

2.1 ไอโซโทปต่าง ๆ ของพลูโทเนียม

ไอโซโทปของพลูโทเนียมมีทั้งหมด 15 ไอโซโทปด้วยกันคือ พลูโทเนียม -232, -233, -234, -235, -236, -237, -238, -239, -240, -241, -242, -243, -244, -245 และ -246 ไอโซโทปต่าง ๆ เหล่านี้มิได้เกิดขึ้นเองและไม่มีอยู่ตามธรรมชาติ แต่เกิดจากการสลายอนุภาคแอลฟา นิวตรอน หรือโปรตอนโดยยูเรเนียมทำให้เกิด ไอโซโทปต่าง ๆ ของพลูโทเนียมขึ้นมา (17,18) ได้รอบเรียงการเกิดไอโซโทปต่าง ๆ ของพลูโทเนียม รวมทั้งคุณสมบัติของแต่ละไอโซโทปไว้ดังรายละเอียดต่อไปนี้

2.1.1 พลูโทเนียม -232

เกิดมาจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ $^{235}\text{U}(n, 5n) \rightarrow ^{232}\text{Pu}$ และ $^{235}\text{U}(n, 7n) \rightarrow ^{232}\text{Pu}$ (2) มีครึ่งชีวิตสั้นประมาณ 36 นาที (17) สลายตัวให้อนุภาคแอลฟาที่มีพลังงาน 6.59 MeV 2 เปอร์เซ็นต์ และสลายตัวโดย electron capture (E.C.) 98 เปอร์เซ็นต์ ผลผลิตของไอโซโทปที่ได้จากการสลายตัวแบบ E.C. ได้แก่เนปทูเนียม -232 (ครึ่งชีวิต 13 นาที) ยูเรเนียม -232 (ครึ่งชีวิต 72.0 ปี) ยูเรเนียม -228 (ครึ่งชีวิต 91 นาที) ทอเรียม -232 (ครึ่งชีวิต 1.05 พันล้านปี) (18) และไอโซโทปอื่น ๆ อีกหลายตัว เนื่องจากพลูโทเนียม -232 สลายตัวกลายเป็นตัวแบบ E.C. จึงมีรังสีที่ได้จากการสลายตัวของพลูโทเนียม -232 จึงมีรังสีแอลฟาและอนุภาคแอลฟาที่เกิดจากการสลายตัวของไอโซโทปต่าง ๆ ดังกล่าวแล้วนั้นด้วย



2.1.2 พลูโทเนียม -233

เกิดมาจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ $^{233}\text{U}(\alpha, 3n)^{233}\text{Pu}$ (2) มีครึ่งชีวิต 20 นาที⁽¹⁷⁾ สลายตัวให้อนุภาคแอลฟาเพียง 0.1 เปอร์เซ็นต์ และสลายตัวโดย E.C. 99 เปอร์เซ็นต์ ให้ผลิตภัณฑ์ต่อเนื่องเช่น เนปทูเนียม -233 (ครึ่งชีวิต 35 นาที) ยูเรเนียม -233 (ครึ่งชีวิต 1.9×10^6 ปี) ทอเรียม -229 (ครึ่งชีวิต 7,430 ปี)⁽¹⁸⁾ ฯลฯ ผลผลิตจากการสลายตัวของพลูโทเนียม -233 จึงมีรังสีเอกซ์และอนุภาคแอลฟาที่เกิดจากการสลายตัวของไอโซโทปต่าง ๆ ดังกล่าวแล้วด้วย

2.1.3 พลูโทเนียม -234

เกิดมาจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ $^{233}\text{U}(\alpha, 3n)^{234}\text{Pu}$ และ $^{235}\text{U}(\alpha, 5n)^{234}\text{Pu}$ (2) มีครึ่งชีวิต 8 ชั่วโมง⁽¹⁷⁾ สลายตัวให้อนุภาคแอลฟาที่มีพลังงาน 6.20 MeV (4%), 5.15 MeV (1.9%) และสลายตัวโดย E.C. 94 เปอร์เซ็นต์ ให้รังสีเอกซ์ของเนปทูเนียม (U-เอกซ์เรย์ และ N-เอกซ์เรย์) ซึ่งให้ผลิตภัณฑ์ต่อเนื่องเช่น เนปทูเนียม -234 (ครึ่งชีวิต 4.4 วัน) ยูเรเนียม -234 (ครึ่งชีวิต 2.47×10^5 ปี) ทอเรียม -230 (ครึ่งชีวิต 3.0×10^4 ปี)⁽¹⁸⁾ ฯลฯ ซึ่งได้จากการสลายตัวของพลูโทเนียม -234 จึงมีรังสีเอกซ์และอนุภาคแอลฟาจากการสลายตัวของไอโซโทปต่าง ๆ เหล่านี้ด้วย

2.1.4 พลูโทเนียม -235

เกิดมาจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ $^{235}\text{U}(\alpha, 2n)^{235}\text{Pu}$ และ $^{235}\text{U}(\alpha, 4n)^{235}\text{Pu}$ (2) มีครึ่งชีวิต 26 นาที⁽¹⁷⁾ สลายตัวให้อนุภาคแอลฟา 5.86 MeV (0.003%) และสลายตัวโดย E.C. 99 เปอร์เซ็นต์ ให้ผลิตภัณฑ์ต่อเนื่องเช่น เนปทูเนียม -235 (ครึ่งชีวิต 410 วัน) ยูเรเนียม -235 (ครึ่งชีวิต 7.1×10^8 ปี) ทอเรียม -231 (ครึ่งชีวิต 25.6 ชั่วโมง)⁽¹⁸⁾ ฯลฯ ผลผลิตจากการสลายตัวของพลูโทเนียม -235 ให้รังสี

เอกซิชของเนปทูเนียม อนุภาคแอลฟา และรังสีเอกซ์ที่เกิดจากการสลายตัวของไอโซโทปต่าง ๆ ดังกล่าวข้างต้นด้วย

2.1.5 พลูโทเนียม -236

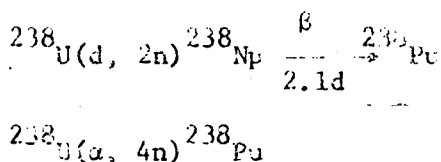
เป็นผลิตภัณฑ์เกิดมาจากการสลายตัวของเนปทูเนียม -236 หรือเกิดมาจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ $^{235}\text{U}(\alpha, 3n)^{236}\text{Pu}$ (2) ครึ่งชีวิต 2.85 ปี⁽¹⁷⁾ สลายตัวให้อนุภาคแอลฟา 5.77 MeV (69%), 5.72 MeV (31%) และให้ L-เอกซเรย์ของยูเรเนียมที่มีพลังงาน 49 KeV (0.81%), 109 KeV (0.012%)

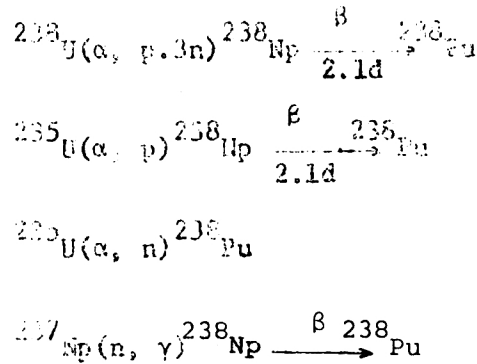
2.1.6 พลูโทเนียม -237

เกิดมาจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ $^{235}\text{U}(\alpha, 2n)^{237}\text{Pu}$ และ $^{237}\text{Np}(d, 2n)^{237}\text{Pu}$ (2) ครึ่งชีวิต 45.6 วัน⁽¹⁷⁾ สลายตัวให้อนุภาคแอลฟา 0.0033 เปอร์เซ็นต์ที่มีพลังงาน 5.25 MeV และสลายตัวโดย β^- 99 เปอร์เซ็นต์ ให้ผลิตภัณฑ์เนื่องเช่น เนปทูเนียม -237 (ครึ่งชีวิต 2.14×10^6 ปี) พลูโทเนียม -233 (ครึ่งชีวิต 27 วัน) ยูเรเนียม -233 (ครึ่งชีวิต 1.62×10^5 ปี)⁽¹⁸⁾ ฯลฯ การสลายตัวของพลูโทเนียม -237 ให้รังสีเอกซ์ของเนปทูเนียม อนุภาคบีตา อนุภาคแอลฟา และรังสีเอกซ์อื่น ๆ จากการสลายตัวของไอโซโทปต่าง ๆ ดังกล่าวด้วย

2.1.7 พลูโทเนียม -238

เกิดจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ไดนิวเคลียสได้แก่



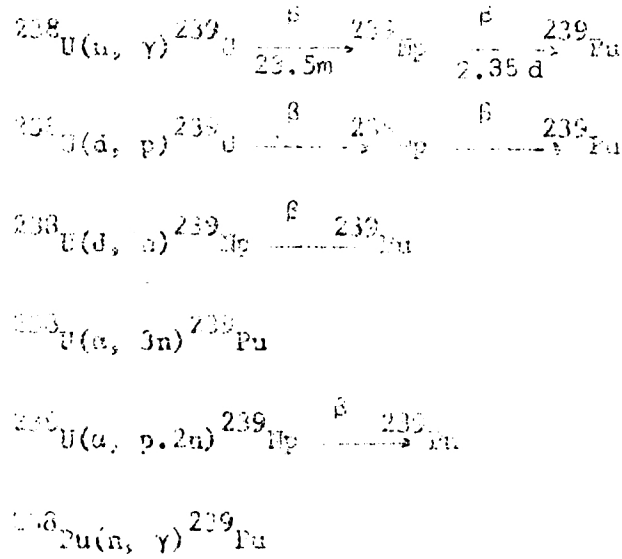


ปฏิกิริยานิวเคลียร์นี้จะ เกิดได้ดีเมื่อตัวเทอรอนมีพลังงานมากกว่าหรือเท่ากับ 20 MeV และสี่เหลี่ยมไอออน (อนุภาคแอลฟา) มีพลังงาน 40 MeV⁽²⁾ พลูโทเนียม -238 มีครึ่งชีวิต 36.4 ปี⁽¹⁷⁾ สลายตัวให้อนุภาคแอลฟาที่มีพลังงาน 5.50 MeV (72%), 5.40 MeV (28%) และให้รังสีแกมมาของยูเรเนียม (L-เอกซ์เรย์)⁽¹⁸⁾ มีอัตราการสลายตัวเอง (spontaneous fission) 5.1×10^6 ฟิสชั่นต่อกรัม-ชั่วโมง⁽²⁾ ใช้ประโยชน์เป็นต้นกำเนิดพลังงานในดาวเทียมพลังงานนิวเคลียร์ หรือใช้เป็นต้นกำเนิดพลังงานไฟฟ้าแบบ thermo-electrical power และยังใช้เป็นต้นกำเนิดพลังงานในการกระตุ้นการทำงานของฮิวโดรเจนไดอิดด้วย⁽¹⁹⁾

พลูโทเนียม -238 นี้ถูกสกัดขึ้นมาเป็นครั้งแรกโดย McMillan, Seaborg และผู้ร่วมงาน⁽²⁾ จากการยิงยูเรเนียมด้วยตัวเทอรอนในเครื่องเร่งอนุภาคไซโคลตรอน พบว่าธาตุที่ผลิตขึ้นมาได้มีคุณสมบัติทางเคมีต่างไปจากธาตุที่ 88-90 ที่มีอยู่ในตารางธาตุเกิดมาจากการสลายตัวของเมทเนียม จึงให้เลขอะตอมของธาตุนี้ค่าเท่ากับ 94 และพบว่าพลูโทเนียม -238 นี้สลายตัวให้อนุภาคแอลฟา

2.1.8 พลูโทเนียม -239

เกิดมาจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ได้หลายปฏิกิริยา ได้แก่



ปฏิกิริยาฟิวชั่นระหว่างยูเรเนียมกับดิวเทอเรียมให้พลังงาน 8 MeV ในเครื่องเร่งอนุภาค และปฏิกิริยาการสลายตัวของพลูโทเนียม -238 มีค่าครึ่งชีวิตสั้น 455 บาร์น⁽²⁶⁾ พลูโทเนียม -239 มีครึ่งชีวิต 24,390 ปี สลายตัวให้อนุภาคแอลฟาที่มีพลังงาน 5.15 MeV (89%), 5.11 MeV (11%) และให้รังสีแกมมาของยูเรเนียม (เ.แกมมาแรง)⁽²⁷⁾ ด้วย มีอัตราการสลายตัวของตนเอง 35 ฟิล์มต่อกรัม-ชั่วโมง⁽²⁸⁾ ใช้ประโยชน์เป็นเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู ใช้เป็นวัสดุกำบังระเบิดหรืออาวุธนิวเคลียร์

McMillan และ Abelson⁽²⁾ พบว่าพลูโทเนียม -239 ซึ่งเกิดจากการสลายตัวของยูเรเนียม -238 มีการสลายตัวให้อนุภาคแอลฟาที่มีพลังงาน 5.4 MeV เป็นพลูโทเนียม -239 Kennedy, Seaborg และผู้ร่วมงานก็พบว่า พลูโทเนียม -239 เป็นผลจากการสลายตัวของเนปทูเนียม -239 จากการยิงยูเรเนียมโลหะ 1 กิโลกรัมด้วยนิวตรอนจากเครื่องเร่งอนุภาคไซโคลตรอนขนาด 50 นิ้ว และสามารถแยกพลูโทเนียม -239 ได้ 0.5 ไมโครกรัม และพบว่าไอโซโทปที่สลายแตกตัวได้ (fission) เมื่อถูกยิงด้วยนิวตรอน มีค่าครึ่งชีวิตสั้น 741 บาร์น ซึ่งมากกว่ายูเรเนียม -235 ด้วย

พลาสมาเดิม -239 เป็นเชื้อไวรัสโคโรนาที่ปรากฏในธรรมชาติเป็นปริมาณเล็กน้อยในเซลล์สัตว์ (vertebrate) ร่วมกับยูเรียและโปรตีนจากการที่ยูเรเนียม -239 สอดคล้องมาจากกระบวนการฟิชชันของยูเรเนียมหรือฉนวนรังสีจาก ก๊าซจากปฏิกิริยา (α, n) ที่ต่อเนื่องจากเซลล์จากการศึกษาวิจัยของยูเรเนียมร่วมกับเชื้อไวรัสที่มีลักษณะต่อตัว เช่น แบคทีเรีย และสัตว์ ได้ทดลองหาปริมาณของไวรัสที่ปล่อยจากยูเรเนียมในธรรมชาติต่าง ๆ ซึ่งได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.1.8.1

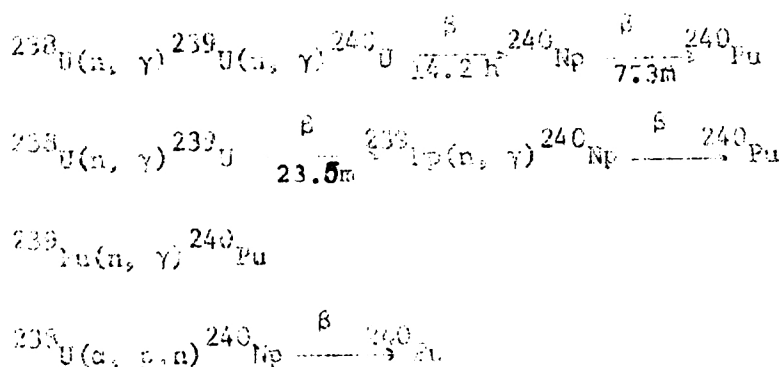
ตารางที่ 2.1.8.1 ปริมาณไวรัสโคโรนา ที่มีที่พบในธรรมชาติ⁽²⁾

ชนิดเชื้อ	ปริมาณยูเรเนียม (%)	พลาสมาเดิม -239/แตร	พลาสมาเดิม -239/ยูเรเนียม
โคโรนาไวรัส (การเพาะ)	13.5	8.1×10^{-13}	7.1×10^{-12}
โคโรนาไวรัส (เซลล์สัตว์ ก่อเชื้อ)	38	8.7×10^{-12}	12×10^{-12}
โคโรนาไวรัส (โคโรนาไวรัส)	50	3.8×10^{-12}	7.7×10^{-12}
โอมิครอนไวรัส (เซลล์สัตว์)	0.24	2.1×10^{-14}	8.3×10^{-12}
โอมิครอนไวรัส (โคโรนาไวรัสเพาะ)	1.64	5.9×10^{-14}	3.6×10^{-12}
เฟอรูซิโอไวรัส (โคโรนาไวรัส)	0.25	$< 1 \times 10^{-14}$	$< 4 \times 10^{-12}$
กาโรนาไวรัส (โคโรนาไวรัส)	10	$< 4 \times 10^{-14}$	$< 0.4 \times 10^{-12}$

จากตารางที่ 2.1.8.1 นี้จะเห็นว่า พลาสมาเดิมในแร่คาร์บอนไดออกไซด์และเฟอรูซิโอไวรัส มีปริมาณต่ำกว่าหลายล้านเท่าในแง่ของปริมาณต่อตัว

2.1.9 พลูโทเนียม -240

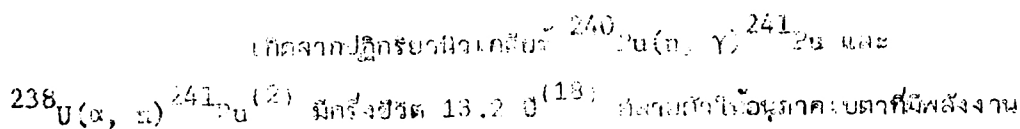
เกิดจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่ได้ทางปฏิกิริยาแตก โดยเกิดร่วมในปฏิกิริยาการยิงจากยูเรเนียมและตัวกลางตรงหน้าในการผลิตพลูโทเนียม -239 หรือในเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ยูเรเนียมเป็นเชื้อเพลิง ดังสมการ



ถ้าสมมติว่าไอโซโทปที่มีพลังงาน 40 MeV⁽¹⁷⁾ พลูโทเนียม -240 มีครึ่งชีวิต 6,500 ปี (17) สลายตัวโดยปลดปล่อยพลังงาน 5.17 MeV (73%), 5.19 MeV (24%) ผลผลิตต่อไอโซโทปการสลายตัวใหญ่เรเดียม -238 (ครึ่งชีวิต 2.39x10⁷ ปี) หรือรังสี -232 (ครึ่งชีวิต 1.41x10¹⁰ ปี) ฯลฯ และยังคงแผ่รังสีให้ N-เอกซิมป์ของยูเรเนียมที่กักเก็บ

เนื่องจากพลูโทเนียม -239, 240 สลายตัวหรือถูกแตกโดยตัวที่มีพลังงานใกล้เคียงกันคือ 5.10 (88%), 5.11 (11%) และ 5.17 (73%), 5.19 (24%) MeV ตามลำดับ ดังนั้นในตัวอย่างที่ใช้พลูโทเนียม -239 และพลูโทเนียม -240 เป็นกันอยู่จะไม่สามารถแยกตัวพลังงานของไอโซโทปทั้งสองออกจากกันด้วยเครื่องอนุภาคสเปกโตรมิเตอร์

2.1.10 พลูโทเนียม -241



0.021 MeV (99%), และให้อนุภาคแอลฟาที่มีพลังงาน 4.90 MeV (0.0019%), 4.85 MeV (0.0007%) เกิดผลต่อเนื่องจากการสลายตัวของไอโซโทปกัมมาของทริโทเนียม -241 ให้อเมริเชียม -241 (ครึ่งชีวิต 458 ปี) ซึ่งสลายตัวให้อนุภาคแอลฟาที่มีพลังงาน 5.45 MeV (85%), 5.44 MeV (13%) นอกจากนี้ทริโทเนียม -241 ยังให้รังสีเอกซ์ของยูเรเนียมด้วย

ทริโทเนียม -241 เป็นวัสดุที่แตกตัวได้ (fissile material) เมื่อถูกยิงด้วยเทอร์โมนิวตรอน มีค่าการสลายตัว 950 บาร์น⁽²⁾

2.1.11 ทริโทเนียม -242

เกิดมาจากปฏิกิริยานิวเคลียร์จากการสลายนิวตรอนมากกว่าหนึ่งตัวของยูเรเนียม -238 และทริโทเนียม -239 และเป็นผลิตภัณฑ์ต่อเนื่องมาจากการสลายตัวแบบ E.C. ของอะเมริเชียม -242 มีครึ่งชีวิต 3.79×10^5 ปี สลายตัวให้อนุภาคแอลฟาที่มีพลังงาน 4.90 MeV (76%), 4.86 MeV (24%) และให้ L-เอกซ์เรย์ของยูเรเนียมด้วย^(2,17)

2.1.12 ทริโทเนียม -243

เกิดมาจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ $^{238}\text{Pu} \xrightarrow{\beta^-} \text{Am}^{243} \xrightarrow{\beta^-} \text{Pu}^{243}$ (2) มีครึ่งชีวิต 4.98 ชั่วโมง⁽¹⁷⁾ สลายตัวให้อนุภาคเบตา 0.58 MeV ให้ผลิตภัณฑ์ต่อเนื่องเป็นอะเมริเชียม -243 (ครึ่งชีวิต 7.95×10^3 ปี) ซึ่งสลายตัวให้อนุภาคแอลฟาที่มีพลังงาน 5.26 MeV (87%), 5.23 MeV (11.5%) นอกจากนี้ทริโทเนียม -243 ยังให้ L-เอกซ์เรย์ของอะเมริเชียมด้วย

2.1.13 พลูโทเนียม -244

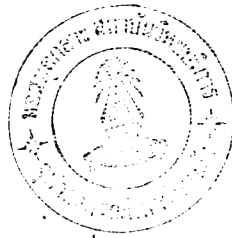
เกิดมาจากปฏิกิริยา (n, γ) โดปการสับนิวตรอนหลายตัวของ ยูเรเนียม -238 และพลูโทเนียม -239 ในเครื่องปฏิกรณ์ที่ มีครึ่งชีวิต 7.6×10^7 ปี⁽¹⁷⁾ สลายตัวให้อนุภาคเบตาที่มีพลังงาน 4.58 MeV ให้รังสีของผลิตภัณฑ์ต่อเนื่อง ยูเรเนียม -240 (ครึ่งชีวิต 14.3 ชั่วโมง) เนปทูนียม -240 (ครึ่งชีวิต 65 นาที) พลูโทเนียม -240 (ครึ่งชีวิต 6,580 ปี) ฯลฯ

2.1.14 พลูโทเนียม -245

เกิดมาจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ $^{244}\text{Pu}(n, \gamma)^{245}\text{Pu}$ ⁽²⁾ และจาก ปฏิกิริยาการสับนิวตรอนหลายตัวของยูเรเนียม -238 และพลูโทเนียม -239 ในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ มีครึ่งชีวิต 10.1 ชั่วโมง สลายตัวให้อนุภาคเบตา ให้ผลิตภัณฑ์ต่อเนื่องเป็น อะเมริเซียม -245 (ครึ่งชีวิต 2.07 ชั่วโมง) และรังสีส่วนใหญ่ที่แผ่ออกมาก็เป็นของ อะเมริเซียม -245 ซึ่งสลายตัวให้อนุภาคเบตาที่มีพลังงาน 0.91 MeV ให้ผลิตภัณฑ์ต่อเนื่อง เป็นคูเรียม -245 (ครึ่งชีวิต 9.3×10^3 ปี) และให้รังสีเอกซ์ของคูเรียม

2.1.15 พลูโทเนียม -246

เกิดมาจากปฏิกิริยาการสับนิวตรอนหลายตัวของยูเรเนียม -238 มีครึ่งชีวิต 10.95 วัน⁽¹⁷⁾ สลายตัวให้อนุภาคเบตาที่มีพลังงาน 0.33 MeV (10%) และ 0.55 MeV ให้ผลิตภัณฑ์เป็นอะเมริเซียม -246 (ครึ่งชีวิต 25.0 นาที) สลายตัวให้อนุภาคเบตาที่มีพลังงาน 2.10 MeV ให้ผลิตภัณฑ์ต่อเนื่อง เป็นคูเรียม -246 (ครึ่งชีวิต 5.5×10^3 ปี) และรังสีที่ได้จากผลิตภัณฑ์ต่อเนื่องนี้ก็คือรังสีเอกซ์ของอะเมริเซียม อนุภาคเบตาและรังสีเอกซ์ของคูเรียมจากการสลายตัวของอะเมริเซียม -246



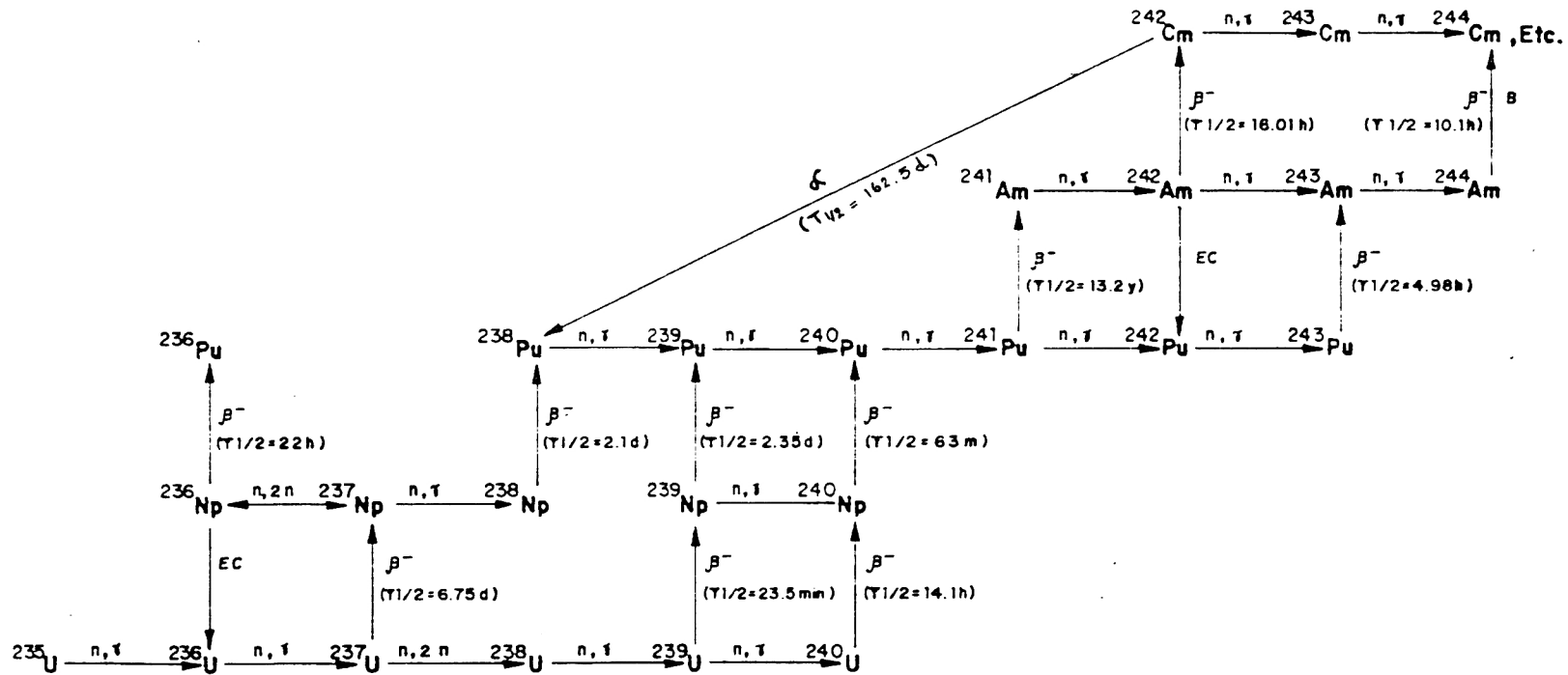
การเก็บหลักฐานฝอยไมโอโบริกต่าง ๆ ที่เกิดจากการสับผดรองของยูเรเนียมและ
พวกรูปแบบที่ไม่ได้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ โดโดของไวโอมิงตามรูปที่ 2.1.11
และตารางที่ 2.1.1 เป็นการรวบรวมการสลายตัวของพวกรูป ฝอยไมโอโบริกต่าง ๆ

2.2 คุณสมบัติทางฟิสิกส์และทางเคมี

โลหะพวกรูป ฝอยมีสีขาวคล้ายเงิน ถูกออกซิไดซ์ง่ายเมื่อถูกกับอากาศ และมี
คุณสมบัติเป็น pyrophoric^(1,20) โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเป็นผงละเอียดหรืออยู่ในรูปของ
คาร์ไบด์ ดังนั้นจึงมักเก็บโลหะพวกรูปฝอยในบรรยากาศของก๊าซเฉื่อย (inert atmos-
phere) เช่น อาร์กอน ไนโตรเจน ที่อุณหภูมิห้องมีความหนาแน่น 19.8 กรัมต่อ ลบ.ซม. มี
จุดหลอมเหลวที่ 640 °C โลหะพวกรูป ฝอยมีปรากฏอยู่ 6 โครงสร้าง มี 4 โครงสร้างที่มี
คุณสมบัติปกติคือขยายตัวเมื่อร้อนและหดตัวเมื่อเย็น 2 โครงสร้างเกิดที่อุณหภูมิ 310 °C-
452 °C และ 452 °C-480 °C จะหดตัวเมื่อร้อนและขยายตัวเมื่อเย็น ที่อุณหภูมิที่มีความหนา
แน่นเป็น 16 กรัมต่อ ลบ.ซม. มีการนำไฟฟ้าและความร้อนต่ำเมื่อเทียบกับโลหะอื่น

โลหะพวกรูป ฝอยละลายได้ง่ายในกรดเกลือเข้มข้น กรดเปอร์คลอริก 72% และ
กรดฟอสฟอริก 85% หรือในสารละลายกรดไตรคลอโรอะซิติก (trichloroacetic acid)
ทำปฏิกิริยาอย่างช้า ๆ กับน้ำที่อุณหภูมิห้อง ไม่ทำปฏิกิริยากับสารละลายเข้มข้น (conc.
aqueous) หรือไฮดรอกไซด์ และไม่ทำปฏิกิริยากับกรดไนตริก

พวกรูป ฝอยเมื่อออกซิไดซ์ในลำดับที่ 2, 3, 4, 5 และ 6 มีสารประกอบมากมาย
เกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับแอมโมเนีย เกิดเป็นแอมโมเนียมเฮกซะฟลูออโรออสไมต์และ
สารอื่นที่มีไนโตรเจน และบางออกไซด์ขั้นสูงเกิดเป็นโพลีเมอร์ที่ง่าย



รูปที่ 2.1.1 แผนภูมิของไอโซโทปรังสีที่เกิดจากการจับนิวตรอน ของยูเรเนียม-พลูโทเนียม (2)

ตารางที่ 2.1.1 การสลายตัวของไอโซโทปฟลูออโรเนียม (26)

Isotope and mode of formation	Radiation	Yield (%)	Energy (MeV)	Half-life	Specific activity (Ci/g)	Spontaneous fission (SF) neutrons ($\text{g}^{-1}\text{s}^{-1}$)
^{232}Pu	Alpha	2	6.58	36 min	2.25×10^7	
$^{233}\text{U}(\alpha, 5n)$	EC	98	-			
$^{236}\text{U}(\alpha, 7n)$	Also daughter of ^{232}Pu , ^{238}U , etc.					
^{233}Pu	Alpha	0.1	6.31	20 min	4.03×10^7	
$^{233}\text{U}(\alpha, 4n)$	EC	99				
	Also daughter of ^{233}Pu , ^{229}U , ^{225}Th , etc.					
^{234}Pu	Alpha	4.0	6.2	9 h	1.49×10^6	
$^{233}\text{U}(\alpha, 3n)$		1.9	6.15			
$^{235}\text{U}(\alpha, 5n)$	EC	94	-			
	Pu X-rays Also daughter of ^{234}Pu , ^{230}U , etc.					
^{235}Pu	Alpha	3×10^{-3}	5.86	26 min	3.03×10^7	
$^{235}\text{U}(\alpha, 4n)$	EC	> 99				
$^{233}\text{U}(\alpha, 2n)$	Pu X-rays					

ตารางที่ 2.1.1 (ต่อ)

Isotope and mode of formation	Radiation	Yield (%)	Energy (MeV)	Half-life	Specific activity (Ci/g)	Spontaneous fission (SF) neutrons (g ⁻¹ .S ⁻¹)
²³⁶ Pu	Alpha	69	5.77	2.35 yr	5.2x10 ²	3.7x10 ⁴
²³⁵ U(α, 3n)		31	5.72	SF 3.5x10 ⁹ yr		
Daughter ²³⁶ Np	Gamma	0.31	0.048			
		0.012	0.109			
	Electron	-	0.026			
	Uranium L					
	X-rays	-	0.043			
	Also daughter of ²³² U, etc:	-	-			
²³⁷ Pu	Alpha	10 ⁻³	5.66	45.6 d	1.25x10 ⁴	
²³⁵ U(α, 2n)		2.3x10 ⁻³	5.37			
²³⁷ Np(d, 2n)	Gamma	5	0.050			
	Electrons	-	0.026			
		-	0.032			
		-	0.038			
		-	0.042			
		-	0.056			
	Np X-rays	-	-			
	EC	> 99	-			

ตารางที่ 2.1.1 (ต่อ)

Isotope and mode of formation	Radiation	Yield (%)	Energy (MeV)	Half-life	Specific activity (Ci/g)	Spontaneous fission (SF) neutrons ($g^{-1}S^{-1}$)
^{238}Pu	Alpha	72.0	5.5	86.4 yr	17.4	3.44×10^3
Daughter ^{238}Np		28	5.46	SF 4.9×10^{10} yr		
^{242}Cm and $^{237}\text{Np}(n, \gamma)$	Gamma	8×10^{-3} 10^{-3} 5×10^{-5}	0.099 0.150 0.77			
	Electrons	-	0.024 0.039			
	Uranium L X-rays	13	0.017			
^{239}Pu	Alpha	11	5.11	2.4×10^4 yr	0.062	0.03
$^{238}\text{U}(n, \gamma)$		88	5.15	SF 5.5×10^{15} yr		
$^{239}\text{U}(\beta^-)$	Gamma	0.007	0.039			
$^{239}\text{Np}(\beta^-)$		0.02	0.052			
	Gamma	0.005 0.0012 0.0012 8×10^{-5} 2×10^{-5}	0.129 0.375 0.414 0.65 0.77			
	Electrons		0.008 0.019 0.033 0.047			
	Uranium X-rays	1.4 2.2 0.2	0.0136 0.0174 0.0205			

ตารางที่ 2.1.1 (ต่อ)

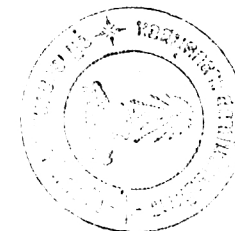
Isotope and mode of formation	Radiation	Yield (%)	Energy (MeV)	Half-life	Specific activity (Ci/g)	Spontaneous fission (SF) neutrons (g ⁻¹ .S ⁻¹)
²⁴⁰ Pu	Alpha	76	5.162	6.58x10 ³ yr	0.23	1.6x10 ³
²³⁹ Pu(n, γ)		24	5.118	SF 1.34x10 ¹¹ yr		
Multiple n-capture from ²³⁸ U and ²³⁹ Pu	Gamma	10 ⁻²	0.044			
		2x10 ⁻⁵	0.65			
	Electrons	-	0.026			
		-	0.040			
	Uranium L X-rays	10	0.017			
		40	0.012-0.125			
²⁴¹ Pu	Alpha	1.9x10 ⁻³	4.9	13.2 yr	111.5	
²⁴⁰ Pu(n, γ)		3x10 ⁻⁴	4.85			
Multiple n-capture from ²³⁸ U and ²³⁹ Pu	Beta	99.997	0.021 max.			
	Gamma	2x10 ⁻⁴	0.145			
		10 ⁻³	0.1			
	Uranium X-rays	-	-			
	Also from ²⁴¹ Am	-	-			

ตารางที่ 2.1.1 (ต่อ)

Isotope and mode of formation	Radiation	Yield (%)	Energy (MeV)	Half-life	Specific activity (Ci/g)	Spontaneous fission (SF) neutrons ($g^{-1}.s^{-1}$)
^{242}Pu	Alpha	76	4.9	3.79×10^5	4×10^{-3}	1.67×10^3
$^{241}\text{Pu}(n,\gamma)$		24	4.86	SF 7.1×10^{10} yr		
Multiple n-capture from ^{238}U and ^{239}Pu	Gamma	10^{-2}	0.045			
	Uranium L X-rays	10	0.017			
^{243}Pu	Beta	62	0.579 max.	4.98 h	2.59×10^4	
$^{242}\text{Pu}(n,\gamma)$		38	0.490 max.			
	Gamma	21	0.084			
		0.7	0.331			
	Electrons	-	0.019			
		-	0.036			
	Am L X-rays	-	-			
^{244}Pu	Alpha	100	4.58	7.6×10^7 yr	1.9×10^5	5.1×10^3
$^{243}\text{Pu}(n,\gamma)$	Also from ^{240}U , ^{240m}Np			SF 2.5×10^{10} yr		
Multiple n-capture from ^{238}U and ^{239}Pu						

ตารางที่ 2.1.1 (ต่อ)

Isotope and mode of formation	Radiation	Yield (%)	Energy (MeV)	S Half-life	Specific activity (Ci/g)	Spontaneous fission (SF) neutrons (g ⁻¹ .s ⁻¹)
²⁴⁵ Pu	Beta	100		10.1 h	1.23x10 ⁶	
²⁴⁴ Pu(n,γ)	Also daughter of ²⁴⁵ Am					
Multiple n-capture from ²³⁸ U and ²³⁹ Pu						
²⁴⁶ Pu	Beta	10	0.33	10.85 d	5.2x10 ⁴	
²⁴⁵ Pu(n,γ)		90	0.15			
Multiple n-capture from ²³⁸ U	Gamma	30	0.044			
		110	0.18			
		25	0.224			
	Am X-rays					
	Electrons		0.020			
			0.038			
			0.055			
			0.156			
	Also daughter of ²⁴⁶ Am					



2.2.1 การเกิดสารประกอบเชิงซ้อน

การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของพลูโทเนียมเกี่ยวข้องกับแอนไอออนที่กลับแทน (anionic ligand) เป็นเรื่องที่สำคัญมากสำหรับเคมีของพลูโทเนียมในสารละลาย การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนและการแตกตัวด้วยน้ำ (hydrolysis) เป็นปฏิกิริยาที่แข่งขันกันจากความเสถียรได้จากการแทนที่น้ำในโมเลกุลของสารประกอบที่ล้อมรอบด้วยน้ำ การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนขึ้นกับประจุของไอออนและรัศมีของไอออนพลูโทเนียมที่มีออกซิเดชันเลขต่างกัน รัศมีไอออนที่จะเกิดสารประกอบเชิงซ้อนเป็นลำดับคือ Pu (IV) > Pu (III) > Pu (VI) > Pu (V) และลำดับความสามารถของการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของแอนไอออนเป็น $CO_3^{2-} > C_2O_4^{2-} > SO_4^{2-} > F^- > NO_3^- > Cl^- > ClO_4^-$ (21)

พลูโทเนียม (IV) ไม่เกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับกรดเกลือ เสจจางและกรดเปอร์คลอริก เสจจาง แต่เกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับคลอไรด์ในไฮดรอกไซด์ในสารละลายที่มีความเข้มข้นของกรดสูง ๆ ได้สารประกอบเชิงซ้อนแอนไอออน เช่น $PuCl_5^-$, $PuCl_6^{2-}$ ซึ่งเป็นประโยชน์ในการแยกพลูโทเนียมจากธาตุต่าง ๆ ด้วยวิธีแอนไอออน-เอ็กซ์เชนจ์

2.2.2 การเกิดโพลีเมอร์

ในสารละลายของพลูโทเนียม (IV) ที่เสจจางหรือมีความเข้มข้นของกรดต่ำมาก ๆ อาจเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวของพลูโทเนียม (IV) ด้วยน้ำ เกิดสารประกอบของพลูโทเนียม (IV) เป็นโมเลกุลยาวหรือโพลีเมอร์ และจะเกิดโพลีเมอร์เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของพลูโทเนียม (IV) และอุณหภูมิ หรือลดความเป็นกรดลง นอกจากนี้ยังเกิดจากการเติมกะหล่ำยเกินไปในการละลายพลูโทเนียม (IV) ไฮดรอกไซด์ การเกิดโพลีเมอร์จะลดลงได้หากมีแอนไอออนที่จะทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนมาก ๆ หรือใช้กรดในการละลายพลูโทเนียม (IV) ไฮดรอกไซด์ให้มากเกินไป

เชื่อว่าสารสกัดก่อนพลูโทเนียม (IV) โปตรอกไซด์ได้จากสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และละลายให้หมดไม่ เป็นโพเนียมที่ไอโซโทปของพลูโทเนียม (IV) นี้จะกลายเป็นโพเนียมเมื่อใช้การผสมค่าที่อุณหภูมิห้อง ปฏิกิริยาการระเหยจะเกิดเร็วขึ้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิโดยการให้ความร้อน ใช้กรดแก่ ซัมซัน และเติมสารที่ทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนอย่างรุนแรงเช่นไฮดรอกไซด์และซัลเฟต

3.1.1.6 การรีดอกซ์ของพลูโทเนียมในสารละลายด้วยรังสี

ผลงานของอนุภาคแอลฟาจากการสลายตัวของพลูโทเนียม-239 เพียงพอที่ทำให้เกิดการแตกตัวโดยรังสี (Radiolysis) ของพลูโทเนียม ยังผลให้เกิดการรีดิวซ์หรือการออกซิไดซ์ พลูโทเนียม ซึ่งขึ้นกับความเป็นกรดเป็นด่างของสารละลายและออกซิเดชันสแตตของพลูโทเนียม

Kasha และ Sheline⁽²¹⁾ พบว่าพลูโทเนียม (VI) ในสารละลายกรดเปอร์คลอริกจะถูกรีดิวซ์เป็นพลูโทเนียม (IV) 0.6 เปอร์เซ็นต์ต่อวินาที และอธิบายว่าผลของการเกิดรีดักชันของพลูโทเนียม (VI) อาจเกิดเป็นพลูโทเนียม (V) ก่อน แล้วออกซิเดชันสแตตที่ต่ำกว่านี้จะเกิดออกมาเป็นลำดับ Page's, Page's และ Laisinsky⁽²¹⁾ พบว่า อัตราการรีดิวซ์ขึ้นกับมวลของอนุภาคในสารละลายโดยการทดลองใช้รังสีแกมมาจากภายนอกกระตุ้นให้เกิดการรีดิวซ์ของพลูโทเนียม (VI) อัตราการรีดิวซ์ได้แก่ตามลำดับเป็น $\text{ClO}_4^- \approx \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- \gg \text{NO}_3^-$ ซึ่งจากผลการทดลองนี้อาจนำไปใช้ประโยชน์ของการรีดิวซ์ตัวเองของพลูโทเนียมโดยอนุภาคแอลฟาได้

Pogov และผู้ร่วมงาน⁽²¹⁾ ได้ตัดทวนงานสารละลายพลูโทเนียมในสารละลายกรดไฮโดรซัลฟิวริกจากภายนอก พบว่า เกิดการออกซิเดชันของพลูโทเนียมและอัตราการออกซิไดซ์ลดลง เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของอนุภาคในเตตระและความเป็นกรดเพิ่มขึ้น

2.3 สารประกอบพลูโทเนียม

2.3.1 พลูโทเนียม (II)

ซึ่งพลูโทเนียมออกไซด์ (PuO) พลูโทเนียมซัลไฟด์ (PuS) เป็น electropositive ในการทำให้ ออกไซด์ เลขอะตอม +2 นี้ จำนวนเป็นอย่างมากที่ต้องใช้วิธีตัวอื่น

2.3.2 พลูโทเนียม (III)

มีสารประกอบมากที่สุดพวกออกไซด์และไฮดรอกไซด์ มีสีต่างกันไปตั้งแต่ สีเขียว น้ำ จนถึงม่วง พลูโทเนียม +3 นี้มีความเสถียรในสารละลายที่มีฤทธิ์เป็นกรด นับเป็นธาตุตัวแรกของกลุ่มแอกทิไนด์ที่ออกไซด์เลขอะตอม +3 เลขที่บ่งชี้เลขอะตอมที่จะคงอยู่ในสารละลาย ซึ่งใช้ประโยชน์ได้มากในกระบวนการแยกทางเคมี ในสารละลายที่มีฤทธิ์เป็นด่างจะถูกออกซิไดส์ด้วย ออกซิเจนในอากาศให้เป็น Pu^{4+} ได้ง่าย

2.3.3 พลูโทเนียม (IV)

เป็นออกไซด์เลขอะตอมที่เสถียรที่สุดและสารประกอบมากที่สุด สารประกอบที่เสถียรที่สุดคือพลูโทเนียมไดออกไซด์ (PuO_2) ซึ่งเป็น refractory ไม่ละลายในกรดหรือด่างธรรมดา ต้องใช้วิธีหลอมด้วยวิธีเคมิกัลหรือหลอมด้วยวิธีไฮโดรอลิซิสเฟสหรือปล่อยให้ละลายอยู่ในกรดไฮโดรโบรมิก (HBr) หรือกรดทังคิกเข้มข้นนาน ๆ (22) พลูโทเนียมไฮดรอกไซด์ ($Pu(OH)_4$) ไม่ละลายน้ำ นอกจากนี้อังรีสารประกอบที่ไม่ละลายน้ำอื่น ๆ อีก เช่น ฟลูออไรด์ ไอโอเดต (IO_3^-) และออกซาเลต (oxalate) เป็นต้น สารประกอบที่ละลายได้แก่ คลอไรด์ ไนเตรต เปอร์คลอเรต และซัลเฟต เป็นต้น

เมื่อละลายจากพลูโทเนียม (IV) เป็นออกไซด์เลขอะตอมที่เสถียรที่สุด ดังนั้นพลูโทเนียม (III) และพลูโทเนียม (VI) ในสารละลายอาจถูกออกซิไดส์หรือรีดิวซ์ตามลำดับเป็น

พลูโทเนียม (IV) โดยให้ตัวออกซิไดซ์หรือตัวรีดิวซ์ที่เหมาะสม เช่นอนุมูลไนโตรทีนในสารละลายกรดไนตริก สามารถออกซิไดซ์พลูโทเนียม (III) เป็นพลูโทเนียม (IV) และสามารถรีดิวซ์พลูโทเนียม (VI) เป็นพลูโทเนียม (IV) ได้เล็กน้อย เป็นการปรับออกซิเดชันสถานะของพลูโทเนียมในสารละลายเพื่อให้เหมาะสมแก่การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนในการวิเคราะห์แยกทางเคมีต่อไป

2.3.4 พลูโทเนียม (IV)

เป็นสารประกอบที่ต้องเตรียมโดยวิธีเฉพาะ ปรากฏในสารละลายในรูปของไอออนที่มีออกซิเจน (oxygenated ion PuO_2^{2+}) โดยเสียอิเล็กตรอนออกซิไดซ์เป็นพลูโทเนียม (VI) หรือถูกรีดิวซ์เป็นพลูโทเนียม (IV) หรือพลูโทเนียม (III) ได้ง่าย

2.3.5 พลูโทเนียม (VI)

ปรากฏเป็นเกลือพลูโทนิล (plutonyl) และพลูโทเนต (plutonate) เหมือนกับยูเรนิลและยูเรเนต เป็น PuO_2^{++} ในสารละลายกรด และสามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับแอมโมเนียที่มีประจุหนึ่งหรือมากกว่าหนึ่งได้ นอกจากนี้ก็ความเข้มข้นของกรดสูง พลูโทเนียม (VI) ยังสามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับแอนไอออนกับอนุมูลควโรตีและไนเตรทได้

2.4 การแยกพลูโทเนียมออกจากธาตุต่าง ๆ

การแยกพลูโทเนียมออกจากธาตุต่าง ๆ (21) อาจกระทำได้หลายวิธีโดยอาศัยความแตกต่างของคุณสมบัติทางเคมี เช่นการตกตะกอน การสกัดด้วยตัวทำละลายต่าง ๆ หรือการแลกเปลี่ยนไอออน เป็นต้น ทั้งนี้พิจารณาจากความเสถียรของออกซิเดชันสถานะของธาตุในกลุ่มเดียวกันเรียงลำดับได้เป็น $\text{UO}_2^+; \text{NpO}_2^{2+} > \text{PuO}_2^{2+} > \text{AmO}_2^{2+}$ และ $\text{Am}^{3+} > \text{Pu}^{3+} \gg \text{Np}^{3+}; \text{U}^{4+}$ เพื่อจะได้เลือกใช้ตัวรีดิวซ์หรือตัวออกซิไดซ์ที่เหมาะสมในการเปลี่ยน

ออกซิเดชันแล้วโดยของเหลวต่าง ๆ ให้ต่างกันไปตามต้องการ แต่สิ่งแยกด้วยวิธีการทางเคมีดังกล่าวแล้วต่อไป ปรากฏว่าฟลูออโรเนียมถูกออกซิไดซ์เป็น PuO_2^{2+} ในขณะที่อะเมริเซียมยังคงเป็น Am^{3+} แล้วแยกด้วยการสกัดด้วยตัวทำละลาย แล้วตกตะกอน AmF_3 ภายหลัง เป็นต้น

2.4.1 การแยกโดยวิธีการตกตะกอน

2.4.1.1 การตกตะกอนร่วม ฟลูออโรเนียมตกตะกอนร่วมกับสาร

ประกอบบางชนิดได้แก่และเหมาะสำหรับการหาฟลูออโรเนียมปริมาณน้อย ๆ จากตัวอย่างที่มีปริมาณมาก ฟลูออโรเนียม (III), (IV) และ (VI) ตกตะกอนร่วมกับไฮดรอกไซด์ได้ดี ฟลูออโรเนียม (III) และ (IV) ตกตะกอนร่วมได้ดีกับ LaF_3 และออกซาแลก แต่ฟลูออโรเนียม (VI) ไม่ตกตะกอนร่วม มีธาตุอื่นที่ตกตะกอนร่วมกับฟลูออโรเนียมอีก เช่น ทอเรียม ยูเรเนียม (IV) บิสฟัท และแกลมกานัม ในกรณีนี้การออกซิไดซ์หรือการรีดิวซ์จะเป็นตัวรบกวนในปฏิบัติการ เราสามารถทำออกซิเดชัน-รีดิวซ์ซ้ำไปได้หลายครั้งเพื่อให้ได้ฟลูออโรเนียมที่บริสุทธิ์ แต่การใช้ LaF_3 ไม่เหมาะสมในการตกตะกอนร่วมจากธาตุหลายชนิดที่ตกตะกอนฟลูออไรด์แล้วไม่ละลายในกรดรวมอยู่ด้วย นอกจากนี้ยังราคาสูงและเข้มนอกตัวหนึ่งที่รบกวนการตกตะกอนร่วมของฟลูออโรเนียมกับ LaF_3 เพราะแคลเซียมฟลูออไรด์ไม่มีใครจะละลายง่าย ๆ การจะแยกตัวออกจากฟลูออโรเนียมเป็นฟลูออโรเนียม (VI) แยกแคลเซียมฟลูออไรด์ออกมา ก่อน แล้วรีดิวซ์ฟลูออโรเนียม (VI) เป็นฟลูออโรเนียม (IV) จึงตกตะกอนร่วมกับ LaF_3 ต่อไป

นอกจากนี้ฟลูออโรเนียมยังสามารถตกตะกอนร่วมกับสารอินทรีย์และสารอินทรีย์อื่น ๆ ได้อีกด้วย

2.4.1.2 การตกตะกอนโดยตรง การตกตะกอนฟลูออโรเนียมด้วยแอม

ซิออนต่าง ๆ จะมีออกซิเจนเหล็ก โคบอลต์ ซีเซียม เซอร์โคเนียม โมลิบดีนัม และรูทีเนียมติดตามด้วยมากบ้างน้อยบ้าง จึงจำเป็นต้องทำให้บริสุทธิ์ก่อน

2.4.1.2.1 ไฮดรอกไซด์ ทั้งพหุโทเนียม (III) และ (IV), อาจตกตะกอนจากสารละลายกรดแร่ (mineral acid) ด้วยไฮเดรียมไฮดรอกไซด์ โพลีเอสเซียมไฮดรอกไซด์ หรือแอมโมเนียไฮดรอกไซด์ได้ในรูปไฮดรอกไซด์หรือออกไซด์ที่มีน้ำประสานน้ำได้ในหลายกรณี แต่ต้องไปความเข้มข้นของกรดสูง เพื่อป้องกันการเกิดโพลีเมอร์

2.4.1.2.2 ฟลูออไรด์ พหุโทเนียมไตรฟลูออไรด์ (PuF_3) และพหุโทเนียมเพนตาฟลูออไรด์ (PuF_5) อาจตกตะกอนได้จากสารละลายกรด โดยการเติมกรดแก่จำนวนมากเกินพอลงในสารละลายตะกอนที่ละลายได้ลงในสารที่เกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับฟลูออไรด์ เช่นกรดบอริก (H_3BO_3) มีน้ำยาที่ 500 ซี. จะละลายได้ยาก การเผาพหุโทเนียมไตรฟลูออไรด์ในบรรยากาศของออกซิเจนจะได้พหุโทเนียมไดออกไซด์ซึ่งละลายในกรดไนตริก

2.4.1.2.3 ออกไซด์ สามารถตกตะกอนพหุโทเนียมไดโอบตรึงจากสารละลายกรดเพื่อหา

2.4.2 การแยกโดยวิธีการสกัด

เหมาะที่จะใช้ในการผลิตหรือการแยกพหุโทเนียมในปริมาณมาก ๆ เพื่อใช้ในเครื่องปฏิกรณ์โดยวิธีการสกัดจากของเหลว (liquid-liquid extraction) ความสามารถในการสกัดกำหนดอยู่ในรูปของสัมประสิทธิ์การแพร่กระจาย (distribution coefficient, D)

$$D = \frac{\text{ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในเฟสของสารอินทรีย์}}{\text{ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในเฟสของน้ำ}}$$

สารที่ใช้ในการสกัดมีมากมาย เช่นสารประกอบอินทรีย์ของฟอสฟอรัสซึ่งมีทั้งชนิดที่เป็นกลาง เช่นไตรบิวทิลฟอสเฟต (TBP) หรืออนุกรมของบิวทิลฟอสเฟต ($(RO)_3PO$) ฟอสโฟเนต ($R(RO)_2PO$) ฟอสไฟเนต ($R_2(RO)PO$) ฯลฯ และชนิดที่เป็นกรด มีทั้งกรดหนึ่ง

ตัว เช่น DBP และ HDEHP และที่มีกรดสองตัว เช่น mono-2-ethyl hexyl phosphoric acid ในการวิจัยที่ใช้ HDEHP เป็นตัวสกัดฟลูโทเนียม (IV) เข้าอยู่ในชั้นของสารอินทรีย์ และสกัดกลับเข้าอยู่ในชั้นของกรดในตรรกโดยการสกัดด้วย DBHQ เป็นฟลูโทเนียม (III)

Peppard และผู้ร่วมงาน⁽²¹⁾ ใช้ HDEHP แยกเบอร์เกียมจากแอกทีนัม +6 และฟลูโทเนียมเบอร์เกียมที่ถูกออกซิไดซ์เป็นเบอร์เกียม (IV) ในกรดไนตริก 10 โมลาร์ ด้วยโพแทสเซียมเปอร์โบรมาต (KBrO₃) 1 โมลาร์ แล้วถูกสกัดจากกรดแอกทีนัม +6 ต่าง ๆ และถูกสกัดกลับด้วยกรดไนตริก 8 โมลาร์โดยการรีดด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H₂O₂) ซึ่งฟลูโทเนียมและโพแทสเซียมเป็นฟลูโทเนียม (III) ในสถานะนี้และยังคงอยู่ในชั้นของสารอินทรีย์

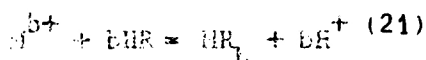
ฟลูโทเนียมยังถูกสกัดได้ด้วยเอมีน (amine) หรือคอออล คีโตน (ketone) อีเทอร์ และพวกเอไมด์ (amide) หรือโดยการทำให้ฟลูโทเนียมเกิด chelate กับสารบางตัวแล้วสกัดสารประกอบของ chelate นี้ไปอยู่ในชั้นของสารอินทรีย์ ฯลฯ

2.4.3 การแยกโดยการแลกเปลี่ยนไอออน

ฟลูโทเนียมสามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนได้ทั้งแคทไอออนและแอนไอออน ดังนั้นจึงสามารถแยกฟลูโทเนียมออกจากธาตุต่าง ๆ ได้โดยการแลกเปลี่ยนฟลูโทเนียมไอออนกับไอออนบางชนิดโดยใช้แคทไอออนหรือแอนไอออน-แลกเปลี่ยนเรซินตามลำดับ

2.4.3.1 การแลกเปลี่ยนแคทไอออน ฟลูโทเนียมแคทไอออน (Pu^{IV})

ในสารละลายกรดที่แรงได้ทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนจะถูกจับบนแคทไอออนเรซินที่อยู่ในรูปของไฮโดรเจนหรือโซเดียมคลอไรด์ ปฏิกิริยาทั่วไปของภาวะแลกเปลี่ยนแคทไอออนที่อยู่ในรูป H⁺ ในสารละลายกรดเป็น



ปริมาณการ¹² เป็นตัวแปรหลักเปลี่ยนสถานะ ปฏิกิริยาจะเกิดมากถ้าใช้ความเข้มข้นของกรดที่ต่ำกว่าเพราะความเข้มข้นของกรดสูงทำให้มีผลต่อไอออนของโลหะจากตัวหนักเปลี่ยนโดยเวลาหรือ action หรือการใส่โลหะของเหลวร้อนนี้อาจทำได้ด้วยความเข้มข้นของ H^+ โดยการศึกษาให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อน โดยทั่วไปการเพิ่มการสับของแคทไอออนเรซินทำให้โอกาสเพิ่มประจุและผลขนาดของไอออนที่ล้อมรอบด้วยน้ำ (hydrated radius) ซึ่งในที่สุดเรียงจากเบาของการสับสูงไปเป็นขนาดแคทไอออนเรซินเป็น $Pu(IV) > Pu(III) > Pu(VI)$

2.4.3.2 การแลกเปลี่ยนแอนไอออน พลูโทเนียม (IV) และ (VI)

ที่เกิดสารประกอบเชิงซ้อนแอนไอออนกับกรดไนตริกและกรดเกลือเข้มข้น จะถูกจับบนแอนไอออนออกซีเจนหรือ ออกซีแอนไอออน-ออกซีเจนเรซินที่เป็นแบบแท้ (เช่น Powex 1,2) แอ็กไนด์ที่มีออกซีเจนที่หนัก (III) จะไม่ถูกจับบนแอนไอออน-ออกซีเจนเรซิน ส่วนพวกออกซีเดียม (IV-VI) จะถูกจับได้เมื่อความเข้มข้นของกรดเกลือมากกว่า 6 โมลาร์ และจะหลุดเมื่อความเข้มข้นของกรดเกลือมากกว่า 2 โมลาร์

สับแยกพลูโทเนียมออกจากธาตุออกไนด์อื่น ๆ ด้วยวิธีทำโดยการสับพลูโทเนียม (IV) และ (VI) บนเรซินจากสารละลายกรดเกลือที่มีความเข้มข้นมากกว่า 6 โมลาร์ แล้วใส่พลูโทเนียมออกไซด์หรือการรีดิวซ์เป็นพลูโทเนียม (III) ด้วยตัวรีดิวซ์ที่เหมาะสม ซึ่งวิธีนี้เป็นวิธีที่ง่าย ปลอดภัย และเป็นวิธีมาตรฐานในห้องปฏิบัติการ และใช้ได้กับการผลิตในปริมาณมาก

การสับพลูโทเนียมจากสารละลายกรดไนตริก 7 โมลาร์ แล้วใส่ออกไซด์กรดเกลือหรือจากสารรีดิวซ์ที่มีสัมประสิทธิ์การกระจายและการแยกดีกว่าในกรดเกลือ แต่ที่อุณหภูมิห้องปฏิกิริยาเกิดช้า เป็นผลให้เกิดการสูญเสียของสาร แต่ถ้าสับพลูโทเนียมจากสารละลายกรดเกลือ 8-10 โมลาร์แล้วใส่พลูโทเนียมออกไซด์เป็นพลูโทเนียม (III) ด้วยแอมโมเนียมไฮไดรด์ในกรดไนตริก 3 โมลาร์ พลูโทเนียมจะออกมาก่อนเนปทูเนียม



วิธีใช้ที่ห้องเรียนร่วมอยู่ด้วยก็จะแยกโดยการสับกองรีม (IV) พลุโทเนียม (IV) และแบ่งเป็นเบาะจากกรดไฟฟ้า 8 โมลาร์ โดยจะใส่ท่อเรียงด้วยกรดเกลือ 12 โมลาร์ ใส่พลุโทเนียมด้วยกรดเกลือ 12 โมลาร์-แอมโมเนียมไฮไดรด์ 0.1 โมลาร์ และใส่เบาะเหนียวด้วยกรดเกลือ 4 โมลาร์ ซึ่งได้ผลมากกว่า 95 เปอร์เซ็นต์⁽²¹⁾

นอกจากนี้ยังมีวิธีการหนึ่งคือ slurry-column ทำเองโดย Kressin และ Waterbury⁽²¹⁾ ทำโดยใส่ เรซินประมาณครึ่งหนึ่ง ในลำระสายพลุโทเนียม แล้วนำไปใส่คอสัมพันธ์ปล่อยให้ไหลอย่างรวดเร็ว พลุโทเนียมจะไม่หลุดออกมาเพราะพลุโทเนียมส่วนใหญ่จะถูกรับไว้ใน เรซินที่อยู่ในคอสัมพันธ์ และนำลำระสายนี้ไปใส่ถัง วิธีนี้ใช้ low cross-link (Dowex 1x2) เพื่อให้เกิดการสับดีเอ็น เออร์ใส่พลุโทเนียมของกรเร็ว ๆ คัดปลำระสายผลระหว่างกรดเกลือ-กรดกรดแก้ว ให้ผลมากกว่า 99 เปอร์เซ็นต์⁽²¹⁾

2.5 การรับพลุโทเนียมเข้าสู่ร่างกาย

การรับพลุโทเนียมเข้าสู่ร่างกายเป็นไปได้ทั้งทางตรงและทางอ้อม ทางตรงคือ การได้รับโดยการหายใจเอาอากาศที่มีพลุโทเนียมปนเปื้อนอยู่เข้าสู่ร่างกาย ส่วนทางอ้อมคือ การได้รับโดยการบริโภคอาหารที่มีพลุโทเนียมปนเปื้อนอยู่เข้าสู่ร่างกาย ดังรายละเอียดต่อไปนี้

2.5.1 โดยการหายใจ

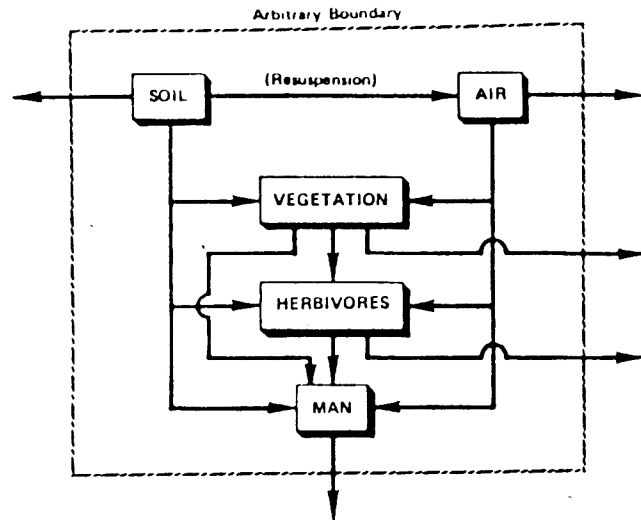
โดยหายใจเอาอากาศที่มีพลุโทเนียมปนเปื้อนอยู่เข้าไปโดยตรง พลุโทเนียมที่ปนเปื้อนอยู่ในอากาศนี้ได้แก่ฝุ่นกับมันตรังสีพลุโทเนียม สืบมาจากการทดลองระเบิดนิวเคลียร์ พลุโทเนียมจากโรงงานผลิตพลุโทเนียม จากโรงงานคิงส์ภาพเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ และพลุโทเนียมในดินที่ฝังกระจายอยู่รอบๆ อากาศ ในกรณีนี้ พลังของฝุ่นที่ใหม่ ๆ⁽⁹⁾ ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาค แรงยึดเหนี่ยวของอนุภาคกับผิวดิน และผลของอุณหภูมิที่มีต่อผิวดิน เป็นต้น⁽²³⁾

3.3.2 โดยการบริโภค

การรับพืชนิยมเข้าสู่ร่างกายได้จากวงจรของอาหารโดยการบริโภคอาหารที่มีพืชนิยมเหมือนปณอญ์ Bennett⁽⁹⁾ ได้รายงานว่าสัตว์น้ำพวกมีเปลือกหุ้ม เช่น หอย ปู กุ้ง รับปริมาณพืชนิยมสะสมอยู่มากที่สุด รองลงมาได้แก่ผลิตภัณฑ์จากข้าว ผลไม้ ผักและผักสด Caballero และผู้ร่วมงาน⁽²⁴⁾ พบว่าการถ่ายเทพืชนิยมจากใบสู่รากและเมล็ดโดยการชะล้างของฝนมากกว่าในที่ไม่ฝน และยังมีองค์ประกอบทางเคมีและความไม่เสถียรทางเคมีของพืชนิยมด้วย นอกจากนี้ระยะของการชะล้าง การเจริญของพืชและความสามารถในการละลายของพืชนิยมแล้วมีแนวโน้มทำให้พืชมีการรับและสะสมพืชนิยมมากกว่า Schulz, Tompkins และ Dabcock⁽²⁵⁾ พบว่าข้าวสาลีที่ปลูกในดินที่มีสภาพเป็นด่าง (calcareous soil) และพืชนิยมที่อยู่ในรูปของไนเตรททำให้มีการสะสมพืชนิยมมากที่สุด

อาหารประเภทเนื้อ ไข่ นมฝรั่งที่ปกปิดเปลือกแล้ว และอาหารกระป๋อง พบว่ามีพืชนิยมน้อยรองลงมาจากพืช⁽⁹⁾ ความแตกต่างระหว่างพืชนิยมในอาหารสดและอาหารกระป๋องชี้ให้เห็นว่าการชะล้าง (leaching) และขบวนการผลิต (processing) เกี่ยวข้องการชะล้างทำให้พืชนิยมในอาหารลดน้อยลง และยังพบว่านมฝรั่งที่ยังไม่ปกปิดเปลือกพืชนิยมมากกว่าที่ปกปิดเปลือกแล้วถึง 60 เท่า⁽⁹⁾ ในอาหารประเภทพืชนิยมมีน้อยมากจนเก็บวัดไม่ได้ แสดงว่าการถ่ายเทไปสู่อาหารประเภทนี้มีน้อยมาก⁽²⁶⁾

นอกจากนี้จะมี การรับพืชนิยมจากอาหารบริโภคอาหารแล้วยังอาจได้รับพืชนิยมจากน้ำดื่มอีกด้วย จากการวิเคราะห์น้ำประปาในประเทศสหรัฐอเมริกา เมืองนิวยอร์ก ปี ค.ศ. 1973 พบว่ามีพืชนิยม 0.3 พบโคตรัสต่อลิตร ระหว่างปี ค.ศ. 1972 Bennett⁽⁹⁾ ได้ประมาณการรับพืชนิยมจากน้ำดื่มโดยตรงสี่ของประชาชนในเมืองนิวยอร์กโดยการบริโภคเป็นปริมาณ 1.6 ลิตร ซึ่งปริมาณน้ำมาจากผลิตภัณฑ์ของข้าว 35 เปอร์เซ็นต์ พืช ผัก ผลไม้ และเนื้อสัตว์ อย่างละ 20 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 2.5.1 วิธีการที่มนุษย์ได้รับมลพิษโทเคมีมเข้าสู่ร่างกาย

พื้นที่ที่เรากำลังพิจารณาอยู่แสดงถึงสิ่งแวดล้อมที่เปราะบางเพื่อมลพิษโทเคมีม (arbitrary boundary of a contaminated area) ที่เปลี่ยนแปลงเล็ก ๆ ภายในแสดงถึงส่วนใด ๆ ของสิ่งแวดล้อม (ecosystem) ที่สนใจ ถูกคร่าแสดงถึงการล่าเสียไปผู้ส่วนต่าง ๆ และลูกคร่าที่ข้ามวงรอบรูปใหม่ (arbitrary boundary) แทนการล่าเสียออกจากระบบ

วิธีการที่ควบคุมและจำกัดได้รับสารพิษอันตรายซึ่งอาจก่อให้เกิดทางตรงและทางอ้อม ได้
แสดงไว้ในรูปที่ 2.5.1

2.5.3 อันตรายจากฟลูออโรเนียมและค่าที่ยอมรับได้

เมื่อฟลูออโรเนียมเข้าสู่ร่างกายของบางสัตว์จะเข้าไปสะสมในอวัยวะต่าง ๆ
(critical organs) และบางส่วนจะถูกขับถ่ายออกมาโดยกลไกการขับถ่ายของร่างกายเป็น
อาหาร จากการศึกษาการถ่ายเทของฟลูออโรเนียมไปสู่ตัวต่างๆ ของร่างกายโดยวิธีแบบ
ของสัตว์⁽²⁷⁾ ไก่ที่ได้รับฟลูออโรเนียมโดยการหายใจ ซึ่งสันนิษฐานว่าฟลูออโรเนียมในฝุ่นกันมลพิษ
ซึ่งส่วนใหญ่อยู่ในรูปของฟลูออโรเนียมไดออกไซด์ (เป็นอนุภาคฟลูออโรเนียมที่ผ่านเข้าสู่ และ oropharynx
สู่หลอดลมจะถูกขับออกอย่างรวดเร็ว บางส่วนก็ถูกขับออก บางส่วนออกมาพร้อมกับหายใจ
และมีการขับฟลูออโรเนียมออกจาก pulmonary สู่ทางเดินอาหารประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์
ด้วยครึ่งชีวิต 500 วัน ตึก 5 เปอร์เซ็นต์สู่เนื้อเยื่อซึ่งจะเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับ organic
ligand และถูกขับถ่ายในเลือดโดยการรวมกับ transferrin ซึ่งเป็นโปรตีนขนถ่ายธาตุ
เหล็ก⁽²⁸⁾ และอีก 15 เปอร์เซ็นต์สู่ระบบน้ำเหลือง และประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ของ
ฟลูออโรเนียมที่เข้าสู่ระบบน้ำเหลืองยังคงอยู่ในตัวเมื่อถึงเนื้อเยื่อ ส่วนฟลูออโรเนียมในเลือดประมาณ
45 เปอร์เซ็นต์จะไปสู่กระดูกและสะสมอยู่ในไฮดรอกซีอะปาทิต (โดยจะถูกห่อหุ้มด้วย glycoprotein
มีการสังเคราะห์ด้วยตัวด้วยครึ่งชีวิต 100 ปี อีก 40 เปอร์เซ็นต์สู่ตับซึ่งจะถูกห่อหุ้มด้วย
ferritin ซึ่งเป็นโปรตีนสะสมธาตุเหล็ก 1 เปอร์เซ็นต์สู่ไต และส่วนที่เหลืออื่น ๆ จะไปสู่
เนื้อเยื่ออ่อนนุ่ม (soft tissue) และขับถ่ายออกมา จากการศึกษาของฟลูออโรเนียมจากระบบ
การขับถ่ายการสู่ระบบเลือดของนก (ประมาณ 10^{-6}) จึงได้ค่าปริมาณฟลูออโรเนียมที่กระจาย
ไปสะสมในเนื้อเยื่อต่าง ๆ จากการถ่ายเทฟลูออโรเนียมจากปอดสู่ทางเดินอาหาร

และกระทำการป้องกันอันตรายจากรังสี⁽⁶⁾ ได้กำหนดความเข้มข้นสูงสุด

(maximum permissible concentration, MPC) ของฟลูออโรเนียมในน้ำและในอากาศที่
ยอมให้รับได้ไว้ดังนี้

ตารางที่ 2.5.1 ความเข้มข้นสูงสุดของพลูโทเนียมในน้ำและอากาศที่ยอมให้ร่างกายรับได้

ไอโซโทปพลูโทเนียม และรังสีที่เกิดจาก การสลายตัว	อวัยวะที่ถูกรัง	ค่าความถี่ที่ ยอมให้สะสม ในร่างกาย λ ($\mu\text{C}/\text{cm}^3$)	ค่าความเข้มข้นสูงสุดที่ยอมให้ร่างกายรับได้ (MPC) สำหรับการสูดดม				
			40 ซม/สัปดาห์		168 ซม/สัปดาห์		
			(MPC) _v	(MPC) _a	(MPC) _w	(MPC) _u	
($\mu\text{C}/\text{cm}^3$)							
238 94Pu แอลฟา, แกมมา	อวัยวะ	กระดูก	0.04	10^{-4}	2×10^{-10}	5×10^{-5}	7×10^{-13}
		ตับ	0.4	6×10^{-4}	8×10^{-10}	2×10^{-4}	3×10^{-12}
	ไม่ละลาย	ไต	0.3	8×10^{-4}	10^{-11}	3×10^{-4}	4×10^{-12}
		ทางเดินอาหาร		8×10^{-4}	2×10^{-7}	3×10^{-4}	6×10^{-8}
		ทั้งร่างกาย	0.3	10^{-3}	10^{-11}	4×10^{-4}	5×10^{-12}
		ปอด			3×10^{-11}		10^{-11}
	ทางเดินอาหาร		9×10^{-4}	10^{-7}	3×10^{-4}	5×10^{-8}	
239 94Pu แอลฟา, แกมมา	อวัยวะ	กระดูก	0.04	10^{-4}	2×10^{-10}	5×10^{-5}	5×10^{-13}
		ตับ	0.4	5×10^{-4}	7×10^{-10}	1×10^{-4}	2×10^{-12}
	ไม่ละลาย	ไต	0.3	7×10^{-4}	9×10^{-12}	1×10^{-4}	3×10^{-12}
		ทางเดินอาหาร		8×10^{-4}	2×10^{-7}	3×10^{-4}	6×10^{-8}
		ทั้งร่างกาย	0.04	10^{-3}	10^{-11}	3×10^{-4}	3×10^{-12}
		ปอด			4×10^{-11}		10^{-11}
	ทางเดินอาหาร		8×10^{-4}	2×10^{-7}	3×10^{-4}	5×10^{-8}	

ตารางที่ 2.5.1 (ต่อ)

ไอโซโทปฟลูออโรเนียม และรังสีที่เกิดจาก การสลายตัว	อวัยวะที่ถูก	ค่าความถี่สุดที่ ยอมรับได้ของ เนื้อเยื่อ ในร่างกาย ϕ (mc/cm ³)	ค่าความเข้มข้นสูงสุดที่ยอมรับในร่างกาย (MPC) สำหรับประชากร					
			40 ปี/สปีด		68 ปี/สปีด			
			(MPC) _w	(MPC) _a	(MPC) _w	(MPC) _a		
(mc/cm ³)								
240Pu 94	อวัยวะ	กระดูก	0.04	10 ⁻⁴	2x10 ⁻¹¹	5x10 ⁻⁵	6x10 ⁻¹³	
		ตับ	0.4	5x10 ⁻⁴	7x10 ⁻¹¹	2x10 ⁻⁴	2x10 ⁻¹²	
	แอสฟา, แกมมา	ไต	ทางเดินอาหาร	0.5	7x10 ⁻⁴	9x10 ⁻¹¹	1x10 ⁻⁴	3x10 ⁻¹²
			ทั่วร่างกาย	0.04	8x10 ⁻⁴	2x10 ⁻⁷	3x10 ⁻⁴	6x10 ⁻¹²
		ไม่ละลาย	ปอด		10 ⁻³	10 ⁻¹¹	1x10 ⁻⁴	3x10 ⁻¹²
			ทางเดินอาหาร			4x10 ⁻¹¹		10 ⁻¹¹
241Pu 94	อวัยวะ	กระดูก	0.9	7x10 ⁻³	9x10 ⁻¹¹	2x10 ⁻³	3x10 ⁻¹¹	
		ตับ	10					
	แอสฟา, เบตา แกมมา	ไต	ทางเดินอาหาร	5	0.04	5x10 ⁻¹⁰	0.01	2x10 ⁻¹⁰
			ทั่วร่างกาย		0.04	8x10 ⁻⁸	0.01	3x10 ⁻⁸
		ไม่ละลาย	ปอด	9	0.06	8x10 ⁻¹⁰	0.02	3x10 ⁻¹⁰
			ทางเดินอาหาร			4x10 ⁻⁸		10 ⁻⁸
			0.04	7x10 ⁻⁶	0.01	2x10 ⁻⁶		

ตารางที่ 2.5.1 (ต่อ)

ไอโซโทปพลูโทเนียม และรังสีที่เกิดจาก การสลายตัว	อวัยวะวิกฤต	ค่าความถี่ที่อยู่ที่ ขอบหรือใกล้เคียง ในร่างกาย ϕ ($\mu\text{C}/\text{cm}^3$)	ค่าความเข้มข้นสูงสุดที่ปอดให้ร่างกายรับได้ (MPC) สำหรับภาวะทำงาน				
			40 ชม/สัปดาห์		168 ชม/สัปดาห์		
			(MPC) _w	(MPC) _a	(MPC) _w	(MPC) _a	
----- ($\mu\text{C}/\text{cm}^3$) -----							
242 244Pu	กระดูก	0.05	10^{-4}	2×10^{-12}	5×10^{-5}	6×10^{-15}	
		0.4	6×10^{-4}	7×10^{-12}	1×10^{-4}	3×10^{-12}	
		0.5	7×10^{-4}	10^{-11}	3×10^{-4}	3×10^{-12}	
	ไขกระดูก	ทางเส้นอาหาร		9×10^{-4}	2×10^{-7}	1×10^{-4}	7×10^{-12}
		ที่ร่างกาย	0.9	10^{-3}	10^{-11}	4×10^{-4}	5×10^{-12}
		ปอด			4×10^{-11}		10^{-11}
		ทางเส้นอาหาร		9×10^{-4}	2×10^{-7}	3×10^{-4}	5×10^{-8}

หมายเหตุ สำหรับประชาชนทั่วไปปอดให้รับได้น้อยกว่าค่าที่กำหนด 10 เท่า