

目 次

1. 緒 論

| | | |
|-----|---------------------------------|---|
| 1.1 | プルトニウム利用の新時代 | 1 |
| 1.2 | プルトニウム取扱い量の増大とそれに伴う被ばくの増大 | 2 |
| 1.3 | 同位体組成の変化に伴う線源の質的变化とそれに伴う被ばくの多様化 | 2 |
| 1.4 | 評価対象の拡大，職業人のみから職業人と公衆の両方へ | 3 |
| 1.5 | 評価対象とする期間の延長 | 4 |
| 1.6 | 本書の目標 | 4 |

2. プルトニウム同位体と生成機構

| | | |
|-------|----------------------------|----|
| 2.1 | Pu の生成機構 | 5 |
| 2.2 | 同位体の種類 | 6 |
| 2.3 | 超ウラン核種の中での Pu の位置 | 7 |
| 2.4 | 炉型起源によるプルトニウム同位体組成の変化 | 9 |
| 2.5 | プルトニウム同位体とその娘核の健康影響評価上での意義 | 9 |
| 2.5.1 | 同位体の比放射能とその健康影響上での意義 | 9 |
| 2.5.2 | リサイクルプルトニウムの比放射能の時間的变化 | 10 |
| 2.6 | 同位体組成の健康影響における問題点 | 11 |
| 2.6.1 | 同位体別の預託線量寄与率 | 11 |
| 2.6.2 | 同位体の LX 線放出率の変化と計測の精度への影響 | 12 |
| 2.6.3 | 比放射能の増大に伴う問題点 | 12 |
| 2.6.4 | 取扱いに伴う外部被ばくにおける問題 | 13 |
| 2.7 | 同位体別の用途，特徴 | 14 |
| 2.7.1 | ^{236}Pu | 14 |
| 2.7.2 | ^{238}Pu | 14 |
| 2.7.3 | ^{239}Pu | 14 |
| 2.7.4 | ^{240}Pu | 15 |
| 2.7.5 | ^{241}Pu | 15 |
| 2.7.6 | ^{242}Pu | 15 |

3. プルトニウムの存在形式

| | | |
|-------|----------------------------------|----|
| 3.1 | 化合物としての形態 | 17 |
| 3.2 | 燃料組成という存在形式 | 17 |
| 3.3 | プルトニウム核燃料の製造過程での存在形式 | 18 |
| 3.4 | 核燃料プルトニウムの同位体組成 | 19 |
| 3.5 | プルトニウム同位体混在の安全評価上での意味 | 19 |
| 3.5.1 | 比放射能の上昇 | 19 |
| 3.5.2 | γ 線放射比率の上昇 | 20 |
| 3.5.3 | 健康影響に関連するプルトニウム計測への影響 | 21 |
| 3.6 | 回収ウランと Pu | 21 |
| 3.7 | 燃料電池としての ^{238}Pu の存在形式 | 21 |
| 3.8 | Pu の粒子性 | 22 |

4. 原子力施設でのプルトニウム

| | | |
|-------|------------------|----|
| 4.1 | 原子炉における Pu | 25 |
| 4.2 | 再処理施設における Pu | 27 |
| 4.3 | 燃料加工施設における Pu | 29 |
| 4.4 | 廃棄物処理処分施設における Pu | 31 |
| 4.4.1 | 低レベル廃棄物埋設施設 | 31 |
| 4.4.2 | 高レベル廃棄物処理処分施設 | 33 |
| 4.5 | 使用施設における Pu | 33 |
| 4.6 | 廃炉処分と Pu | 34 |
| 4.7 | TRU 消滅処理処理と Pu | 35 |
| 4.8 | 核兵器プルトニウムの処理処分問題 | 35 |
| 4.9 | ウラン濃縮関連施設と Pu | 36 |

5. プルトニウムの物理的性質

| | | |
|-------|---------------------|----|
| 5.1 | 核分裂特性 | 37 |
| 5.2 | 核反応特性 | 38 |
| 5.3 | 金属プルトニウムの物性 | 38 |
| 5.4 | プルトニウム化合物の物性 | 38 |
| 5.5 | プルトニウム関連の核燃料の物性 | 39 |
| 5.6 | Pu の安全性に関連性の深い物質の物性 | 39 |
| 5.6.1 | 金属ナトリウム | 39 |

| | |
|---------------------------------|----|
| 5.6.2 Zr (ジルコニウム)..... | 40 |
| 5.6.3 Gd (ガドリニウム), B (ほう素)..... | 40 |
| 5.6.4 ドデカンと TBP | 40 |

6. プルトニウムの化学的性質

| | |
|---|----|
| 6.1 元素としての Pu | 43 |
| 6.2 生成起源：核反応..... | 44 |
| 6.3 存在形式..... | 44 |
| 6.4 代表的な Pu の同位体..... | 45 |
| 6.5 原子価 | 46 |
| 6.6 溶解度 | 46 |
| 6.7 重要な溶液の種類..... | 46 |
| 6.7.1 硝酸溶液 | 46 |
| 6.7.2 クエン酸溶液 | 47 |
| 6.7.3 TBP ドデカン溶液 | 47 |
| 6.8 重合性 | 47 |
| 6.9 安定度定数..... | 48 |
| 6.10 Pu の重要な存在形態としての PuO ₂ と金属プルトニウム | 48 |
| 6.11 Pu の安全性に関連する重要化学物質 | 49 |
| 6.11.1 ドデカン+TBP | 49 |
| 6.11.2 キレート剤 | 50 |
| 6.11.3 液体ナトリウム | 51 |
| 6.11.4 Gd (ガドリニウム) | 52 |

7. プルトニウムの放射線特性

| | |
|---|----|
| 7.1 崩壊形式 | 54 |
| 7.2 Pu の放射線放出特性 | 54 |
| 7.2.1 α 線放出特性 | 54 |
| 7.2.2 β 線放出特性 | 54 |
| 7.2.3 γ 線放出特性 | 55 |
| 7.2.4 LX 線放出特性 | 55 |
| 7.2.5 自発中性子特性 | 56 |
| 7.2.6 ($\alpha \cdot n$) 核反応特性 | 57 |
| 7.2.7 核分裂特性と核分裂中性子エネルギー | 57 |
| 7.2.8 ($\alpha \cdot n$) 核反応による中性子エネルギー | 58 |

| | |
|----------------------------------|----|
| 7.3 Pu の計測の基礎 | 58 |
| 7.3.1 α 線計測法 | 58 |
| 7.3.2 α , β 線同時計測法 | 60 |
| 7.3.3 LX線, γ 線計測法：体外計測 | 63 |
| 7.4 臨界特性 | 65 |
| 7.5 中性子吸収特性 | 66 |
| 7.6 プルトニウム α 線の生物効果の物理的基礎 | 66 |

8. プルトニウムの人体摂取経路

| | |
|----------|----|
| 8.1 経皮吸収 | 71 |
| 8.2 創傷侵入 | 72 |
| 8.3 経口摂取 | 73 |
| 8.4 吸入摂取 | 73 |
| 8.5 静脈投与 | 77 |

9. プルトニウムの体内挙動

| | |
|---------------------------------|----|
| 9.1 経皮吸収率 | 79 |
| 9.2 消化管吸収率 (f_i) | 80 |
| 9.2.1 化学的形態の影響 | 81 |
| 9.2.2 Pu の質量効果 | 81 |
| 9.2.3 有機結合型プルトニウムの吸収率 | 83 |
| 9.2.4 年齢による変動 | 83 |
| 9.2.5 絶食の影響 | 83 |
| 9.2.6 消化管吸収率の動物種差 | 84 |
| 9.3 血液からの組織移行 | 84 |
| 9.4 血清蛋白との結合 | 85 |
| 9.4.1 トランスフェリンとの結合 | 85 |
| 9.4.2 肝臓でのフェリチンとの結合 | 85 |
| 9.4.3 骨の蛋白 (シアロプロテイン) との結合 | 87 |
| 9.4.4 骨での Pu の微細分布の形式 | 87 |
| 9.5 吸入摂取の Pu の代謝 | 88 |
| 9.5.1 呼吸気道の解剖学的分類 | 88 |
| 9.5.2 ET ₁ 領域での粒子の挙動 | 89 |
| 9.5.3 ET ₂ 領域での粒子の挙動 | 89 |
| 9.5.4 BB 領域での粒子の沈着 | 89 |

| | |
|--------------------------------|----|
| 9.5.5 bb 領域での粒子の挙動 | 89 |
| 9.5.6 AI 領域での粒子の挙動 | 89 |
| 9.5.7 初期肺沈着率 | 91 |
| 9.5.8 沈着プルトニウムの転移 | 91 |
| 9.6 全身滞留率 | 92 |
| 9.7 臓器分配率 | 92 |
| 9.8 骨蛋白との結合 | 93 |
| 9.9 臓器間転移 (肺→肝→骨, 肺→リンパ節) | 94 |
| 9.10 胎児移行 | 94 |
| 9.11 生殖腺への移行 | 95 |
| 9.11.1 生殖腺への移行率 | 95 |
| 9.11.2 生殖腺内部での分布の形式 | 97 |
| 9.11.3 線量評価の困難性 | 97 |
| 9.12 排泄経路 | 97 |
| 9.12.1 粘液繊毛運動による排泄 | 97 |
| 9.12.2 胆汁排泄 | 98 |
| 9.12.3 糞中排泄 | 98 |
| 9.12.4 尿中排泄 | 98 |
| 9.13 Pu の体内挙動に及ぼす諸要因 | 98 |
| 9.13.1 年齢 | 98 |
| 9.13.2 摂取量 | 98 |
| 9.13.3 化学物質, DTPA, TBP, Cl イオン | 99 |
| 9.13.4 Pu-Na 複合体 | 99 |
| 9.13.5 動物種差 | 99 |
| 9.13.6 プルトニウム酸化物の焼結温度 | 99 |

10. 化学毒性と放射線毒性

| | |
|------------------------------|-----|
| 10.1 化学物質の化学毒性の発現レベルと発現時期 | 103 |
| 10.2 放射性核種の重量とは, 核種の半減期と比放射能 | 103 |
| 10.3 化学毒性と放射線毒性との対比 | 104 |
| 10.4 ウラン毒性との比較 | 104 |
| 10.5 Th (トリウム) の毒性 | 105 |
| 10.6 超ウラン元素の毒性 | 105 |
| 10.7 既知の一般毒物との比較 | 106 |
| 10.8 毒性発現の時期に関する考察 | 107 |
| 10.9 比放射能と化学毒性との関連 | 108 |

| | |
|---|-----|
| 10.10 共存物質の化学毒性 | 108 |
| 11. 摂取経路と生物影響 | |
| 11.1 プルトニウム実験投与による急性効果 | 109 |
| 11.1.1 致死効果 (LD ₅₀) | 109 |
| 11.2 経口摂取と生物影響 | 110 |
| 11.3 実験投与としての静脈注射と生物影響 | 111 |
| 11.3.1 注射投与の場合の骨肉腫 | 111 |
| 11.3.2 Pu による白血病 | 112 |
| 11.3.3 Pu による染色体異常 | 113 |
| 11.4 吸入摂取と生物影響 | 113 |
| 11.4.1 ラットでの吸入実験 | 113 |
| 11.4.2 イヌでの吸入実験 | 115 |
| 11.4.3 プルトニウム吸入による肺がんの誘発と肺がんの組織形の種差 | 118 |
| 11.4.4 イヌでの硝酸プルトニウムの吸入の影響 | 118 |
| 11.4.5 Pu による肝腫瘍の誘発, Am との比較 | 119 |
| 11.4.6 粒子状プルトニウムの生物影響 | 119 |
| 11.5 吸入被ばくによる人体での肺がん | 121 |
| 11.6 創傷侵入と生物影響 | 121 |
| 11.7 生物作用を修飾する要因 | 121 |
| 11.7.1 体内挙動における年齢差 | 122 |
| 11.7.2 感受性の年齢差 | 122 |
| 11.7.3 感受性の性差 | 122 |
| 12. 安全評価上の関連共存核種と生成機構 | |
| 12.1 重要共存核種の存在の安全評価上の意義 | 125 |
| 12.2 共存核種の生成機構 | 125 |
| 12.3 共存核種の存在比率 | 126 |
| 12.4 検出系への影響 | 127 |
| 12.4.1 検出器がエネルギー弁別不能である例 | 127 |
| 12.4.2 外部計測における問題 | 127 |
| 12.5 生物影響という点での競合 | 128 |
| 12.5.1 比放射能の増大 | 128 |
| 12.5.2 ²⁴¹ Am の生成による γ 放射体化 | 128 |
| 12.5.3 連鎖崩壊娘核種による γ 放射線 | 129 |

| | |
|--|-----|
| 12.5.4 原子炉プルトニウムの時間経過による変化 | 130 |
| 12.5.5 液体金属ナトリウム冷却高速炉における Na と Pu との反応 | 130 |

13. 動物実験結果と人体影響

| | |
|-------------------------------|-----|
| 13.1 動物種差の発現機構 | 133 |
| 13.2 プルトニウム体内挙動の動物種差 | 133 |
| 13.2.1 摂取に関連するもの | 134 |
| 13.2.2 血清蛋白との結合性に関する動物種差 | 134 |
| 13.2.3 血液中からの消失 | 135 |
| 13.2.4 吸入後の肺における滞留の動物種差 | 137 |
| 13.2.5 沈着に関するパラメータの動物種差 | 137 |
| 13.2.6 母体から胎児への移行（胎盤通過）の動物種差 | 140 |
| 13.3 プルトニウム内部被ばくでの放射線感受性の動物種差 | 141 |
| 13.3.1 Pu の晩発性効果に関する動物種差 | 142 |

14. プルトニウム過剰被ばくの人体例

| | |
|--------------------------|-----|
| 14.1 マンハッタンプロジェクト被ばく者集団 | 145 |
| 14.1.1 追跡の経過の報告 | 145 |
| 14.1.2 追跡結果の解釈をめぐる色々な考え方 | 146 |
| 14.2 プルトニウム投与末期がん患者集団 | 147 |
| 14.3 ロッキーフラット火災被ばく者 | 148 |
| 14.4 米国超ウラン元素取扱い作業員国家登録 | 148 |
| 14.5 金属プルトニウム片侵入創傷組織検査例 | 149 |
| 14.6 中国でのプルトニウム過剰被ばく例 | 149 |
| 14.7 プルトニウム被ばく者の肺がん | 150 |

15. プルトニウムの環境への拡散

| | |
|--|-----|
| 15.1 核実験フォールアウト | 154 |
| 15.2 長崎の原爆投下時のフォールアウト | 154 |
| 15.3 衛星打ち上げ失敗による大気圏拡散 | 155 |
| 15.4 核兵器搭載爆撃機の空中衝突事故（Palomares, Spain） | 157 |
| 15.5 核兵器搭載航空機の墜落事故（Tule, Greenland） | 158 |
| 15.6 原子力施設から環境への放出 | 158 |
| 15.6.1 大気放出と地表沈着 | 159 |

| | |
|------------------------------------|-----|
| 15.6.2 Pu の海洋放出と人体への移行 | 160 |
| 15.7 英国ウインズケール再処理施設からのプルトニウム放出 | 160 |
| 15.8 チェルノブイリ原子炉事故からの環境汚染 | 161 |
| 15.9 ソ連南ウラル化学爆発事故 | 161 |
| 15.10 ソ連テチャ河再処理施設放出事故 | 163 |
| 15.11 Pu による人体組織の汚染 | 163 |
| 15.13 核施設周辺の住民の発がんに関する疫学的研究のレビュー結果 | 163 |

16. プルトニウム安全性評価基準

| | |
|----------------------------------|-----|
| 16.1 プルトニウム安全性基準の歴史的変遷 | 165 |
| 16.2 線量限度, 組織荷重係数, 放射線荷重係数 | 166 |
| 16.3 預託線量当量という考え方と Pu における現実の問題点 | 168 |
| 16.4 線量換算係数 | 169 |
| 16.5 年摂取限度 | 171 |
| 16.6 誘導空気中濃度限度 | 172 |
| 16.7 Pu のめやす線量 | 172 |

17. プルトニウムのリスク評価

| | |
|---------------------------------------|-----|
| 17.1 Mays のリスク評価 (ラド当たり) | 175 |
| 17.2 Cohen のリスク評価 (プルトニウムの重量当たり) | 176 |
| 17.3 Dolphin のリスク評価 (単位摂取 Bq 当たり) | 177 |
| 17.4 CEC のリスク評価 (α 線ラド当たり) | 178 |
| 17.5 McClellan のリスク評価 (10^6 ラド当たり) | 178 |
| 17.6 原子炉級プルトニウムのリスク評価についての考案 | 179 |

18. プルトニウムの保健物理

| | |
|---------------------------|-----|
| 18.1 プルトニウム取扱いの問題点 | 181 |
| 18.2 プルトニウム同位体複合の問題 | 181 |
| 18.3 プルトニウム取扱いに伴う外部被ばくの問題 | 182 |
| 18.3.1 Pu と中性子被ばく | 182 |
| 18.3.2 核分裂中性子による被ばく | 182 |
| 18.3.3 自発中性子による被ばく | 182 |
| 18.3.4 核反応中性子による被ばく | 182 |
| 18.4 プルトニウム内部被ばくの防止の具体的方法 | 183 |

| | | |
|---------|-------------------------------|-----|
| 18.4.1 | 施設の機密構造 | 183 |
| 18.4.2 | 差圧維持, 作業室, セルおよびグローブボックス (GB) | 184 |
| 18.4.3 | 換気回数, 排気フィルタ | 184 |
| 18.4.4 | 閉じこめ, セル, GB, フード | 184 |
| 18.5 | 作業環境のモニタリング | 184 |
| 18.5.1 | エアスニフャーシステム | 184 |
| 18.5.2 | 連続空気モニタリング | 185 |
| 18.5.3 | 表面汚染検査 | 185 |
| 18.6 | 個人被ばく量のモニタリング | 185 |
| 18.6.1 | 個人サンプラ | 185 |
| 18.6.2 | 個人線量計 | 185 |
| 18.6.3 | 平常時バイオアッセイ | 185 |
| 18.7 | 事故被ばくの評価の方法 | 187 |
| 18.7.1 | 環境のモニタリング値から | 187 |
| 18.7.2 | 衣服の汚染モニタリング | 187 |
| 18.7.3 | バイオアッセイから | 187 |
| 18.7.4 | 肺モニタリングから | 187 |
| 18.8 | 線量被ばく線量計算モデル | 189 |
| 18.8.1 | ICRP Publ. 30 の被ばく線量計算モデル | 189 |
| 18.9 | 被ばく線量評価に用いられる概念, 指標そして基準 | 190 |
| 18.9.1 | 線量限度, 組織荷重係数, 放射線荷重係数 | 190 |
| 18.9.2 | 預託線量当量という考え方の導入 | 191 |
| 18.9.3 | 年摂取限度 | 191 |
| 18.9.4 | 誘導空気中濃度 | 191 |
| 18.10 | 皮膚表面汚染の評価 | 192 |
| 18.11 | 創傷侵入の評価: 傷モニタリング | 192 |
| 18.12 | 吸入摂取の評価 | 193 |
| 18.12.1 | 空気汚染のモニタリング | 193 |
| 18.12.2 | 鼻スミア | 193 |
| 18.12.3 | 尿分析 | 193 |
| 18.12.4 | 糞分析 | 194 |
| 18.13 | 人体事故後の処理 | 194 |
| 18.13.1 | キレート剤治療 | 195 |
| 18.13.2 | 手術的切除 | 195 |
| 18.13.3 | 肺洗浄 | 196 |
| 18.13.4 | プルトニウム-ナトリウム複合体エアロゾルの吸入 | 196 |
| 18.14 | Pu の輸送に関連する問題 | 196 |

| | | |
|---------|----------------|-----|
| 18.14.1 | 輸送容器の安全性 | 199 |
| 18.14.2 | Pu の輸送容器 | 199 |
| 18.14.3 | 輸送方法の問題点 | 200 |
| 18.14.4 | 輸送事故のリスク評価 | 200 |
| 18.14.5 | プルトニウム海上輸送の安全性 | 200 |

19. プルトニウムの核防護と核拡散防止

| | | |
|--------|----------------|-----|
| 19.1 | 核防護の上での区分 | 203 |
| 19.2 | 核物質の臨界量と臨界条件 | 205 |
| 19.3 | 臨界防止の具体的手段 | 205 |
| 19.4 | 核拡散の防止の考え方 | 207 |
| 19.4.1 | 技術的対策 | 207 |
| 19.4.2 | IAEA 国際査察と保障措置 | 208 |
| 19.4.3 | 法制的規制 | 209 |
| 19.4.4 | 警備 | 209 |

20. 環境汚染のリスク評価

| | | |
|--------|-----------------|-----|
| 20.1 | 環境汚染リスク評価の問題点 | 211 |
| 20.1.1 | 移行の形式 | 211 |
| 20.1.2 | 移行の経路のモデル化 | 211 |
| 20.1.3 | 移行の指標（移行係数）と問題点 | 212 |
| 20.1.4 | 再浮遊率 | 213 |
| 20.2 | 食物連鎖関連性 | 214 |
| 20.2.1 | 食物連鎖関連性の指標 | 214 |
| 20.2.2 | 牛乳への移行係数 | 216 |
| 20.2.3 | 畜産物への移行係数 | 217 |
| 20.2.4 | 米への移行係数 | 217 |
| 20.2.5 | 核種の移行率の修飾要因 | 217 |
| 20.2.6 | 生物濃縮係数 | 217 |
| 20.3 | 決定グループ | 218 |
| 20.3.1 | 決定グループの選定の方法 | 218 |
| 20.3.2 | 決定グループの利用 | 218 |
| 20.4 | 環境からの被ばく線量評価の例 | 219 |

21. プルトニウムに関連する安全審査の仕組み

| | |
|---|-----|
| 21.1 安全審査の法的根拠 | 221 |
| 21.2 施設の法的分類 | 221 |
| 21.2.1 原子炉 | 221 |
| 21.2.2 再処理施設 | 221 |
| 21.2.3 濃縮施設 | 221 |
| 21.2.4 燃料加工施設 | 222 |
| 21.2.5 使用施設 | 222 |
| 21.2.6 廃棄物処理施設 | 222 |
| 21.3 安全審査の組織体制 | 222 |
| 21.3.1 原子力安全委員会 | 222 |
| 21.3.2 安全技術顧問会 | 222 |
| 21.3.3 核燃料安全審査会 | 223 |
| 21.4 安全審査指針 | 223 |
| 21.4.1 プルトニウムを燃料とする原子炉の立地評価上必要なプルトニウムのめやす線量について | 224 |
| 21.4.2 核燃料施設の立地審査上必要なプルトニウムのめやす線量について | 224 |
| 21.4.3 核燃料施設安全審査基本指針 | 224 |
| 21.4.4 再処理施設安全審査指針 | 224 |
| 21.4.5 放射性廃棄物埋設施設の安全審査の基本的考え方 | 224 |
| 21.4.6 放射性廃棄物管理施設の安全性評価の考え方 | 225 |
| 21.5 安全審査に当たり主務大臣に提出される書類と審査結果 | 225 |
| 21.5.1 施設の許可申請書 | 225 |
| 21.5.2 安全審査書 | 225 |

22. プルトニウムの安全性に関連する重要な批判と反論

| | |
|----------------------------|-----|
| 22.1 Tamplin のホットパーティクル提案 | 227 |
| 22.2.1 タンプリン提案の内容 | 227 |
| 22.2.2 タンプリン提案に対する反論 | 228 |
| 22.2 Morgan のプルトニウム許容量低減提案 | 228 |
| 22.3 Goffman の発がんリスク | 229 |

23. プルトニウムの内部被ばくに関する研究組織

.....231

付録1 プルトニウム内部被ばく関連のICRP出版物.....233

付録2 プルトニウムに関する参考書および重要文献.....235

