



IND-OAP

การตรวจวัดและประเมินค่าปริมาณรังสี จากภายในร่างกาย



ดารุณี พิขุนทด
สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ
พฤษภาคม 2553



สารบัญ

บทนำ	3
1. เส้นทางการเข้าสู่ร่างกายของสารรังสี (Entry of Radionuclides into the Body)	3
2. การขจัดสารกัมมันตรังสีให้ออกจากร่างกาย (Elimination)	5
3. วิธีการตรวจวัด (Monitoring methods)	5
3.1. การวัดการเปื้อนของสารรังสีบนพื้นผิวของสถานที่ปฏิบัติงาน	6
3.2. การตรวจวัดปริมาณสารรังสีในอากาศของห้องปฏิบัติงาน	7
3.3. การตรวจวัดตัวอย่างสิ่งขับถ่ายและตัวอย่างทางชีวภาพอื่นๆ	8
3.4. การตรวจวัดสารรังสีในร่างกายโดยตรง	8
4. การคำนวณปริมาณสารรังสีที่เข้าสู่ร่างกาย (Intake estimate)	9
4.1. การคำนวณปริมาณสารรังสีที่เข้าสู่ร่างกายโดยการตรวจวัดการฟุ้งกระจายของสารรังสี ในอากาศ	9
4.2. การคำนวณปริมาณสารรังสีที่เข้าสู่ร่างกาย จากการตรวจวัดปริมาณสารรังสีในสิ่งขับถ่าย หรือตรวจวัดโดยตรงที่อวัยวะหรือทั่วร่างกาย	10
5. การประเมินค่าปริมาณรังสีจากภายในร่างกาย	11
6. ชีตจำกัดการได้รับรังสี	12
7. ค่าอ้างอิง(Reference Level)	15
เอกสารอ้างอิง	17
ตัวอย่างการกำหนดคุณสมบัติของไอ โอดีนและยูเรเนียมจาก ICRP78	18

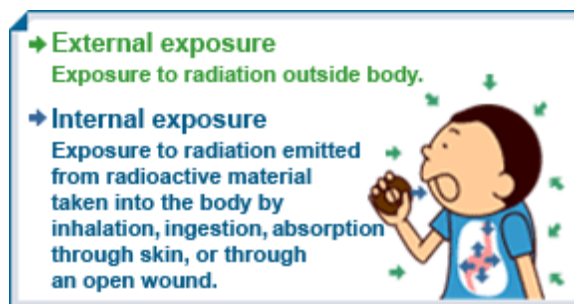


การตรวจวัดและประเมินค่าปริมาณรังสีจากภายในร่างกาย

บทนำ

การปฏิบัติงานกับสารรังสีในด้านต่างๆ ผู้ปฏิบัติงานมีโอกาสได้รับรังสีทั้งจากภายนอกในร่างกาย และภายในร่างกาย โดยการได้รับรังสีจากภายนอกในร่างกาย สารรังสีนั้นจะแผ่รังสีชนิดต่างๆเข้าสู่ร่างกาย ผลของรังสีที่ได้รับนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของรังสี และปริมาณรังสี ส่วนการได้รับรังสีจากภายในร่างกายนั้น เป็นการได้รับรังสีจากการที่ได้รับสารรังสีเข้าสู่ร่างกาย โดยทางการหายใจ กิน ทางผิวหนังหรือทางบาดแผล ซึ่งผลของการได้รับรังสีจากภายในร่างกายจะยังคงมีอยู่จนกว่าสารรังสีเหล่านั้นจะถูกขับออกจากร่างกายจนหมด สารรังสีแต่ละตัวจะมีความสามารถในการขับออกจากร่างกายแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับค่าครึ่งชีวิตยังผลหรือ Effective half-life ซึ่งหมายถึงเวลาที่ทำให้สารรังสีขับออกจากร่างกายครึ่งหนึ่งจากปริมาณเดิมของสารรังสีนั้นๆ

ผู้ปฏิบัติงานที่มีโอกาสได้รับสารรังสีเข้าสู่ร่างกายส่วนใหญ่จะทำงานเกี่ยวข้องกับต้นกำเนิดรังสีชนิดไม่ปิดผนึก(unsealed source) ที่สามารถระเหยและฟุ้งกระจายเข้าสู่ร่างกายได้ง่าย สารรังสีที่เข้าสู่ร่างกายแล้วทำให้เป็นอันตรายต่อร่างกายและอวัยวะภายในร่างกายมากที่สุดคือ สารรังสีที่ให้รังสีแอลฟา เนื่องจากเมื่อผ่านตัวกลางจะสูญเสียพลังงานส่วนใหญ่ในการทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนจำเพาะสูง สารรังสีเมื่อเข้าสู่ร่างกายจะมีการส่งผ่านและสะสมตามอวัยวะต่างๆในร่างกาย สารรังสีแต่ละชนิดจะมีการสะสมในอวัยวะต่างๆไม่เหมือนกัน เช่น I-131 อวัยวะที่ไปสะสมมากที่สุดหรืออวัยวะวิกฤติ คือ ไทรอยด์ เป็นต้น

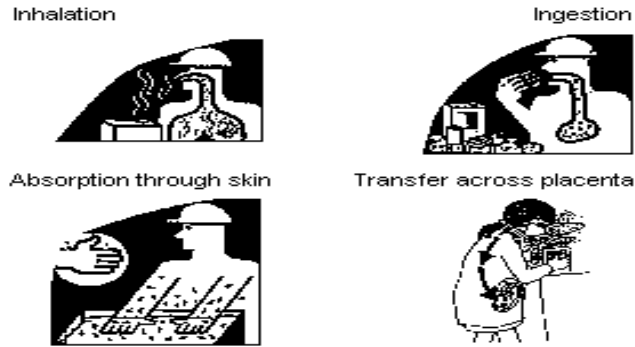


1. เส้นทางการเข้าสู่ร่างกายของสารรังสี (Entry of Radionuclides into the Body)

สารรังสีสามารถเข้าสู่ร่างกายได้หลายทางด้วยกัน คือ

1.1 การหายใจ (Inhalation)

สารรังสีสามารถเข้าสู่ร่างกายได้โดยการหายใจเข้าไปยังระบบทางเดินหายใจ และส่งผ่านไปยังส่วนอื่นๆในระบบทางเดินหายใจ ส่วนที่เหลือจะถูกขับออกโดยการหายใจออก และเข้าสู่ระบบย่อยอาหาร ถูกซึมเข้าสู่ระบบของไหลภายนอกเซลล์ และสะสมในอวัยวะอื่นๆภายในร่างกาย โดยกลไกของร่างกาย คุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของสารรังสีชนิดนั้นๆ



รูปที่ 1 เส้นทางการได้รับรังสีวิธีต่างๆ

1.2 การกิน (Ingestion)

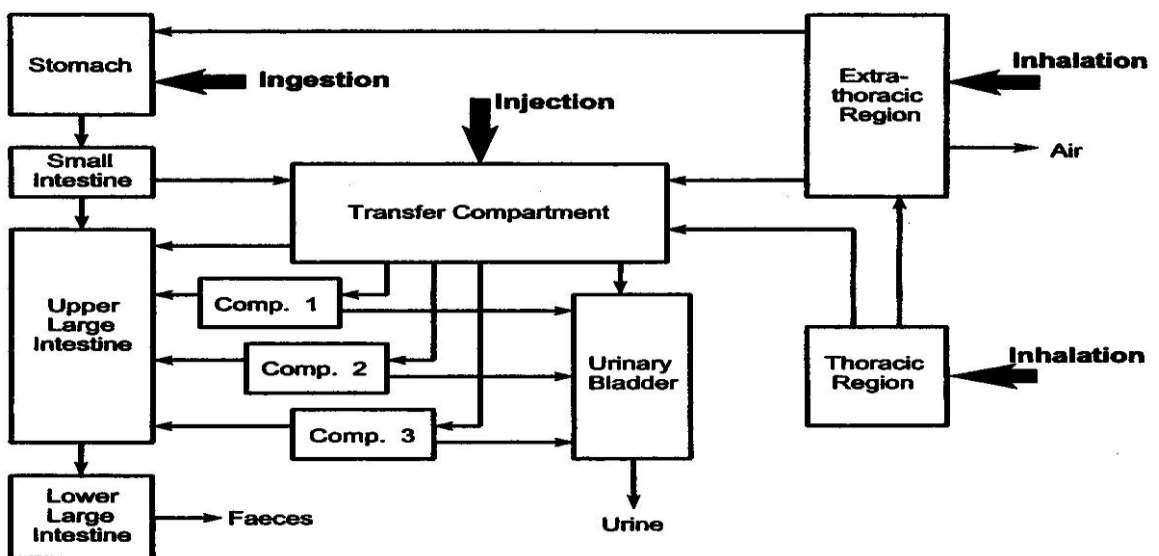
เมื่อสารรังสีเข้าทางปากจะส่งต่อไปยังระบบย่อยอาหาร สารรังสีที่ไม่ดูดซึมในกระเพาะอาหาร จะถูกขับออกจากร่างกายโดยทางอุจจาระ ถ้าสารรังสีนั้นสามารถนำพาไปได้ตามของเหลวภายในร่างกาย จะส่งผ่านไปตามส่วนต่างๆ โดยการแพร่ และการรวมเป็นเนื้อเดียวกันกับน้ำ หรือคั่งอยู่ในอวัยวะและเนื้อเยื่อ

1.3 ซึมผ่านผิวหนัง (Absorption through skin)

การดูดซึมจะสะสมอยู่ในอวัยวะใต้ผิวหนังและเลือด สารรังสีบางตัวจะคงอยู่ที่ใต้ผิวหนัง ก่อนระยะหนึ่งก่อนที่จะดูดซึมเข้าไปตามส่วนต่างๆ เช่น ครีเดียมออกไซด์ที่อยู่ในรูปของของเหลวหรือไอ สามารถซึมผ่านผิวหนังและเข้าไปอยู่ในส่วนต่างๆของร่างกายที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบ

1.4. ทางบาดแผล (Wound)

เส้นทางการเข้าสู่ร่างกายเช่นเดียวกับทางผิวหนัง



รูปที่ 2 เส้นทางการเข้าสู่ร่างกายของสารรังสี



2. การกำจัดสารกัมมันตรังสีให้ออกจากร่างกาย (Elimination)

การกำจัดสารรังสีออกจากร่างกายเกิดขึ้นได้ทั้งจากการสลายตัวของสารรังสีเอง และการขจัดออกด้วยกลไกของร่างกายโดยการขับถ่ายออกทางปัสสาวะ อุจจาระ การหายใจออก เหงื่อ และของเหลวต่างๆที่ขับถ่ายออกจากร่างกาย การขับถ่ายสารรังสีออกทางอุจจาระมาจากการรับสารรังสีเข้าไปแล้วไม่เกิดการดูดซึมในของเหลวภายในร่างกาย ส่วนการขับถ่ายสารรังสีออกทางปัสสาวะนั้นได้มาจากสารรังสีนั้นละลายได้ในของเหลวภายในร่างกายแล้วเกิดการดูดซึมส่งผ่านไปยังระบบของเหลวภายในร่างกายลงไปที่ไตและกระเพาะปัสสาวะ หลังจากนั้นสารรังสีจะไปสะสมในอวัยวะต่างๆ ภายในร่างกาย ซึ่งสารรังสีแต่ละชนิดจะมีอวัยวะสะสมที่ไม่เหมือนกัน สารรังสีแต่ละชนิดจะมีอัตราการขจัดออกจากร่างกายที่แตกต่างกันเช่นกันขึ้นอยู่กับค่าครึ่งชีวิตยังผลหรือ effective half- life ดังแสดงในสมการ

$$\lambda = \lambda_p + \lambda_b$$

λ = ค่าคงที่การสลายตัวของสารรังสีรวม (decay constant)

λ_p = ค่าคงที่การสลายตัวเนื่องจากสารรังสีเอง (Physical Decay Constant)

λ_b = ค่าคงที่การสลายตัวเนื่องจากร่างกายขจัดออก (Biological Decay Constant)

$$\text{ซึ่ง } \lambda = 0.693 / T_{1/2}$$

$$\text{ดังนั้น } 0.693 / T_{1/2} = (0.693 / T_p) + (0.693 / T_b)$$

$$1 / T_{1/2} = (T_b + T_p) / (T_p \cdot T_b)$$

$$T_{1/2} = (T_p \cdot T_b) / (T_b + T_p)$$

$T_{1/2}$ = ครึ่งชีวิตยังผล (Effective half-life)

T_p = ครึ่งชีวิตของสารรังสี (Physical half-life)

T_b = ครึ่งชีวิตเนื่องจากร่างกายขจัดออก (Biological half-life)

3. วิธีการตรวจวัด (Monitoring methods)

การตรวจวัดปริมาณรังสีจากภายในร่างกายเป็นการประเมินโดยรวมของทั้งสภาวะแวดล้อมต่างๆของสถานปฏิบัติการ และการได้รับรังสีรายบุคคล ซึ่งการประเมินสามารถทำได้ทั้งการตรวจวัดรังสีที่ทะลุออกมาจากร่างกายโดยตรง หรือจากการตรวจวัดโดยอ้อมจากการตรวจวัดตัวอย่างทางชีวภาพหรือทางกายภาพ ผลจากการตรวจวัดที่ได้นำมาใช้ในการคำนวณค่าปริมาณสารรังสีที่ได้รับเข้าสู่ร่างกายหรือ Intake estimate เทคนิคที่ใช้ในการประเมินดังกล่าวสามารถเลือกใช้อย่างใดอย่างหนึ่งหรือมากกว่าหนึ่งวิธีต่อไปนี้เป็นคือ



วิธีการตรวจวัดโดยตรง เป็นการวัดปริมาณรังสีที่ทั่วร่างกายหรือวัดที่อวัยวะใดอวัยวะหนึ่งโดยนำเครื่องมือมาตรวจวัดภายนอกในร่างกายตรงตำแหน่งที่ต้องการตรวจวัด

วิธีการตรวจวัดโดยอ้อม เป็นการตรวจวัดปริมาณรังสีจากตัวอย่างทางชีวภาพ เช่น ตัวอย่างสิ่งขับถ่าย ลมหายใจ หรือการตรวจวัดตัวอย่างทางกายภาพ เช่น กระจกกรองที่ได้จากเครื่องตรวจวัดอากาศรายบุคคลหรือแบบติดตั้งอยู่กับที่ หรือจากการตรวจวัดการเปราะเปื้อนบนพื้นผิวต่างๆภายในห้องปฏิบัติการ

การเลือกวิธีการตรวจวัดที่ดีที่สุดขึ้นอยู่กับ ปริมาณสารรังสีที่มีอยู่ในตัวอย่าง ชนิด และการสลายตัวของไอโซโทปรังสี รูปแบบทางกายภาพและทางเคมีของสารรังสีนั้น ความไวในการตรวจวัดด้วยเทคนิคต่างๆ และสถานะแวดล้อมการทำงานต่างๆไป

การตรวจวัดปริมาณรังสีดำเนินการเพื่อประเมินสถานะของการทำงาน และการได้รับรังสีรายบุคคล เพื่อช่วยให้แน่ใจได้ว่ามีความปลอดภัยในการปฏิบัติงาน และสถานะทางรังสีในห้องปฏิบัติงานอยู่ในระดับที่น่าพอใจ

การตรวจวัดปริมาณรังสีเป็นการวิเคราะห์ และประเมินความปลอดภัยในการใช้สารรังสี โดยมีรายละเอียดเกี่ยวกับการตรวจวัดความเปราะเปื้อน การเก็บตัวอย่างในการวิเคราะห์ และการวัดปริมาณสารรังสีในตัวอย่างที่วิเคราะห์หรือในอวัยวะหรือเนื้อเยื่อหรือทั่วร่างกาย เพื่อประเมินปริมาณสารรังสีที่ร่างกาย อวัยวะและเนื้อเยื่อได้รับ ตลอดจนควบคุมและออกแบบการทำงานให้เกิดความปลอดภัย และคล่องตัวในการทำงาน การตรวจวัดปริมาณรังสีเพื่อป้องกันสารรังสีชนิดไม่ปิดผนึกเข้าสู่ร่างกาย สามารถทำได้โดยวิธีใดวิธีหนึ่งหรือหลายวิธีต่อไปนี้เป็นวิธีการตรวจวัดความเปราะเปื้อนบนพื้นผิว หรือการตรวจวัดตัวอย่างอากาศในบริเวณที่ปฏิบัติงาน หรือการตรวจวัดสิ่งขับถ่าย หรือการตรวจวัดสารรังสีในร่างกายโดยตรง

3.1. การวัดการเปราะเปื้อนของสารรังสีบนพื้นผิวของสถานที่ปฏิบัติงาน

เป็นการวัดปริมาณสารรังสีที่เปราะเปื้อนบนพื้นผิวที่ปฏิบัติงาน เพื่อประเมินสถานะการทำงาน ประเมินโอกาสที่สารรังสีจะสามารถเข้าสู่ร่างกาย ซึ่งหากตรวจพบการเปราะเปื้อนบ่อยและปริมาณรังสีค่อนข้างสูง โอกาสที่ผู้ปฏิบัติงานจะได้รับสารรังสีเข้าสู่ร่างกายก็จะสูงตามไปด้วย นอกจากนี้ยังเป็นการหามาตรการในการป้องกันการได้รับรังสีต่อไป การตรวจวัดปริมาณสารรังสีบนพื้นผิวมักจะใช้เป็นตัวบ่งชี้ระดับความแรงรังสีในสถานที่ทำงานที่จะใช้เป็นข้อมูลประกอบในการตัดสินใจเลือกวิธีการตรวจวัดและไม่ได้ใช้ในการคำนวณค่าปริมาณสารรังสีที่เข้าสู่ร่างกาย แต่ในบางประเทศได้กำหนดค่าขีดจำกัดสูงสุดในการเปราะเปื้อนบนพื้นผิวของสารรังสีแต่ละชนิด ที่สัมพันธ์กับการได้รับรังสีจากภายในร่างกาย ทำให้การตรวจวัดโดยวิธีนี้สามารถหาปริมาณสารรังสีเข้าสู่ร่างกายได้ โดยเทียบกับค่าขีดจำกัดสูงสุดในการเปราะเปื้อนสารรังสีแต่ละชนิดนั้น ซึ่งขีดจำกัดนั้นมีผลทำให้ได้รับปริมาณรังสีเท่ากับขีดจำกัดการได้รับรังสีในหนึ่งปี



รูปที่ 3 แสดงวิธีการตรวจวัดการเปราะเปื้อนบนพื้นผิว

3.2. การตรวจวัดปริมาณสารรังสีในอากาศของห้องปฏิบัติงาน

การตรวจวัดด้วยวิธีนี้เป็นการประมาณค่าของการได้รับสารรังสีเข้าสู่ร่างกาย จากการฟุ้งกระจายของสารรังสีเข้าสู่คนทำงานโดยการหายใจ การตรวจวัดวิธีนี้มีประโยชน์สำหรับคนที่ทำงานในโรงบดแร่ คนขุดแร่ยูเรเนียม คนที่ทำงานกับสารรังสีที่สามารถฟุ้งกระจายได้ง่ายในอากาศ และสามารถใช้ในการคำนวณปริมาณสารรังสีที่ได้รับจากเรดอนและทอรอนในหลอดลมได้ วิธีนี้เป็นการประเมินปริมาณสารรังสีที่เข้าสู่ร่างกายโดยทางอ้อม เหมาะสำหรับตรวจวัดในกรณีต่างๆดังต่อไปนี้

1. ในกรณีเกิดการเปราะเปื้อนของสารรังสีเข้าสู่ร่างกายโดยการหายใจ
2. ในกรณีเกิดอุบัติเหตุทางรังสีโดยการหายใจเอาสารรังสีเข้าสู่ร่างกายในปริมาณมากๆ
3. เป็นตัวที่แสดงค่าการฟุ้งกระจายของสารรังสีในอากาศ ซึ่งอาจจะเป็นการลดความถี่ของการตรวจวัดสารรังสีในสิ่งขั้บถ่ายของคนทำงาน



รูปที่ 4 แสดงวิธีการเก็บตัวอย่างอากาศ

การตรวจวัดปริมาณรังสีในอากาศนี้การแปลผลค่อนข้างยาก เนื่องจากตำแหน่งที่ทำการตรวจวัดไม่ใช่บริเวณที่ใกล้เคียงกับบริเวณอากาศของคนทำงานที่หายใจเข้าไปจริงๆ ดังนั้นหากต้องการให้ได้ค่าที่ใกล้เคียงกับอากาศในบริเวณที่หายใจของคนทำงานจริง ควรใช้เครื่องตรวจวัดอากาศประจำตัวบุคคล (Personal Air Sampler (PAS)) การคำนวณค่าปริมาณสารรังสีที่ได้รับเข้าสู่ร่างกายจากการตรวจวัดการฟุ้งกระจายของสารรังสีในอากาศนี้ ไม่ได้ขึ้นอยู่กับสัมผัสกับสัดส่วนการคงอยู่ในร่างกายแต่อย่างใด นอกจากนี้การตรวจวัดนี้ยังมีข้อเสียคือไม่สามารถตรวจวัดหรือเก็บตัวอย่างซ้ำได้หากเกิดข้อสงสัย



หรือเกิดการสูญหายของตัวอย่างเกิดขึ้น แต่อย่างไรก็ตามวิธีนี้สามารถคำนวณค่าปริมาณสารรังสีที่เข้าสู่ร่างกายได้ในกรณีที่มีการตรวจวัดโดยตรงหรือโดยอ้อมวิธีอื่น ๆ มีความไวในการตรวจวัดไม่เพียงพอ ค่าปริมาณสารรังสีในอากาศไม่ควรเกินค่าขีดจำกัดสูงสุดของการฟุ้งกระจายของสารรังสีในอากาศหรือค่า Derived Air Concentration (DAC)

3.3 การตรวจวัดตัวอย่างสิ่งขับถ่ายและตัวอย่างทางชีวภาพอื่นๆ

เป็นการตรวจวัดปริมาณรังสีในตัวอย่างสิ่งขับถ่ายต่างๆ หรือตัวอย่างทางชีวภาพอื่นๆ เช่น ตัวอย่างปัสสาวะ อุจจาระ ทมหายใจและเลือด ในบางกรณีอาจตรวจวัดในปัสสาวะหรือเส้นผมการเลือกตัวอย่างที่จะนำมาวิเคราะห์ต้องคำนึงถึงโครงสร้างทางเคมีหรือทางกายภาพ และความสามารถในการละลาย เช่น สารรังสีที่ไม่สามารถละลายได้ดี ทั้งจากการได้รับแบบการหายใจหรือการกิน การตรวจวัดและประเมินค่าปริมาณรังสีควรใช้ตัวอย่างอุจจาระจึงจะน่าเชื่อถือกว่า

ในกรณีเกิดอุบัติเหตุและได้รับรังสีสูง การเก็บตัวอย่างเลือดจะเป็นวิธีที่เหมาะสมที่จะสามารถบอกปริมาณรังสีที่ได้รับได้ โดยการนับเซลล์เม็ดเลือดขาว การเปลี่ยนแปลงโครโมโซม หรืออื่นๆ ที่เป็นตัวบ่งชี้ปริมาณรังสีที่ได้รับ

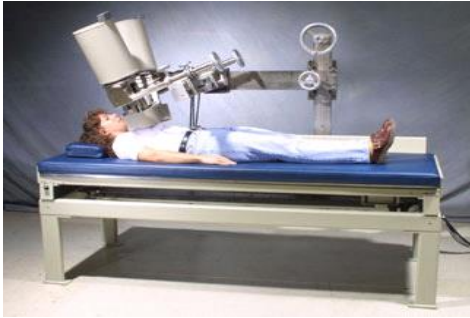
การตรวจวัดสิ่งขับถ่ายเป็นการตรวจวัดปริมาณสารรังสีที่ถูกขับออกจากสิ่งขับถ่าย ซึ่งจะสัมพันธ์กับปริมาณที่มีอยู่ในร่างกาย โดยส่วนใหญ่เป็นการวิเคราะห์ทางเคมี ข้อดีของวิธีนี้คือสามารถวัดสารรังสีที่มีปริมาณน้อยๆ ในร่างกายได้ แต่มีข้อที่ต้องคำนึงถึงคือ ต้องหลีกเลี่ยงการเกิดการเปราะเปื้อนของตัวอย่างในระหว่างการเก็บและการวิเคราะห์ ควรเก็บตัวอย่างให้ครบ 24 ชั่วโมง เพื่อใช้เป็นตัวแทนในการขับถ่ายต่อวัน ระบุช่วงเวลาในการเก็บตัวอย่าง และปริมาณของตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์ต้องเหมาะสมกับความไวในการวิเคราะห์สารรังสีนั้นๆ บางครั้งอาจต้องเก็บตัวอย่างรวมไว้เป็นเวลาหลายวันจึงจะเหมาะสม หากยังไม่วิเคราะห์ตัวอย่างทันทีควรเก็บรักษาตัวอย่างไว้ในที่ที่อุณหภูมิต่ำๆ ส่วนการเก็บตัวอย่างอุจจาระควรเก็บในถุงพลาสติกซึ่งจะเป็นการง่ายในการเผาตัวอย่าง เพราะถุงพลาสติกสามารถเผาไปพร้อมกับตัวอย่างอุจจาระ การวิเคราะห์โดยวิธีนี้เป็นการประเมินการได้รับสารรังสีเข้าสู่ร่างกาย โดยการเลือกวิเคราะห์ตัวอย่างให้เหมาะสมกับนิวไคลด์นั้นๆ

3.4 การตรวจวัดสารรังสีในร่างกายโดยตรง

เป็นการวัดปริมาณสารรังสีที่มีอยู่ในร่างกายโดยตรง โดยการที่วางหัววัดรังสีภายนอกในร่างกายตรงตำแหน่งที่สารรังสีอยู่ เหมาะสำหรับการวัดสารรังสีที่สามารถทะลุผ่านออกมานอกร่างกายได้ โดยเฉพาะรังสีแกมมา ตัวอย่างเช่น Na-22 Fe-59 Co-60 Zn-65 Rb-86 Sr-85 Te-132 I-131 Cs-137 Ba-140 Ce-144 Au-198 U-235 และ Np-239 เครื่องวัดรังสีชนิดนี้ต้องมีหัววัดรังสีที่มีประสิทธิภาพสูงอยู่ในเครื่องกำบังที่ดี มีความไวสูง สามารถแยกพลังงานรังสีแกมมาได้ดี และค่าปริมาณรังสีตามธรรมชาติต่ำ การวัดโดยวิธีนี้จะเป็นที่ยอมรับมากกว่าการวิเคราะห์ในปัสสาวะ และผู้ที่ต้องการวัดต้องทำความสะอาดร่างกายและเปลี่ยนเสื้อผ้าที่สะอาด เพื่อป้องกันการเปราะเปื้อนสารรังสี



จากภายนอก ร่างกายที่จะไปรบกวนการตรวจวัด ทำให้ค่าที่ตรวจวัดได้ไม่ได้เกิดจากการได้รับสารรังสีเข้าสู่ร่างกายจริงๆ ข้อดีของการวัดด้วยวิธีนี้คือ ในกรณีเกิดอุบัติเหตุสามารถวัดได้อย่างรวดเร็ว



รูปที่ 5 แสดงวิธีการตรวจวัดปริมาณรังสีในร่างกายโดยตรง

4. การคำนวณปริมาณสารรังสีที่เข้าสู่ร่างกาย (Intake estimate)

การคำนวณค่าปริมาณสารรังสีที่เข้าสู่ร่างกาย เป็นการคำนวณจากข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดด้วยวิธีต่างๆ ทั้งจากการตรวจวัดโดยตรงที่อวัยวะ หรือตรวจวัดโดยอ้อมด้วยการตรวจวัดตัวอย่างทางกายภาพหรือทางชีวภาพต่างๆ ข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดจะสัมพันธ์กับปริมาณสารรังสีที่ร่างกายได้รับ ยกเว้นการตรวจวัดการเปราะเปื้อนบนพื้นผิว ซึ่งการตรวจวัดบนพื้นผิวห้องปฏิบัติการเป็นการตรวจสอบโอกาสในการได้รับสารรังสีเข้าสู่ร่างกาย หรือเป็นการตรวจสอบสถานะของห้องปฏิบัติการ ไม่สามารถใช้ในการคำนวณค่า Intake estimate ได้ เนื่องจากยังไม่มีค่ามาตรฐานในการเปรียบเทียบผลระหว่างค่าการเปราะเปื้อนและค่าปริมาณสารรังสีที่ได้รับ

ในเอกสาร ICRP 78 ได้กำหนดสัดส่วนปริมาณสารรังสีชนิดต่างๆ ที่คงอยู่ในอวัยวะหรือขับถ่ายออกทางปัสสาวะที่เวลาต่างๆ สามารถนำไปใช้ในการคำนวณปริมาณสารรังสีที่เข้าสู่ร่างกายได้ ซึ่งสัดส่วนต่างๆ เหล่านี้มีค่าที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางเคมีของสารรังสีชนิดนั้นๆ ด้วย โครงสร้างทางเคมีของสารรังสีเหล่านี้จะเป็นตัวกำหนดรูปแบบของการดูดกลืน (absorption types) ของสารรังสีนั้นๆ ดังนั้นหากทราบโครงสร้างทางเคมีของสารรังสีชนิดนั้นๆ ก็สามารถเลือกใช้ค่าต่างๆ ใน ICRP78 ได้อย่างถูกต้องตามความเป็นจริง นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับโปรแกรมในการตรวจวัดอีกด้วย วิธีการคำนวณปริมาณสารรังสีที่เข้าสู่ร่างกาย แบ่งตามวิธีการตรวจวัดด้วยเทคนิคต่างๆ ดังนี้

4.1 การคำนวณปริมาณสารรังสีที่เข้าสู่ร่างกายโดยการตรวจวัดการฟุ้งกระจายของสารรังสีในอากาศ

การฟุ้งกระจายของสารรังสีในอากาศในห้องปฏิบัติงาน มีโอกาสทำให้ผู้ปฏิบัติงานได้รับสารรังสีเข้าสู่ร่างกาย โดยการหายใจเอาสารรังสีที่ปนเปื้อนอยู่ในอากาศ การได้รับสารรังสีมากหรือน้อยจะสัมพันธ์กับปริมาตรของอากาศที่หายใจเข้าไป ซึ่งปริมาตรของอากาศที่หายใจเข้าไป สามารถคำนวณได้



จากค่าอ้างอิงมาตรฐานอัตราการหายใจของคนปกติในวัยทำงานซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.2 ลูกบาศก์เมตรต่อ ชั่วโมง ดังนั้นปริมาณสารรังสีที่ร่างกายได้รับจากการตรวจวัดด้วยวิธีนี้สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\text{Intake} = \text{CIT}$$

เมื่อ C = ปริมาณการฟุ้งกระจายของสารรังสีในอากาศมีหน่วยเป็น Bq/m³

I = อัตราการหายใจมีหน่วยเป็น m³/hr

T = เวลาที่ปฏิบัติงานมีหน่วยเป็น ชั่วโมง

ปริมาณสารรังสีที่ฟุ้งกระจายในอากาศไม่ควรเกินค่า Derived Air Concentration(DAC) ซึ่งหมายถึงค่าขีดจำกัดสูงสุดของการฟุ้งกระจายของสารรังสีในอากาศ ที่ยอมให้ผู้ปฏิบัติงานทางรังสีในบริเวณนั้นปฏิบัติงานได้ 8 ชั่วโมงต่อวัน 5 วันในหนึ่งสัปดาห์ 50 สัปดาห์ใน 1 ปี หากการปฏิบัติงานกับบริเวณรังสีที่มีการฟุ้งกระจายของสารรังสีในอากาศเท่ากับค่า DAC จะมีผลทำให้ได้รับรังสีจากร่างกายเท่ากับขีดจำกัดสูงสุดของการได้รับรังสีในหนึ่งปีหรือ 20 mSv ซึ่งค่า DAC สามารถคำนวณได้ในหัวข้อ 6 ของเอกสารนี้

4.2 การคำนวณปริมาณสารรังสีที่เข้าสู่ร่างกาย จากการตรวจวัดปริมาณสารรังสีในสิ่งขับถ่ายหรือตรวจวัดโดยตรงที่อวัยวะหรือทั่วร่างกาย

ปริมาณรังสีที่ตรวจวัดได้ในตัวอย่างสิ่งขับถ่าย หรือในอวัยวะ หรือทั่วร่างกายจะเป็นสัดส่วนที่สัมพันธ์กับปริมาณสารรังสีที่ได้รับเข้าสู่ร่างกาย โดยสารรังสีที่ได้รับเข้าสู่ร่างกายจะมีการขจัดออกและมีการสะสมอยู่ในอวัยวะต่างๆด้วยสัดส่วนที่แตกต่างกันที่เวลา t วันหลังจากได้รับสารรังสีเข้าสู่ร่างกาย ตามลักษณะการได้รับรังสีเช่น การได้รับแบบเฉียบพลัน (Acute exposure) หรือ การได้รับรังสีอย่างต่อเนื่อง (Continuous exposure) ที่กำหนดไว้ในหนังสือ ICRP 78 ค่าต่างๆเหล่านี้แต่ละสารรังสีจะมีค่าที่แตกต่างกันไป วิธีการคำนวณสารรังสีที่เข้าสู่ร่างกายสามารถคำนวณได้ทั้งโดยการใส่โปรแกรมสำเร็จรูป หรือคำนวณจากสมการข้างล่างนี้ ตามโปรแกรมการตรวจวัด 2 กรณีคือ

- กรณีตรวจวัดแบบ special monitoring เป็นการตรวจวัดที่ไม่มีระยะเวลากำหนดแน่นอน ขึ้นอยู่กับผู้ที่ต้องการตรวจวัด ซึ่งโดยปกติจะตรวจวัดเมื่อเกิดเหตุการณ์สงสัยว่าผิดปกติ หรือมีสิ่งเตือนบอกเหตุในระหว่างการตรวจวัดแบบ routine monitoring โดยการคำนวณปริมาณสารรังสีที่ร่างกายได้รับสามารถคำนวณได้จากสมการข้างล่างนี้

$$\text{Intake} = \frac{M}{m(t)}$$



- กรณีตรวจวัดแบบ routine monitoring เป็นการตรวจวัดแบบเป็นประจำสม่ำเสมอ มีการกำหนดคนที่
 จะต้องตรวจวัดและช่วงเวลาการตรวจวัดที่แน่นอน โดยการคำนวณปริมาณสารรังสีที่ร่างกายได้รับ
 สามารถคำนวณได้จากสมการข้างล่างนี้

$$\text{Intake} = \frac{M}{m(T/2)}$$

เมื่อ

M = ค่าปริมาณสารรังสีที่มีในตัวอย่างสิ่งขับถ่ายหรือในอวัยวะ (Bq)

m(t) = ปริมาณสารรังสีที่วัดได้ในสิ่งขับถ่ายหรือในอวัยวะหรือทั่วร่างกายที่เวลา t วันหลังจาก intake 1 Bq

m(T/2) = ปริมาณสารรังสีที่วัดได้ในสิ่งขับถ่ายหรือในอวัยวะหรือทั่วร่างกายที่เวลา T/2 วันหลังจาก

intake 1 Bq โดย T คือระยะห่างระหว่างการตรวจวัดแต่ละครั้งมีหน่วยเป็นวัน

5. การประเมินค่าปริมาณรังสีจากภายในร่างกาย

การประเมินค่าปริมาณรังสีจากภายในร่างกาย เป็นการคำนวณหาค่า committed Effective Dose Equivalent (CEDE) ซึ่งหมายถึงปริมาณรังสีที่ร่างกายได้รับในช่วงเวลา 50 ปี หลังจากได้รับสารรังสีเข้าสู่ร่างกาย ซึ่งมีค่าเท่ากับผลรวมของ Committed Dose Equivalent (CDE) ซึ่งหมายถึงปริมาณรังสีที่อวัยวะและเนื้อเยื่อได้รับในช่วงเวลา 50 ปี หลังจากได้รับสารรังสีเข้าสู่ร่างกายคูณกับค่า weighting factor ของอวัยวะหรือเนื้อเยื่อนั้นๆ ดังแสดงในตารางที่ 1 ดังสมการ

$$\text{CEDE} = \sum (w_T \cdot \text{CDE})$$

หรือค่า CEDE คำนวณได้จากการนำค่า Dose Coefficient ที่เหมาะสมมาคูณกับค่าปริมาณสารรังสีที่ได้รับเข้าสู่ร่างกายหรือค่า Intake นั้นเอง ซึ่งค่า Dose Coefficient หมายถึง สัดส่วนปริมาณรังสีที่ร่างกายได้รับในช่วงเวลา 50 ปี หลังจากได้รับสารรังสีเข้าสู่ร่างกายมีแสดงไว้ใน ICRP 78 มีหน่วยเป็น Sv/Bq ค่านี้จะมีค่าแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับรูปแบบของสารประกอบทางเคมีของสารรังสีนั้นๆ และวิธีการได้รับสารรังสีเข้าสู่ร่างกาย การคำนวณค่า CEDE และ CDE เป็นไปดังสมการ

$$\text{CEDE} = \text{Intake} \times \text{Dose Coefficient}$$

$$\text{CDE} = \text{Intake} \times \text{CDE per unit intake}$$

CDE per unit intake หรือ Committed Dose Equivalent per unit intake เป็นสัดส่วนปริมาณรังสีที่อวัยวะและเนื้อเยื่อได้รับในช่วงเวลา 50 ปี หลังจากได้รับสารรังสีเข้าสู่ร่างกายมีแสดงไว้ใน ICRP 78 มีหน่วยเป็น Sv/Bq



ตารางที่ 1 แสดงค่า weighting factor ของอวัยวะและเนื้อเยื่อต่างๆ

Organ or Tissues	Weighting factor(W_T)	Organ or Tissues	Weighting factor(W_T)
Gonads	0.20	Liver	0.05
Bone marrow(red)	0.12	Oesophagus	0.05
Colon	0.12	Thyroid	0.05
Lung	0.12	skin	0.01
Stomach	0.12	Bone surfaces	0.01
Bladder	0.05	remainder	0.05
Breasts	0.05		

ส่วนการคำนวณค่า CEDE จากการตรวจวัดการเปราะเปื้อนของสารรังสีบนพื้นผิวของสถานที่ปฏิบัติงานนั้นมีวิธีการคำนวณที่แตกต่างออกไป ดังที่ได้กล่าวไปแล้วว่าวิธีการนี้ไม่ได้ใช้ในการคำนวณหาปริมาณสารรังสีที่เข้าสู่ร่างกาย แต่สามารถคำนวณค่า CEDE ได้โดยเทียบกับค่าขีดจำกัดสูงสุดในการเปราะเปื้อนบนพื้นผิวสารรังสีแต่ละชนิดดังแสดงในตารางที่ 3 ในหัวข้อที่ 6 ในเอกสารนี้ ซึ่งขีดจำกัดเหล่านี้มีผลทำให้ได้รับปริมาณรังสีที่ได้รับมีค่าเท่ากับขีดจำกัดการได้รับรังสีในหนึ่งปี หรือ 20 mSv นั่นเอง ขีดจำกัดนี้จะไม่ใช้เป็นมาตรฐานสากล ขึ้นอยู่กับประเทศใดจะกำหนดขึ้นมา

6. ขีดจำกัดการได้รับรังสี

ขีดจำกัดการได้รับรังสี หรือ Dose limit สำหรับผู้ปฏิบัติงานทางรังสี แสดงในตารางที่ 2 นอกจากนี้ยังมีขีดจำกัดอื่นๆที่เกี่ยวข้องกับการได้รับสารรังสีเข้าสู่ร่างกาย ซึ่งเป็นขีดจำกัดที่สัมพันธ์กับ Dose limit นั่นคือ Annual limit on intake (ALI) หมายถึง ปริมาณสารรังสีที่ยอมให้ร่างกายของผู้ปฏิบัติงานทางรังสีรับได้สูงสุดใน 1 ปี มีหน่วยเป็นเบคเคอเรล(Bq) และค่า Derived Air Concentration(DAC) หมายถึง ปริมาณสารรังสีที่ฟุ้งกระจายในอากาศสูงสุดที่ยอมให้ผู้ปฏิบัติงานทางรังสีในบริเวณนั้นปฏิบัติงานได้ 8 ชั่วโมงต่อวัน 5 วันในหนึ่งสัปดาห์ 50 สัปดาห์ใน 1 ปี มีหน่วยเป็นเบคเคอเรลต่อลูกบาศก์เมตร โดยค่า ALI และ DAC สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$ALI = \frac{0.02}{\text{Dose Coefficient}}$$

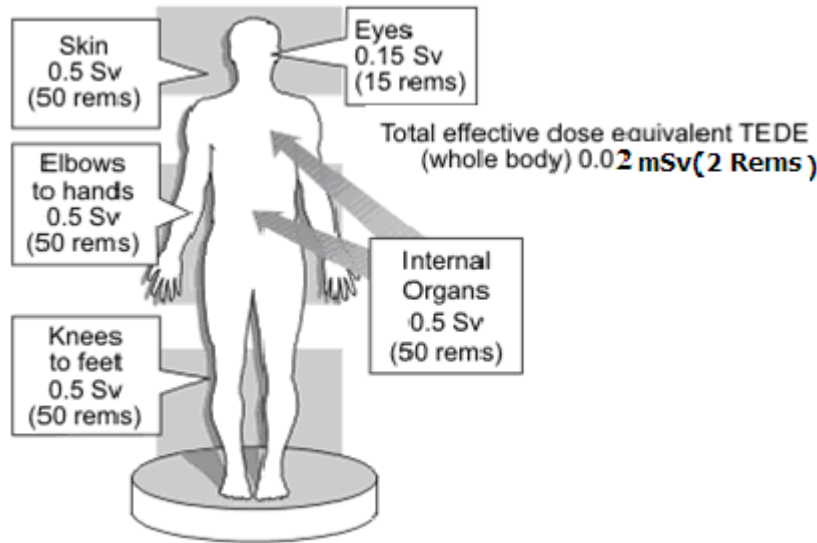


ส่วนค่า DAC คำนวณจากการได้รับปริมาณสารรังสีจากการหายใจในหนึ่งปีหรือ 2000 ชั่วโมง สามารถคำนวณได้ดังสมการ

$$DAC = \frac{ALI}{2000 \text{ hr} \times 1.2 \text{ m}^3/\text{hr}}$$

ตารางที่ 2 Dose limit สำหรับผู้ปฏิบัติงานทางรังสี

Applications	Dose limit
Effective dose	20 mSv/year (averaged over defined period of 5 years) 50 mSv in any single year
Equivalent dose in	
เลนส์ตา	150 mSv/year
ผิวหนัง	500 mSv/year
มือเท้า	500 mSv/year



ผู้ปฏิบัติงานทางรังสีที่มีโอกาสได้รับรังสีทั้งจากภายนอกและภายในร่างกาย ปริมาณรังสีที่ได้รับทั้งหมดหรือ Total Effective Dose Equivalent (TEDE) ไม่ควรเกินค่าขีดจำกัดที่กำหนด ดังแสดงในสมการ

$$TEDE = Hp(10) + CEDE, < 20 \text{ mSv}$$

เมื่อ Hp(10) คือ ปริมาณรังสีที่ได้รับจากภายนอก



นอกจากนี้ยังมีขีดจำกัดสูงสุดในการประกอบเป็นบนพื้นผิวสารรังสีแต่ละชนิด ซึ่งขีดจำกัดนี้มีผลทำให้ได้รับปริมาณรังสีเท่ากับขีดจำกัดการได้รับรังสีในหนึ่งปีหรือ 20 mSv ดังได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ 5 ขีดจำกัดนี้จะไม่ใช้เป็นมาตรฐานสากล ขึ้นอยู่กับประเทศใดจะกำหนดขึ้นมา ยกตัวอย่างเช่น การกำหนดค่าขีดจำกัดการประกอบเป็นบนพื้นผิวของประเทศออสเตรเลียที่แสดงในตารางที่ 3 ค่าขีดจำกัดนี้จะมีค่าแตกต่างกันไปแล้วแต่ความเป็นพิษของสารรังสีชนิดนั้นๆ

ตารางที่ 3 แสดงค่าขีดจำกัดการประกอบเป็นของสารรังสีชนิดต่างๆ

NUCLIDE	Limit Bq/cm ²	NUCLIDE	Limit Bq/cm ²	NUCLIDE	Limit Bq/cm ²
³ H	10 ³	⁹⁹ Mo	10 ³	¹⁸¹ Hf	10 ³
¹⁴ C	10 ³	^{99m} Tc	10 ³	¹⁸⁵ W	10 ³
²² Na	10 ²	⁹⁹ Tc	10 ³	¹⁸⁶ Re	10 ³
²⁴ Na	10 ³	¹⁰³ Ru	10 ³	¹⁹² Ir	10 ³
³² P	10 ²	¹⁰⁶ Ru	10 ²	¹⁹⁸ Au	10 ³
³⁵ S	10 ³	^{110m} Ag	10 ²	¹⁹⁷ Hg	10 ³
³⁶ Cl	10 ³	¹¹¹ Ag	10 ³	²⁰³ Hg	10 ³
⁴⁵ Ca	10 ³	¹⁰⁹ Cd	10 ²	²⁰¹ Tl	10 ³
⁴⁷ Ca	10 ³	^{115m} Cd	10 ²	²⁰⁴ Tl	10 ³
⁴⁶ Sc	10 ³	¹¹¹ In	10 ³	²¹⁰ Pb	10 ⁰
⁴⁷ Sc	10 ³	^{113m} In	10 ²	²¹⁰ Bi	10 ²
⁵¹ Cr	10 ³	¹¹³ Sn	10 ³	²¹⁰ Po	10 ⁰
⁵⁴ Mn	10 ³	¹²⁴ Sb	10 ²	²²³ Ra	10 ¹
⁵⁵ Fe	10 ³	¹²⁵ Sb	10 ³	²²⁴ Ra	10 ¹
⁵⁹ Fe	10 ³	¹²³ I	10 ³	²²⁶ Ra	10 ⁰
⁵⁶ Co	10 ²	¹²⁵ I	10 ²	²²⁷ Th	10 ⁰
⁵⁷ Co	10 ³	¹³¹ I	10 ²	²²⁸ Th	10 ⁰
⁵⁸ Co	10 ³	¹²⁹ Cs	10 ³	²³⁰ Th	10 ⁻¹
⁶⁰ Co	10 ²	¹³¹ Cs	10 ³	²³² Th	10 ⁻¹
⁶³ Ni	10 ³	¹³⁴ Cs	10 ²	²³¹ Pa	10 ⁻¹
⁶⁴ Cu	10 ²	¹³⁷ Cs	10 ²	²³² U	10 ⁻¹
⁶⁷ Cu	10 ²	¹³³ Ba	10 ³	²³⁴ U	10 ⁰
⁶⁵ Zn	10 ²	¹⁴⁰ La	10 ²	²³⁵ U	10 ⁰
⁶⁷ Ga	10 ³	¹³⁹ Ce	10 ³	²³⁶ U	10 ⁰
⁶⁸ Ga	10 ²	¹⁴¹ Ce	10 ³	²³⁸ U	10 ⁰
⁶⁸ Ge	10 ³	¹⁴⁷ Nd	10 ³	²³⁸ Pu	10 ⁻¹
⁷⁵ Se	10 ²	¹⁴⁷ Pm	10 ²	²³⁹ Pu	10 ⁻¹
⁷⁷ Br	10 ³	¹⁴⁷ Sm	10 ⁰	²⁴¹ Am	10 ⁻¹
⁸¹ Rb	10 ³	¹⁵³ Sm	10 ⁰	²⁴⁴ Cm	10 ⁻¹
⁸⁶ Rb	10 ²	¹⁵² Eu	10 ²	all other alpha emitters with a half life > 3 month	10 ⁻¹
⁸⁵ Sr	10 ³	¹⁵⁴ Eu	10 ²		
^{87m} Sr	10 ³	¹⁵³ Gd	10 ³		
⁸⁹ Sr	10 ²	¹⁶⁰ Tb	10 ³		
⁹⁰ Sr	10 ¹	¹⁶⁹ Yb	10 ³	All other non alpha emitting nuclides	10 ²
⁸⁷ Y	10 ³	¹⁷⁰ Tm	10 ³		
⁸⁸ Y	10 ³	¹⁶⁹ Yb	10 ³		
⁹⁰ Y	10 ²	¹⁷⁷ Lu	10 ³		



7. ค่าอ้างอิง(Reference Level)

ค่าอ้างอิงเป็นค่าที่ใช้ช่วยในการบริหารจัดการการดำเนินงาน เพื่อให้ได้รับปริมาณรังสีอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด เป็นค่าที่กำหนดขึ้นเพื่อให้สัมพันธ์กับการตรวจวัดและค่าปริมาณสารรังสีที่ได้รับเข้าสู่ร่างกาย หากค่าปริมาณสารรังสีที่ได้รับเข้าสู่ร่างกายหรือค่า Intake estimate มีค่าเกินค่านี้จะต้องมีการดำเนินการที่เหมาะสมหรือใช้ช่วยในการตัดสินใจอย่างใดอย่างหนึ่งตามนิยามของค่าอ้างอิง ค่านี้จะกำหนดขึ้นตามค่า Committed Effective Dose Equivalent ซึ่งค่าอ้างอิงที่เกี่ยวข้องกับการได้รับสารรังสีเข้าสู่ร่างกายมีด้วยกัน 2 ค่าคือ Recording Level(RL)และ Investigation Level(IL)

ค่า Recording Level(RL) หมายถึง ปริมาณรังสีที่ได้รับหรือปริมาณสารรังสีที่ได้รับเข้าสู่ร่างกายที่กำหนดขึ้นโดยหน่วยงานที่มีหน้าที่ในการกำกับดูแลความปลอดภัยทางรังสี ซึ่งหากค่าปริมาณรังสีที่ได้รับหรือปริมาณสารรังสีที่ได้รับเข้าสู่ร่างกายมีค่าเท่ากับหรือมากกว่าค่า RL จะต้องทำการเก็บบันทึกค่าการได้รับรังสีรายบุคคลของเจ้าหน้าที่ท่านนั้น โดยปกติค่า RL สำหรับการได้รับสารรังสีเข้าสู่ร่างกายในหนึ่งปีจะกำหนดตามค่าปริมาณรังสีจากภายในร่างกายหรือค่า Committed Effective Dose Equivalent(CEDE) ที่มีค่าเท่ากับ 1 mSv ค่า RL ขึ้นอยู่กับจำนวนครั้งในการตรวจวัดในหนึ่งปี RL มีหน่วยเป็นเบคเคอเรล ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการ

$$RL = \frac{0.001}{N.dose\ coefficient}$$

เมื่อ N = จำนวนครั้งในการวิเคราะห์หรือตรวจวัดต่อปี

ค่า Investigation Level(IL) หมายถึง ปริมาณรังสีที่ได้รับหรือปริมาณสารรังสีที่ได้รับเข้าสู่ร่างกายที่จะต้องตรวจสอบหาสาเหตุของการได้รับรังสี เนื่องจากมีแนวโน้มที่จะได้รับสารรังสีสูงกว่าปกติ เพื่อหามาตรการในการลดระดับรังสี หากค่าปริมาณรังสีที่ได้รับหรือปริมาณสารรังสีที่ได้รับเข้าสู่ร่างกายมีค่ามากกว่าค่า IL จะต้องวิเคราะห์หาสาเหตุ โดยปกติค่า IL สำหรับการได้รับสารรังสีเข้าสู่ร่างกายในหนึ่งปีจะเท่ากับค่า Committed Effective Dose Equivalent(CEDE) 5 mSv ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับจำนวนครั้งในการตรวจวัดในหนึ่งปี IL มีหน่วยเป็นเบคเคอเรล ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการ

$$IL = \frac{0.005}{N.dose\ coefficient}$$

นอกจากนี้ค่าอ้างอิงสามารถกำหนดเป็นค่าปริมาณสารรังสีที่มีอยู่ในตัวอย่างสิ่งขับถ่าย หรือในอวัยวะหรือทั่วร่างกายได้อีกด้วย ซึ่งจะสะดวกและลดขั้นตอนการทำงานได้ ค่าอ้างอิงเหล่านี้เป็นค่าที่



แปลงมาจากค่า Recording Level และค่า Investigation Level กำหนดไว้ในรูปของค่า Derived Recording level(DRL) และ Derived Investigation level(DIL) ค่า DRL และ DIL จะสัมพันธ์เกี่ยวข้องกับสัดส่วนการคงอยู่ในร่างกาย หรือการขับถ่ายสารรังสีออกจากร่างกายต่อวันของสารรังสีนั้นตามเวลา หลังจากได้รับสารรังสีเข้าสู่ร่างกาย โดยเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$DRL = \frac{0.001}{N. \text{ dose coefficient}} \times m(t)$$

ค่าปริมาณรังสีที่วัดได้ในสิ่งขับถ่ายหรือทั่วร่างกายหรือในอวัยวะที่มีค่าต่ำกว่า DRL ไม่จำเป็นต้องนำค่าที่ได้มาประเมินผลในรูปของ intake หรือ committed dose equivalent (CDE) และ committed effective dose equivalent (CEDE) แต่หากค่าปริมาณรังสีในอวัยวะหรือในสิ่งขับถ่ายมีค่าเกิน DRL หมายความว่าปริมาณรังสีมีความสำคัญพอที่จะต้องนำมาคำนวณเป็นค่าปริมาณรังสีที่ร่างกายได้รับและเก็บบันทึกค่า ส่วนค่าปริมาณรังสีในอวัยวะหรือในสิ่งขับถ่ายมีค่าเกิน DIL หมายความว่าค่าปริมาณรังสีที่ได้มีปริมาณที่ค่อนข้างสูง จำเป็นต้องตรวจสอบความถูกต้องของการคำนวณและการแปลงผลที่ได้ หรืออาจดำเนินการดังนี้

- ทำการวัดซ้ำเพื่อยืนยันผลที่ได้หรือเพื่อแก้ไขการประเมินครั้งแรก
- ใช้เทคนิคการตรวจสอบแบบใหม่เพิ่มเติม
- ทบทวนสภาวะการทำงานและการได้รับรังสี
- ควรพิจารณาขนาดของอนุภาค (particle size) ตามความเป็นจริง
- ทบทวนความถี่ในการตรวจวัด
- ทบทวนค่าตัวแปรต่างที่ใช้ในการคำนวณเพื่อแก้ไขค่า

หากการตรวจสอบข้างต้นถูกต้องแล้ว ให้ดำเนินการตรวจสอบสาเหตุของการได้รับรังสีสูงและหามาตรการในการลดระดับการได้รับรังสีลง โดยค่า DIL คำนวณได้ตามสมการ

$$DIL = \frac{0.005}{N. \text{ dose coefficient}} \times m(t)$$

ค่าขีดจำกัดต่างๆ และค่าอ้างอิงที่กำหนดขึ้นสามารถนำมาใช้ในการประเมินความปลอดภัยจากการได้รับรังสีได้ โดยนำค่าที่ตรวจวัดได้ในตัวอย่างหรือค่าปริมาณสารรังสีที่ร่างกายได้รับมาเทียบกับค่าอ้างอิงและค่าขีดจำกัดต่างๆเหล่านี้ เพื่อตรวจสอบความพึงพอใจในความปลอดภัยของสถานปฏิบัติงานใช้ในการปรับปรุงการทำงานหรือหามาตรการในการลดระดับรังสีหากการได้รับรังสีมีค่าสูงผิดปกติ



เอกสารอ้างอิง

1. CINDY, Conceptual Representation , Battele Memorial Institute,USA,1995
2. Safety Series no. 115 “Internation Basic Safety Standards for Protection Against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources”, International Atomic Energy Agency, Vienna, 1996
3. ICRP 78, “Individual Monitoring for Internal Exposure of Workers Replacement of ICRP publication 54”, Pergamon, 1997
4. Lecture note-Assessment of Occupational Exposure due to Intake of Radionuclide, training course in KOREA, 2007
5. Recommended limits on radioactive contamination on surfaces in laboratories (1995) Radiation Health Series No. 38 Approved at the 119th session of the National Health and Medical Research Council Canberra, June 1995 © Commonwealth of Australia 1995
6. IAEA Safety Standards Series no. RS-G-1.2, ”Assessment of Occupational Exposure Due to Intakes of Radionuclides”, Vienna, 1999



ตัวอย่างการกำหนดคุณสมบัติของไอโอดีนและยูเรเนียม จาก ICRP78



INDIVIDUAL MONITORING FOR INTERNAL EXPOSURE OF WORKERS

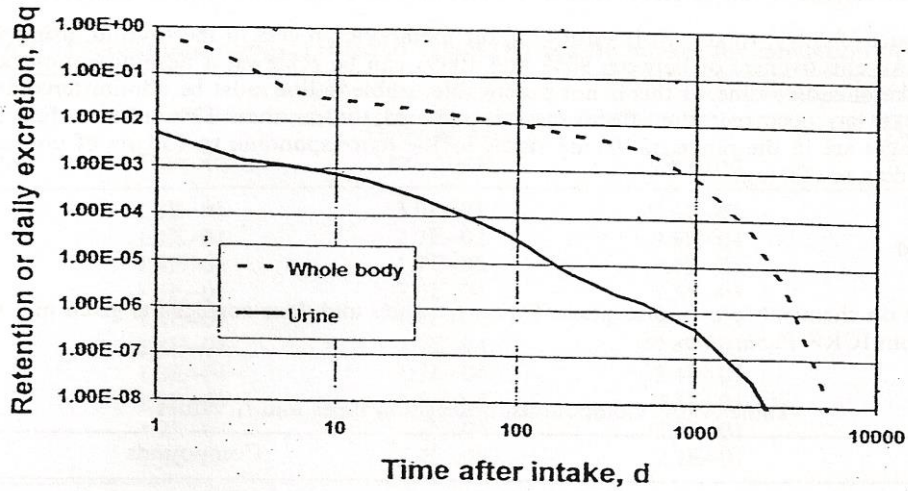


Fig. A.5.4. ^{106}Ru Ingestion: predicted values (Bq per Bq intake) following acute intake.

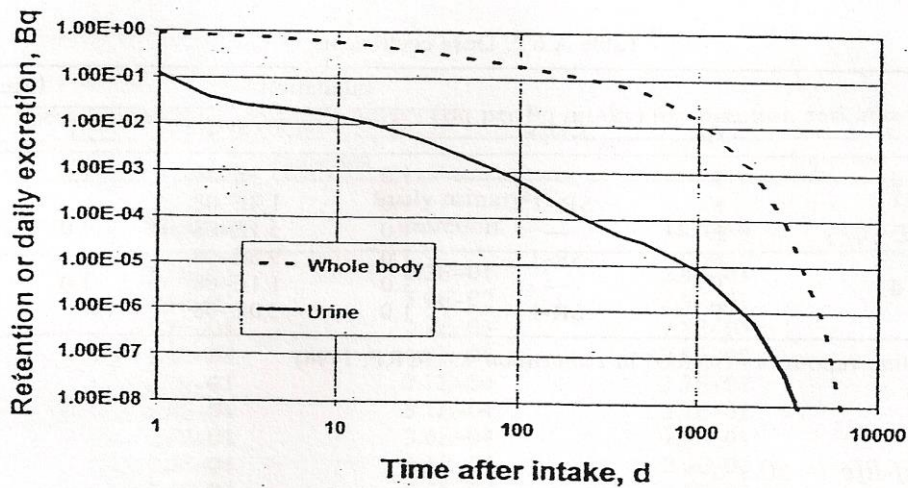


Fig. A.5.5. ^{106}Ru Injection: predicted values (Bq per Bq intake) following acute intake.

A.6. Iodine

Biokinetic model

The biokinetic model for iodine (Figure A.6.1.) is taken from *Publication 67* (ICRP, 1993) and was developed from an earlier model given in *Publication 30* (ICRP, 1979). It is assumed that of iodine reaching blood a fraction of 0.3 is accumulated in the thyroid gland and 0.7 is excreted directly in urine. The biological half-time in blood is taken to be 0.25 days. Iodide incorporated into thyroid hormones leaves the gland with a half-time of about 80 days and enters other tissues where it is retained with a half-time of 12 days. Most iodide (80%) is subsequently released and is available in the circulation for uptake by the gland and urinary excretion; the remainder (20%) is excreted in faeces in organic form.

The biokinetic model for iodine assumes that 0.3 is taken up by the thyroid and the remainder is excreted in urine. In fact, there are relatively large variations, depending on many parameters and these are especially important in case of thyroid dysfunctions. For example, current uptake values for a European euthyroid adult are in the range 0.20–0.25. Pathological states of the thyroid may result in uptake values from 0–0.05 (blocked thyroid) to more than 0.5. Hypothyroid adults have a low thyroid uptake, but a prolonged excretion, resulting in a thyroid dose a little larger than normal. On the contrary hyperthyroid adults exhibit a shorter iodine half-time in the thyroid and therefore have a smaller thyroid dose. When such cases are suspected, then individual values should be introduced in the dose calculation, especially in case of accidental exposure, where a precise assessment is needed.



INDIVIDUAL MONITORING FOR INTERNAL EXPOSURE OF WORKERS

Effect of medical intervention

Whatever the route of entry, treatment is saturating the metabolic process in the thyroid, using stable iodine as a blocking agent. An effectiveness of between 90% and 100% can be achieved if administration occurs before or at the time of intake of radioiodine. If this is not practicable, stable iodine must be administered as soon as possible after the intake has occurred; the effectiveness is reduced to less than 10% after a few hours. Current recommended dosages are in the range of 100 mg stable iodine (corresponding to 130 mg of potassium iodide) to 300 mg (corresponding to 390 mg).

Dosimetric data

The information on chemical forms, absorption Types, f_1 values and dose coefficients given in Tables A.6.1 and A.6.2 are taken from ICRP *Publication 68*.

Table A.6.1. Compounds, absorption types and f_1 values

Intake	f_1	Compounds
Ingestion	1.0	All compounds
Inhalation, Class SR-1	1.0	Iodine vapour
Inhalation, Type F	1.0	All other compounds

Table A.6.2. Dose coefficients

Nuclide	$t_{1/2}$	Type	Class	Inhalation		Ingestion	
				f_1	$e(50), Sv Bq^{-1}$	f_1	$e(50), Sv Bq^{-1}$
I-125	60.1 d	F	—	1.0	7.3E-09	1.0	1.5E-08
		F	SR-1 ^a	1.0	1.4E-08		
I-129	1.57E+07 y	F	—	1.0	5.1E-08	1.0	1.1E-07
		F	SR-1	1.0	9.6E-08		
I-131	8.04 d	F	—	1.0	1.1E-08	1.0	2.2E-08
		F	SR-1	1.0	2.0E-08		

^aThe model for iodine vapour is described in *Publication 68* (ICRP, 1994)

Iodine-125 (half-life = 60.1 d)

Table A.6.3. Emissions

Radiation	Energy (MeV)	Intensity (%)
x	0.027-0.032	140
γ	0.035	6.7

Table A64. Measurement techniques

Method of measurement		Typical detection limit
Photon spectrometry <i>in vivo</i>	Thyroid	100 Bq
liquid scintillation counting	Urine	1 Bq l ⁻¹

Iodine-125 presents no detection problems. The urinary excretion rate decreases rapidly with time following intake and so thyroid monitoring is to be preferred unless the actual time of intake is known. Monitoring by urinary excretion would be required if thyroid uptake had been blocked.



INDIVIDUAL MONITORING FOR INTERNAL EXPOSURE OF WORKERS

Table A.6.5. Special monitoring: predicted values (Bq per Bq intake) for inhalation of ^{125}I

Time after intake (d)	Type F		Vapour	
	Thyroid	Daily urinary excretion	Thyroid	Daily urinary excretion
1	1.3E-01	3.0E-01	2.5E-01	5.7E-01
2	1.4E-01	2.7E-02	2.6E-01	4.9E-02
3	1.4E-01	1.7E-03	2.5E-01	3.2E-03
4	1.3E-01	2.0E-04	2.5E-01	3.6E-04
5	1.3E-01	1.3E-04	2.4E-01	2.4E-04
6	1.3E-01	1.5E-04	2.4E-01	2.8E-04
7	1.3E-01	1.7E-04	2.4E-01	3.3E-04
8	1.2E-01	2.0E-04	2.3E-01	3.7E-04
9	1.2E-01	2.2E-04	2.3E-01	4.1E-04
10	1.2E-01	2.4E-04	2.2E-01	4.4E-04

Table A.6.6. Special monitoring: predicted values (Bq per Bq intake) for ingestion and injection of ^{125}I

Time after intake (d)	Ingestion		Injection	
	Thyroid	Daily urinary excretion	Thyroid	Daily urinary excretion
1	2.7E-01	6.2E-01	2.8E-01	6.4E-01
2	2.8E-01	5.9E-02	2.9E-01	5.2E-02
3	2.8E-01	3.7E-03	2.8E-01	3.3E-03
4	2.8E-01	4.2E-04	2.8E-01	4.0E-04
5	2.7E-01	2.7E-04	2.7E-01	2.7E-04
6	2.6E-01	3.1E-04	2.7E-01	3.2E-04
7	2.6E-01	3.6E-04	2.6E-01	3.7E-04
8	2.5E-01	4.1E-04	2.6E-01	4.1E-04
9	2.5E-01	4.5E-04	2.5E-01	4.5E-04
10	2.4E-01	4.9E-04	2.5E-01	4.9E-04

Table A.6.7. Routine monitoring: predicted values (Bq per Bq intake) for inhalation of ^{125}I

Monitoring interval (d)	Type F		Vapour	
	Thyroid	Daily urinary excretion	Thyroid	Daily urinary excretion
120	4.7E-02	2.5E-04	8.9E-02	4.6E-04
90	6.2E-02	3.1E-04	1.2E-01	5.7E-04
60	8.1E-02	3.5E-04	1.5E-01	6.5E-04
30	1.1E-01	3.0E-04	2.0E-01	5.6E-04
14	1.3E-01	1.7E-04	2.4E-01	3.3E-04
7	1.3E-01	2.0E-04	2.5E-01	3.6E-04



INDIVIDUAL MONITORING FOR INTERNAL EXPOSURE OF WORKERS

Chronic intakes

Table A.6.8. gives equilibrium values, and the approximate times after intake that they are reached, for continuous chronic inhalation at a rate of 1 Bq y^{-1} ($1/365 \text{ Bq d}^{-1}$). Values for inhalation at a rate which would result in exposure at the average annual dose limit (20 mSv) are also given.

Table A.6.8. Equilibrium values (Bq) for continuous chronic intake of ^{125}I

Measured quantity	Type F			Vapour		
	Inhalation per year			Inhalation per year		
	1 Bq	At annual limit	Time	1 Bq	At annual limit	Time
Thyroid	$2.1\text{E}-02$	$5.8\text{E}+04$	1 year	$4.0\text{E}-02$	$5.7\text{E}+04$	1 year
Daily urinary excretion	$9.9\text{E}-04$	$2.7\text{E}+03$	6 months	$1.9\text{E}-03$	$2.7\text{E}+03$	6 months

Iodine-129 (half-life = $1.57\text{E}+07 \text{ y}$)

Table A.6.9. Emissions

Radiation	Energy (MeV)	Intensity (%)
β^-	0.049 ^a	100
x	0.030-0.034	70
γ	0.040	7.5

^aAverage energy

Table A.6.10. Measurement techniques

Method of measurement	Typical detection limit
Photon spectrometry <i>in vivo</i>	Thyroid 100 Bq
Radiochemical separation and β^- counting	Urine 1 Bq l^{-1}

Iodine-129 presents no detection problems. The urinary excretion rate decreases rapidly with time following intake and so thyroid monitoring is to be preferred unless the actual time of intake is known. Monitoring by urinary excretion would be required if thyroid uptake had been blocked.

Table A.6.11. Special monitoring: predicted values (Bq per Bq intake) for inhalation of ^{129}I

Time after intake (d)	Type F		Vapour	
	Thyroid	Daily urinary excretion	Thyroid	Daily urinary excretion
1	$1.3\text{E}-01$	$3.1\text{E}-01$	$2.5\text{E}-01$	$5.7\text{E}-01$
2	$1.4\text{E}-01$	$2.7\text{E}-02$	$2.6\text{E}-01$	$5.1\text{E}-02$
3	$1.4\text{E}-01$	$1.8\text{E}-03$	$2.6\text{E}-01$	$3.3\text{E}-03$
4	$1.4\text{E}-01$	$2.1\text{E}-04$	$2.6\text{E}-01$	$3.8\text{E}-04$
5	$1.4\text{E}-01$	$1.4\text{E}-04$	$2.6\text{E}-01$	$2.6\text{E}-04$
6	$1.4\text{E}-01$	$1.6\text{E}-04$	$2.6\text{E}-01$	$3.0\text{E}-04$
7	$1.4\text{E}-01$	$1.9\text{E}-04$	$2.5\text{E}-01$	$3.6\text{E}-04$
8	$1.3\text{E}-01$	$2.2\text{E}-04$	$2.5\text{E}-01$	$4.1\text{E}-04$
9	$1.3\text{E}-01$	$2.4\text{E}-04$	$2.5\text{E}-01$	$4.5\text{E}-04$
10	$1.3\text{E}-01$	$2.6\text{E}-04$	$2.5\text{E}-01$	$4.9\text{E}-04$



INDIVIDUAL MONITORING FOR INTERNAL EXPOSURE OF WORKERS

Table A.6.12. Special monitoring: predicted values (Bq per Bq intake) for ingestion and injection of ^{129}I

Time after intake (d)	Ingestion		Injection	
	Thyroid	Daily urinary excretion	Thyroid	Daily urinary excretion
1	2.7E-01	6.3E-01	2.8E-01	6.4E-01
2	2.9E-01	6.0E-02	2.9E-01	5.3E-02
3	2.9E-01	3.9E-03	2.9E-01	3.5E-03
4	2.9E-01	4.4E-04	2.9E-01	4.1E-04
5	2.9E-01	2.8E-04	2.9E-01	2.9E-04
6	2.8E-01	3.3E-04	2.9E-01	3.4E-04
7	2.8E-01	3.9E-04	2.8E-01	4.0E-04
8	2.8E-01	4.5E-04	2.8E-01	4.5E-04
9	2.8E-01	5.0E-04	2.8E-01	5.0E-04
10	2.7E-01	5.4E-04	2.8E-01	5.5E-04

Table A.6.13. Routine monitoring: predicted values (Bq per Bq intake) for inhalation of ^{129}I

Monitoring interval (d)	Type F		Vapour	
	Thyroid	Daily urinary excretion	Thyroid	Daily urinary excretion
360	4.4E-02	2.4E-04	8.3E-02	4.5E-04
180	7.8E-02	4.2E-04	1.5E-01	7.9E-04
120	9.4E-02	4.9E-04	1.8E-01	9.3E-04
90	1.0E-01	5.1E-04	1.9E-01	9.6E-04
60	1.1E-01	4.9E-04	2.2E-01	9.2E-04
30	1.3E-01	3.6E-04	2.4E-01	6.7E-04
14	1.4E-01	1.9E-04	2.5E-01	3.6E-04
7	1.4E-01	2.1E-04	2.6E-01	3.8E-04

Chronic intakes

Table A.6.14. gives equilibrium values, and the approximate times after intake that they are reached, for continuous chronic inhalation at a rate of 1 Bq y^{-1} ($1/365 \text{ Bq d}^{-1}$). Values for inhalation at a rate which would result in exposure at the average annual dose limit (20 mSv) are also given.

Table A.6.14. Equilibrium values (Bq) for continuous chronic intake of ^{129}I

Measured quantity	Type F			Vapour			
	Inhalation per year			Inhalation per year			
	1 Bq	At annual limit	Time	1 Bq	At annual limit	Time	
Thyroid	6.0E-02	2.3E+04	3 years	1.1E-01	2.3E+04	3 years	
Daily urinary excretion	1.2E-03	4.7E+02	1 year	2.3E-03	4.7E+02	1 year	53



INDIVIDUAL MONITORING FOR INTERNAL EXPOSURE OF WORKERS

Iodine-131 (half-life = 8.0 d)

Table A.6.15. Emissions

Radiation	Energy (MeV)	Intensity (%)
β^-	0.19 ^a	89
γ		0.36
		81
Average energy		

Table A.6.16. Measurement techniques

Method of measurement	Typical detection limit
γ -ray spectrometry <i>in vivo</i>	100 Bq
γ -ray spectrometry on biological samples	1 Bq l ⁻¹

Iodine-131 presents no detection problems. The urinary excretion rate decreases rapidly with time following intake and so thyroid monitoring is to be preferred unless the actual time of intake is known. Monitoring by urinary excretion would be required if thyroid uptake had been blocked.

Table A.6.17. Special monitoring: predicted values (Bq per Bq intake) for inhalation of ¹³¹I

Time after intake (d)	Type F		Vapour	
	Thyroid	Daily urinary excretion	Thyroid	Daily urinary excretion
1	1.2E-01	2.8E-01	2.3E-01	5.3E-01
2	1.2E-01	2.3E-02	2.2E-01	4.3E-02
3	1.1E-01	1.4E-03	2.0E-01	2.5E-03
4	9.9E-02	1.5E-04	1.9E-01	2.7E-04
5	9.0E-02	8.9E-05	1.7E-01	1.7E-04
6	8.2E-02	9.6E-05	1.5E-01	1.3E-04
7	7.4E-02	1.0E-04	1.4E-01	1.9E-04
8	6.8E-02	1.1E-04	1.3E-01	2.0E-04
9	6.2E-02	1.1E-04	1.2E-01	2.1E-04
10	5.6E-02	1.1E-04	1.1E-01	2.1E-04

9.5d 5.9E-02

Table A.6.18. Special monitoring: predicted values (Bq per Bq intake) for ingestion and injection of ¹³¹I

Time after intake (d)	Ingestion		Injection	
	Thyroid	Daily urinary excretion	Thyroid	Daily urinary excretion
1	2.5E-01	5.8E-01	2.6E-01	5.9E-01
2	2.5E-01	5.1E-02	2.5E-01	4.5E-02
3	2.2E-01	3.0E-03	2.3E-01	2.7E-03
4	2.0E-01	3.1E-04	2.1E-01	2.9E-04
5	1.9E-01	1.8E-04	1.9E-01	1.9E-04
6	1.7E-01	2.0E-04	1.7E-01	2.0E-04
7	1.5E-01	2.1E-04	1.6E-01	2.2E-04
8	1.4E-01	2.2E-04	1.4E-01	2.3E-04
9	1.3E-01	2.3E-04	1.3E-01	2.3E-04
10	1.2E-01	2.3E-04	1.2E-01	2.3E-04



INDIVIDUAL MONITORING FOR INTERNAL EXPOSURE OF WORKERS

Table A.6.19. Routine monitoring: predicted values (Bq per Bq intake) for inhalation of ^{131}I

Monitoring interval (d)	Type F		Vapour	
	Thyroid	Daily urinary excretion	Thyroid	Daily urinary excretion
30	(3.5E-02) ^a	9.8E-05	(6.6E-02)	1.8E-04
14	7.4E-02	1.0E-04	1.4E-01	1.9E-04
7	9.9E-02	1.5E-04	1.9E-01	2.7E-04

^aValues in brackets do not satisfy the requirements set out in Section 6

Chronic intakes

Table A.6.20. gives equilibrium values, and the approximate times after intake that they are reached, for continuous chronic inhalation at a rate of 1 Bq y^{-1} ($1/365 \text{ Bq d}^{-1}$). Values for inhalation at a rate which would result in exposure at the average annual dose limit (20 mSv) are also given.

Table A.6.20. Equilibrium values (Bq) for continuous chronic intake of ^{131}I

Measured quantity	Type F			Vapour		
	Inhalation per year			Inhalation per year		
	1 Bq	At annual limit	Time	1 Bq	At annual limit	Time
Thyroid	4.1E-03	7.4E+03	2 months	7.6E-03	7.6E+03	2 months
Daily urinary excretion	8.5E-04	1.6E+03	4 days	1.6E-03	1.6E+03	4 days

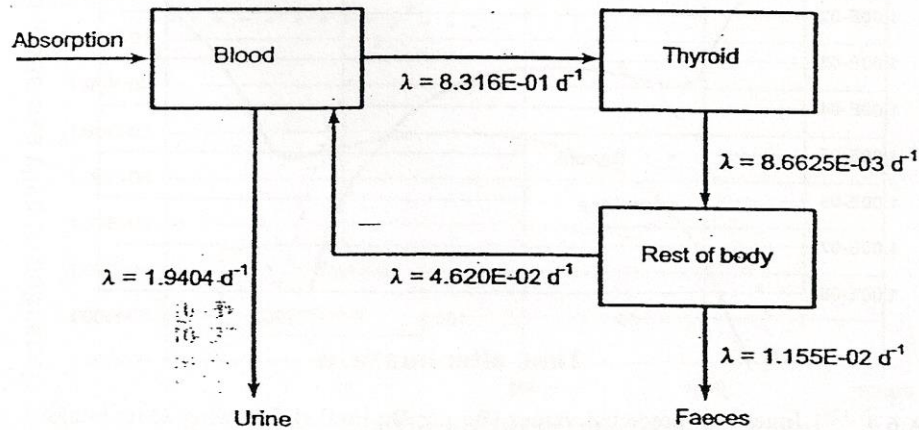


Fig. A.6.1. Biokinetic model for iodine metabolism.



INDIVIDUAL MONITORING FOR INTERNAL EXPOSURE OF WORKERS

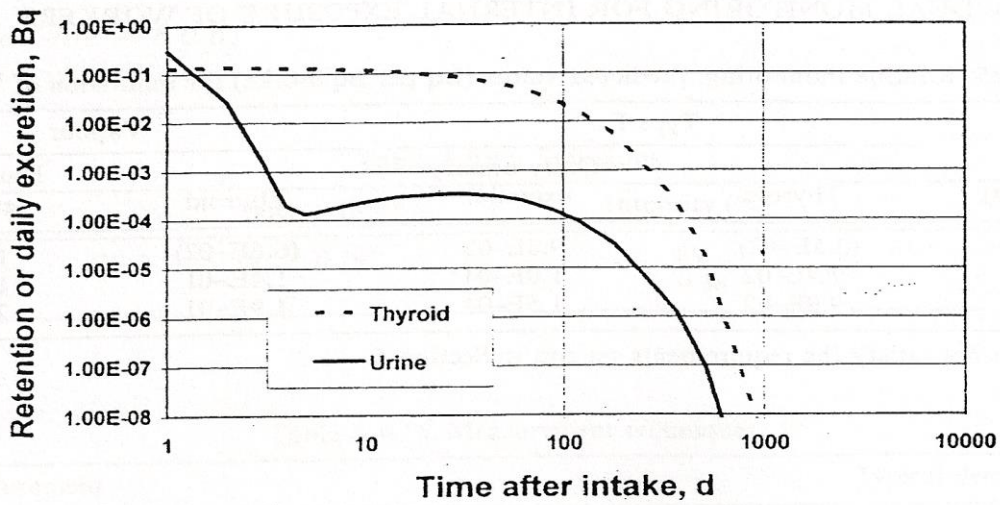


Fig. A.6.2. ^{125}I Inhalation Type F: predicted values (Bq per Bq intake) following acute intake.

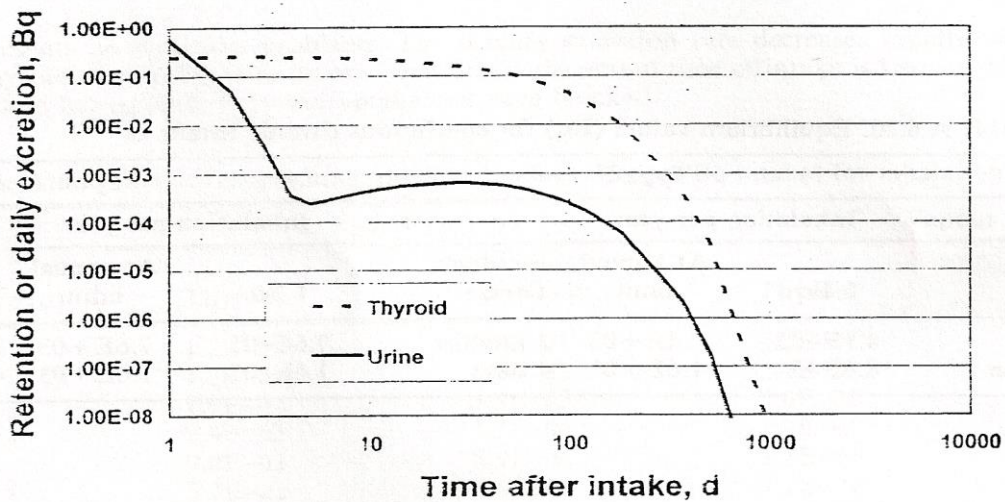


Fig. A.6.3. ^{125}I Inhalation Vapour: predicted values (Bq per Bq intake) following acute intake.

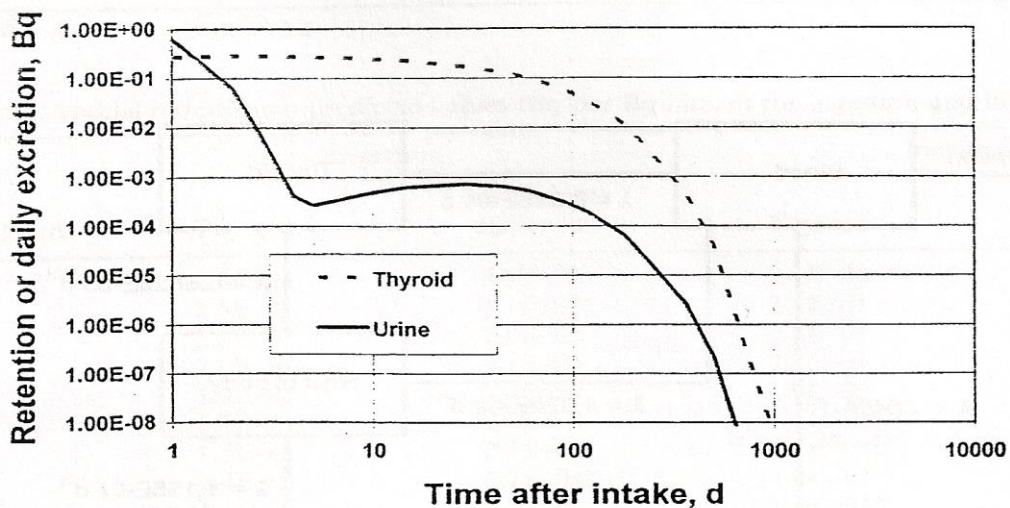


Fig. A.6.4. ^{125}I Ingestion: predicted values (Bq per Bq intake) following acute intake.



INDIVIDUAL MONITORING FOR INTERNAL EXPOSURE OF WORKERS

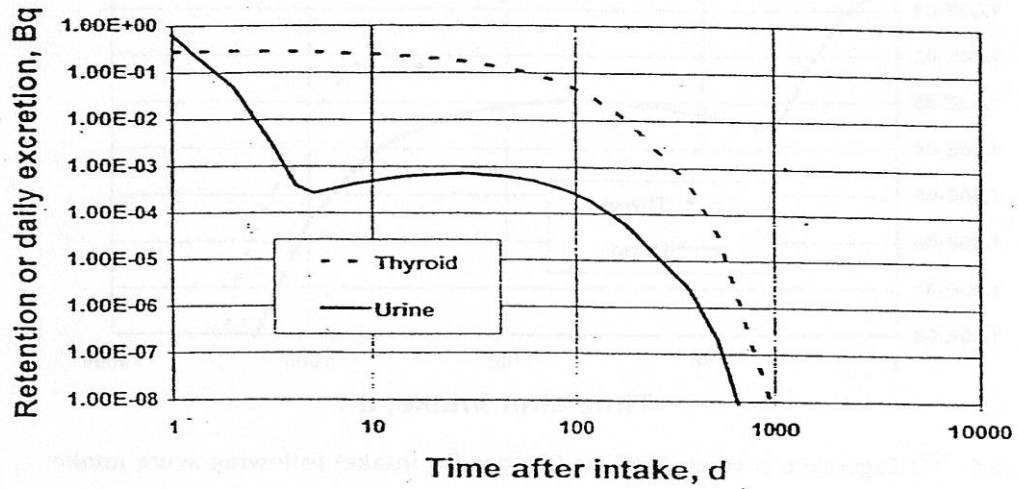


Fig. A.6.5. ^{125}I Injection: predicted values (Bq per Bq intake) following acute intake.

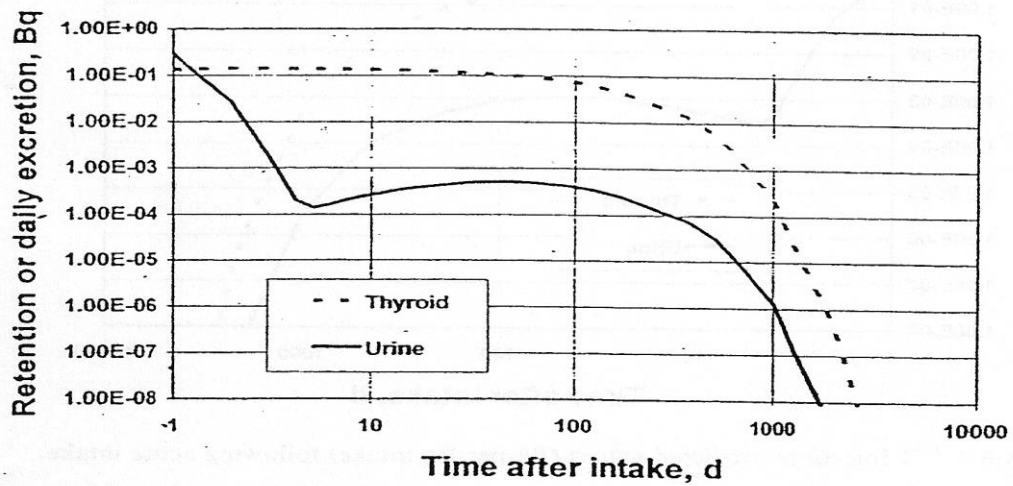


Fig. A.6.6. ^{129}I Inhalation Type F: predicted values (Bq per Bq intake) following acute intake.

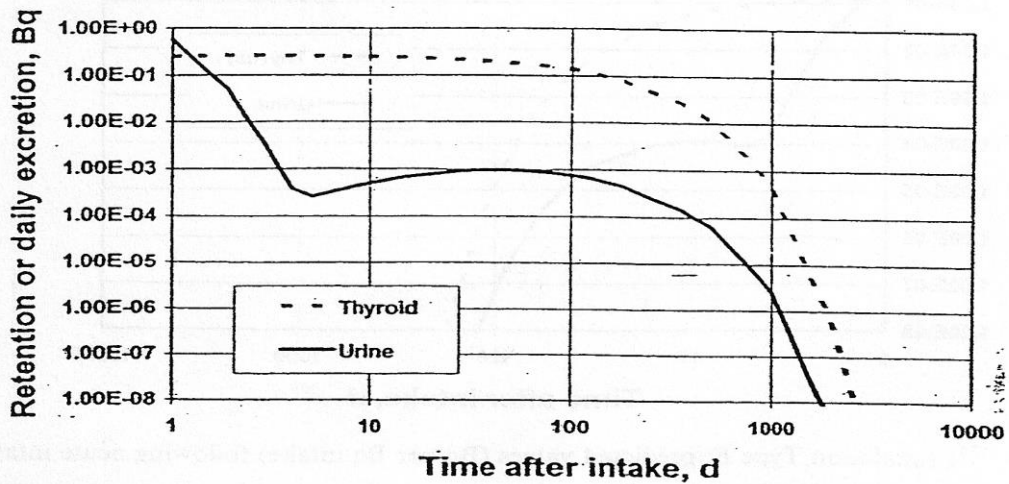


Fig. A.6.7. ^{129}I Inhalation Vapour: predicted values (Bq per Bq intake) following acute intake.



INDIVIDUAL MONITORING FOR INTERNAL EXPOSURE OF WORKERS

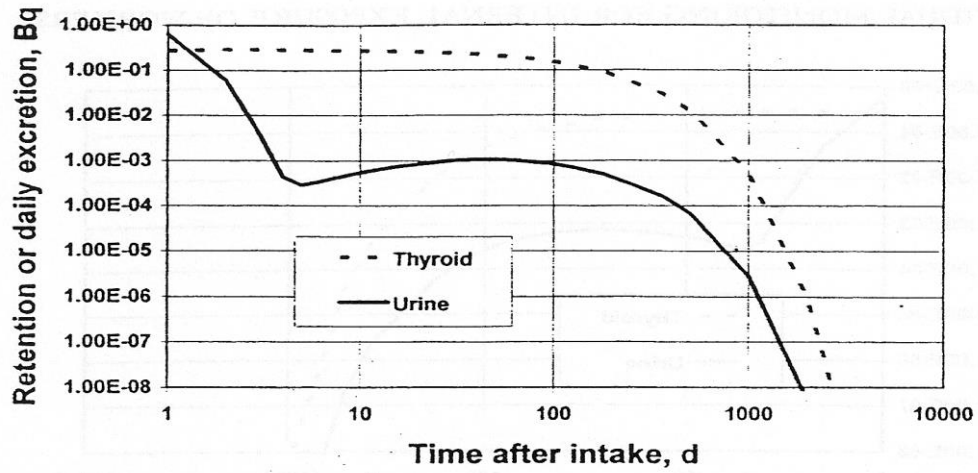


Fig. A.6.8. ^{129}I Ingestion: predicted values (Bq per Bq intake) following acute intake.

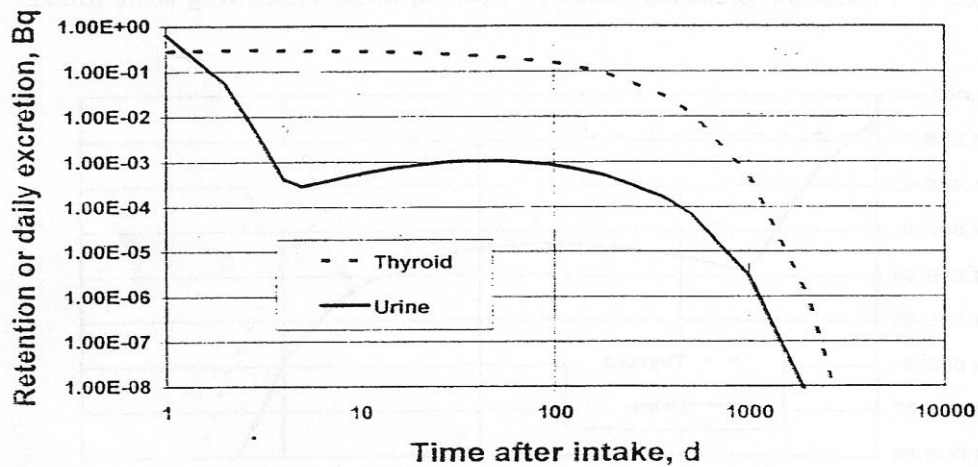


Fig. A.6.9. ^{129}I Injection: predicted values (Bq per Bq intake) following acute intake.

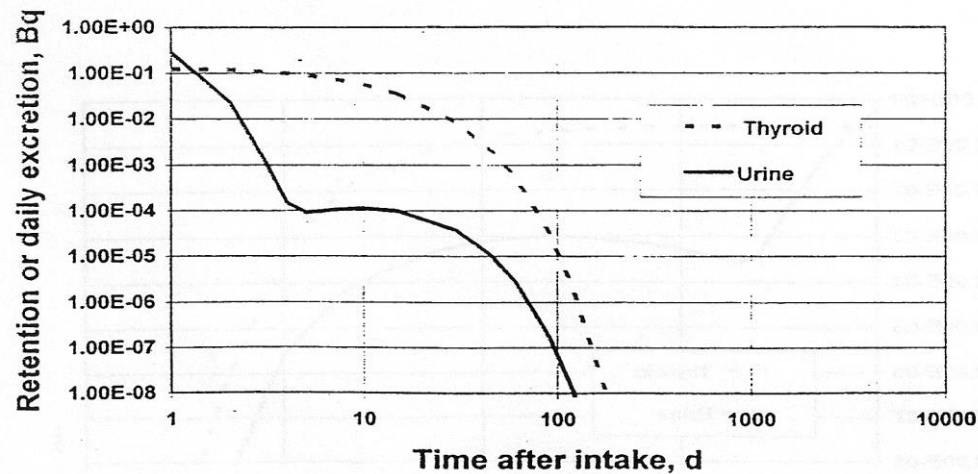


Fig. A.6.10. ^{131}I Inhalation Type F: predicted values (Bq per Bq intake) following acute intake.



INDIVIDUAL MONITORING FOR INTERNAL EXPOSURE OF WORKERS

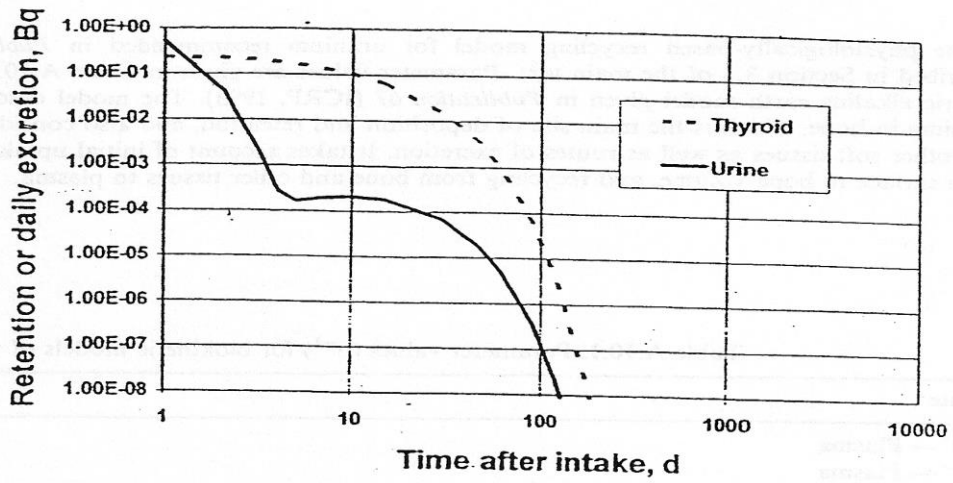


Fig. A.6.11. ^{131}I Inhalation Vapour: predicted values (Bq per Bq intake) following acute intake.

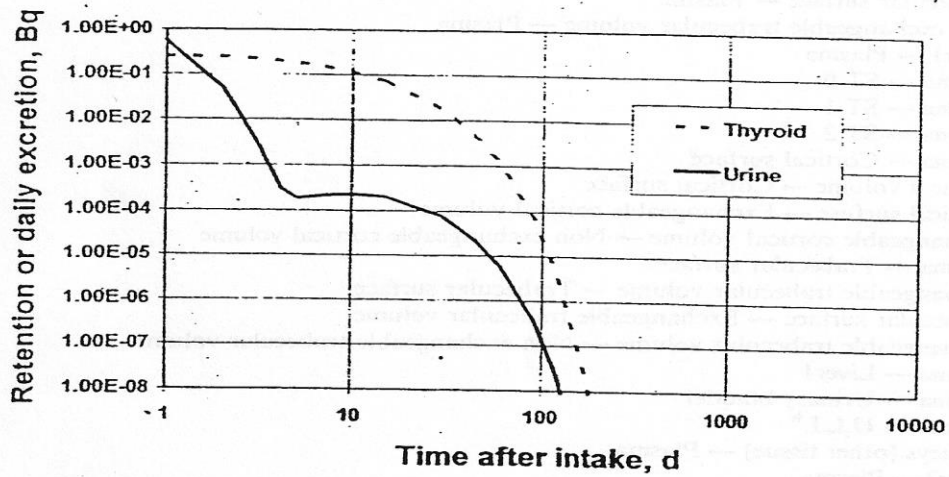


Fig. A.6.12. ^{131}I Ingestion: predicted values (Bq per Bq intake) following acute intake.

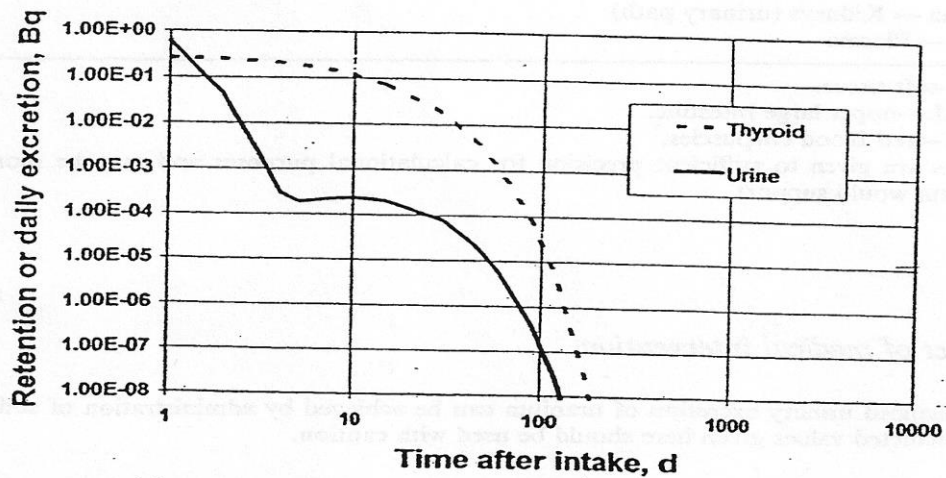


Fig. A.6.13. ^{131}I Injection: predicted values (Bq per Bq intake) following acute intake.



INDIVIDUAL MONITORING FOR INTERNAL EXPOSURE OF WORKERS

A.10. Uranium

Biokinetic model

The physiologically-based recycling model for uranium recommended in *Publication 69* (ICRP, 1993) described in Section 3.3 of the main text. Parameter values are given in Table A.10.1. The model is based on the generic alkaline earth model given in *Publication 67* (ICRP, 1993). The model describes in detail the kinetics of uranium in bone, which is the main site of deposition and retention, and also considers retention in liver and other soft tissues as well as routes of excretion. It takes account of initial uptake onto bone surfaces, from surface to bone volume, and recycling from bone and other tissues to plasma.

Table A.10.1. Parameter values (d^{-1}) for biokinetic models of uranium

Route	Transfer rate
ST0 ^a → Plasma	8.32E+00
ST1 ^a → Plasma	3.47E-02
ST2 ^a → Plasma	1.90E-05
Cortical surface → Plasma	6.93E-02
Non exchangeable cortical volume → Plasma	8.21E-05
Trabecular surface → Plasma	6.93E-02
Non exchangeable trabecular volume → Plasma	4.93E-04
Liver1 → Plasma	9.20E-02
Plasma → ST 0	1.05E+01
Plasma → ST 1	1.63E+00
Plasma → ST 2	7.35E-02
Plasma → Cortical surface	1.63E+00
Cortical volume → Cortical surface	1.73E-02
Cortical surface → Exchangeable cortical volume	6.93E-02
Exchangeable cortical volume → Non exchangeable cortical volume	5.78E-03
Plasma → Trabecular surface	2.04E+00
Exchangeable trabecular volume → Trabecular surface	1.73E-02
Trabecular surface → Exchangeable trabecular volume	6.93E-02
Exchangeable trabecular volume → Non exchangeable trabecular volume	5.78E-03
Plasma → Liver1	3.67E-01
Plasma → Urinary bladder	1.543E+01
Plasma → U.L.I. ^b	1.22E-01
Kidneys (other tissue) → Plasma	3.80E-04
Liver2 → Plasma	1.90E-04
Plasma → Kidneys (other tissue)	1.22E-02
Liver1 → Liver2	6.93E-03
Kidneys (urinary path) → Bladder	9.90E-02
Plasma → RBC ^c	2.45E-01
Plasma → Kidneys (urinary path)	2.94E+00
RBC → Plasma	3.47E-01

^aST—soft tissue.

^bU.L.I.—upper large intestine.

^cRBC—red blood corpuscles.

Values are given to sufficient precision for calculational purposes and may be more precise than the available data would support.

Effect of medical intervention

Enhanced urinary excretion of uranium can be achieved by administration of sodium bicarbonate. In this case the predicted values given here should be used with caution.



INDIVIDUAL MONITORING FOR INTERNAL EXPOSURE OF WORKERS

125

Chemical toxicity

Intakes of uranium compounds may be limited by consideration of chemical toxicity rather than radiation dose.

ICRP (1964) recommended that the inhalation of soluble uranium of any isotopic composition should not exceed 2.5 mg in any one day. This value was adopted in European legislation in 1980 (OJEC, 1980). Chemical toxicity has not been considered in the latest Euratom Directive (OJEC, 1996) nor in International Basic Safety Standards Against Ionising Radiation (IAEA, 1996). The American Conference on Governmental Industrial Hygienists (ACGIH, 1968, 1983) recommended a threshold limit value on concentration in air of 0.2 mg m^{-3} . This was adopted in the UK and remains in force (HSE, 1980). In 1989, the Occupational Safety and Health Administration in the USA (OSHA, 1989) recommended a permissible exposure limit of 0.05 mg m^{-3} for soluble compounds, equivalent to a daily intake of 0.5 mg.

Stradling *et al.* (1997) have re-examined these standards in the light of the new model of the respiratory tract and recent developments in the biokinetic modelling of the behaviour of uranium. They have concluded that, on the basis of a daily limit of 2 mg (0.2 mg m^{-3} at a breathing rate of $1.2 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ and an 8 hour working day):

- daily intakes of Type F and Type M compounds of any isotopic composition will be limited by chemical toxicity;
 - annual intakes of natural and low enriched uranium Type F compounds will be limited by chemical toxicity;
 - annual intakes of highly enriched type F compounds and Type M compounds of any isotopic composition will be limited by consideration of radiation dose.
- On the basis of the OSHA recommendation of 0.05 mg m^{-3} :
- annual intakes of natural and low enriched Type M compounds would also be restricted by chemical toxicity.

Dosimetric data

Table A.10.2. Compounds, absorption types and f_1 values

Intake	f_1	Compounds
Ingestion	0.02	Unspecified compounds
Ingestion	0.002	Most tetravalent compounds, e.g. UO_2 , U_3O_8 , UF_4
Inhalation, Type F	0.02	Soluble compounds including hexavalent compounds, e.g. UF_6 , UO_2F_2 and $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$
Inhalation, Type M	0.02	Less soluble compounds, e.g. UO_3 , UF_4 , UCl_4 , and most other hexavalent compounds
Inhalation, Type S	0.002	Highly insoluble compounds, e.g. UO_2 , and U_3O_8

Table A.10.3. Dose coefficients

Nuclide	$t_{1/2}$	Type	Inhalation		Ingestion	
			f_1	$e(50), \text{Sv Bq}^{-1}$	f_1	$e(50), \text{Sv Bq}^{-1}$
U-234	$2.44 \text{E} + 05 \text{y}$	F	0.02	$6.4\text{E}-07$	0.02	$4.9\text{E}-08$
		M	0.02	$2.1\text{E}-06$	0.002	$8.3\text{E}-09$
		S	0.002	$6.8\text{E}-06$		
U-235	$7.04 \text{E} + 08 \text{y}$	F	0.02	$6.0\text{E}-07$	0.02	$4.6\text{E}-08$
		M	0.02	$1.8\text{E}-06$	0.002	$8.3\text{E}-09$
		S	0.002	$6.1\text{E}-06$		
U-238	$4.47 \text{E} + 09 \text{y}$	F	0.02	$5.8\text{E}-07$	0.02	$4.4\text{E}-08$
		M	0.02	$1.6\text{E}-06$	0.002	$7.6\text{E}-09$
		S	0.002	$5.7\text{E}-06$		

WARNING. For Type F and M uranium compounds, intakes may be limited by considerations of chemical toxicity



INDIVIDUAL MONITORING FOR INTERNAL EXPOSURE OF WORKERS

References

- ACGIM (1968) Threshold Limit Values in airborne contaminants for 1968, recommended and intended values. American Conference on Government Industrial Hygienists. St. Louis, Missouri.
- ACGIM (1983) Threshold Limit Values for chemical substances and physical agents in the work environment with intended changes for 1983-84. American Conference of Government Industrial Hygienists. Cincinnati, Ohio.
- HSE (1980) Threshold Limit Values 1980. Health and Safety Executive. Guidance Note 15/80. HMSO London.
- IAEA (1996) *International Basic Safety Standards Against Ionising Radiation and for the Safety of Radioactive Sources*. International Atomic Energy Agency. Safety Series 115, Vienna.
- ICRP (1964) Recommendations of the *International Commission on Radiological Protection*. ICRP Publication 6. Pergamon Press, Oxford.
- OJEC (1980) *Official Journal of the European Communities L246 23*, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.
- OJEC (1996) *Official Journal of the European Communities L159 39*, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.
- Stradling, G. N., Hodgson, A., Moody, J. C., Fell, T. P. and Rance, E. (1997) *Exposure Limits and Assessment of Intake from Inhaled Soluble Uranium Compounds*. NRPB-M801. NRPB, Chilton, Oxon.

Uranium-234 (half-life = $2.44E+05$ y)

Uranium-235 (half-life = $7.04E+08$ y)

Uranium-238 (half-life = $4.47E+09$ y)

Table A.10.4. Emissions

Radionuclide	Radiation	Energy (MeV)	Intensity (%)
^{234}U	α	4.72	27
	α	4.77	72
^{235}U	α	4.22	6
	α	4.33	5
	α	4.37	18
	α	4.40	56
	α	4.56	4
	α	4.60	5
	γ	0.14	11
	γ	0.19	54
^{238}U	γ	0.21	5
	α	4.15	23
	α	4.20	77

Table A.10.5. Measurement techniques for ^{234}U , ^{235}U and ^{238}U

Method of measurement		Typical detection limit
γ -ray spectrometry <i>in vivo</i>	Lung ^a	200 Bq
Radiochemical separation and α -spectrometry on biological samples	Urine	10 mBq l ⁻¹
	Faeces	10 mBq

^aFor ^{235}U only

The detection limits given above are adequate for special monitoring. For routine monitoring, the detection limits for bioassay are adequate, but the detection limit for lung counting would not permit detection of intakes at levels corresponding to the annual limit.



INDIVIDUAL MONITORING FOR INTERNAL EXPOSURE OF WORKERS

Table A.10.6. Special monitoring: predicted values (Bq per Bq intake) for inhalation of ²³⁴U, ²³⁵U or ²³⁸U

Time after intake (d)	Type F		Type M		Type S	
	Daily urinary excretion	Lungs ^a	Daily urinary excretion	Lungs	Daily urinary excretion	Daily faecal excretion
1	1.8E-01	5.8E-02	2.3E-02	6.4E-02	7.0E-04	1.1E-01
2	6.4E-03	5.6E-02	1.1E-03	6.3E-02	4.4E-05	1.6E-01
3	5.1E-03	5.5E-02	8.5E-04	6.2E-02	2.6E-05	8.4E-02
4	4.6E-03	5.4E-02	7.9E-04	6.1E-02	2.4E-05	3.5E-02
5	4.2E-03	5.3E-02	7.3E-04	6.1E-02	2.2E-05	1.4E-02
6	3.8E-03	5.3E-02	6.9E-04	6.0E-02	2.0E-05	5.7E-03
7	3.5E-03	5.2E-02	6.5E-04	6.0E-02	1.9E-05	2.5E-03
8	3.2E-03	5.1E-02	6.1E-04	5.9E-02	1.8E-05	1.3E-03
9	2.9E-03	5.0E-02	5.7E-04	5.8E-02	1.7E-05	8.2E-04
10	2.7E-03	5.0E-02	5.4E-04	5.8E-02	1.6E-05	6.5E-04

^aLung monitoring is feasible only for ²³⁵U

Table A.10.7. Special monitoring: predicted values (Bq per Bq intake) for ingestion and injection of ²³⁴U, ²³⁵U or ²³⁸U

Time after intake (d)	Ingestion, $f_1 = 0.02$	Ingestion, $f_1 = 0.002$	Injection
	Daily urinary excretion	Daily urinary excretion	Daily urinary excretion
1	1.3E-02	1.3E-03	6.5E-01
2	6.9E-04	7.0E-05	2.2E-02
3	3.7E-04	3.7E-05	1.8E-02
4	3.3E-04	3.3E-05	1.6E-02
5	3.0E-04	3.0E-05	1.5E-02
6	2.7E-04	2.7E-05	1.3E-02
7	2.5E-04	2.5E-05	1.2E-02
8	2.3E-04	2.3E-05	1.1E-02
9	2.1E-04	2.1E-05	1.0E-02
10	1.9E-04	1.9E-05	9.4E-03

Table A.10.8. Routine monitoring: predicted values (Bq per Bq intake) for inhalation of ²³⁴U, ²³⁵U or ²³⁸U

Monitoring interval (d)	Type F		Type M		Type S	
	Daily urinary excretion	Lungs ^b	Daily urinary excretion	Lungs	Daily urinary excretion	Daily faecal excretion
60	(3.1E-05) ^a	1.2E-02	6.5E-05	3.2E-02	3.3E-06	3.7E-05
180	(1.2E-04)	2.2E-02	1.2E-04	3.8E-02	4.3E-06	1.1E-04
120	2.3E-04	2.8E-02	1.7E-04	4.2E-02	5.2E-06	1.9E-04
90	3.5E-04	3.3E-02	2.0E-04	4.5E-02	6.0E-06	2.5E-04
60	6.8E-04	3.8E-02	2.7E-04	4.9E-02	7.7E-06	3.5E-04
30	1.8E-03	4.6E-02	4.3E-04	5.5E-02	1.2E-05	4.9E-04
14	3.5E-03	5.2E-02	6.5E-04	6.0E-02	1.9E-05	(2.5E-03)
7	4.6E-03	5.4E-02	7.9E-04	6.1E-02	2.4E-05	(3.5E-02)

Values in brackets do not satisfy the requirements set out in Section 6.

^aLung monitoring is feasible only for ²³⁵U



INDIVIDUAL MONITORING FOR INTERNAL EXPOSURE OF WORKERS

Chronic intakes

Table A.10.9. gives equilibrium values, and the approximate times after intake that they are reached, for continuous chronic inhalation at a rate of 1 Bq y^{-1} ($1/365 \text{ Bq d}^{-1}$). Values for inhalation of ^{234}U at a rate would result in exposure at the average annual dose limit (20 mSv) are also given.

Table A.10.9. Equilibrium values (Bq) for continuous chronic intake of ^{234}U , ^{235}U or ^{238}U

Measured quantity	Type F			Type M		
	Inhalation per year			Inhalation per year		
	1 Bq	Annual limit	Time	1 Bq	Annual limit	T_{in}
Lungs ^a	—	—	—	$1.8\text{E}-02$	$2.0\text{E}+02$	3 ye
Daily urinary excretion	$7.8\text{E}-04$	24/26/27 ^b	15 years	$1.9\text{E}-04$	1.8/2.1/2.4 ^b	15 ye

^aLung monitoring is feasible only for Type M ^{235}U .

^bValues for ^{234}U , ^{235}U , ^{238}U respectively

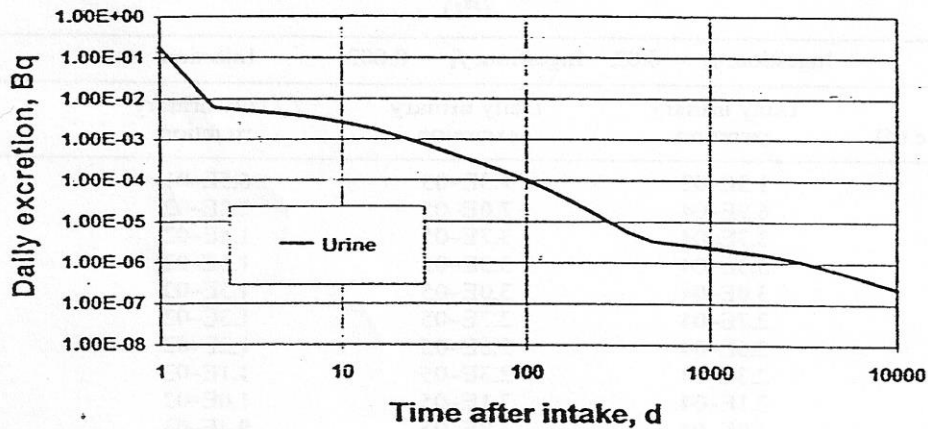


Fig. A.10.1. ^{234}U Inhalation Type F: predicted values (Bq per Bq intake) following acute intake.

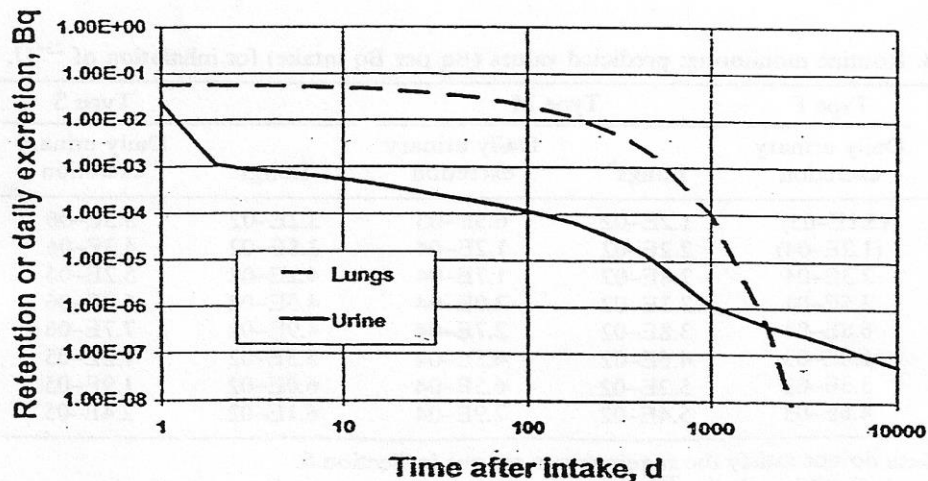


Fig. A.10.2. ^{234}U Inhalation Type M: predicted values (Bq per Bq intake) following acute intake.



INDIVIDUAL MONITORING FOR INTERNAL EXPOSURE OF WORKERS

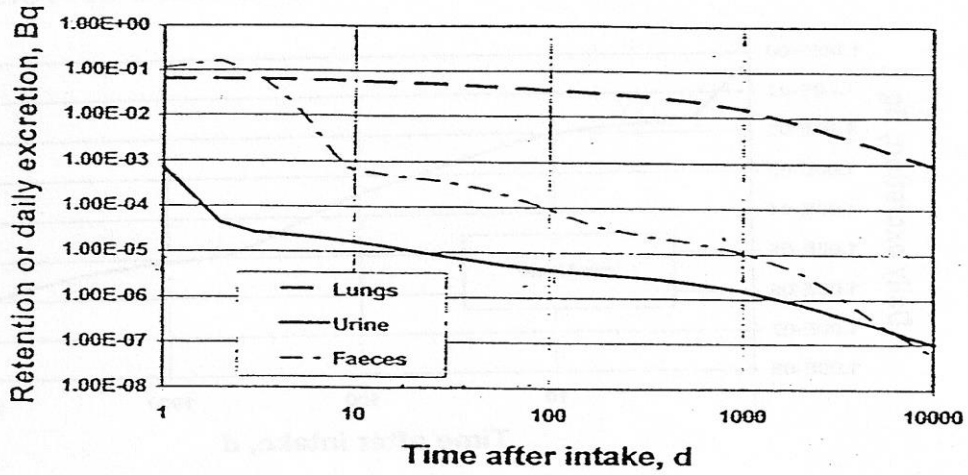


Fig. A.10.3. ^{234}U Inhalation Type S: predicted values (Bq per Bq intake) following acute intake.

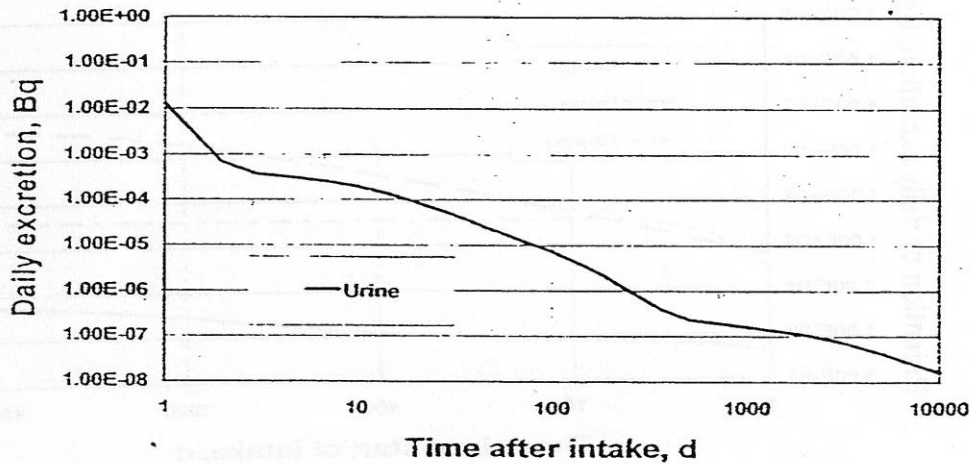


Fig. A.10.4. ^{234}U Ingestion ($f_i = 0.02$): predicted values (Bq per Bq intake) following acute intake.

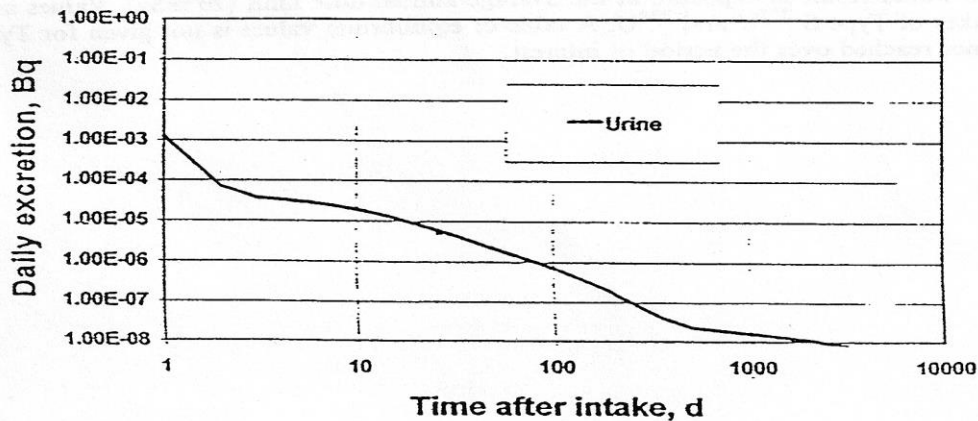


Fig. A.10.5. ^{234}U Ingestion ($f_i = 0.002$): predicted values (Bq per Bq intake) following acute intake.



INDIVIDUAL MONITORING FOR INTERNAL EXPOSURE OF WORKERS

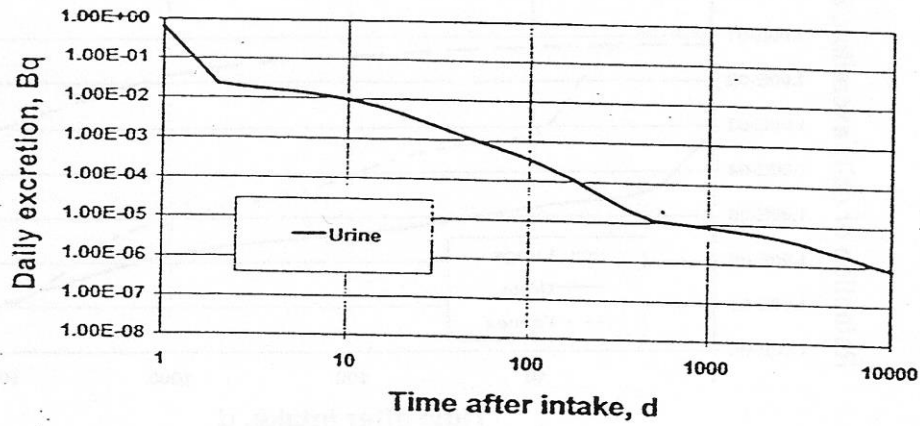


Fig. A.10.6. ^{234}U Injection: predicted values (Bq per Bq intake) following acute intake.

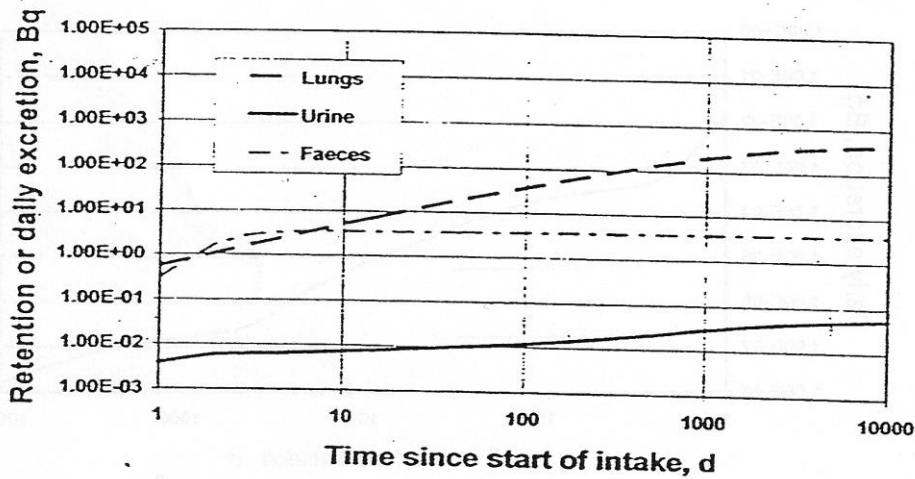


Fig. A.10.7. ^{234}U Inhalation Type S: predicted values (Bq) following continuous chronic intake at a rate which would result in exposure at the average annual dose limit (20 mSv).

Figure A.10.7. shows the predicted values as a function of time for continuous chronic intake of Type S ^{234}U at a rate which would result in exposure at the average annual dose limit (20 mSv). Values are up to about 20% higher for intakes of Type S ^{235}U and ^{238}U . A table of equilibrium values is not given for Type S materials since equilibria are not reached over the period of interest.



CINDY - Code for INTERNAL Dosimetry
 (Version 1.4 12-Jun-95)
 Report Date: 09/11/:8 at 13:35

Run title: Bioassay projection
 Subject: Boonlert Sex: Male
 ID No.: 1234567890 SSN: 111-22-2333
 Intake Occurred: 07/09/2007 at 13:00
 Operating Mode: Bioassay Projection

Acute inhalation exposure to I 131 (Class: D /f1: 1.00000) 1.00 Bq

I 131 Bioassay Projection - Excretion Rates and Retention

Time (d)	Urine (Bq/d)	Feces (Bq/d)	Total Lung (Bq)	Total Body (Bq)
1.0	1.3E-01	7.3E-06	2.6E-02	3.2E-01
2.0	1.6E-02	1.7E-05	7.2E-03	2.4E-01
3.0	3.4E-03	2.5E-05	2.0E-03	2.1E-01
4.0	1.0E-03	3.1E-05	5.2E-04	2.0E-01
5.0	4.3E-04	3.5E-05	1.4E-04	1.8E-01
6.0	2.9E-04	3.8E-05	3.5E-05	1.6E-01
7.0	2.6E-04	4.0E-05	8.8E-06	1.5E-01
8.0	2.6E-04	4.2E-05	2.2E-06	1.4E-01
9.0	2.6E-04	4.2E-05	5.6E-07	1.3E-01
10.0	2.6E-04	4.2E-05	1.4E-07	1.2E-01
11.0	2.5E-04	4.1E-05	3.5E-08	1.1E-01
12.0	2.5E-04	4.0E-05	8.7E-09	9.8E-02
13.0	2.4E-04	3.9E-05	2.3E-09	9.0E-02
14.0	2.3E-04	3.8E-05	5.7E-10	8.3E-02
15.0	2.2E-04	3.6E-05	2.6E-10	7.6E-02
16.0	2.1E-04	3.5E-05	1.4E-10	7.0E-02
17.0	2.0E-04	3.3E-05	1.3E-11	6.4E-02
18.0	1.9E-04	3.1E-05	1.9E-11	5.9E-02
19.0	1.8E-04	2.9E-05	6.4E-11	5.4E-02
20.0	1.7E-04	2.8E-05	4.1E-11	4.9E-02
21.0	1.6E-04	2.6E-05	1.1E-11	4.5E-02
22.0	1.5E-04	2.4E-05	2.3E-11	4.1E-02
23.0	1.4E-04	2.3E-05	5.2E-12	3.8E-02
24.0	1.3E-04	2.1E-05	1.4E-11	3.5E-02
25.0	1.3E-04	2.0E-05	7.0E-12	3.2E-02
26.0	1.2E-04	1.9E-05	1.3E-11	2.9E-02
27.0	1.1E-04	1.7E-05	2.9E-11	2.7E-02
28.0	1.0E-04	1.6E-05	3.0E-11	2.4E-02
29.0	9.4E-05	1.5E-05	9.4E-12	2.2E-02
30.0	8.7E-05	1.4E-05	3.9E-12	2.0E-02
31.0	8.1E-05	1.3E-05	1.0E-11	1.9E-02
32.0	7.5E-05	1.2E-05	8.8E-12	1.7E-02
33.0	6.9E-05	1.1E-05	5.2E-12	1.6E-02
34.0	6.4E-05	1.0E-05	4.2E-12	1.4E-02
35.0	5.9E-05	9.4E-06	5.5E-12	1.3E-02
36.0	5.5E-05	8.7E-06	4.0E-12	1.2E-02
37.0	5.0E-05	8.0E-06	7.8E-12	1.1E-02
38.0	4.6E-05	7.4E-06	6.6E-12	1.0E-02
39.0	4.3E-05	6.8E-06	2.6E-12	9.2E-03
40.0	3.9E-05	6.3E-06	2.8E-12	8.4E-03



41.0	3.6E-05	5.8E-06	2.8E-12	7.7E-03
42.0	3.3E-05	5.3E-06	1.2E-12	7.1E-03
43.0	3.1E-05	4.9E-06	2.0E-12	6.5E-03
44.0	2.8E-05	4.5E-06	1.8E-12	5.9E-03
45.0	2.6E-05	4.1E-06	7.9E-13	5.4E-03
46.0	2.4E-05	3.8E-06	1.9E-12	4.9E-03
47.0	2.2E-05	3.5E-06	2.9E-12	4.5E-03
48.0	2.0E-05	3.2E-06	3.0E-12	4.1E-03
49.0	1.9E-05	2.9E-06	1.8E-12	3.8E-03
50.0	1.7E-05	2.7E-06	5.9E-13	3.5E-03

Error tolerance: 1.0E-06

I 131 model: ICRP 54 Iodine Model

Particle size (micron): 5.0

Lung deposition fractions: 0.740 (ZNP), 0.080 (ZTB), 0.088 (ZP)



CINDY - Code for INternal Dosimetry
(Version 1.4 12-Jun-95)
Report Date: 09/11/:8 at 13:35

Run title: Bioassay projection
Subject: Boonlert Sex: Male
ID No.: 1234567890 SSN: 111-22-2333
Intake Occurred: 07/09/2007 at 13:00
Operating Mode: Bioassay Projection

Acute inhalation exposure to I 131 (Class: D /f1: 1.00000) 1.00 Bq

I 131 Bioassay Projection - Excretion Rates and Retention

Time (d)	Stomach (Bq)	S. Int. (Bq)	UL Int. (Bq)	LL Int. (Bq)	Total GI (Bq)
1.0	1.9E-05	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	1.9E-05
2.0	5.6E-07	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	5.6E-07
3.0	1.6E-08	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	1.6E-08
4.0	4.7E-10	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	4.7E-10
5.0	3.9E-10	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	3.9E-10
6.0	2.8E-14	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	2.8E-14
7.0	5.9E-13	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	5.9E-13
8.0	2.4E-13	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	2.4E-13
9.0	5.6E-13	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	5.6E-13
10.0	5.4E-11	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	5.4E-11
11.0	7.1E-12	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	7.1E-12
12.0	6.4E-12	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	6.4E-12
13.0	2.2E-13	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	2.2E-13
14.0	1.1E-13	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	1.1E-13
15.0	3.5E-15	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	3.5E-15
16.0	3.4E-15	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	3.4E-15
17.0	7.4E-16	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	7.4E-16
18.0	8.8E-16	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	8.8E-16
19.0	2.0E-14	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	2.0E-14
20.0	1.6E-15	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	1.6E-15
21.0	1.1E-15	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	1.1E-15
22.0	5.6E-16	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	5.6E-16
23.0	6.8E-17	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	6.8E-17
24.0	6.3E-17	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	6.3E-17
25.0	1.8E-17	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	1.8E-17
26.0	4.0E-16	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	4.0E-16
27.0	5.2E-17	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	5.2E-17
28.0	1.4E-15	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	1.4E-15
29.0	4.0E-16	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	4.0E-16
30.0	3.5E-15	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	3.5E-15
31.0	2.5E-15	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	2.5E-15
32.0	3.5E-15	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	3.5E-15
33.0	2.0E-14	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	2.0E-14
34.0	6.2E-14	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	6.2E-14
35.0	1.1E-13	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	1.1E-13
36.0	1.0E-14	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	1.0E-14
37.0	6.6E-13	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	6.6E-13
38.0	8.2E-14	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	8.2E-14
39.0	3.5E-13	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	3.5E-13
40.0	1.7E-13	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	1.7E-13
41.0	1.2E-15	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	1.2E-15



42.0	3.2E-14	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	3.2E-14
43.0	1.9E-14	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	1.9E-14
44.0	4.6E-15	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	4.6E-15
45.0	8.6E-15	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	8.6E-15
46.0	1.8E-14	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	1.8E-14
47.0	6.3E-14	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	6.3E-14
48.0	3.7E-14	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	3.7E-14
49.0	7.5E-14	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	7.5E-14
50.0	3.8E-14	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	3.8E-14

Error tolerance: 1.0E-06

I 131 model: ICRP 54 Iodine Model

Particle size (micron): 5.0

Lung deposition fractions: 0.740 (ZNP), 0.080 (ZTB), 0.088 (ZP)

ID	Age	Sex	Height	Weight	Surface Area	Volume
01-01.1	01-01.1	M	170.0	60.0	1.70	60.0
01-01.2	01-01.2	F	160.0	50.0	1.60	50.0
01-01.3	01-01.3	M	175.0	65.0	1.75	65.0
01-01.4	01-01.4	F	165.0	55.0	1.65	55.0
01-01.5	01-01.5	M	180.0	70.0	1.80	70.0
01-01.6	01-01.6	F	170.0	60.0	1.70	60.0
01-01.7	01-01.7	M	185.0	75.0	1.85	75.0
01-01.8	01-01.8	F	175.0	65.0	1.75	65.0
01-01.9	01-01.9	M	190.0	80.0	1.90	80.0
01-01.10	01-01.10	F	180.0	70.0	1.80	70.0
01-01.11	01-01.11	M	195.0	85.0	1.95	85.0
01-01.12	01-01.12	F	185.0	75.0	1.85	75.0
01-01.13	01-01.13	M	200.0	90.0	2.00	90.0
01-01.14	01-01.14	F	190.0	80.0	1.90	80.0
01-01.15	01-01.15	M	205.0	95.0	2.05	95.0
01-01.16	01-01.16	F	195.0	85.0	1.95	85.0
01-01.17	01-01.17	M	210.0	100.0	2.10	100.0
01-01.18	01-01.18	F	200.0	90.0	2.00	90.0
01-01.19	01-01.19	M	215.0	105.0	2.15	105.0
01-01.20	01-01.20	F	205.0	95.0	2.05	95.0
01-01.21	01-01.21	M	220.0	110.0	2.20	110.0
01-01.22	01-01.22	F	210.0	100.0	2.10	100.0
01-01.23	01-01.23	M	225.0	115.0	2.25	115.0
01-01.24	01-01.24	F	215.0	105.0	2.15	105.0
01-01.25	01-01.25	M	230.0	120.0	2.30	120.0
01-01.26	01-01.26	F	220.0	110.0	2.20	110.0
01-01.27	01-01.27	M	235.0	125.0	2.35	125.0
01-01.28	01-01.28	F	225.0	115.0	2.25	115.0
01-01.29	01-01.29	M	240.0	130.0	2.40	130.0
01-01.30	01-01.30	F	230.0	120.0	2.30	120.0
01-01.31	01-01.31	M	245.0	135.0	2.45	135.0
01-01.32	01-01.32	F	235.0	125.0	2.35	125.0
01-01.33	01-01.33	M	250.0	140.0	2.50	140.0
01-01.34	01-01.34	F	240.0	130.0	2.40	130.0
01-01.35	01-01.35	M	255.0	145.0	2.55	145.0
01-01.36	01-01.36	F	245.0	135.0	2.45	135.0
01-01.37	01-01.37	M	260.0	150.0	2.60	150.0
01-01.38	01-01.38	F	250.0	140.0	2.50	140.0
01-01.39	01-01.39	M	265.0	155.0	2.65	155.0
01-01.40	01-01.40	F	255.0	145.0	2.55	145.0
01-01.41	01-01.41	M	270.0	160.0	2.70	160.0
01-01.42	01-01.42	F	260.0	150.0	2.60	150.0
01-01.43	01-01.43	M	275.0	165.0	2.75	165.0
01-01.44	01-01.44	F	265.0	155.0	2.65	155.0
01-01.45	01-01.45	M	280.0	170.0	2.80	170.0
01-01.46	01-01.46	F	270.0	160.0	2.70	160.0
01-01.47	01-01.47	M	285.0	175.0	2.85	175.0
01-01.48	01-01.48	F	275.0	165.0	2.75	165.0
01-01.49	01-01.49	M	290.0	180.0	2.90	180.0
01-01.50	01-01.50	F	280.0	170.0	2.80	170.0



CINDY - Code for Internal Dosimetry
(Version 1.4 12-Jun-95)
Report Date: 09/11/:8 at 13:35

Run title: Bioassay projection
Subject: Boonlert Sex: Male
ID No.: 1234567890 SSN: 111-22-2333
Intake Occurred: 07/09/2007 at 13:00
Operating Mode: Bioassay Projection

Acute inhalation exposure to I 131 (Class: D /f1: 1.00000) 1.00 Bq

I 131 Bioassay Projection - Excretion Rates and Retention

Time (d)	Lung (Bq)	Lymph (Bq)	N-P Reg. (Bq)	Other (Bq)	Thyroid (Bq)
1.0	2.0E-02	5.6E-03	4.6E-16	6.9E-02	2.2E-01
2.0	4.7E-03	2.6E-03	2.9E-14	1.1E-02	2.2E-01
3.0	1.1E-03	8.9E-04	8.7E-12	6.0E-03	2.1E-01
4.0	2.5E-04	2.7E-04	5.6E-12	5.8E-03	1.9E-01
5.0	5.7E-05	7.9E-05	5.0E-10	6.3E-03	1.7E-01
6.0	1.3E-05	2.2E-05	5.4E-13	6.8E-03	1.6E-01
7.0	3.0E-06	5.8E-06	7.9E-13	7.1E-03	1.4E-01
8.0	6.9E-07	1.5E-06	3.2E-13	7.3E-03	1.3E-01
9.0	1.6E-07	4.0E-07	7.4E-13	7.4E-03	1.2E-01
10.0	3.7E-08	1.0E-07	7.1E-11	7.3E-03	1.1E-01
11.0	8.6E-09	2.6E-08	9.3E-12	7.2E-03	1.0E-01
12.0	2.0E-09	6.6E-09	8.4E-12	7.1E-03	9.1E-02
13.0	5.2E-10	1.8E-09	2.8E-13	6.9E-03	8.3E-02
14.0	1.2E-10	4.5E-10	1.5E-13	6.6E-03	7.6E-02
15.0	6.8E-11	1.9E-10	4.7E-15	6.3E-03	7.0E-02
16.0	3.0E-11	1.1E-10	4.4E-15	6.1E-03	6.4E-02
17.0	8.6E-13	1.2E-11	9.8E-16	5.8E-03	5.8E-02
18.0	6.9E-12	1.2E-11	1.1E-15	5.5E-03	5.3E-02
19.0	1.2E-11	5.1E-11	2.6E-14	5.2E-03	4.8E-02
20.0	1.1E-12	4.0E-11	2.1E-15	4.9E-03	4.4E-02
21.0	8.3E-12	2.4E-12	1.5E-15	4.6E-03	4.0E-02
22.0	4.6E-12	1.8E-11	7.2E-16	4.3E-03	3.7E-02
23.0	2.6E-12	2.6E-12	8.9E-17	4.0E-03	3.4E-02
24.0	3.4E-12	1.1E-11	7.9E-17	3.8E-03	3.1E-02
25.0	1.3E-12	5.7E-12	2.3E-17	3.5E-03	2.8E-02
26.0	7.7E-12	5.4E-12	5.2E-16	3.3E-03	2.6E-02
27.0	1.0E-11	1.9E-11	6.1E-17	3.0E-03	2.4E-02
28.0	6.5E-12	2.4E-11	1.8E-15	2.8E-03	2.2E-02
29.0	3.3E-13	9.1E-12	5.1E-16	2.6E-03	2.0E-02
30.0	3.3E-12	6.1E-13	4.6E-15	2.4E-03	1.8E-02
31.0	3.3E-12	6.9E-12	3.3E-15	2.3E-03	1.6E-02
32.0	7.0E-13	8.1E-12	4.5E-15	2.1E-03	1.5E-02
33.0	2.0E-12	3.2E-12	2.6E-14	1.9E-03	1.4E-02
34.0	2.0E-12	2.1E-12	8.1E-14	1.8E-03	1.3E-02
35.0	8.9E-13	4.6E-12	1.5E-13	1.6E-03	1.1E-02
36.0	6.7E-13	3.3E-12	1.3E-14	1.5E-03	1.0E-02
37.0	1.6E-12	6.2E-12	8.6E-13	1.4E-03	9.6E-03
38.0	9.1E-13	5.7E-12	1.1E-13	1.3E-03	8.8E-03
39.0	3.5E-13	2.3E-12	4.5E-13	1.2E-03	8.0E-03
40.0	8.1E-13	2.0E-12	2.3E-13	1.1E-03	7.3E-03
41.0	3.8E-13	2.5E-12	1.6E-15	1.0E-03	6.7E-03



42.0	3.2E-13	8.9E-13	4.2E-14	9.3E-04	6.1E-03
43.0	5.3E-13	1.5E-12	2.5E-14	8.6E-04	5.6E-03
44.0	2.4E-13	1.6E-12	6.1E-15	7.9E-04	5.1E-03
45.0	1.7E-13	6.2E-13	1.1E-14	7.3E-04	4.7E-03
46.0	5.2E-13	1.4E-12	2.3E-14	6.7E-04	4.3E-03
47.0	6.8E-13	2.2E-12	8.2E-14	6.1E-04	3.9E-03
48.0	5.2E-13	2.4E-12	4.9E-14	5.6E-04	3.6E-03
49.0	1.3E-13	1.7E-12	9.8E-14	5.2E-04	3.3E-03
50.0	1.1E-13	4.7E-13	4.9E-14	4.7E-04	3.0E-03

Error tolerance: 1.0E-06

I 131 model: ICRP 54 Iodine Model

Particle size (micron): 5.0

Lung deposition fractions: 0.740 (ZNP), 0.080 (ZTB), 0.088 (ZP)