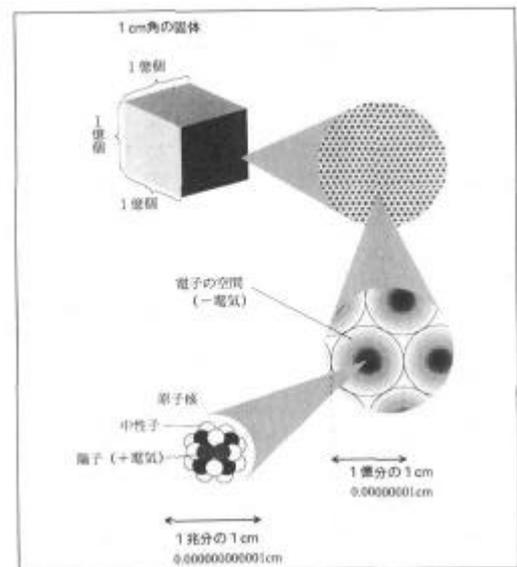


中性子とその被曝について

今中哲二（京都大学原子炉実験所）

1．原子核と中性子

- 自然界のあらゆる物質は、水素、酸素といった 92 種類の元素の組み合わせによって構成されている。
- 各元素にはそれぞれに特有の原子があり、1 番（水素）から 92 番（ウラン）までの番号（原子番号）がついている。
- 原子は、中心の原子核と外側の電子から構成される（原子の大きさは約 1 億分の 1 cm で、原子核の大きさは約 1 兆分の 1 cm）。
- 原子核のまわりには、原子番号と同じ数の電子（- 1 の電荷をもつ）がある。
- 原子核には、原子番号と同じ数の陽子（+ 1 の電荷をもつ粒子）と、ほぼ同数の中性子（陽子と同じ大きさで電荷をもたない粒子）がある。中性子は、原子核の中で陽子がバラバラにならないよう接着剤の役を果たしている。
- たとえば、炭素（原子番号 6）の原子核には、中性子を 6 個もつものと 7 個もつものがあり、同位体と呼ばれる。
- 陽子の数と中性子の数を合わせたものが質量数である。炭素のうち質量数 12、つまり炭素 12 の割合は 99% で、炭素 13 が 1% である。
- ウランの原子番号は 92 なので、ウラン 238 の原子核にある中性子の数は、 $238 - 92 = 146$ 個である。



2．放射能と核分裂

- 原子核に含まれる陽子と中性子の数のバランスが悪いと、その原子核は不安定となり、アルファ線やベータ線といった放射線を出して原子核が変化する（放射線を出す能力やその物質のことを放射能とよぶ）。
- たとえば、コバルト 60 (^{60}Co) の原子核には陽子 27 個と中性子 33 個があるが、中性子が多すぎるため、
（中性子）（陽子）+（電子）
というベータ崩壊反応で、電子を原子核外に放出し（ベータ線）、陽子 28 個、中性子 32 個の安定なニッケル 60 (^{60}Ni) に変化する。原子核が落ち着く際の余分なエネルギーは同時に、ガンマ線として放出される。

- ラジウム 226 (陽子 88、中性子 138) の場合は、アルファ線 (陽子 2 個 + 中性子 2 個のヘリウム原子核) とガンマ線を放出し、ラドン 222 (陽子 86、中性子 136) となる。
- ウラン 235 (陽子 92、中性子 143) が中性子を吸収すると、原子核はほぼ 2 つに分裂して 2 個の核分裂生成物ができ、2 個か 3 個の中性子が放出される。たとえば、核分裂生成物の片割れがストロンチウム 90 (陽子 38、中性子 52) の場合、相手方の方はキセノンであり：

$$^{235}\text{U} + n (\text{中性子}) \rightarrow \text{ストロンチウム 90} + \text{キセノン 144} + 2 \text{ 個の } n$$

$$^{235}\text{U} + n (\text{中性子}) \rightarrow \text{ストロンチウム 90} + \text{キセノン 143} + 3 \text{ 個の } n$$
 といった核分裂反応が起きる。

3 . 中性子の特徴

- 核分裂によって発生した中性子は非常に大きなエネルギー (平均 200 万電子ボルト : 2 MeV) をもち、非常に高速である (光の速度の 10 分の 1 程度)。
- 電荷をもたないので透過力が強く、電子とは相互作用せずに原子核と衝突し散乱される。
- 鉄や鉛を通過してもなかなか減衰しない (質量数 1 の中性子が、質量数の大きな原子核にぶつかっても、跳ね返ったときの速度は落ちない)。中性子を遮蔽するためには、水やポリエチレンのように水素をたくさん含む物質が有効である。
- 何回も衝突を繰り返すうちに、中性子の速度が落ちてエネルギーが下がる。周囲の温度と平衡状態となった中性子は熱中性子 (平均速度毎秒 2000m) と呼ばれ、原子核に吸収されやすくなる。
- 中性子を吸収した原子核は多くの場合、放射能をもつようになる。ナトリウム (^{23}Na) では、

$$^{23}\text{Na} (\text{陽子 } 11, \text{中性子 } 12) + n \rightarrow ^{24}\text{Na} (\text{陽子 } 11, \text{中性子 } 13; \text{半減期 } 15 \text{ 時間でベータ崩壊})$$

4 . 中性子被曝の特徴

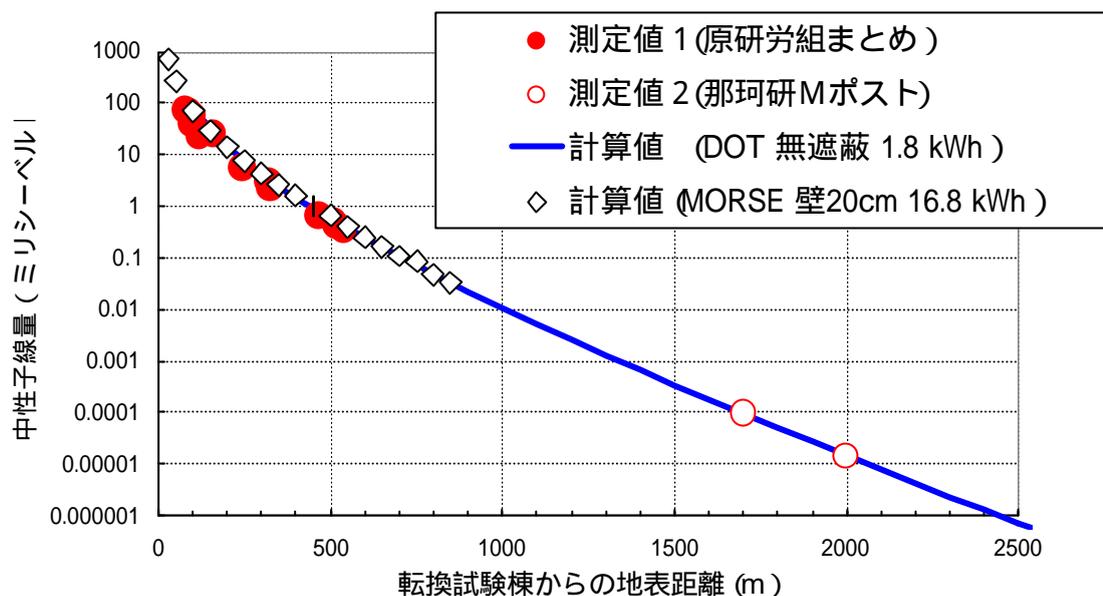
- 人体の大部分は水であるため、中性子の人体への影響は、水に含まれる水素との衝突が重要となる。中性子によりはじき飛ばされた水素の原子核 (陽子) は、周辺の分子をイオン化したりして細胞の構成分子を破壊する。
- ガンマ線やベータ線に比べ、中性子被曝にともなうイオン化は、その軌跡にそって密に生じる (高 LET 放射線)。そのため、同じ被曝量 (吸収線量 D : グレイ) であっても、中性子被曝の場合は影響が大きくなる (表 1)。
- 現在導入が検討されている ICRP60 勧告によると、被曝量 (等価線量 H : シーベルト) は：

$$H = w_R \times D \quad w_R : \text{放射線加重係数 (中性子ではエネルギーにより } 5 \sim 20)$$

表 1 中性子はガンマ線に比べどれだけ大きな影響をもたらすか (ICRP60 より)

腫瘍誘発	約 3 ~ 約 200 倍
(腫瘍誘発にともなう) 寿命短縮	15 ~ 45 倍
形質転換	35 ~ 70 倍
染色体異常など	40 ~ 50 倍
哺乳動物の遺伝学的影響	10 ~ 45 倍

5 . JCO事故による放射線被曝



地表 1 m の中性子線量 測定値と計算値

JCO 事故による被曝の特徴は、中性子による被曝が中心だったことである。上の図に示すように、2 km も離れた原研那珂研究所でも中性子が検出されている。今中の計算による中性子線量：

- 100 m で 81 ミリシーベルト
- 450 m で 1 ミリシーベルト
- 700 m で 0.1 ミリシーベルト
- 1000 m で 0.01 ミリシーベルト
- 1300 m で 0.001 ミリシーベルト

一方、科学技術庁や事故調査委員会は、周辺住民の被曝については 350m 以内にいた人々しか考慮に入れていない。

表 2 科技庁による JCO 職員・周辺住民等の被曝線量推定値 (H12.1.31 報告)

推定線量 ミリシーベルト	水抜作業 JCO 職員	その他の JCO 職員	防災業務 関係	周辺住民 () は 1 以上	合計
0 ~ 5 未満	7	116	54	180 (92)	357
5 ~ 10 未満	1	14	6	18	39
10 ~ 15 未満	3	3	-	6	12
15 ~ 20 未満	4	6	-	2	12
20 ~ 25 未満	5	3	-	1	9
25 ~ 30 未満	1	0	-	-	1
30 ~ 35 未満	0	2	-	-	2
35 ~ 40 未満	0	0	-	-	0
40 ~ 45 未満	1	0	-	-	1
45 ~ 50 未満	2	1	-	-	3
合計	24	145	60	207 (116)	436

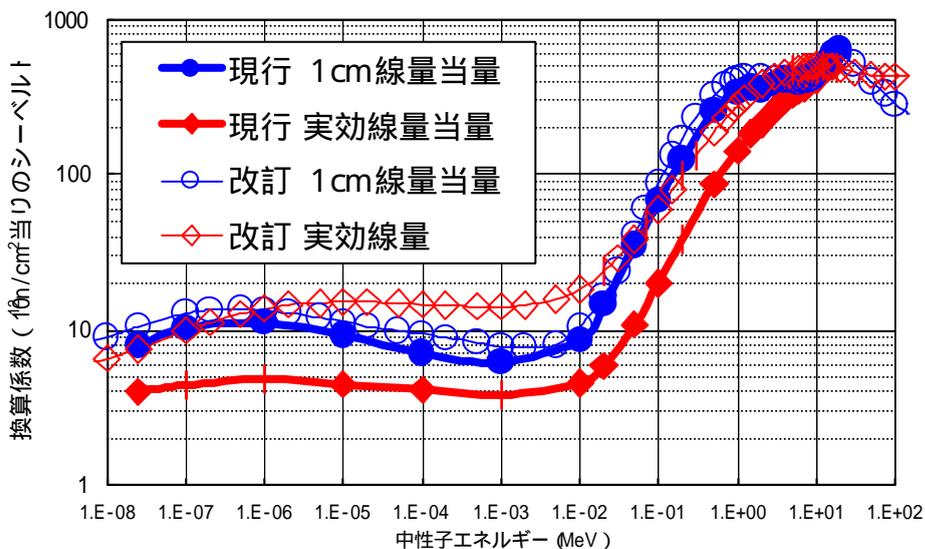
6. 法令改定にともない被曝線量が変わる

現在、来年春の実施を目標に、被曝基準の改訂作業が進められている。現在の法令はICRP26勧告（1977）に準拠しているが、ICRP60（1990）を取り入れようというものである。中性子線量の評価方法には、以下の3点の変更が関係してくる。

- ◇ 中性子の線質係数（放射線加重係数）の変更：速中性子（0.1～2.0MeV）の線質係数が10から20に変更された。
- ◇ 臓器別線量の計算方法の変更：以前の計算方法では、着目組織での中性子エネルギースペクトルを計算し、各エネルギーごとに線質係数をかけてから積分しながら臓器線量当量（シーベルト）を求めた。新しい計算方法では、着目組織での吸収線量（グレイ）をまず計算し、それに入射する中性子のエネルギーによって決まる放射線加重係数をかけて等価線量（シーベルト）を求める。
- ◇ 組織加重係数が若干変わった：

組織または臓器	加重係数（旧）	組織加重係数（新）
生殖腺	0.25	0.20
骨髄（赤色）	0.12	0.12
結腸		0.12
肺	0.12	0.12
胃		0.12
膀胱		0.05
乳房	0.15	0.05
肝臓		0.05
食道		0.05
甲状腺	0.03	0.05
皮膚		0.01
骨表面	0.03	0.01
残りの臓器・組織	0.30	0.05

結局、法令改定にともない中性子被曝による実効線量は約2倍、1cm線量当量は3割増となる。



中性子束からシーベルトへの換算係数
現行法令（ICRP51）と新法令（ICRP74）