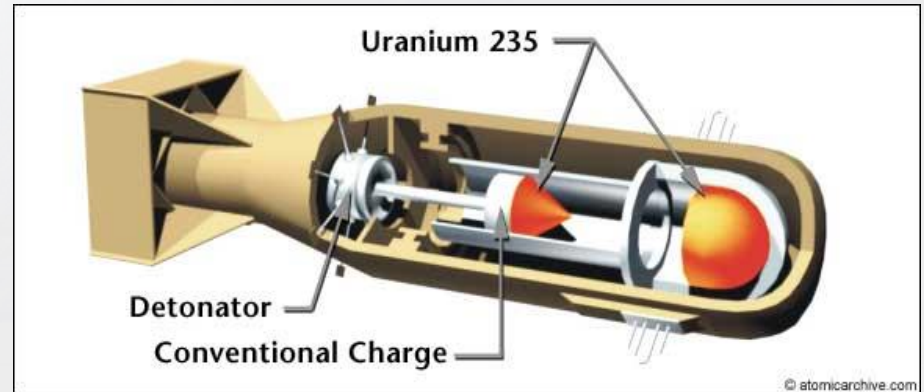
# Hiroshima – Aug. 6, 1945, 8:16am



- 15,000 ton 위력
- 높이 580 미터에서 폭발
- 10 만명 즉사
- ~1945년말 +4만명 사망
- 46~1951년 +6만명 사망
- 3만명 방사선피폭 사망(15%)



# Little Boy

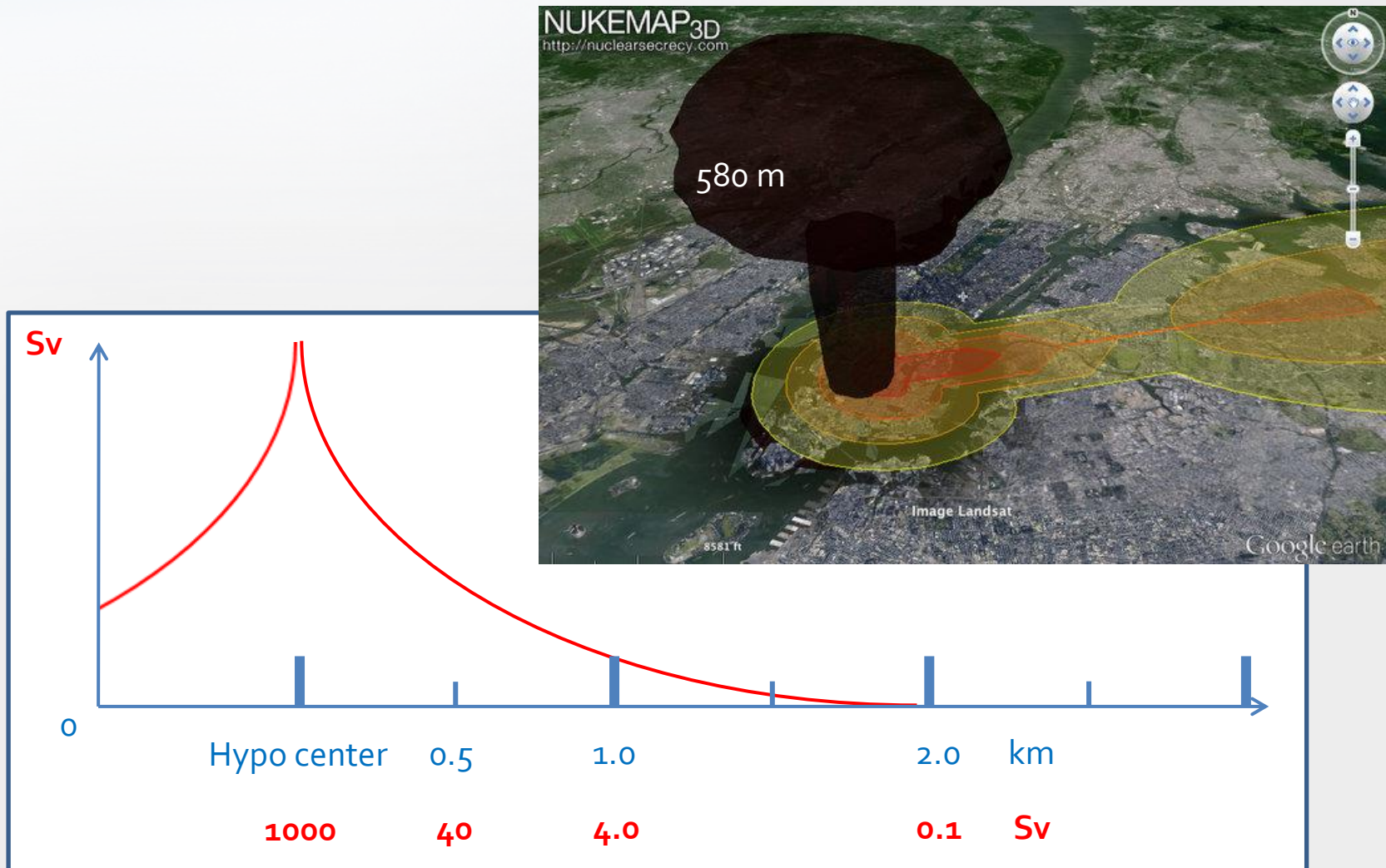


## ▲포신형(gun-type, U탄)

- 길이 3 m, 직경 0.71 m, 중량 4 ton
- 핵분열 물질 : HEU( $U^{235}$  농축도 80%) 64 kg
- 연소효율 : 1.3 % 즉  $U^{235}$  0.6 kg이 연소됨.
- 위력 : TNT 15,000 t
- 1945. 8. 6. 히로시마 투하



# 히로시마 거리별 방사선 피폭선량



# 고이아니아 사건

- 1985년 브라질 고이아니아 병원이 건물주와 분쟁으로 이전하면서 8년된 암치료를 방치
- 1987년 9월 13일 로베르트와 와그너가 1400 큐리의 Cs 선원을 절도한 후 고물상에 25달러에 판매
- 데바이르가 6살 소녀 레이데등 최소 5명에게 줌
- 엄마 마리아가 구토, 열, 피부상처로 인해 동물병원과 시립병원을 방문했다가 밝혀짐

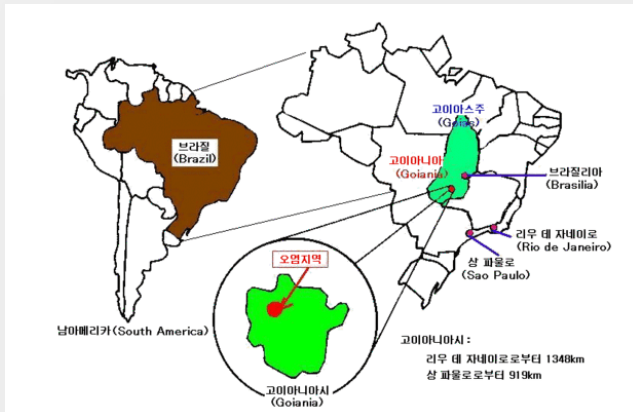
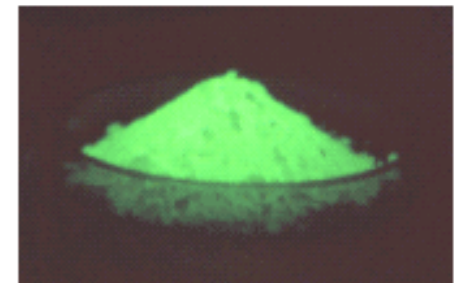


그림-1 세슘 선원이 반출된 방사선치료 클리닉 건물  
[자료] IAEA: The Radiological Accident in Goiânia, Photographs 1, 1988년9월



[문제의 방사능 가루 - 세슘]

# 고아니아 사건

- 11만2천8백명이 검진 → 249명 오염진단, 20명 급성방사선증후군 진단, 28명은 국소피폭진단 → 4명 신체를 절단. 17명 골수 이상 → 10년 동안 249명 중 111명이 사망함
- 레이데(6)와 마리아(38)는 각각 6 및 5.5 Sv 피폭 → 10월 23일 사망
- 고물상 직원 이스라엘과 아드미우송이 각각 4.5 및 5 Sv 피폭 → 10월 27일 사망
- 고물상 주인 데바이르 1994년 사망함

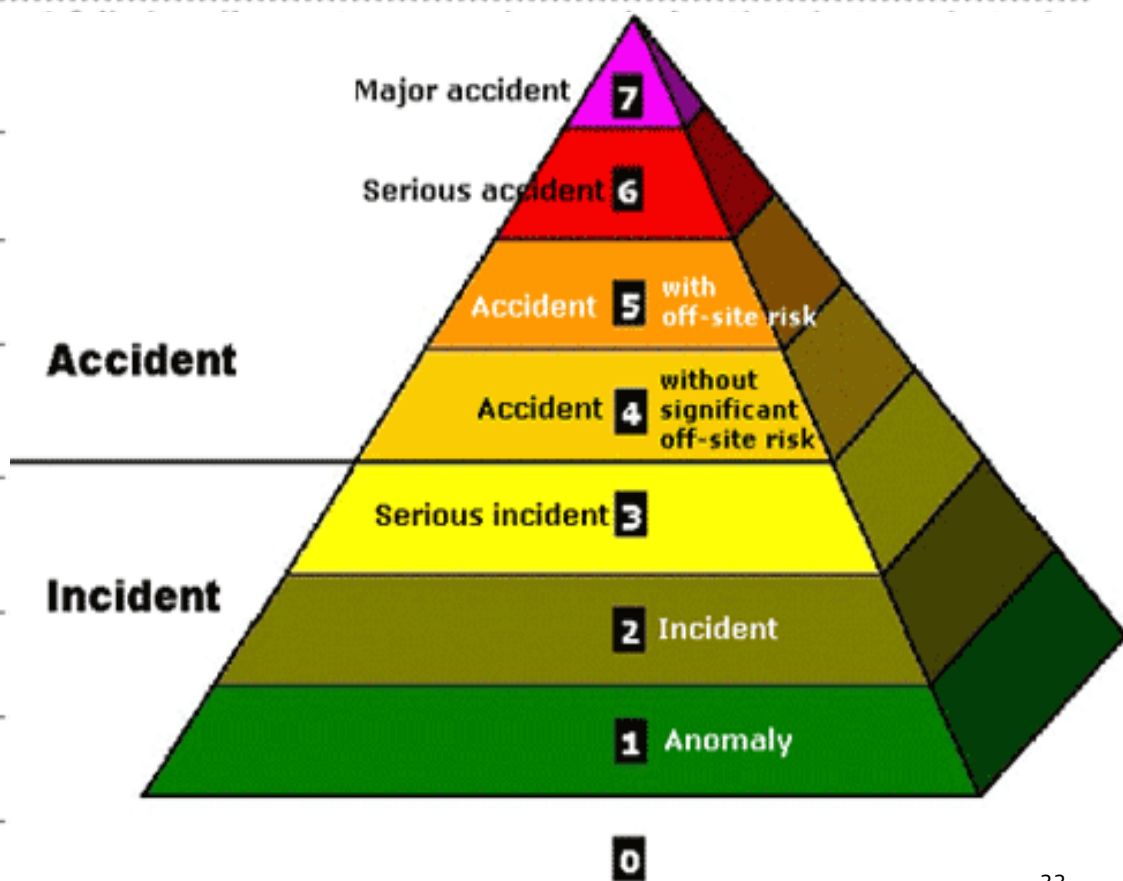


## Rating nuclear danger

Selected events, INES\* scale, 7=maximum

| Level | Place                            | Year | Incident                                                                                                                                                                                                                           |
|-------|----------------------------------|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 7     | Chernobyl, Ukraine               | 1986 | An explosion and a fire in the reactor core at the Chernobyl nuclear power plant sent a radioactive plume across large swathes of Europe. Chernobyl remains easily the worst nuclear accident in history                           |
| 7     | Fukushima, Japan                 | 2011 | Following an earthquake and a tsunami, a series of partial core meltdowns and a fire in a fuel pond at the Japanese Fukushima Dai-ichi plant caused fluctuating releases of radiation into the sea and the surrounding countryside |
| 6     | Kyshtym, Russia                  | 1957 |                                                                                                                                                                                                                                    |
| 5     | Windscale, Britain               | 1957 |                                                                                                                                                                                                                                    |
| 5     | Three Mile Island, United States | 1979 |                                                                                                                                                                                                                                    |
| 5     | Goiania, Brazil                  | 1987 |                                                                                                                                                                                                                                    |
| 4     | Tokaimura, Japan                 | 1999 |                                                                                                                                                                                                                                    |
| 3     | Sellafield, Britain              | 2005 |                                                                                                                                                                                                                                    |
| 2     | Forsmark, Sweden                 | 2006 |                                                                                                                                                                                                                                    |
| 1     | Gravelines, France               | 2009 |                                                                                                                                                                                                                                    |

## 세계의 원전사고 사례와 등급

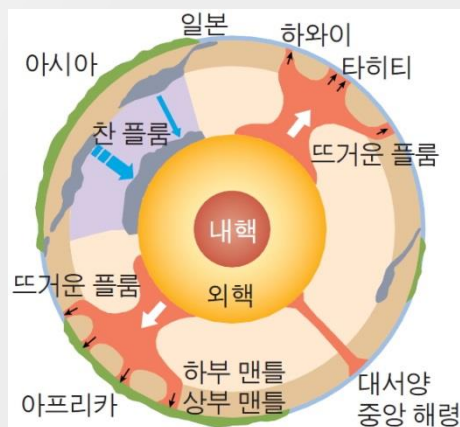
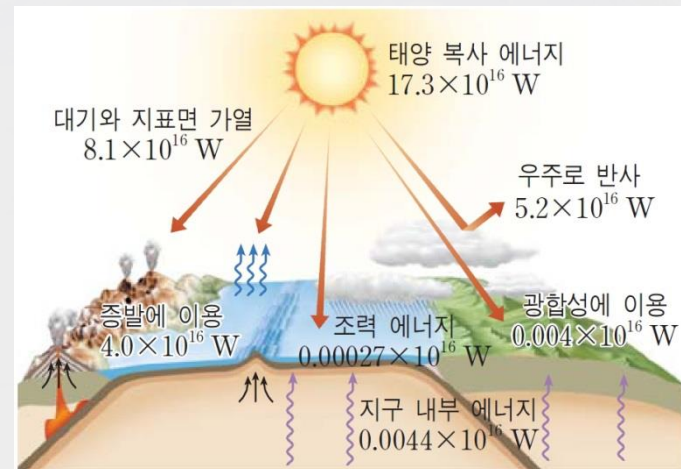
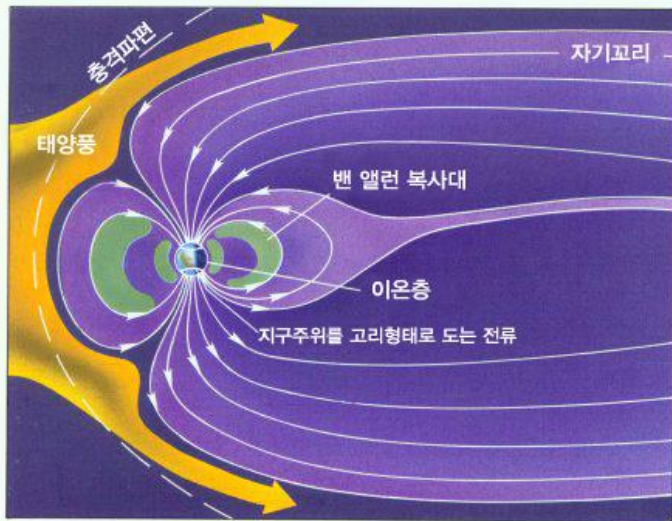


## 4. 자연피폭 & 의료피폭

# 자연방사선 피폭



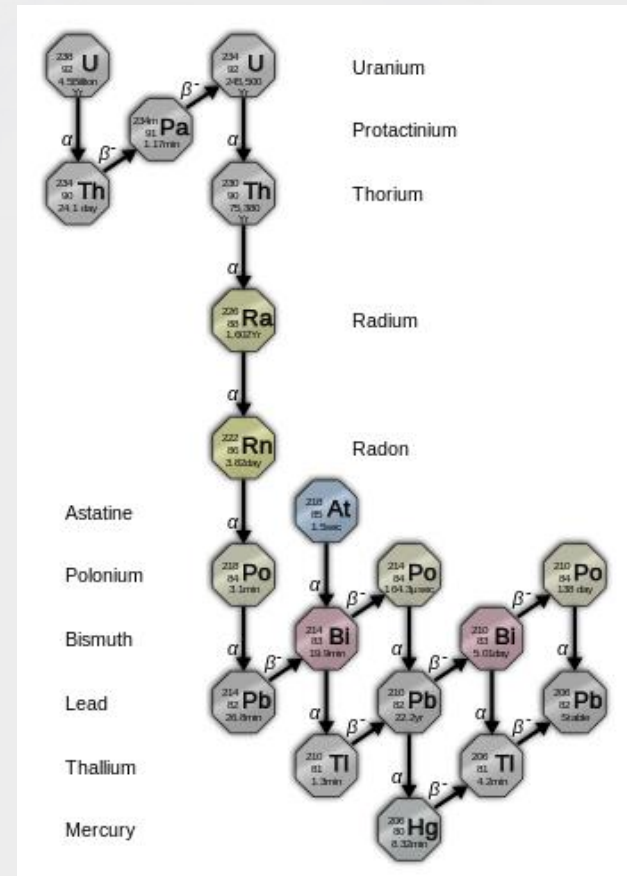
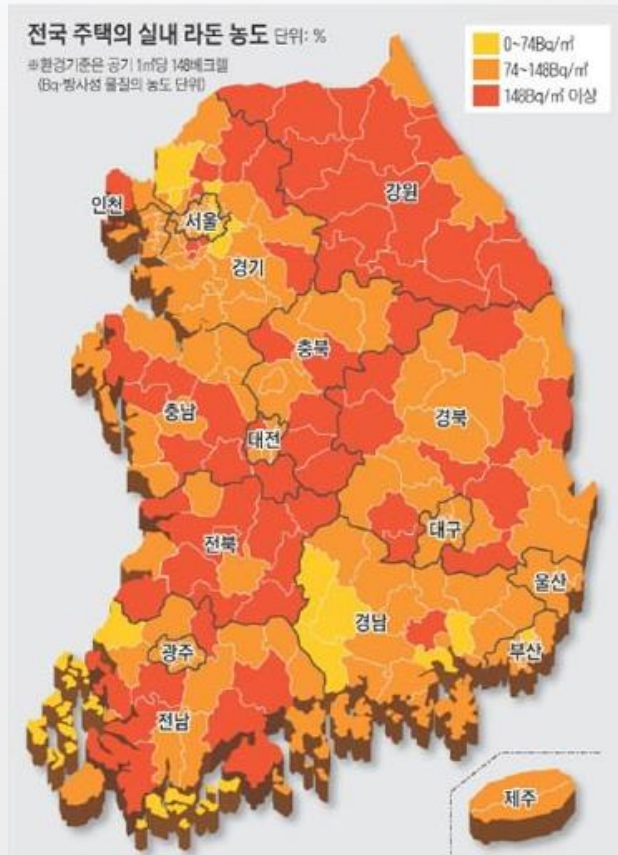
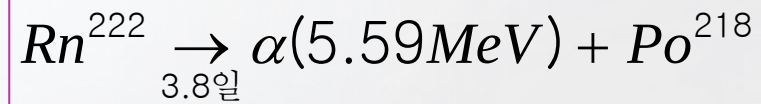
# 우주방사선과 지각방사선



라돈이 형성되는 과정



# Radon 222



# 자연 방사선과 인공방사선

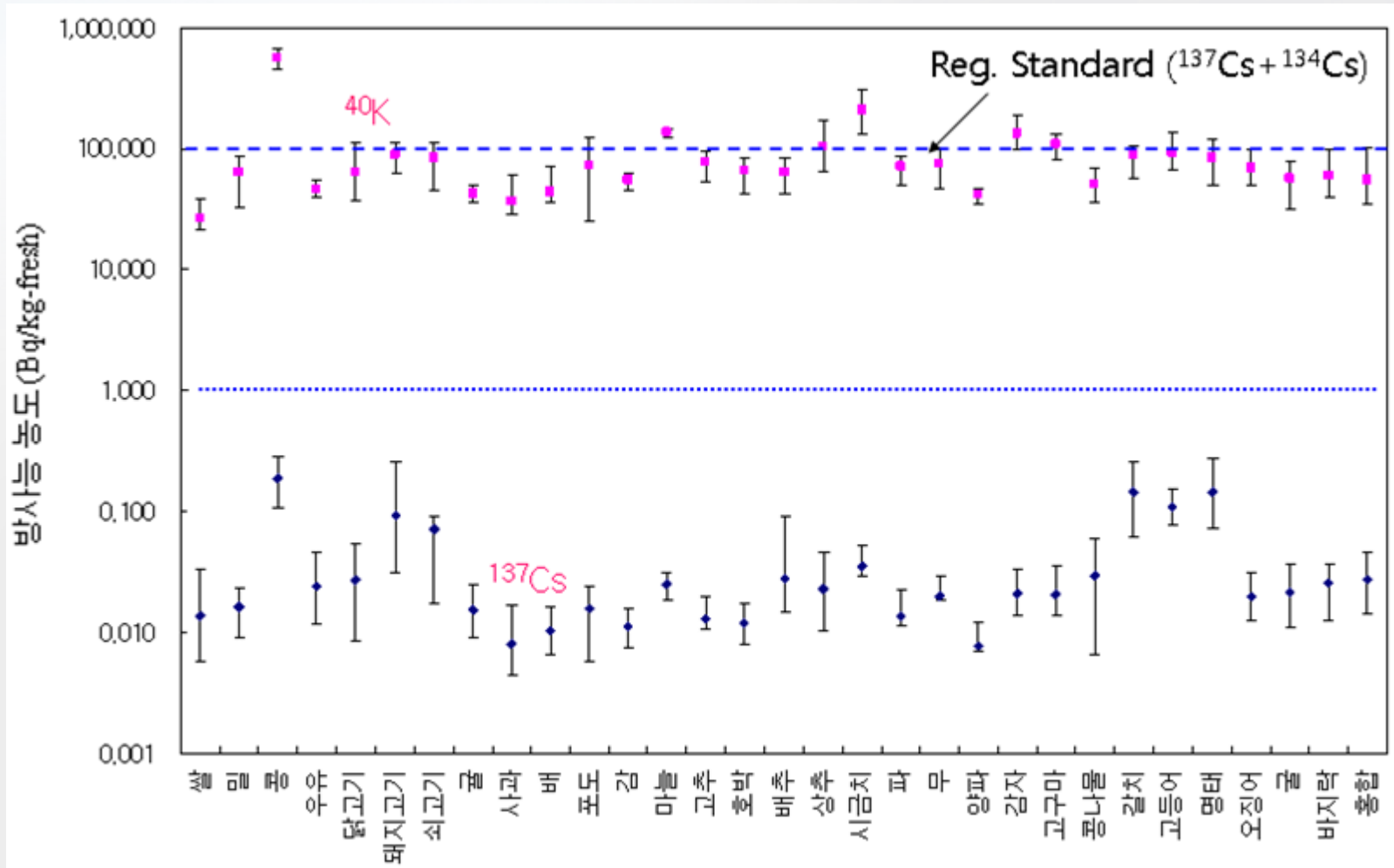
- 자연방사성동위원소 : 지구의 탄생시점 부터 존재

| 자연RI | $^{14}\text{C}$ | $^{40}\text{K}$ | $^{235}\text{U}$ | $^{238}\text{U}$ | $^{226}\text{Ra}$ |
|------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|-------------------|
| 반감기  | 5700년           | 12.8억년          | 4억년              | 44억년             | 1600년             |

- 인공방사성동위원소 : 원폭실험 생성물

| 인공RI | $^{137}\text{Cs}$ | $^{90}\text{Sr}$ | $^{131}\text{I}$ | $^3\text{H}$ | $^{99\text{m}}\text{Tc}$ | $^{18}\text{F}$ |
|------|-------------------|------------------|------------------|--------------|--------------------------|-----------------|
| 반감기  | 30년               | 29년              | 8.4일             | 12.3년        | 6시간                      | 110분            |

# 식재료내 K-40 와 Cs-137 방사능농도



생물체내 방사능 농도 범위 = 40 ~ 600 Bq/kg

# 음식물내 방사능

## • 1Kg 당 음식물 내 방사능

|         | K-40<br>[Bq] | Cs-137<br>[Bq] |
|---------|--------------|----------------|
| 쌀       | 27           | 0.014          |
| 콩       | 570          | 0.18           |
| 닭고기     | 64           | 0.027          |
| 소, 돼지고기 | 88           | 0.08           |
| 배추      | 63           | 0.028          |
| 사과, 양파  | 40           | 0.008          |
| 감자, 마늘  | 135          | 0.023          |
| 어류      | 90           | 0.13           |
| 조개류     | 56           | 0.027          |

~100 Bq/kg <0.2 Bq/kg

## 후쿠시마 원전 근처 어류 Cs-137

- 50km 밖 : 0.4 Bq/kg
- 50km 지점 : **0.7** Bq/Kg
- 51만 Bq/Kg 쥐노래미 포획

## 음식물내 Cs-137 규제 기준치 강화

- 일본 : 500 → **100** Bq/Kg
- 한국 : 370 → 100 Bq/Kg

2011.3.30

만일 100 Bq/Kg으로 오염된  
생선을 매일 1kg씩 1년간 섭취  
한다면 흡수선량은 **0.47 mSv**

# mSv

- 우리나라 일반인 연평균 자연방사선 피폭치는 ?  
→ **~3 mSv**
- 현재 이 장소에서 1시간 받는 방사선량은 ?  
→ **0.0003 mSv (0.3  $\mu$ Sv/hr)**
- 현재 이 장소에서 여러분이 1초당 피폭되는 방사선 개수는 ?  
→ **~100,000 개/sec**

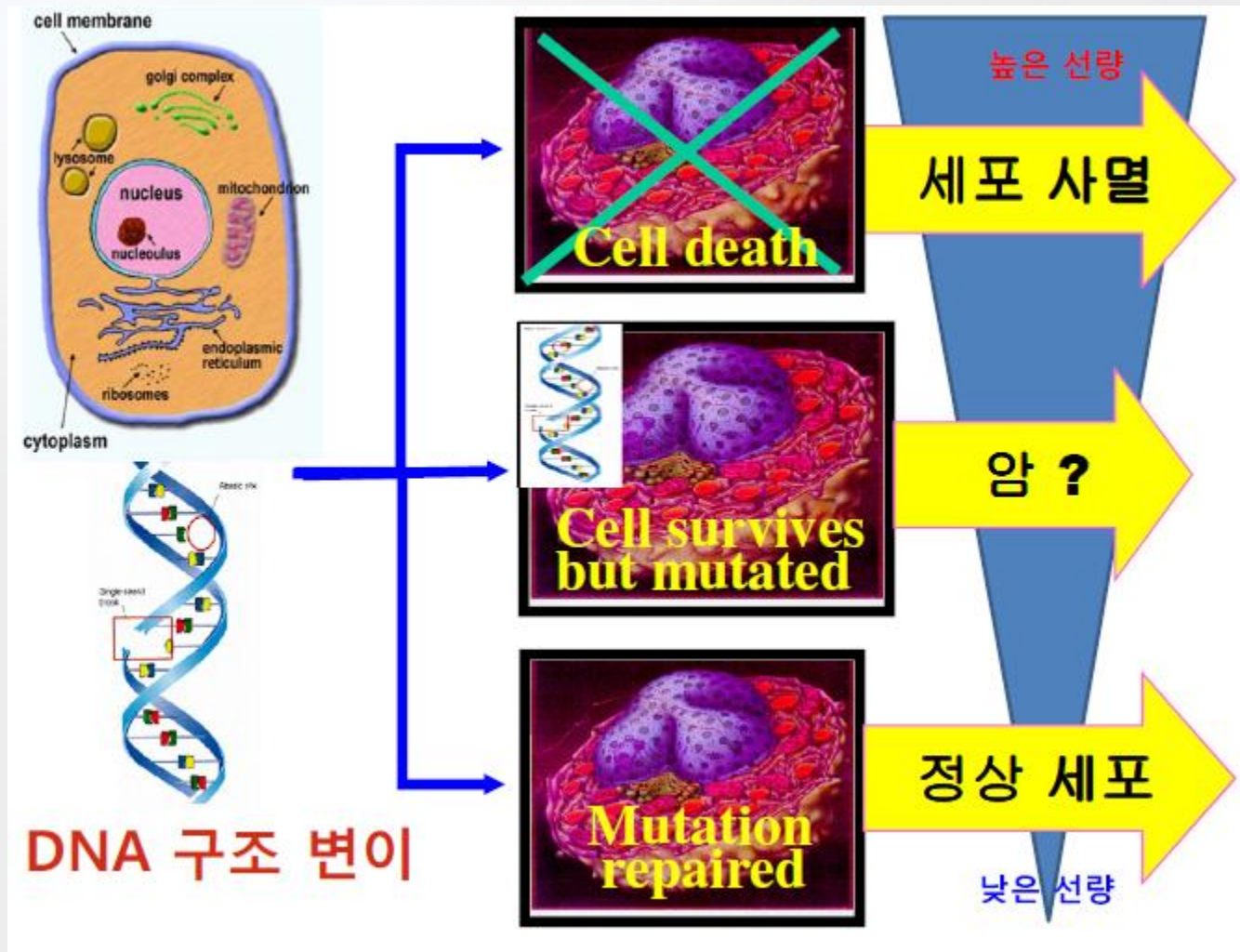
# 의료 방사선 피폭량 (mSv)

|                     |            |
|---------------------|------------|
| - 가슴 X-레이 촬영        | 0.1~0.3    |
| - 저선량 흉부 CT         | 1.6~2      |
| - 뇌 CT              | 6~8        |
| - 흉부 CT             | 8          |
| - 복부 CT             | 10         |
| - 조영제 투입 심혈관 조영술    | 10~12      |
| - 혈관 CT             | 14~24      |
| - PET-CT            | 18         |
| - MDCT              | 8~20(?)    |
| - 방사성 갑상선질환 요오드 치료  | 400        |
| - 일반 방사선 암 치료 (최대치) | 50,000     |
| - 음식물 피폭 제한치 (WHO)  | 10,000,000 |

## 5. 방사선피폭 영향

---

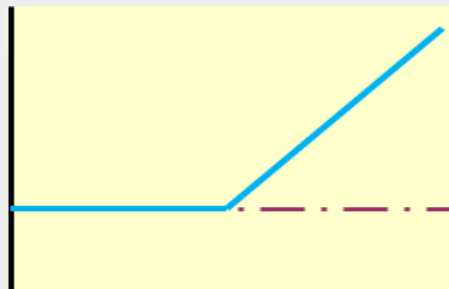
# 방사선 세포영향



# 인체 영향

| 급성 영향 (결정론적 영향)                                                                                | 만성 영향 (확률적 영향)                                                    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| 단기간에<br>높은 선량 피폭할 경우<br>(500 ~ 1,000 mSv 이상)                                                   | 장기간에 걸쳐<br>낮은 선량 피폭할 경우<br>(매년 수 ~ 수십 mSv 정도)                     |
| <p>골수 사망</p> <p>위장관 및 중추신경 사망</p> <p>불임, 백내장</p> <p>세포 사망</p> <p>피부 괴사, 홍반</p> <p>구토, 멀미 등</p> | <p>암의 발생</p> <p>(백혈병, 갑상선암 등)</p> <p>유전적 영향</p> <p>재생불량성 빈혈 등</p> |

효과



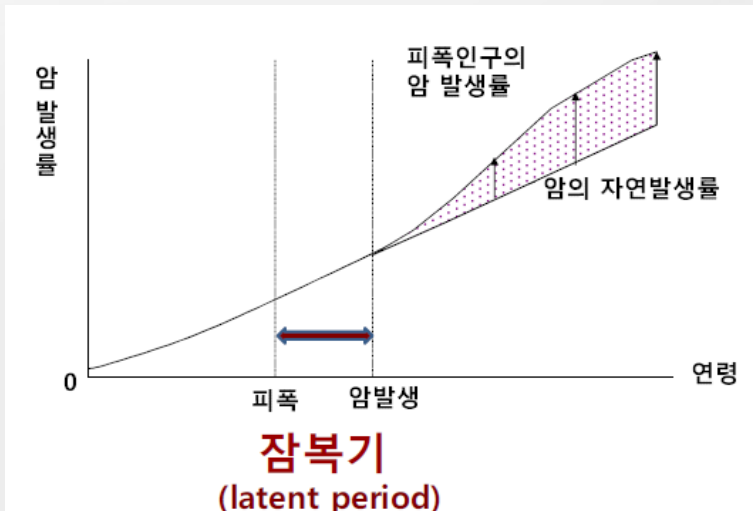
선량

# 급성 영향

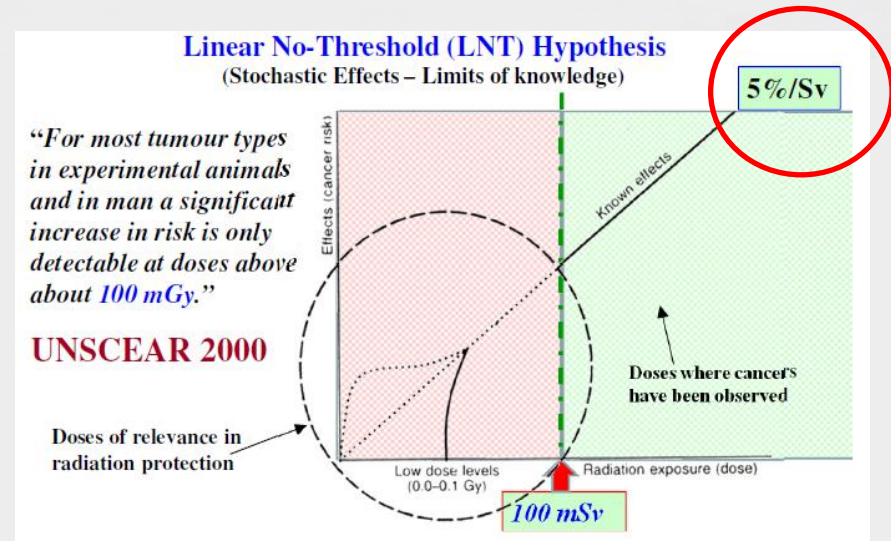
| 문턱 선량   | 증세                           | 사망을                     |
|---------|------------------------------|-------------------------|
| 20 Sv   | CN Synd., 경련, 혼수, 발작         | 100% 2일                 |
| 10 Sv   | GI Synd., 설사, 고열             | 90% 2주                  |
| 4 Sv    | <b>LD 50/60</b>              | 50% 2개월                 |
| 3 Sv    | 영구불임, 궤양, 착색, 탈모             | <b>사망가능</b>             |
| 2 Sv    | HP Synd., 골수 사망, 백내장, 홍반, 구토 | 3시간내 구토<br><b>0% 사망</b> |
| 1 Sv    | 결막염, 각막염                     | (5% 추가발암)               |
| 760 mSv | 갑상선암 발단선량                    | (발암가능)                  |
| 650 mSv | 일시적 여성불임                     | (발암가능)                  |
| 250 mSv | 일시적 적혈구/백혈구 감소               | (발암가능)                  |
| 150 mSv | 일시적 남성불임                     | (발암가능)                  |

# 만성 영향 : 암발병

- 암은 방사선 피폭후 잠복기를 거친후 발병
- 골수암과 백혈병 2~4 년, 기타 암은 ~ 10 년까지
- LNT 모델이란? LNT 모델이 정당할까?

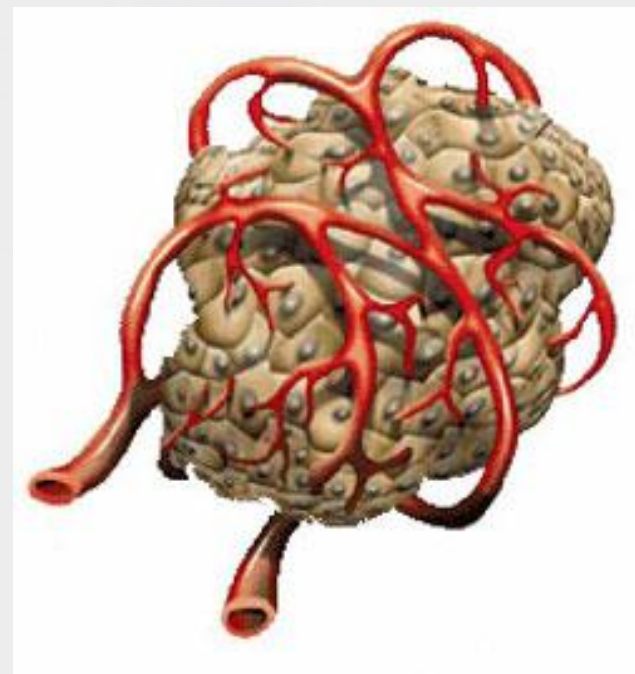
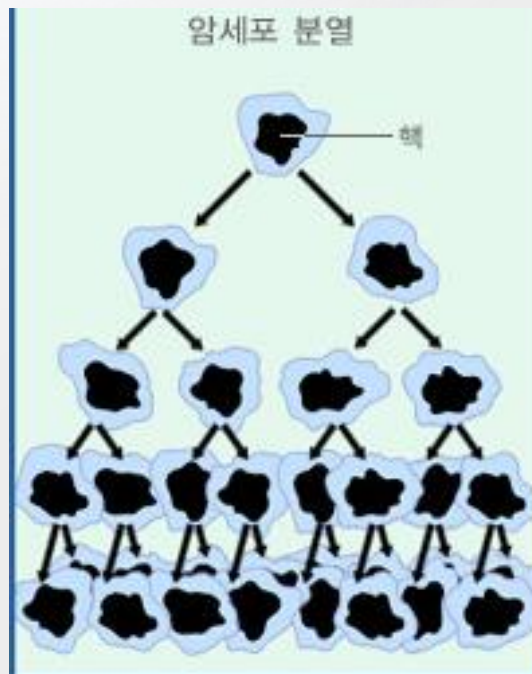
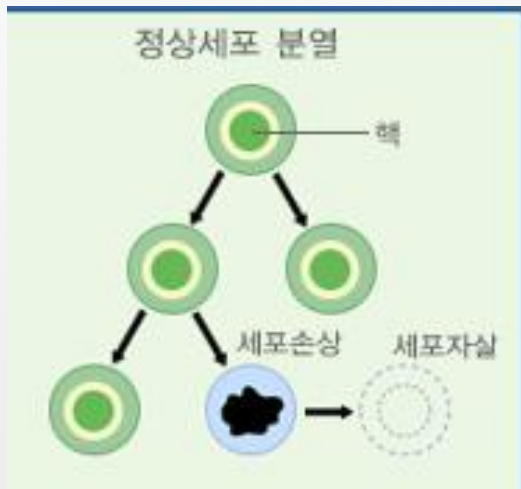


피폭후 경과시간에 따른 암발병율

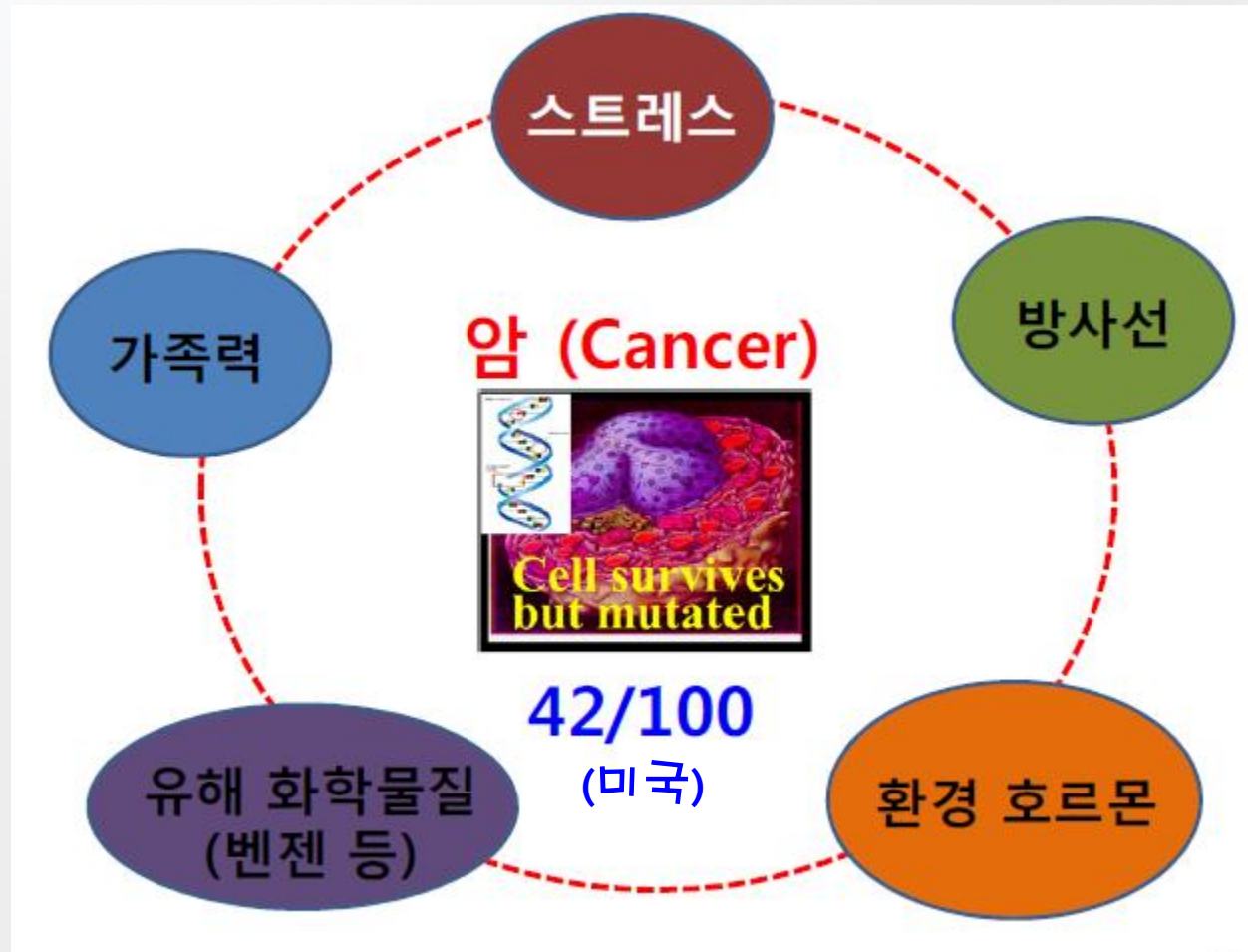


피폭선량에 따른 암발병율

# 암세포



# 암발병 요인

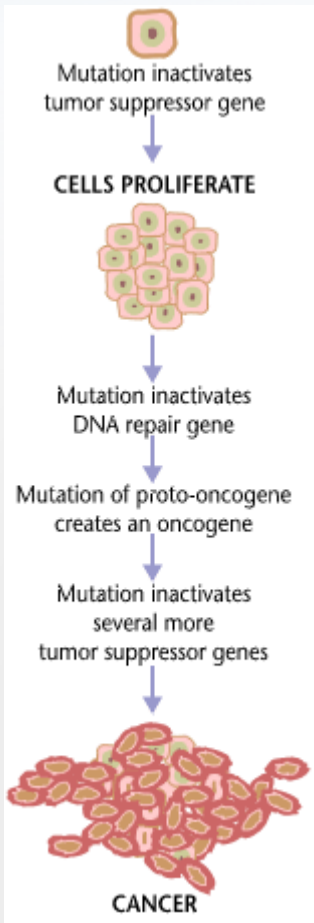


# WHO 1급 발암물질



- 방향족 탄화수소 : DMBA와 벤조피렌, 매연(일산화탄소, 다이옥신), 담배연기, 불에 탄 고기 (PAH, 다환성방향족탄화수소), 산화에틸렌
- 방향족 아민류, 나이트로 화합물, 방향족 아조화합물
- 지방족 화합물중 사염화탄소(CCl4), 돌신, 우레탄
- 무기화합물 : 석면, 수은, 카드뮴, 크롬, 비소, 납, 아연, 구리 등

# 암의 발생 기작



- 특정세포내의 cancer suppression gene (암억제유전자)에 돌연변이가 생겨 기능을 하지 못하게 됨
- 이 세포가 증식됨
- DNA repair gene (DNA복구 유전자)에 돌연변이가 생김
- Proto-oncogene (원(原)종양 형성 유전자)에 돌연변이가 생김
- 다른 암억제유전자에 돌연변이가 생김

# 자연암의 발생

- 인체는 60조( $6 \times 10^{13}$ )개 세포로 구성
- 매일  $10^{10 \sim 11}$  개의 세포분열이 일어남
- 70년 동안  $10^{16}$  새로운 세포가 탄생함
- 매일 500 gram의 산소를 들이쉬며, oxidant가 (Hydroxyl ( $\text{OH}\cdot$ ), peroxy ( $\text{HO}_2\cdot$ ) and superanion ( $\text{O}_2\cdot^-$ ) radicals) 세포의 DNA를 공격함
- 매일  $10^5$  DNA 돌연변이가 발생함 (mutation)
- 이 세포 중 어느 하나가 70년 동안 치명적 암이 될 확률이 개체당 25~30% 정도임

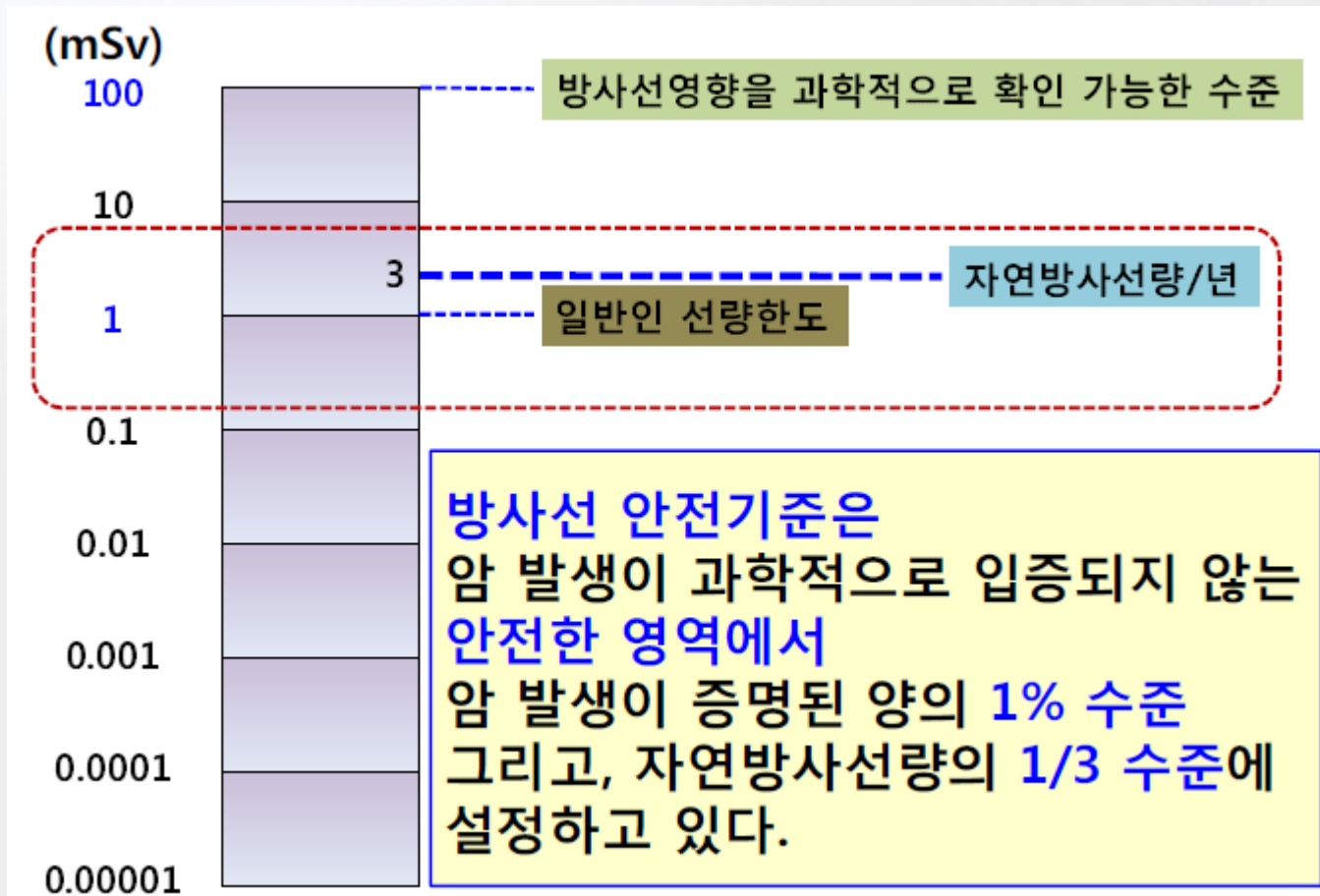
## 6. 방사선피폭 제한기준

---

# 방사선량 기준치 결정 과정



# 선량한도



# 연간 선량한도 제한

## 일반인

- 전신 : 1 mSv
- 손발 : 50 mSv
- 수정체 : 15 mSv

## 방사선작업자

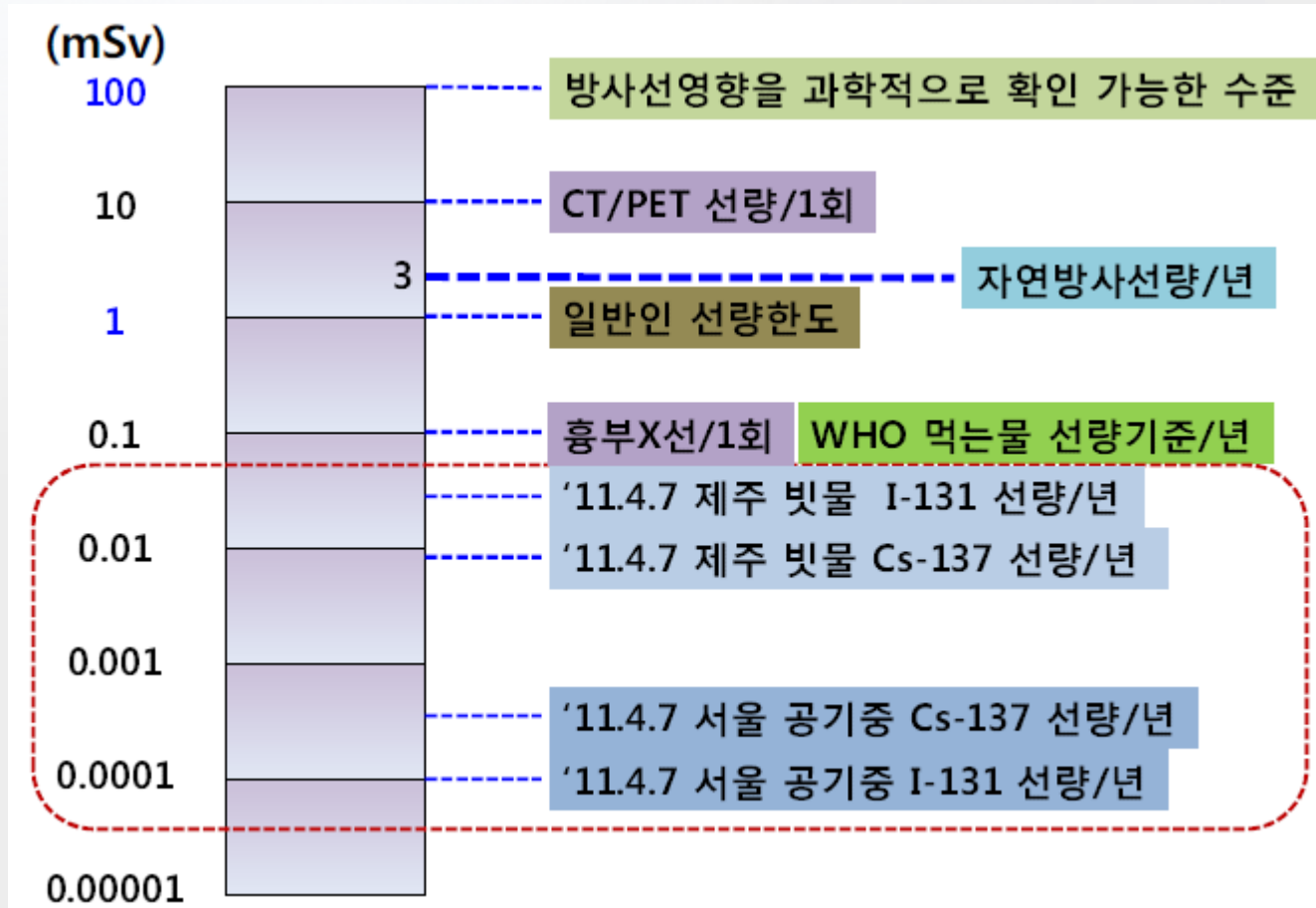
- 전신 : 20 mSv
- 손발 : 500 mSv
- 수정체 : 150 mSv

# 정 리

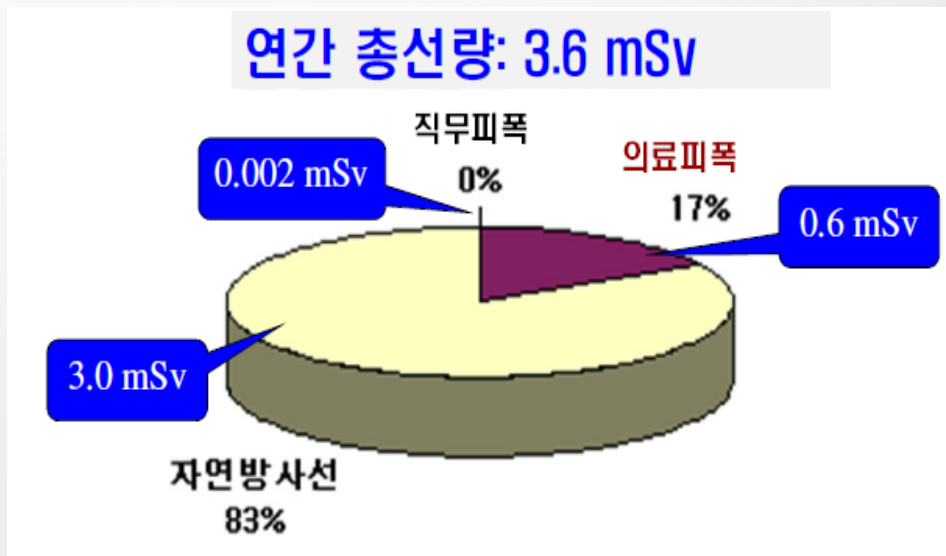
- 한국인의 자연방사선량 :  $3 \text{ mSv/년}$  →  $\sim 10$ 만 방사선/초
- 자연핵종  $\text{Rn}_{222}$  에 의한 연평균 피폭선량 :  $1.3 \text{ mSv/년}$
- 자연핵종  $\text{K}_{40}$  음식물내 농도 :  $\sim 100 \text{ Bq/kg}$  →  $0.35 \text{ mSv/년}$
- 인공핵종  $\text{Cs}_{137}$  의 식재료내 농도 :  $\sim 0.2 \text{ Bq/kg}$
- 식재료내  $\text{Cs}_{137}$  농도 제한치 :  $\sim 100 \text{ Bq/kg} \times 1\text{kg/d} \times 365 \text{ d}$  →  $0.47 \text{ mSv}$
- 저선량 LNT 모델에서 전생애 암발병 확률 :  $25\% + 5\%/\text{Sv} \times \text{Sv}$
- 암발병 문턱치 :  $100 \text{ mSv}$  → 5년간 작업자 피폭선량 한도  
→ 작업자 연간 피폭선량 제한치  $20 \text{ mSv/년}$   
→ 일반인 피폭선량 규제치 ( $1\%$  적용) :  $1 \text{ mSv/년}$

# 첨부

# 일반인 선량한도



# 우리국민의 방사선 피폭선량



## 일반인 자연선량

- 한국인 : 3.0
- 일본인 : 1.4
- 브라질 구아라파리 : 10
- 전세계 평균 : 2.4

## 전세계 평균 2.4의 내역

- 라돈(50%) : 1.26
- 대지(20%) : 0.48
- 우주(15%) : 0.35
- 음식(15%) : 0.35 (자체피폭)

# 선량을

$$\begin{array}{ccc} \text{선량률} & \times & \text{노출시간} \\ (\text{mSv/hr}) & & (\text{hr}) \end{array}$$

- 100 nSv/hr : 일반 환경 수준
- 1  $\mu$ Sv/hr : 식품섭취제한
- 10  $\mu$ Sv/hr : 방사선작업구역 설정
- 100  $\mu$ Sv/hr : 고준위 작업구역
- 1 mSv/hr : 옥내 대피

원자핵내 양성자의 개수

■ 안정동위원소

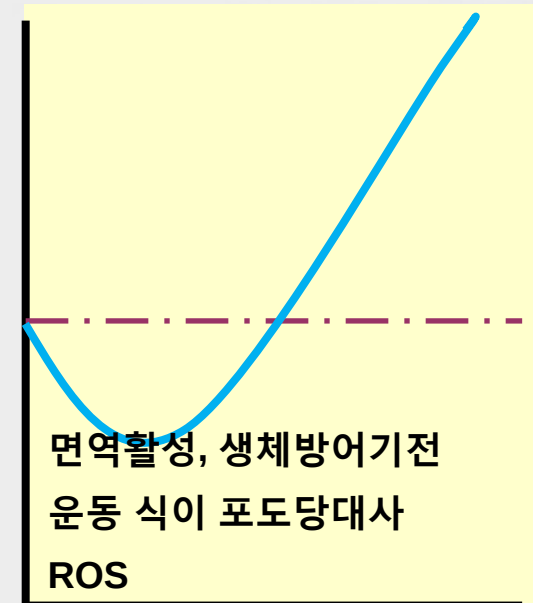
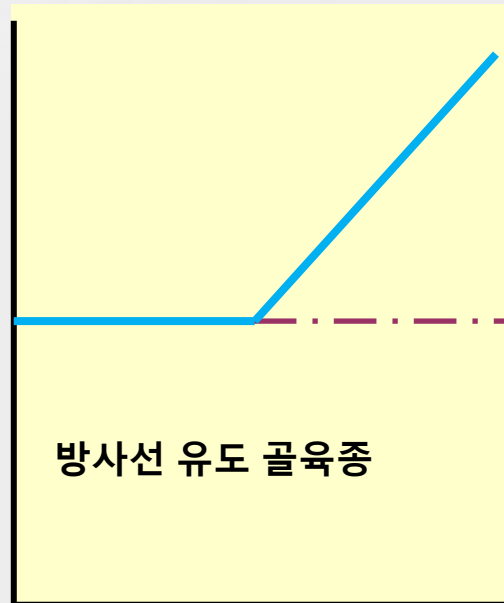
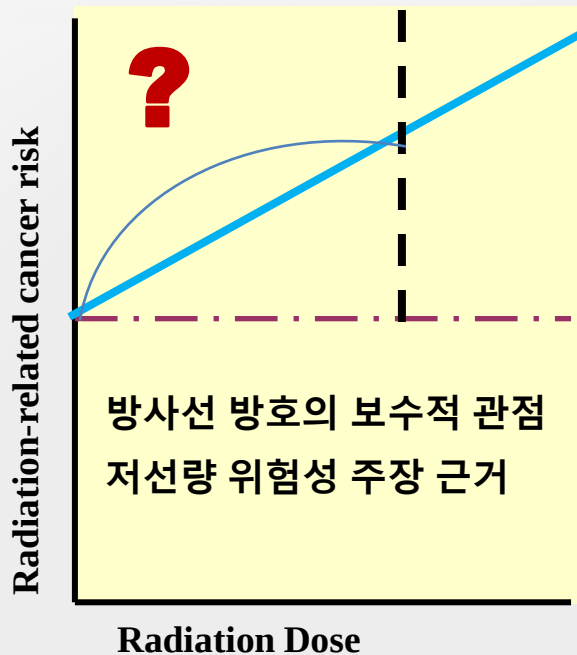
## 원자핵내 중성자의 갯수

# 선량-반응 모델

확률적 효과  
Linear No Threshold

결정적 효과  
Linear Threshold

방사선 호메시스  
Hormesis



# 선량(Sv) or 선량률(Sv/hr) 표

|           |                                                                                                                                                                |        |                                                                                                              |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 0.1       | Hiroshima 2 km distance (Wind, heat 10% death)<br>Some treatment of nuclear medicine dose<br>6/1000 additional cancer risk (if we extrapolate downward)        | 10,000 | Food irradiation limit (WHO)                                                                                 |
| 0.06      | (60 mSv) guide line for brain CT by KFDA,<br>radiation therapy                                                                                                 | 4,200  | 1C increase in Water, industrial process                                                                     |
| 0.02      | (20 mSv) ICRP 60 Annual dose limit for radworker<br>(expected life shortening = 24 days, smoker = 7 yr,<br>drinker = 1 yr) , guide line for abdomen CT by KFDA | 1,000  | Hiroshima A-Bomb pt zero (hypo center)                                                                       |
| 0.015     | (15 mSv) X-ray Stomach Fluoroscope (recent ly 4 mSv)                                                                                                           | 100    | Food irradiation process                                                                                     |
| 0.01      | (10 mSv, 1 rem) Annual dose of air crews<br>Annual dose of Garibi, Brazil, CT, PET                                                                             | 50     | 1 km from a neutron bomb                                                                                     |
| 0.0034    | (3.4 mSv, 340 mrem) Average dose of US Nuclear worker<br>(expected life shortening for 30 yrs = 49 days)                                                       | 20     | Max Radiation cancer Therapy at tumor, Hiroshima 0.5 km                                                      |
| 0.0024    | (2.4 mSv, 240 mrem) Avg natural dose per year<br>(=0.35 cosmic, 0.35 food (internal), 0.4 earth, 1.53 air<br>(Radon))                                          | 10     | Central Nerve Synd, 100% fatality 2 days<br>Cramps경련, lethargy 혼수, 발작 수일내 사망                                 |
| 0.002     | Nuclear Medicine Tc99m<br>Average dose of Korean NPP workers<br>dental x-ray, X-ray CT, annual air crew (500 hr flight)                                        | 8.8    | Gastrointestinal Synd, 90% fatality 2 weeks<br>Diarrhea설사, fever고열                                           |
| 0.0015    | annual dose due to radon,<br>(1mSv, 100 mrem) chest X-ray diagnostics,<br>Annual public dose limit                                                             | 8      | Max dose at Chernobyl fire worker                                                                            |
| 0.001     | 1mSv/hr → shelter in house → 8.7 Sv/yr<br>(0.8 mSv, 80 mrem) Annual dose in Seoul from<br>Earth+Space, average annual minor dose                               | 6      | 1964 Uranium Plant, Criticality (2day)<br>Death within 30 days                                               |
| 0.0008    | Dose of a cosmonaut at Mir per day<br>(0.3 mSv, 30 mrem) annual internal dose, * mostly due to<br>K40 = 4kBq = 17 mg, 100 ug C14, 90 ug U, 30 ug Th            | 5      | Radiation cancer therapy                                                                                     |
| 0.0005    | (0.2 mSv, 20 mrem) chest X-ray diagnostics                                                                                                                     | 4      | 1958 Los Alamos Lab Criticality (3day)                                                                       |
| 0.0003    | (0.1 mSv, 10 mrem) A roundtrip to Europe,<br>Flight from Seattle to Tokyo, average annual Dr dose<br>> 100 uSv/hr → High radiation area                        | 3      | LD50/60, Hiroshima 1 km                                                                                      |
| 0.0002    | (0.05 mSv, 5mrem) 30 km around NPP (design) – legally                                                                                                          | 2      | Pigmentation착색, Epilation탈모, Necrosis괴저,<br>Blistering물집, Ulceration궤양, Dermatitis,                          |
| 0.0001    | (0.02 mSv, 2mrem) Nuclear waste repository – legally                                                                                                           | 1      | Permanent sterility of woman & man<br>Hemopoietic Synd threshold, 3hour 50%<br>vomit, 0 % death, Reddening홍반 |
| 0.00005   | 10 uSv/hr ~ 100 uSv/hr → Radiation Work Area                                                                                                                   | 0.76   | Cataract threshold (1회 조사로 백내장)                                                                              |
| 0.00002   | (5 μSV) watching TV 1 year                                                                                                                                     | 0.65   | No critical short term effect, 6~8/100 additional cancer<br>risk,                                            |
| 0.00001   | 1 μSV/hr → inspection of food and water → 8.7 mSv/yr                                                                                                           | 0.5    | acute conjunctivities결막염, keratitis각막염<br>threshold to Cancer, especially thyroid cancer                     |
| 0.000001  | 100 nSv/hr → Seoul radiation dose rate → 0.87 mSv/yr                                                                                                           | 0.5    | Temporary sterility of woman<br>dose limit to skin, lung, bone marrow, breast, extremity,<br>organs          |
| 0.0000001 |                                                                                                                                                                | sex    |                                                                                                              |
|           |                                                                                                                                                                | 0.3    | No observed medical effects in man except<br>equiv to Cigarette 1 pack/day for 1 year                        |
|           |                                                                                                                                                                | 0.25   | temporary change of white cell, red cell, and platelet                                                       |
|           |                                                                                                                                                                | 0.2    | 0.2~2.5 Sv : mutation rate doubling dose                                                                     |
|           |                                                                                                                                                                | 0.15   | dose limit to eye, temporary sterility of man,                                                               |

1~3% of cancer generation may be originated  
from the natural radiation exposure !  
1 yr = 8760 hr

# 한국인 사망원인 (2012)

| 한국남성의 10대 사망원인 |          |     | 한국여성의 10대 사망원인 |          |     |
|----------------|----------|-----|----------------|----------|-----|
| 184.5          | 암        | 1위  | 108.5          | 암        | 1위  |
| 51.8           | 심장질환     | 2위  | 53.2           | 심장질환     | 2위  |
| 49.2           | 뇌혈관질환    | 3위  | 53.1           | 뇌혈관질환    | 3위  |
| 38.2           | 자살       | 4위  | 22.7           | 당뇨병      | 4위  |
| 23.2           | 당뇨병      | 5위  | 20.3           | 폐렴       | 5위  |
| 21.3           | 간질환      | 6위  | 18.0           | 자살       | 6위  |
| 20.7           | 폐렴       | 7위  | 14.4           | 고혈압성 질환  | 7위  |
| 19.2           | 만성하기도 질환 | 8위  | 11.9           | 만성하기도 질환 | 8위  |
| 19.0           | 운수사고     | 9위  | 9.5            | 알츠하이머병   | 9위  |
| 6.4            | 고혈압성 질환  | 10위 | 6.8            | 운수사고     | 10위 |

통계청(2012년 사망원인 통계 - 단위 : 인구 10만명당) / 2013.9.25

전생애 자연 암 발병율  
 미국 42%  
 한국 35%(?)  
 전세계 평균 25%

# 방사선 기인 초과 암사망율 모델

- 자연 사망률 = 자연 암사망율 + 기타 사망율

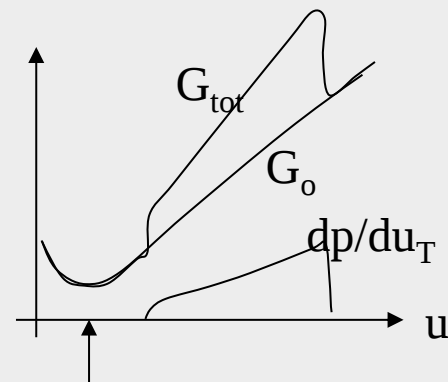
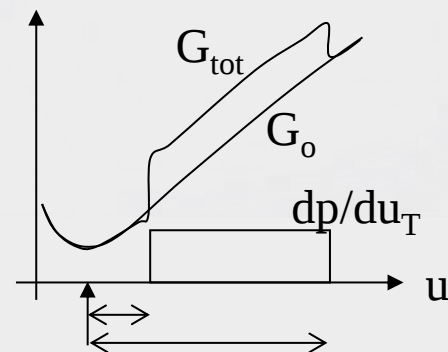
- **Additive model**

➔ 자연 암사망율에 독립적으로 추가 됨

- **Multiplicative model**

➔ 방사선기인 초과 암사망율은

자연 암사망율에 비례해서 추가 됨



# 방사선 기인 초과 암 발병 확률 계수

- From various studies by
  - ICRP, NCRP, The Radiation Effects Research Foundation, the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation(UNSEAR), the National Radiological Protection Board of the United Kingdom, and the National Academy of Science-National Research Council in US
  - Considering **DDREF**(dose and dose rate effectiveness factor of 2 for low dose and low dose rate)

**TABLE 14.3. Probability Coefficients for Stochastic Effects** for low dose

| Detriment              | Adult Workers<br>( $10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$ ) | Whole Population<br>( $10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$ ) |
|------------------------|------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| Fatal Cancer           | 4.0                                            | 5.0                                               |
| Nonfatal cancer        | 0.8                                            | 1.0                                               |
| Severe genetic effects | 0.8                                            | 1.3                                               |
| Total                  | 5.6                                            | 7.3                                               |

Averaged for a population of worker ages (18~65)

=7,300 persons/100,000 people<sup>56</sup>

# Radiation Hormesis

| Group                                 | Size of cohorts | Person-years | Collective dose (man Sv) | Average dose (mSv) | Excess relative risk ( $\text{Sv}^{-1}$ ) <sup>a</sup> |                     | Lifetime risk ( $\% \text{Sv}^{-1}$ ) <sup>a</sup> |                                |
|---------------------------------------|-----------------|--------------|--------------------------|--------------------|--------------------------------------------------------|---------------------|----------------------------------------------------|--------------------------------|
|                                       |                 |              |                          |                    | All cancer                                             | Leukemia            | All cancer                                         | Leukemia                       |
| Survivors of atomic bombings          | 75,991          | 2,185,000    | 10,500                   | 251                | 0.39<br>(0.32-0.46)                                    | 5.2<br>(3.8-7.1)    | 4 <sup>b</sup><br>(3-5)                            | 0.4 <sup>b</sup><br>(0.3-0.55) |
| Nuclear workers in the United Kingdom | 95,217          | 1,218,000    | 3,198                    | 34                 | 0.47<br>(-0.12-1.20)                                   | 4.3<br>(0.40-13.6)  | 10<br>(<0-26)                                      | 0.76<br>(0.07-2.4)             |
| Nuclear workers in the United States  | 35,933          | 705,000      | 1,140                    | 32                 | -0.99<br>(-1.6-0.38)                                   | <1.5<br>(<-1.5-3.4) | <0<br>(<0-8.2)                                     | <0<br>(<0-0.60)                |

<sup>a</sup> 90% CI in parentheses.

<sup>b</sup> Based on ICRP with low-dose-rate reduction factor of 2.

Comparison of risk estimates for mortality in survivors of atomic bombings in Japan and nuclear workers in the UK and in the US (UNSCEAR 1994)

# Radiation Hormesis

## IARC Study of Occupationally Exposed Workers in U.S., U.K. & Canada (>100,000)

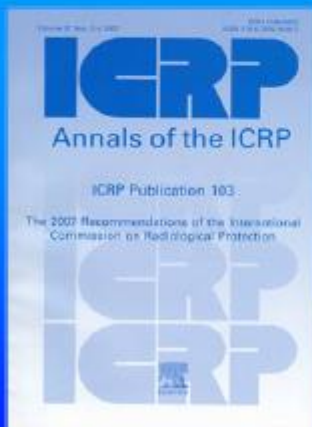
- **Leukemia**
  - UK & Canada: Significant excess risk.
  - US: Non-significant **negative** risk.
  - Pooled: No-significant excess risk.
- **All Other Cancers**
  - Pooled: No-significant excess risk.

# ICRP

## ICRP & its Recommendations

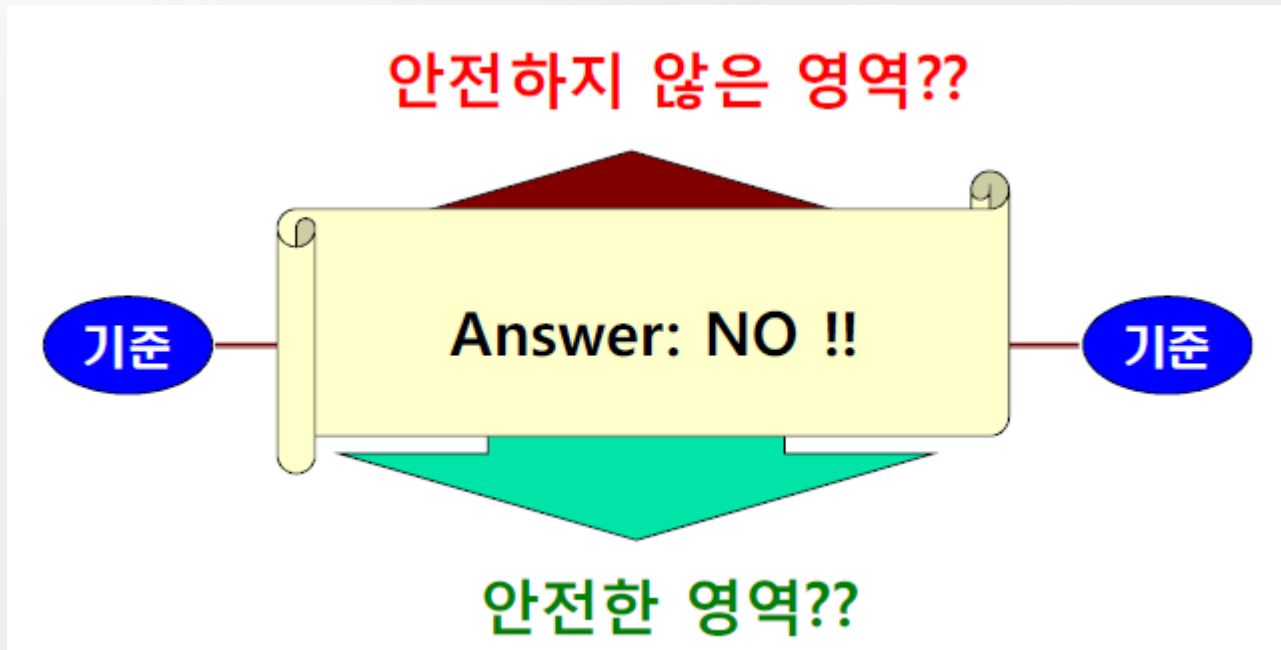


- ❖ **International X-ray and Radium Protection Committee (1928; ICXRP)**
- ❖ **International Commission on Radiological Protection (1950; ICRP)**
- ❖ **Recommendations :**
  - ICRP 1 (1959)**
  - ICRP 6 (1964)**
  - ICRP 9 (1966)**
  - ICRP 26 (1977)**
  - ICRP 60 (1990)**
  - ICRP 103 (2007)**



# ‘방사선 안전기준’ 이란?

- ‘안전하다’와 ‘안전하지 않다’의 경계선??



# 지구의 나이 = 운석의 나이

- Clair Cameron Patterson(1922~1995)는 세 개의 암석 성분의 **운석**과 두 개의 철 성분 **운석**에서 포함된 납의 양을 분석하고 본인이 개발한 Pb-Pb 연대측정법으로 이들이 모두 45.5억년 (7천만년 오차)를 갖는다고 밝힘.



$$\frac{R_{1a} - R_{1b}}{R_{2a} - R_{2b}} = \frac{(e^{\lambda_1 T} - 1)}{k(e^{\lambda_2 T} - 1)}$$

$$R_1 = \text{Pb}^{207}/\text{Pb}^{204} \text{ and } R_2 = \text{Pb}^{206}/\text{Pb}^{204}$$

from different meteorites *a* and *b*

$$k = \text{U}^{238}/\text{U}^{235} \text{ today}$$

$$\lambda_1 = \text{U}^{235} \text{ decay-constant } (9.72 \times 10^{-10} \text{ yr}^{-1})$$

$$\lambda_2 = \text{U}^{238} \text{ decay-constant } (1.537 \times 10^{-10} \text{ yr}^{-1})$$

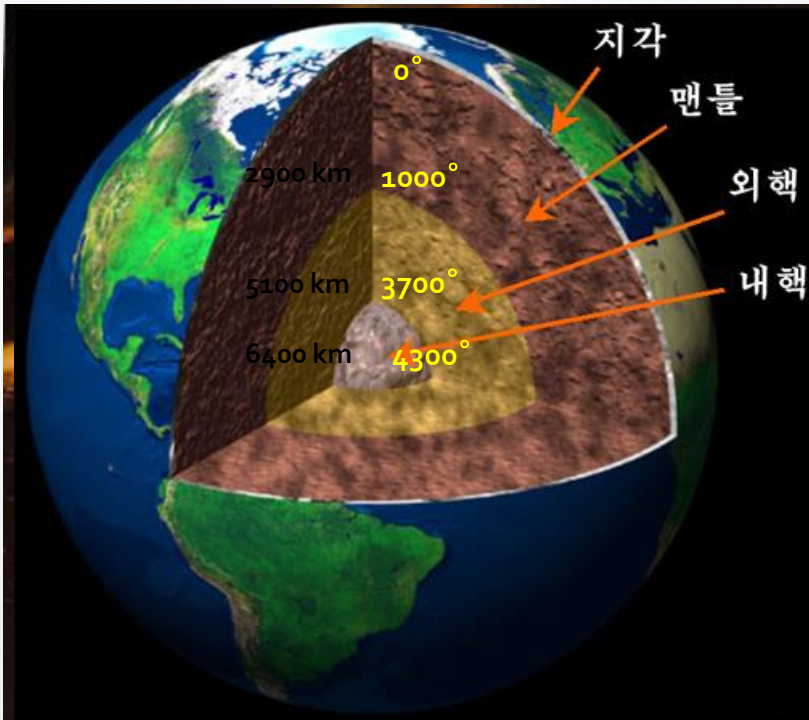
*T* = age of the array.

Nuevo Laredo, Mexico  
Forest City, Iowa  
Modoc, Kansas  
Henbury, Australia  
Canyon Diablo, Arizona



클레어 패터슨은 운석의 방사성동위원소를 분석하여 지구의 나이를 측정했다.  
사진은 그가 사용한 운석 샘플을 채취한 미국 애리조나의 배린저 크레이터. <출처> USGS

# 지구

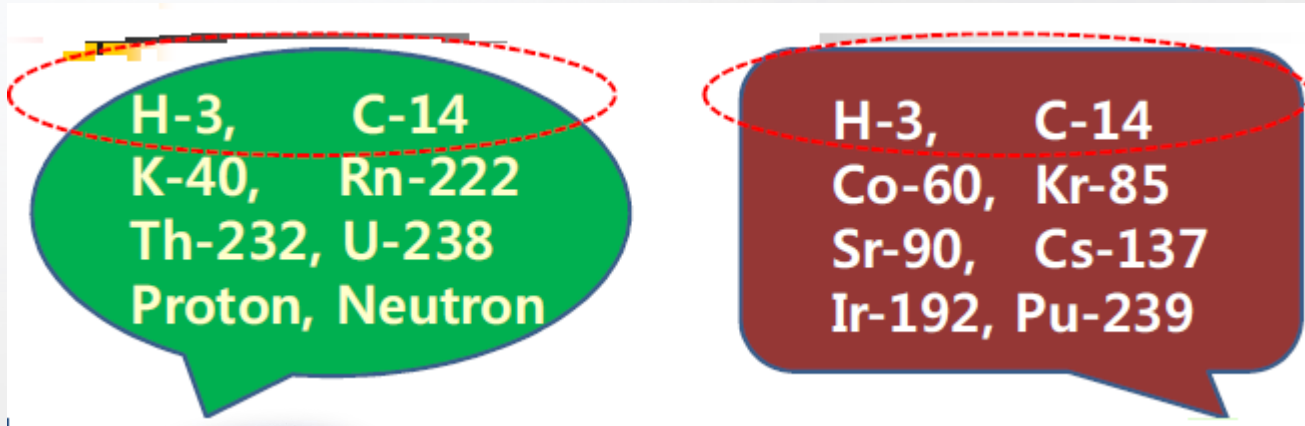


- 45억년전 탄생
- 구성 물질
  - 지각 : O, Si, Al, Fe
  - 맨틀 : Mg, Fe, Al, Si, O
  - 외핵 : Fe, S (액체)
  - 내핵 : Fe (고체)
- 지구는 복사열을 내보내고 있지만, 지구 표면의 평균온도를 유지하는 것은 태양 에너지와 지구내부에너지 때문임.
- 지구내부에너지의 50%는 맨틀층에서  $^{238}\text{U}$ 과  $^{232}\text{Th}$ 의 방사성붕괴에 의한 (20조 Watt)

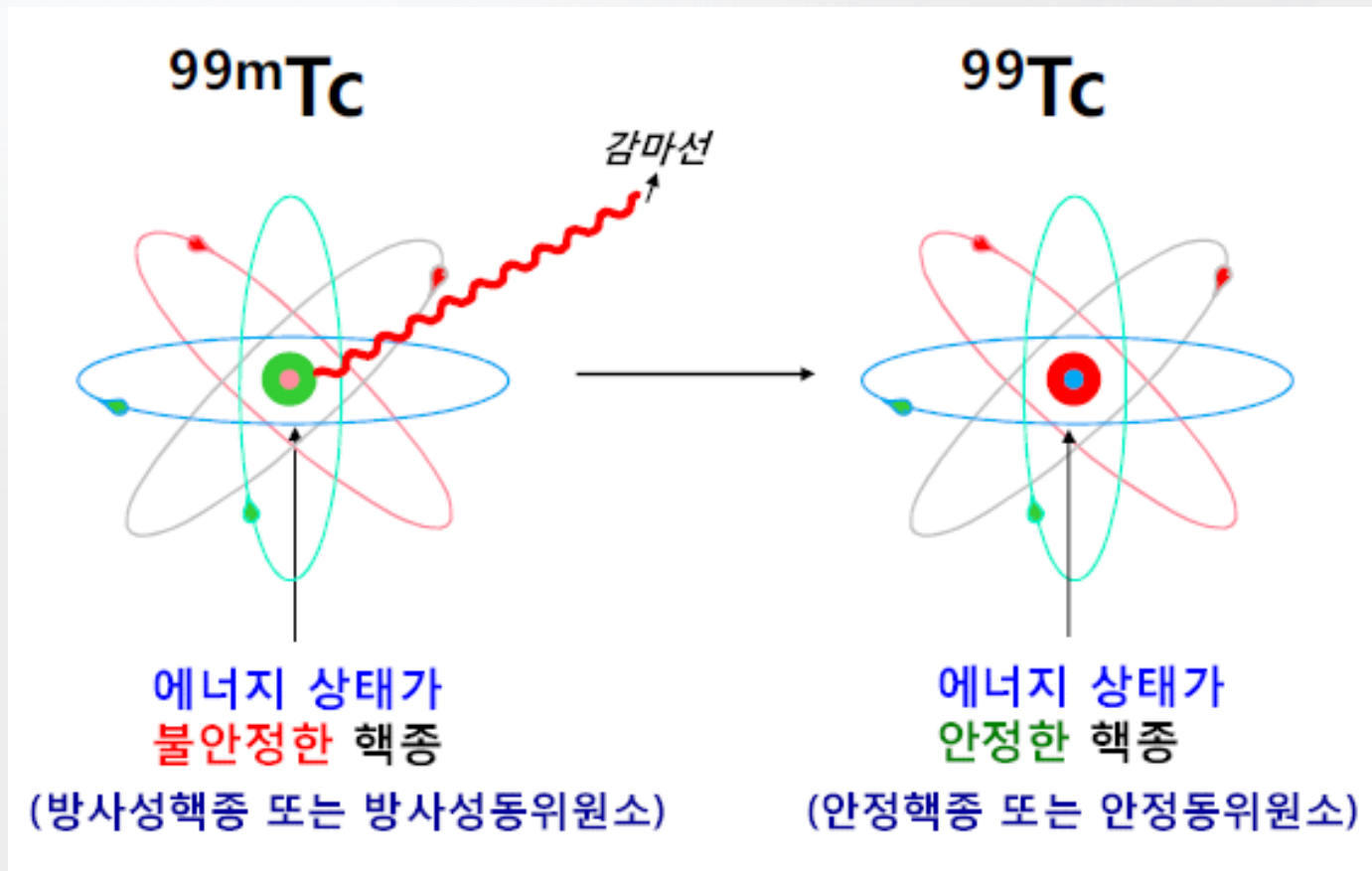
지금으로부터 약 46억 년 전, 갓 태어난 원시태양 주위에 있던 엄청난 수의 미행성이 충돌, 합쳐지면서 원시지구 행성이 탄생했다. 탄생 직후의 지구는 고온의 마그마 바다를 이루고 있었고, 미행성의 충돌이 잦아들면서 서서히 식어 얇은 지각이 형성되기 시작했다 (42~40억 년 전). 또한 수증기와 이산화탄소로 이루어진 원시 대기에서 많은 양의 비가 쏟아져 내리면서 마침내 원시지구에 바다가 탄생 되었다 (약38억 년 전). 이로써 지구는 지하에 마그마, 그 위에 얇은 원시 지각과 바다, 대기가 있는 층 구조를 가지게 되었고, 하나의 행성으로서 지질시대에 들어서기 시작했다.

※ 핵의 높은 온도는 지구 탄생 초기의 열이 핵에 갇혀 있는 것임

# 자연방사선 및 인공방사선택종



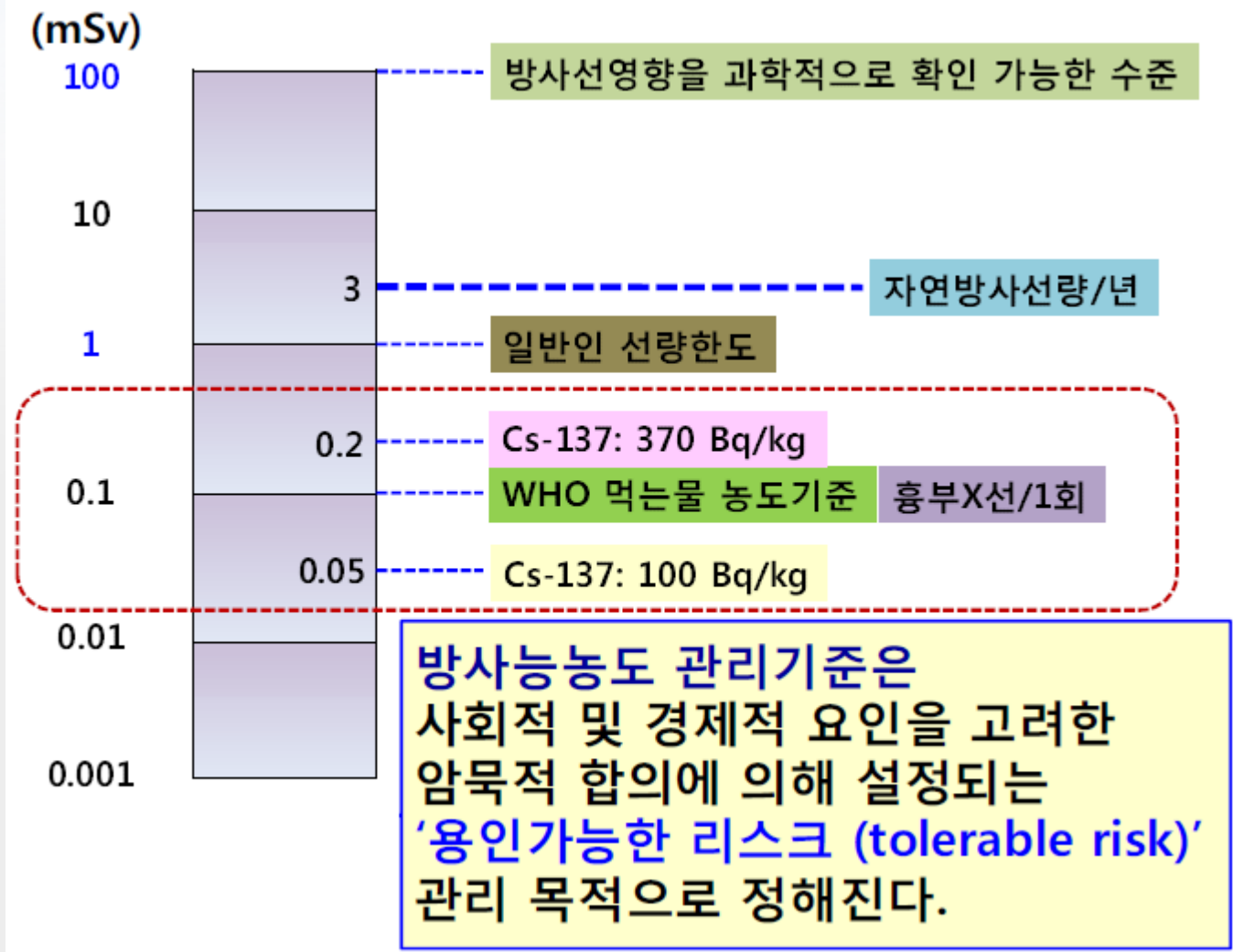
# 방사성 핵종과 안정 핵종



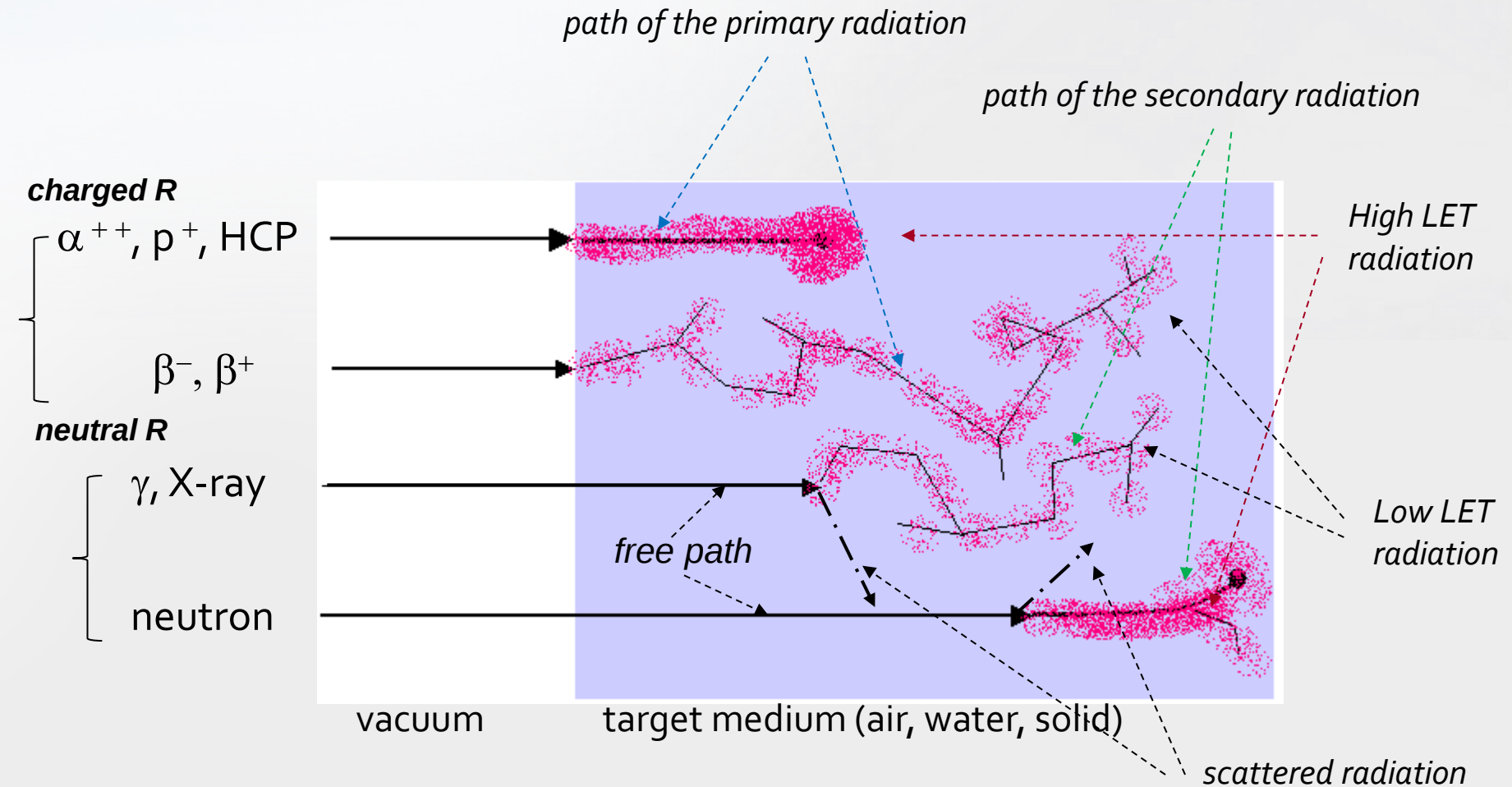
# 핵분열생성물 & 자연동위원소

| 핵종     | 반감기    | 생물학적<br>반감기 | 붕괴종류      | 핵분열물내<br>비율% | 원전사고시<br>방출율 | 인체흡<br>수   | 질병 장기           |
|--------|--------|-------------|-----------|--------------|--------------|------------|-----------------|
| Cs-137 | 30.1 년 | 109 일       | 베타&감<br>마 | 6.22         | 높음           | 100%<br>소장 | 식도, 위,<br>폐, 근육 |
| Cs-134 | 2.06 년 | 109 일       | 베타&감<br>마 | 소량           | 높음           | 100%<br>소장 | 식도, 위,<br>폐, 근육 |
| I-131  | 8.05 일 | 138 일       | 베타&감<br>마 | 2.88         | 높음           | 100%<br>소장 | 갑상선             |
| Sr-90  | 29 년   | 36 년        | 베타        | 5.73         | 낮음           |            | 뼈               |
| Xe-133 | 5.2 일  |             | 베타        | 6.6          | 매우 높음        |            | 없음              |
| Xe-131 | 안정원소   |             | 안정원소      | 소량           | 매우 높음        |            | 없음              |
| Pu-239 | 2만4천년  | ~20 년       | 알파        | 소량           | 매우 낮음        | 낮음         | 뼈, 간            |
|        |        |             |           |              |              |            |                 |
| K-40   | 12억 년  |             | 감마        | 자연방사선        | -            | 100%       | 근육,난소           |
| Rn-222 | 3.8 일  |             | 알파        | 자연방사선        | -            | 폐          | 폐               |

# 방사능 농도 관리 기준 vs 선량



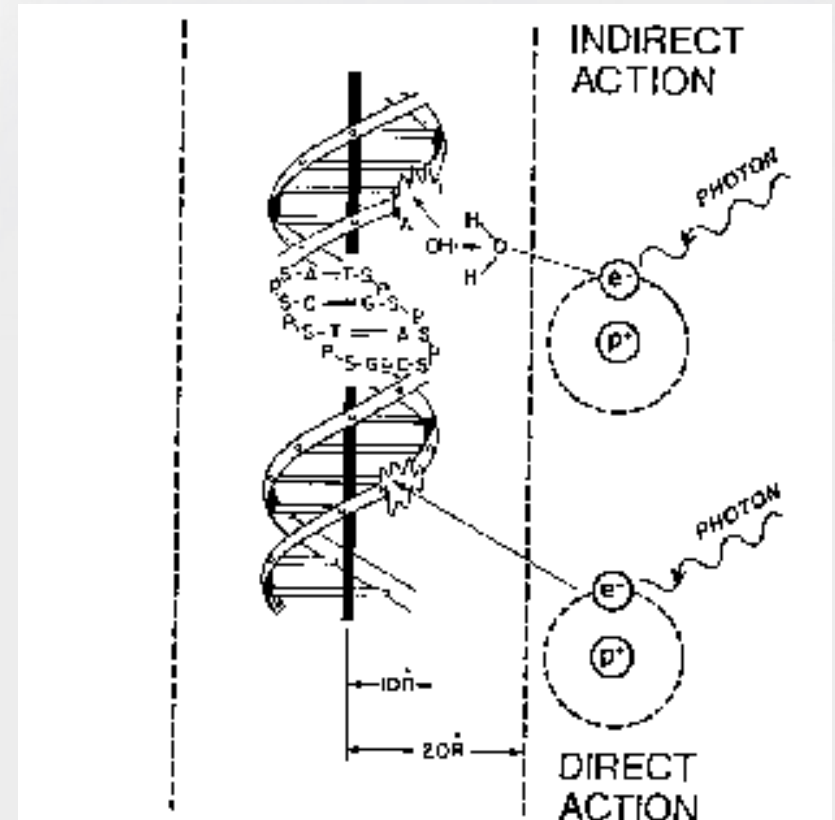
# 방사선의 물질과의 반응



- HCP : *heavy charged particulate radiation*
- LET : *linear energy transfer* ( $\sim$ stopping power)  $dE/dx$

# DNA와 반응

- **Direct effects:** Directly damage biologically important molecules in the cell
- **Indirect effects:** Formation of ion pairs initiating a chain of chemical reactions, mediated through cellular water, leading to ultimate biologic damage



# 인체 장기별 방사선량



$$H_{R,T} \propto \frac{E_R \times N_R}{M_T} \times w_R$$

- $H_{R,T}$ : 방사선량 (mSv)
- $E_R$ : 방사선 에너지 (keV)
- $N_R$ : 장기와 반응한 방사선 갯수
- $M_T$ : 인체장기 무게 (kg)
- $w_R$ : 방사선 보정상수

| 방사선 종류 (R)            | $w_R$ : 보정상수                     |
|-----------------------|----------------------------------|
| $\beta, \gamma, X$ -선 | 1                                |
| $\alpha, neutron$     | 5~20 (LET 에 따른 함수) <sup>69</sup> |

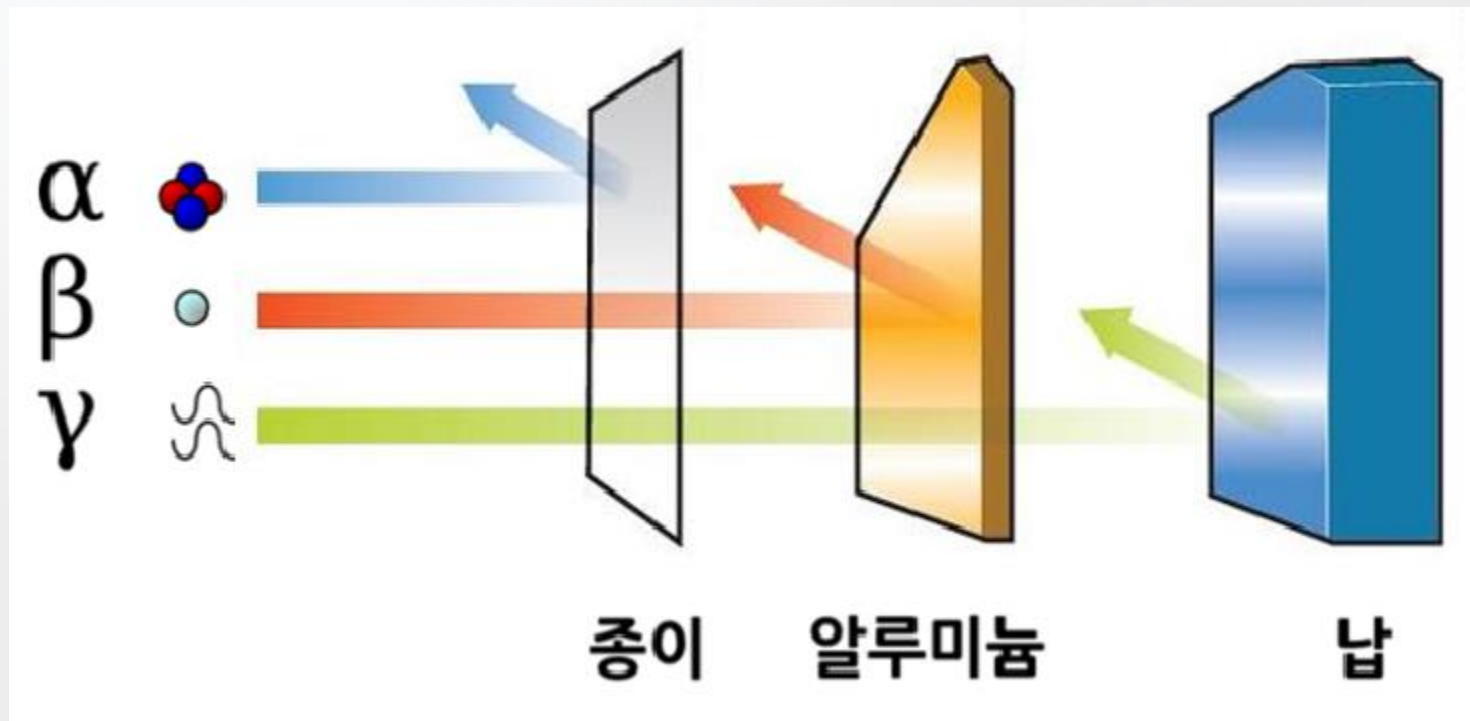
# Radiation Weighting Factors

**TABLE 14.1. Radiation Weighting Factors,  $w_R$ , from NCRP Report No. 116**

| Radiation                                                            | $w_R$          |
|----------------------------------------------------------------------|----------------|
| X and $\gamma$ rays, electrons, positrons, and muons                 | 1              |
| Neutrons, energy < 10 keV                                            | 5              |
| 10 keV to 100 keV                                                    | 10             |
| > 100 keV to 2 MeV                                                   | 20             |
| > 2 MeV to 20 MeV                                                    | 10             |
| > 20 MeV                                                             | 5              |
| Protons, other than recoil protons and energy > 2 MeV                | 2 <sup>a</sup> |
| Alpha particles, fission fragments, and nonrelativistic heavy nuclei | 20             |

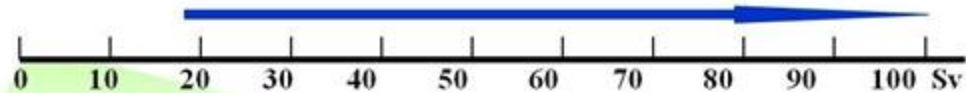
<sup>a</sup>ICRP Publication 60 recommends  $w_R = 5$ .

# 방사선 차폐

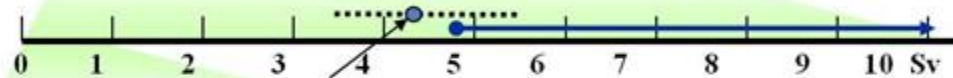


# 방사선량 영역

## 종양 치료 선량

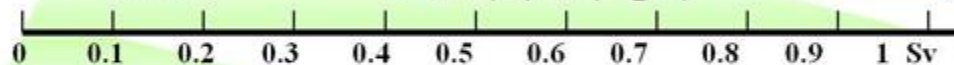


## 급성 방사선 증후군

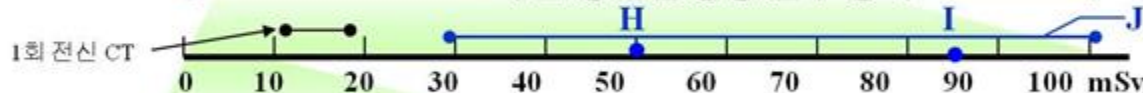


급성 방사선 피폭시 의학적 처치 없이  
3-6 주내 50% 사망

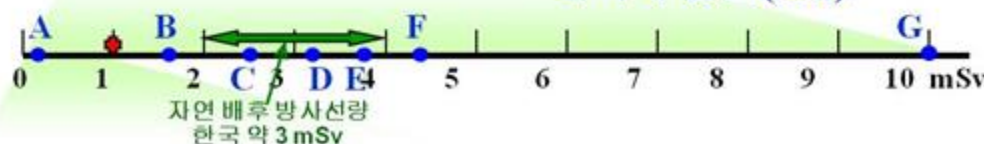
## 암 역학 연구 영역



## 주요 방사선 영향 연구 영역



## 의학적 진단 (A-J)



## 의학적 진단 영역 피폭, mSv

|                                                 |        |
|-------------------------------------------------|--------|
| A- 흉부 X 선(1 회)                                  | 0.1    |
| B- 구강 방사선 검사                                    | 1.6    |
| C- 유방 촬영                                        | 2.5    |
| D- 요추부 검사                                       | 3.2    |
| E- PET                                          | 3.7    |
| F- 뼈 검사 (Tc-99m)                                | 4.4    |
| G- 심장 검사 (Tc-99m)                               | 10     |
| H- 두부 CT (MSAD)<br>(multiple scan average dose) | 50     |
| I- 위장관 바륨 조영촬영<br>fluoroscopy (2 min scan)      | 85     |
| J- 전신 스파이럴 CT                                   | 30-100 |

Chart compiled by NF Metting, Office of Science, DOE/BER  
"Orders of Magnitude" revised March 2006

# 우리나라 최초의 방사선피폭 사망사고

- 1976년 11월 6일 오전 10시 30분경 서울 태릉 한국 원자력연구소 대단위방사선조사실에서 한국과학원 석사2년생 이항목군이 실험을 하는 도중 문이 열려 조사실에 들어가 보니 방사선원(30만 큐리, 코발트60)이 올라와 있어서 피폭을 당함.
- 연구소장에게 보고되고 원자력병원에 입원하게 되었으며
- 이틀 후 백혈구 수치가 떨어지고 어지럼증과 구토증이 일기 시작한 후 머리카락이 빠지고 몸 군데군데 출혈성 붉은 반점이 나타나다가
- 피폭 18일만인 11월 24일 사망함.

# Questions



방사선을 어느정도 맞으면,  
암이 생길까요?

---



기준치 이하이면 안전한가요?

---



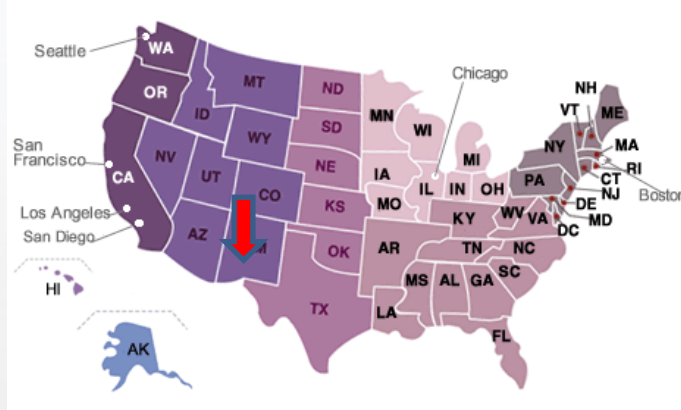
왜 기준치는 정해서 관리하나요?

---

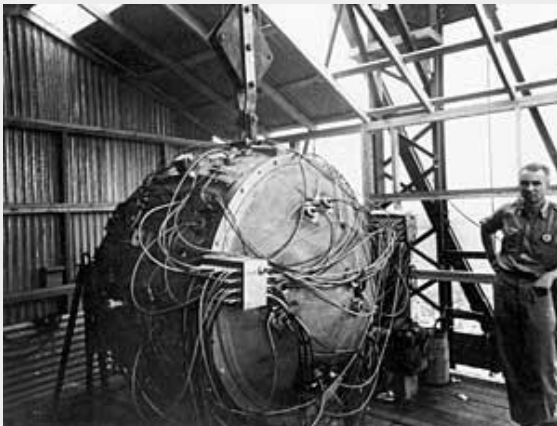
# Trinity Test (1945.7.16 5:29 am)



UC Berkeley 교수  
J. R. Oppenheimer



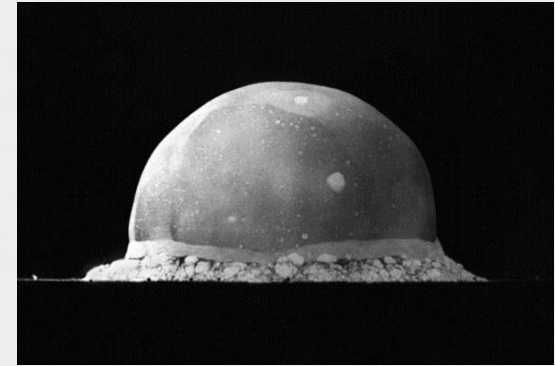
뉴멕시코 앨러머고도 사막



실험용 폭탄 '가젯트' (TNT 20ton)



높이 30m 철탑에 설치



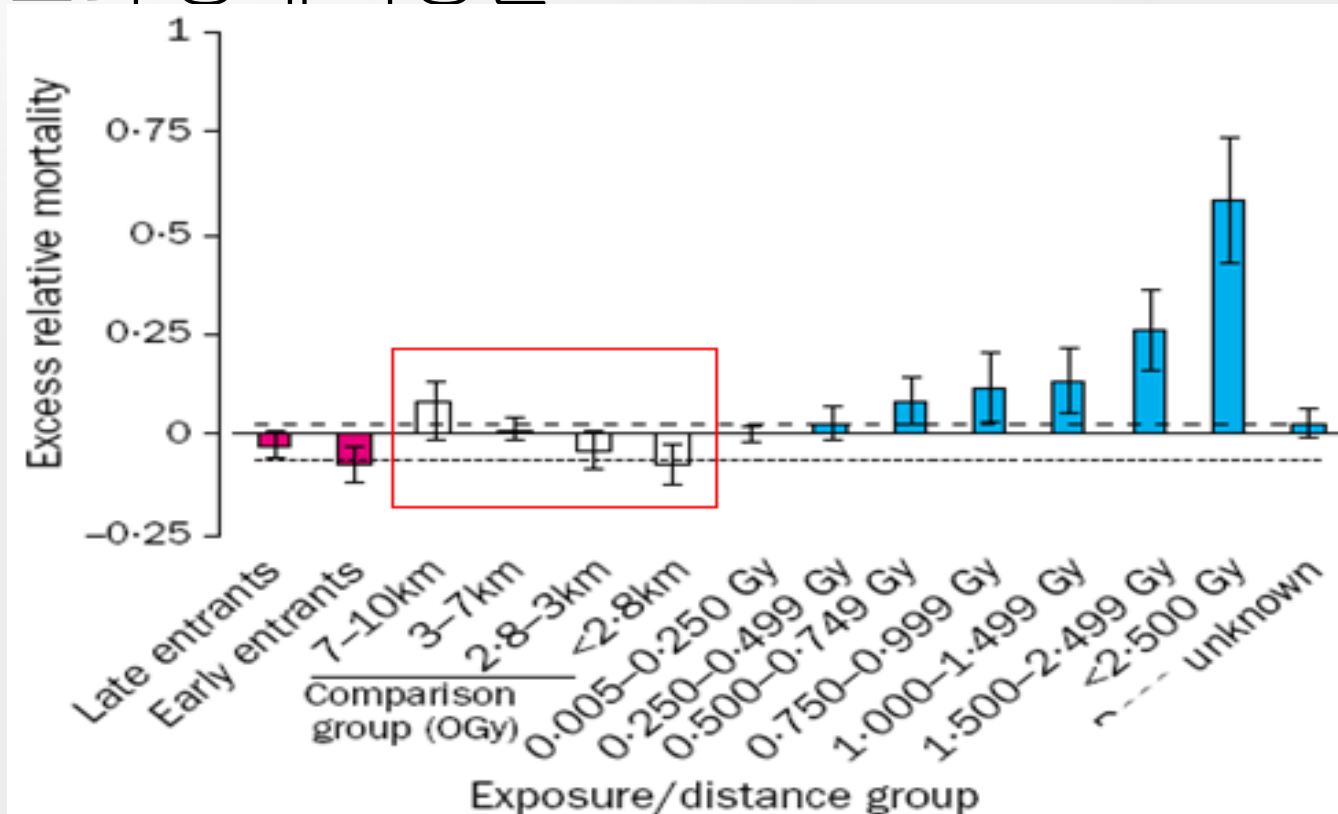
트리니티의 폭발 0.016초 이후 모습. 화구의 지름은 약 200m였다. / 사진: 벌린 브릭스너



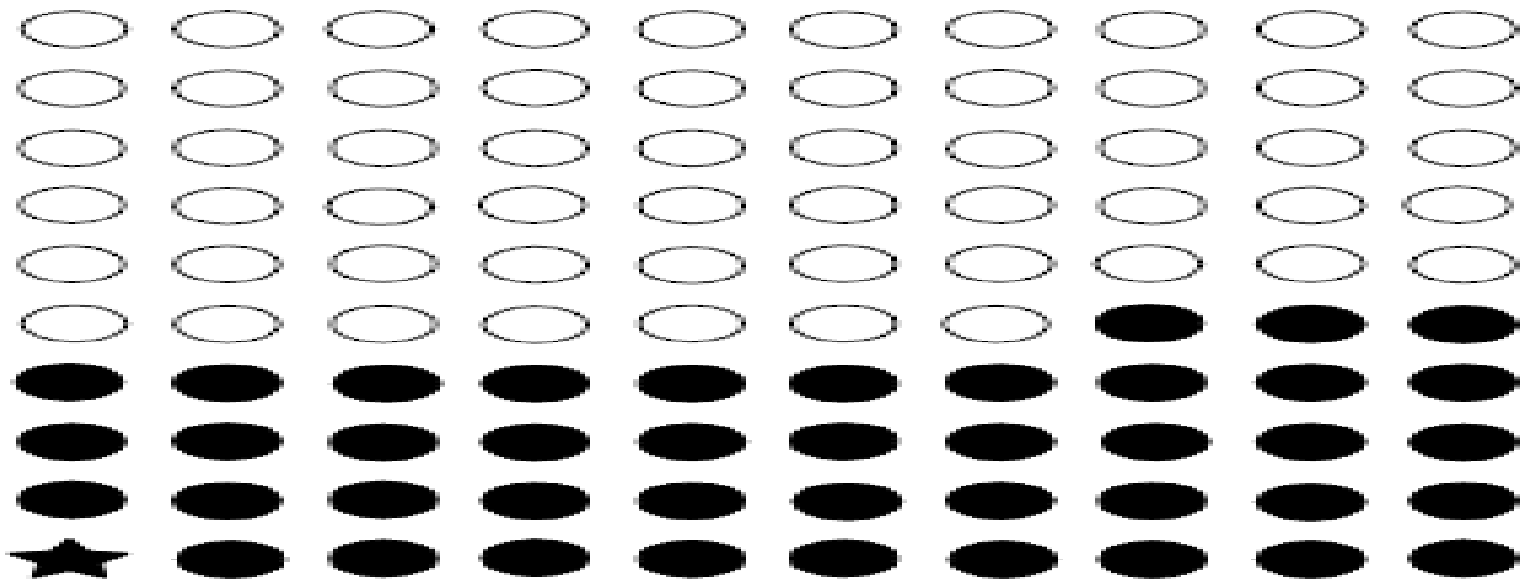
트리니티 실험으로 생긴 버섯구름/사진: 잭 애비

# 히로시마 데이터

- 히로시마 원폭 생존자의 거리 또는 방사선량에 따른 초과 상대 사망율



# 방사선 피폭에 의한 생애 암위험도



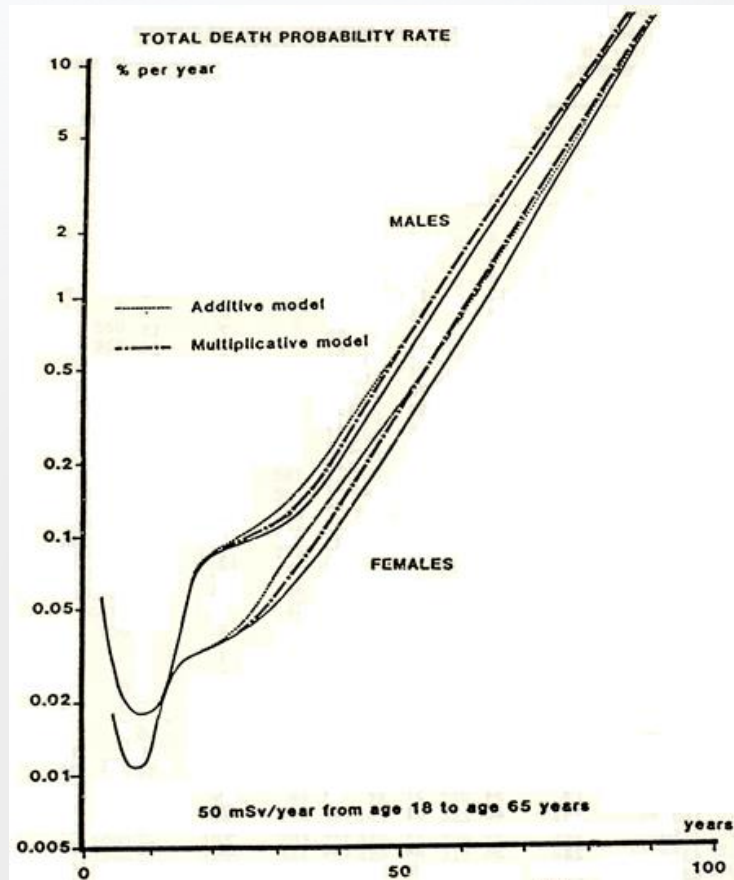
생애 자연 암 발생 위험도 추정치 미국 42%  
한국 35%(?)  
전세계 평균 25%

BEIR VII 2005

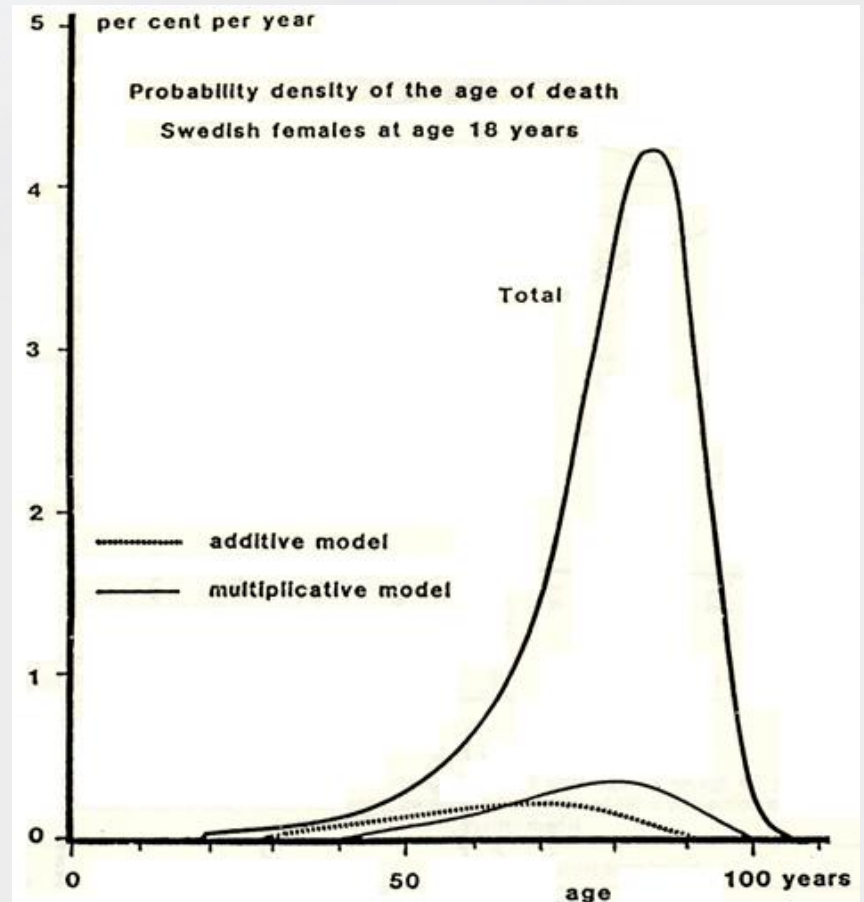
# 고(High)자연배후방사능 지역 연구

|                                                              | Techa River (Russia)                                                                                                                                                                            | Karunagappally (India)                                   | Yangjiang (China)                                                                |
|--------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| Study population                                             | 29,873 (60% are women),<br>all ages                                                                                                                                                             | 69,958 (54% are women),<br>aged 30-84                    | 31,604 (51% are women),<br>aged 30-74                                            |
| Occupation                                                   | Mainly farmers                                                                                                                                                                                  | Mainly fishermen, blue-collar workers, farmers           | Mainly farmers                                                                   |
| Radiation sources                                            | Release of liquid radioactive waste between 1949-1956 ( $^{89}\text{Sr}$ , $^{90}\text{Sr}$ , $^{137}\text{Cs}$ , $^{95}\text{Zr}$ , $^{95}\text{Nb}$ , $^{103}\text{Ru}$ , $^{106}\text{Ru}$ ) | HNBR (mainly $^{232}\text{Th}$ )                         | HNBR ( $^{232}\text{Th}$ and $^{238}\text{U}$ )                                  |
| Dose rate                                                    | Max. was in 1951:<br>Max. RBM dose=300 mGy in a year<br>Max. stomach dose= 200 mGy in a year                                                                                                    | 1–15 mGy in a year (external exposure)                   | 1–5 mGy in a year (external exposure)                                            |
| Primary endpoint                                             | Cancer incidence                                                                                                                                                                                | Cancer incidence                                         | Cancer mortality                                                                 |
| Leukaemia excluding CLL (ERR/Gy, 2 years lagged) [Reference] | 4.9 (95% CI: 1.6, 14.3) [Krestinina et al., 2010]                                                                                                                                               | 3.7 (ND, 336.8) [Nair et al., 2009]                      | 10.68 (<0, inf) [Tao et al., 2012]                                               |
| All cancer excluding Leukaemia (ERR/Gy) [Reference]          | 1 (95% CI: 0.3, 1.9), 5 years lagged [Krestinina et al., 2007]                                                                                                                                  | -0.13 (-0.58, 0.46), 10 years lagged [Nair et al., 2009] | 0.19 (-1.87, 3.04; liver cancer is excluded), 10 years lagged [Tao et al., 2012] |

# 사망확율과 방사선 기인 초과 암사망확율



$G_{tot}$ , continuous exposure of 50 mSv from age 18 to 65 years, 스웨덴



Ex) Continuous exposure of 50 mSv from age 18 to 65 years, a Swedish woman

# Radiation effects

- 10,000 Sv : WHO food irradiation limit
- 1000 Sv : food irradiation, Hiroshima ground zero
- 50 Sv : max dose in cancer therapy
- 20 Sv : 100% death in 2 d, cramps(경련), lethargy
- 10 Sv : 90% death in 2 w, diarrhea, fever
- 4 Sv : LD<sub>50.60</sub>, Hiroshima 1 km
- 3 Sv : pigmentation, epilation(탈모), blistering(물집), ulceration(궤양), permanent sterility
- 2 Sv : 홍반, cataract
- 1 Sv : no short term effect, 5~7% add cancer
- 760 mSv : threshold for thyroid cancer
- 650 mSv : temporary female sterility
- 150 mSv : temporary male sterility
- 100 mSv : Hiroshima 2 km, cancer threshold