หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของปัญหา

เรเดียม-226 เป็นเรดิโอไอโซโทปที่มีปะปนอยู่ในน้ำธรรมชาติ ปริมาณ-มากน้อยแตกต่างกันขึ้นกับสภาพทางธรณีวิทยาของแหล่งน้ำหรือบริเวณที่น้ำไหลผ่าน เช่น น้ำแม่น้ำที่ Mill Creek ประเทศสหรัฐอเมริกา มีปริมาณเรเดียม-226 เท่ากับ 0.04 พิโคคูรีต่อลิตร (1) และในน้ำแร่ที่ประเทศบราซิลมีปริมาณเรเดียม-226 เท่ากับ 94.1 พิโคคูรีต่อลิตร (2) เป็นต้น เรเดียม-226 ในน้ำธรรมชาตินั้นพบว่า เกิดจากแร่ที่มีเรเดียมปะปนอยู่ เช่น สินแร่ยูเรเนียม, ทอเรียม, โคบอลต์, ทองแดง, ถ่านหิน เป็นต้น จากแร่พิทชเบลนด์ (pitchblende) 1 ตัน จะมีเรเดียม-226 ประมาณ 400 กรัม (3) นอกจากนั้น ยังพบเรเดียม-226 ปะปน-อยู่ในหินฟอสเฟต (phosphate rock) ในรัฐฟลอริดา สหรัฐอเมริกา ปริมาณค่อนข้างสูงอีกด้วย (4)

เรเดียม-226 เป็นเรดิโอไอโซโทปที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ จากการ-สลายตัวของยูเรเนียม-238 ซึ่งเป็นไอโซโทปของยูเรเนียมที่มีอยู่ในธรรมชาติเป็นปริมาณสูง คือ มีถึงร้อยละ 99.274 มีค่าครึ่งชีวิต (half life) 1620 ปี ซึ่งยาวกว่าไอโซโทปอื่น ๆ ของเรเดียมมาก เช่น เรเดียม-224 ซึ่งมีค่าครึ่งชีวิตเพียง 3.64 วัน เรเดียม-226 สลายตัวให้อนุภาคอัลฟา เป็นเรดอน-222 ซึ่งมีค่าครึ่งชีวิต 3.8 วัน และเป็นกาซ เนื่องจากเรเดียม-226 เป็นเรดิโอ-ไอโซโทปที่เกิดขึ้นในธรรมชาติ ปริมาณมากที่สุด คือ ร้อยละ 100 เมื่อเปรียบเทียบกับไอโซโทปทั้งหมดของเรเดียมและมีครึ่งชีวิตที่ยาวมาก ฉะนั้นอาจจะนับได้ว่าเรเดียม-226 ค่อนข้างจะมีพิษมากที่สุด (3)

เรเดียม-226 ที่เปรอะเปื้อน (contamination) ในน้ำผ่านเข้าสู่ร่างกายได้ง่าย ทั้งจากการบริโภคน้ำนั้นโดยตรง และ/หรือ ผ่านทางวัฏจักรอาหาร เมื่อเข้าสู่ภายในร่างกายแล้ว จะก่อให้เกิดอันตรายได้มาก เนื่องจากผลของการสลายตัวให้อนุภาคอัลฟา ซึ่งมีค่า specific ionization สูง นอกจากนั้น เรเดียม-226 ยังมีคุณสมบัติทางเคมีเหมือนธาตุแคลเซียม จึงสามารถเข้าแทนที่แคลเซียมในกระดูกได้ (5) ปริมาณเรเดียม-226 ทั้งหมดที่เข้าสู่ร่างกาย พบว่าร้อยละ 99 จะไปสะสมที่กระดูก มีเพียงบางส่วนสะสมในเนื้อเยื่อที่อวัยวะอื่น (6) หากสะสมที่กระดูกแล้ว อัตราการขับถ่ายจะช้ามาก (7) อาการของผู้ที่ได้รับเรเดียม-226 ที่แสดงในระยะเริ่มแรก ได้แก่ โรคโลหิตจาง, เนื้องอกในกระดูกและปอด, แผลในปอด เป็นต้น ซึ่งในภายหลังอาการเหล่านี้เปลี่ยนไปเป็นมะเร็ง มีรายงานว่า บุคคลที่ได้รับเรเดียม-226 ปริมาณเกินกว่ากำหนดที่อนุญาตให้มีได้ในร่างกาย โอกาสการเกิดมะเร็งจะมีถึงร้อยละ 40 (8)

เป็นที่ทราบและยอมรับกันแล้วว่า น้ำเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับร่างกาย โดยทั่ว ๆ ไปแล้วมนุษย์จะดื่มน้ำในปริมาณที่ไม่น้อยกว่า 1.2 ลิตรต่อวัน ฉะนั้น สิ่งเจือปนในน้ำ อาทิ เช่น สารพิษจำพวกโลหะหนัก สารกัมมันตรังสี ฯลฯ ถึงแม้จะมีอยู่ในปริมาณที่ไม่มากนัก อาจก่อให้เกิดอันตรายแก่ผู้บริโภคได้

การวิเคราะห์สารพิษจำพวกโลหะหนัก หรือสิ่งตกค้างจากยากำจัดศัตรูพืชในน้ำ มีผู้วิจัยค้นคว้ากันมากมาย แต่ในขณะเดียวกัน การศึกษาวิจัยเรื่องสารกัมมันตรังสีในน้ำดื่มภายในประเทศยังไม่มีผู้ใดกระทำมาก่อน นอกจากนั้นยังพบว่า เรดิโอไอโซโทปที่ปลดปล่อยอนุภาคอัลฟาที่ตรวจพบในแหล่งน้ำบนโลกนั้น ส่วนใหญ่เกิดจากเรเดียมและ daughter products ซึ่งน้ำสามารถชะล้าง (leach) ออกจากหินและดินได้ (9) ประกอบทั้งเรเดียม-226 เป็นเรดิโอไอโซโทปชนิดหนึ่ง ซึ่งเมื่อสะสมอยู่ในร่างกายในปริมาณที่มากพอจะก่อให้เกิดอันตรายค่อนข้างสูง ดังกล่าวแล้วข้างต้น รวมทั้งค่าครึ่งชีวิตของเรเดียม-226 ยาวมาก ดังนั้น ตลอดชีวิตของมนุษย์การลดลงของกัมมันตภาพรังสี อันเนื่องจากการสลายตัวของเรเดียม-226 มีค่าน้อยมาก (10) การทราบปริมาณที่แน่นอนของเรเดียม-226

ในน้ำจึงเป็นสิ่งจำเป็นและควรได้ริเริ่มขึ้น ทั้งนี้เพื่อความปลอดภัยและคงความ-มีสุขภาพอันดีของมนุษยชาติ ฉะนั้น การศึกษานี้จึงริเริ่มขึ้นและเพื่อเป็นการปูพื้นฐานสำหรับการศึกษาในระดับต่อไป จึงจะดำเนินการศึกษาทั้งค่าความแรงรังสีรวมอัลฟาและปริมาณเรเดียม-226 ทั้งนี้เพื่อศึกษาเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของค่าทั้งสอง ซึ่งอาจจะใช้เป็นแนวทางในการประเมินค่าระดับมูลฐาน (baseline) ในแหล่งน้ำบริโภคในประเทศไทยต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อดำเนินการวัดความแรงรังสีรวมอัลฟา (gross alpha activity) ในน้ำดื่ม น้ำบริโภค จากแหล่งน้ำบริโภคทั่วประเทศ

1.2.2 เพื่อศึกษาวิเคราะห์ปริมาณเรเดียม-226 ในสารตัวอย่างข้างต้น โดยกรรมวิธีแยกทางเรดิโอเคมี อาศัยเทคนิคการตกตะกอนร่วม (co-precipitation) แล้วทำให้บริสุทธิ์ด้วยการสกัด (extraction)ด้วยตัวทำละลายอินทรีย์

1.2.3 เพื่อศึกษาเปรียบเทียบความแรงรังสีรวมอัลฟาและปริมาณ-เรเดียม-226 ในสารตัวอย่างข้อ 1.2.1 ที่เก็บจากสถานที่ที่กำหนดไว้แน่นอน

1.2.4 เพื่อหาข้อมูลสำหรับใช้เป็นแนวทางนำไปสู่การประเมินค่าระดับ-มูลฐานของความแรงรังสีรวมอัลฟาและปริมาณเรเดียม-226 ในแหล่งน้ำบริโภคในประเทศไทย

1.3 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย

1.3.1 สารตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองนี้ ได้รับความอนุเคราะห์จากกองอนามัยสิ่งแวดล้อม กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข ในการจัดเก็บตัวอย่างน้ำจากแหล่งน้ำต่าง ๆ ทั่วประเทศไทย ซึ่งประชาชนใช้ดื่มและบริโภค การศึกษาจะ-กระทำในสารตัวอย่างที่เก็บรวบรวมไว้อย่างน้อยภายในกำหนดเวลา 1 ปี

1.3.2 สารตัวอย่างนำมาวิเคราะห์ความแรงรังสีรวมอัลฟาและปริมาณ-เรเดียม-226 ซึ่งประกอบไปด้วยขั้นตอนต่อไปนี้

1.3.2.1 จัดเตรียมสารตัวอย่างให้เหมาะสม เพื่อนำไปใช้ในการ-วิเคราะห์ต่อไป

1.3.2.2 วัดความแรงรังสีรวมอัลฟา

1.3.2.3 วิเคราะห์ปริมาณเรเดียม-226 โดยกรรมวิธีทางเรดิโอ-เคมี กระทำตามขั้นตอนการทดลอง ดังนี้

1.3.2.3.1 ใช้เทคนิคการตกตะกอนร่วม แยกเรเดียมออกจาก-สารตัวอย่างในรูปของสารประกอบซัลเฟต โดยให้มีความบริสุทธิ์สูงและมีเคมิคัลยิลด์ (Chemical Yield) ใกล้เคียงร้อยละ 100

1.3.2.3.2 การทำเรเดียมให้บริสุทธิ์ ด้วยการขจัดสาร-แทรกซ้อน (interfering substances) โดยใช้สารละลายทีโนอิลไตรฟลูออโร-อะซีโตน (Thenoyltrifluoroacetone,TTA) เป็นตัวสกัด

1.3.2.3.3 การตกตะกอนกลับเป็นเรเดียมซัลเฟต

1.3.2.3.4 การวัดความแรงรังสี

1.3.3 ทดสอบความเชื่อถือได้ของการวัดความแรงรังสีรวมอัลฟา และวิธีวิเคราะห์ปริมาณเรเดียม-226 โดยเปรียบเทียบกับสารตัวอย่างมาตรฐาน (standard reference material) จากต่างประเทศ

1.3.4 การคำนวณและรายงานผล

1.4 <u>ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการศึกษาวิจัยนี้</u>

1.4.1 ข้อมูลที่ได้จากการศึกษาวิจัยนี้ สามารถนำมาใช้ประกอบการ-พิจารณาประเมินค่าระดับมูลฐานของความแรงรังสีรวมอัลฟาและปริมาณเรเดียม-226 ในแหล่งน้ำบริโภคในประเทศไทยได้ ซึ่งค่าระดับมูลฐานนี้จะเป็นข้อมูลที่สำคัญในการพิจารณาเพื่อระบุว่า มีการกระทำให้เปรอะเปื้อนหรือไม่ในอนาคต

1.4.2 ข้อมูลที่ได้รับสามารถนำไปใช้เพื่อพิจารณากำหนดค่าคุณลักษณะทางกัมมันตภาพรังสีของน้ำบริโภคภายในประเทศ (กำหนดโดยสำนักงานผลิตภัณฑ์มาตรฐานอุตสาหกรรม) ซึ่งปัจจุบันยังมิได้กำหนดไว้

1.4.3 ข้อมูลที่ได้รับนี้ สามารถนำไปใช้เพื่อการพิจารณาค้นหาแหล่งแร่ยูเรเนียมได้แน่นอนขึ้น

1.5 <u>การสำรวจงานวิจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องซึ่งได้กระทำมาแล้ว</u>

1.5.1 <u>การใช้งานของเรเดียม-226</u>

ได้มีการนำเอาเรเดียมมาใช้ในกิจการแพทย์และอุตสาหกรรมเป็นอันมากนับตั้งแต่มาดามมารี คูรี ได้ประสบผลสำเร็จในการแยกเรเดียมออกจากแร่ยูเรเนียมในปี ค.ศ.1898 เป็นต้นมา โดยในทางการแพทย์ ได้อาศัยคุณสมบัติการแผ่รังสีมาใช้ทำลายเนื้อเยื่อที่เป็นโรค ในปี ค.ศ.1903 การจำหน่ายเรเดียมในท้องตลาดได้เพิ่มขึ้นอย่างมากมาย ประชาชนในสมัยนั้นนิยมดื่มและอาบน้ำที่ผสมด้วยเรเดียม แพทย์เป็นจำนวนมากฉีดเรเดียมให้กับคนไข้ การใช้เรเดียมเพื่อรักษาโรคได้แพร่หลายมากขึ้นโดยเฉพาะในปี ค.ศ.1913 ซึ่งแพทย์นำมาใช้รักษาโรคต่าง ๆ เช่น โรคปวดตามไขข้อและกล้ามเนื้อ, โรคความดันโลหิตสูง, โรคหืด, โรคเกาท์ (gout), โรคปวดเอว นอกจากนี้ แพทย์ยังอ้างว่า ใช้รักษาโรคโลหิตจางได้อีกด้วย ซึ่งปัจจุบันพบว่า เรเดียมเป็นต้นเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดโรคนี้ขึ้น (11)

ในปัจจุบันทางการแพทย์ยังคงใช้เรเดียม-226 สำหรับทำลายเนื้อเยื่อมะเร็ง (malignancies) โดยอาศัยรังสีแกมมาที่ได้จากการสลายตัวของ daughters เช่น บิสมัส-214, ตะกั่ว-214 และแทลเลียม-210 ซึ่งกระทำโดยผนึกเรเดียม-226 ในภาชนะปิดสนิทที่ยอมให้เฉพาะกัมมันตภาพรังสีแผ่ออกมาได้เท่านั้น ภาชนะที่ใช้บรรจุทำด้วยโลหะผสม (alloy) ที่เบาและทำเป็นลักษณะต่าง ๆ เช่น รูปเข็ม (needles), หลอดกลม (tubes) และแคปซูล (capsules) เป็นต้น แล้วใส่เข้าไปในร่างกายในบริเวณที่เป็นมะเร็งหรือใต้ผิวหนังใกล้กับบริเวณที่เป็นมะเร็ง ลักษณะภาชนะที่ออกแบบไว้สำหรับการใช้งานตามความเหมาะสม

มีชื่อเรียกว่า plaques และ nasopharyngeal สำหรับ plaques ทำด้วยโลหะ-แผ่นบางมาก เพื่อให้อนุภาคอัลฟาสามารถทะลุผ่านออกมาสู่ผิวหนังได้ เนื่องจากภาชนะบรรจุบางมาก จึงพบว่าเกิดการรั่วมากกว่าชนิดอื่น ส่วน nasopharyngeal ใช้สำหรับสอดเข้าไปในโพรงจมูกและช่องในกระโหลกศีรษะ (3,11)

ในทางอุตสาหกรรมได้มีการนำเอาเรเดียม-226 มาผสมกับสารประกอบของสังกะสีซัลไฟด์ (fluorescent zinc sulfide) ใช้เป็นสีสะท้อนแสง (luminous paint) สีชนิดนี้ได้นำมาเขียนบนหน้าปัดนาฬิกา ทั้งชนิดข้อมือและชนิดแขวน และบนเครื่องมือบางอย่างที่ใช้บนเครื่องบินและในเรือเดินทะเล ในระหว่างสงครามโลกครั้งที่ 1 เครื่องมือต่าง ๆ ที่เขียนหน้าปัดด้วยสีที่มีเรเดียมเป็นองค์ประกอบ ได้นำมาใช้ในกองทัพเป็นจำนวนมาก ปกติจะใช้เรเดียมใน-อุตสาหกรรมชนิดนี้ประมาณ 0.1 ไมโครคูรี (11) หรือคิดเป็นปริมาณเรเดียมที่มีความเข้มข้นร้อยละ 20-30 จำนวน 1 มิลลิกรัมต่อปริมาณของสังกะสีซัลไฟด์จำนวน 30-40 กรัม (12), ใช้ในงานเรดิโอกราฟฟี (Radiography) โดยอาศัย-คุณสมบัติการสลายตัวให้รังสีแกมมา เพื่อตรวจหาความหนาของคะตะลิสต์ เบดส์ (Catalyst beds), ใช้ในอุตสาหกรรมการทำเหล็กหล่อ เพื่อตรวจหาตำหนิ/รอยร้าวในเหล็กหล่อ (Casting) เป็นต้น นอกจากนั้น ยังอาศัยคุณสมบัติการ-สลายตัวให้รังสีแกมมาในการตรวจหาแหล่งแร่ยูเรเนียมและน้ำมันได้อีกด้วย การ-ตรวจวัดความเข้มข้นของเรดอนในดินอาจนำมาใช้เพื่อระบุแหล่งแร่ยูเรเนียมได้เช่นกัน

สำหรับคุณสมบัติของเรเดียม-226 ที่สลายตัวให้อนุภาคอัลฟา นำมาใช้ประโยชน์โดยใช้เป็นต้นกำเนิด ionizing radiation ในเครื่องมือกำจัดประจุ-ไฟฟ้าสถิต (static charge eliminator), ใช้เป็นต้นกำเนิดนิวตรอนจาก-ปฏิกิริยานิวเคลียร์ (α,n) โดยผสมกับธาตุเบา เช่น เบริลเลียม (beryllium) เป็นต้น (13,14)

1.5.2 ความเป็นพิษของเรเดียม-226

เรเดียม-226 เข้าสู่ร่างกายได้ 3 ทาง คือ ทางการหายใจ, ทางบาดแผลที่เกิดบนผิวหนัง และทางระบบทางเดินอาหาร นอกเหนือจากการฉีดเข้าทางเส้นเลือดเพื่อรักษาโรคบางอย่างในสมัยก่อน (10,15)

เรเดียม-226 ที่เข้าสู่ร่างกายทางระบบทางเดินอาหารนั้น นับว่ามีอันตรายน้อยที่สุด เนื่องจากการดูดซึมเข้าสู่กระแสโลหิตเป็นไปได้น้อย มีเพียงร้อยละ 2 ที่ไปสะสมที่บริเวณกระดูกโครงร่าง ส่วนที่เหลือถูกขับถ่ายออกจากร่างกายโดยทาง-อุจจาระมากกว่าทางปัสสาวะ พบว่า การขับถ่ายออกทางปัสสาวะมีเพียงร้อยละ 2-5 เท่านั้น (16) และอัตราการขับถ่ายจะเร็วมาก กล่าวคือ ภายหลังจากที่ได้รับเรเดียม-226 เพียง 5 วัน ร่างกายจะขับถ่ายออกและเหลืออยู่เพียงร้อยละ 1-9 ของปริมาณที่ได้รับทั้งหมด (7,17) เรเดียมที่เข้าสู่ร่างกายโดยการหายใจ เกิดจาก-การสูดฝุ่นที่มีเรเดียมปะปนอยู่เข้าไป (18) ซึ่งในกรณีนี้เรเดียม-226 ไม่เพียงแต่ทำอันตรายต่อเนื้อเยื่อของปอดเท่านั้น แต่ยังทำอันตรายต่อเนื้อเยื่ออื่น ๆ อีกด้วย เนื่องจากเมื่อเข้าไปในปอดแล้วมีเพียงบางส่วนที่สะสมอยู่ที่ปอด ส่วนที่เหลือจะค่อย ๆ ละลายอยู่ในของเหลวภายในปอด (พลาสมา) ซึ่งเรเดียม-226 ส่วนที่ละลายอยู่จะถูกพาออกจากปอดไปยังส่วนอื่น ๆ ของร่างกาย แล้วอาจเข้าสะสมอยู่ในอวัยวะต่าง ๆ ที่ผ่านไป เช่น กระดูก, ถุงน้ำดี หรือตับ เป็นต้น สารประกอบของเรเดียมที่เกิดขึ้นในกรณีเช่นนี้ ได้แก่ เรเดียมซัลเฟต ซึ่งมีความสามารถละลายน้ำได้เท่ากับ 0.02 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 20 $^{\circ}$ ซ (8,16)

Marinelli และคณะ (16) ได้กล่าวถึงอุบัติเหตุที่คนงานผู้หนึ่งซึ่งสูด-เรเดียมซัลเฟตเข้าไปว่า ในระยะแรกปริมาณเรเดียมที่อยู่ในปอดจะลดลงอย่างรวดเร็ว แล้วจึงค่อย ๆ ลดลงอย่างช้า ๆ แบบ exponential ในภายหลัง เรเดียมจะถูกขจัดออกจากปอดเป็นปริมาณครึ่งหนึ่ง ภายในเวลา 30 วัน ซึ่งเป็น biological half life ของเรเดียม-226 ในปอด

ความเป็นพิษของเรเดียม-226 ที่เข้าสู่ร่างกายโดยการหายใจ พบว่าจะเกิดกับคนงานทำเหมืองเป็นส่วนใหญ่ ได้มีรายงานถึงคนงานทำเหมืองแร่พิทชเบลนด์ในบริเวณที่ราบสูงโกโลราโด และคนงานทำเหมืองแร่โคบอลต์ที่ประเทศเชคโกสโลวาเกียว่าเสียชีวิตลงเป็นจำนวนมากด้วยโรคระบาดที่เรียกชื่อว่า "Mountain Sickness" อาการที่ตรวจพบ ได้แก่ บริเวณปอดมีการสร้างเยื่อพังผืด (fibrosis) ขึ้นเป็นจำนวนมาก ซึ่งภายหลังกลายเป็นมะเร็งและในบางรายพบเนื้องอกชนิดมะเร็ง (malignancies) จากการสำรวจพบว่า มีเรเดียมปะปนอยู่ในดินและฝุ่นละอองบริเวณเหมืองปริมาณสูงมาก (16,19,20) สำหรับการเข้าสู่ร่างกายทางผิวหนังโดยเข้าทางบาดแผล หรือฉีดเข้าเส้นโลหิต เพื่อรักษาโรคบางอย่างในสมัยก่อนนั้นจะทำอันตรายต่อร่างกายได้มากที่สุด เนื่องจากเรเดียม-226 ถูกดูดซึมเข้าสู่กระแสโลหิตโดยตรง

ในการทดลองกับหนูที่ฉีดเรเดียมคลอไรด์เข้าทางเส้นเลือด พบว่าเรเดียม-226 ส่วนใหญ่จะไปสะสมที่กระดูกมีเป็นส่วนน้อยที่พบในบริเวณทางเดินอาหาร, กล้ามเนื้อ, ผิวหนังและไต กระดูกส่วนที่มีการสะสมมาก ได้แก่ บริเวณที่เป็นเนื้อเยื่อส่วนที่เป็นเส้นใยของกระดูก (trabecular) และตอนปลายของกระดูกทั้ง 2 ข้าง (epiphyseal bone) มีเป็นจำนวนน้อยที่สะสมบริเวณส่วนกลางของกระดูก (metaphyses),กระโหลกศีรษะและกระดูกสันหลัง มีรายงานว่าเรเดียม-226 ที่สะสมในเนื้อเยื่อจะถูกขจัดออกเร็วกว่าบริเวณอื่น ๆ, ฟันและบริเวณส่วนกลางของกระดูกถูกขจัดออกช้าที่สุด (15)

อาการพิษเรื้อรัง (chronic) ของเรเดียม-226 ที่พบในคนงานเขียนหน้าปัดนาฬิกาที่ใช้สีผสมด้วยเรเดียม ได้แก่ โรคโลหิตจาง (Aplastic anaemia) ทั้งนี้ เนื่องจากผลของเรเดียม-226 ที่มีต่อไขกระดูก (bone marrow) ในบางรายพบว่า เรเดียม-226 ไปมีผลต่อเซลล์สร้างเม็ดเลือดแดง (marrow aplasia) ทำให้เกิดอาการมะเร็งในเม็ดเลือด (Aleukaemic leukaemia) Martland (ปี ค.ศ.1925) ได้รายงานถึงการพบอาการภาวะกระดูกตาย (necrosis) ที่กระดูกขากรรไกรและมะเร็งที่กระดูก (bone sarcoma) ทั่วไป

นอกจากนั้น ยังพบว่า บางรายเกิดมะเร็งที่ช่องว่างในกระโหลกศีรษะ(carcinoma of the mastoid air cells) ส่วนพิษของเรเดียมแบบเฉียบพลัน(acute) พบว่า ทำให้เกิดมะเร็งในเม็ดเลือดและโรคโลหิตจางชนิดรุนแรง เนื่องจากผลของ-เรเดียม-226 ที่มีต่อไขกระดูกและม้าม (19-23)

สำหรับอาการภาวะกระดูกตายที่ขากรรไกรทั้ง Stewart และ Lawrence (24,25) ได้รายงานว่า ตรวจพบที่บริเวณขากรรไกรล่างมากกว่าที่ขากรรไกรบน และยังตรวจพบว่า อาการมะเร็งที่เกิดบริเวณปากจะเกิดขึ้นมากที่ลิ้น, ริมฝีปากล่าง, กระดูกขากรรไกรล่างและบริเวณลำคอมากกว่าจะเกิดทางส่วนเหนือขากรรไกรบน-ขึ้นไป

Looney (26) ได้รายงานไว้ว่า ปริมาณเรเดียมที่น้อยกว่า 3.6 ไมโครคูรีจะไม่ทำให้เกิดมะเร็งในกระดูก; ในปี ค.ศ.1969 นักชีววิทยารังสี (Radio-biologist) ชื่อ Dr.A.J.Finkelและคณะ (27) ได้รายงานถึงกรณีการเกิดเนื้องอกบนผิวหนังที่หอหุ้มกระดูกขากรรไกรของคนไข้รายหนึ่งว่า ได้รับเรเดียม-226 เข้าสู่ภายในร่างกายเป็นปริมาณ 0.13 ไมโครคูรี

คณะกรรมาธิการป้องกันอันตรายจากรังสีระหว่างประเทศ (The International Commission on Radiological Protection) (28) และคณะกรรมการป้องกันอันตรายจากรังสีแห่งชาติของสหรัฐอเมริกา (The National Committee on Radiation Protection)(29) กำหนดปริมาณสูงสุดของเรเดียม-226 ที่ยอมให้มีอยู่ในร่างกายได้โดยไม่เกิดอันตรายเท่ากับ 0.1 ไมโครคูรี และปริมาณสูงสุดในอากาศที่อนุญาตให้มีได้เท่ากับ 10^{-11} ไมโครคูรีต่อ-ลบ.ซม. กระทรวงสาธารณสุขของสหรัฐอเมริกา (The United States Public Health Service)(30) และองค์การอนามัยโลก (World Health Organization.WHO) (31) กำหนดปริมาณเรเดียม-226 ไว้ในมาตรฐานน้ำดื่มว่าไม่ควรมีค่าเกิน 3 พิโคคูรีต่อลิตร

อวัยวะที่เรเดียม-226 ทำอันตรายได้มากที่สุด คือ กระดูก เนื่องจากเมตาโบลิซึมของร่างกายต่อเรเดียมและแคลเซียมคล้ายคลึงกัน เรเดียมจึงเข้าแทนที่แคลเซียมในกระดูกได้ (5) จากการศึกษาด้วยวิธีถ่ายภาพสารตัวอย่างที่มีรังสีในตัวเอง (Autoradiograph) ในกระดูกของผู้ที่ทำงานเกี่ยวข้องกับเรเดียม-226 พบว่า บุคคลที่ได้รับเรเดียม-226 ในระบบทางเดินอาหารปริมาณสูง ๆ ช่วงที่ยังมีอายุน้อย การเข้าสะสมจะอยู่ในลักษณะไม่เป็นระเบียบ (non-uniform) กระจัดกระจายทั่วไป (diffuse) และจะสะสมมากในบริเวณที่ใกล้หรืออยู่ในบริเวณช่องทางติดต่อของกลุ่มเซลล์ที่อยู่ล้อมรอบหลอดเลือดและเส้นประสาท (Haversian's canal) โดยจะเข้าแทนที่สารอนินทรีย์ที่อยู่รอบ ๆ ทางติดต่อ (canals) เหล่านั้นด้วยขบวนการแลกเปลี่ยนอิออน (ion-exchange process) สำหรับเรเดียม-226 ที่ได้รับทางระบบทางเดินอาหารอย่างสม่ำเสมอต่อเนื่องกัน และมีการขับถ่ายออกไปตลอดชั่วอายุ การเข้าแทนที่จะแสดงในลักษณะที่มีระเบียบมากขึ้น และถึงแม้ว่าเรเดียม-226 จะถูกกำจัดออกจากกระดูกโครงร่างอย่างช้า ๆ ก็ตาม แต่การได้รับเป็นประจำทุกวันจากอาหาร จะทำให้ปริมาณเรเดียม-226 ในกระดูกโครงร่างมีค่าคงที่ในบุคคลทุกวัย (6,32)

พิษของเรเดียม-226 ที่มีต่อกระดูก คือ ทำให้กระดูกบางลง, ความหนาแน่นของกระดูกลดลง, ข้อต่อหลวม, ทำลายเนื้อเยื่อบริเวณลองโบน และเมื่อได้รับเรเดียม-226 เป็นปริมาณมากขึ้น จะเกิดการแตกร้าวที่กระดูกซี่โครงและกระดูกสันหลัง, การแตกร้าวเกิดเป็นวงรอบ ๆ (spiral features) ที่กระดูกต้นแขนและขา (20,33,34), ทำให้เกิดเนื้องอกของกระดูกซึ่งพบมากในส่วนลองโบน, กระดูกเชิงกราน และกระโหลกศีรษะมากกว่าส่วนอื่นๆ อาการที่ตามมาภายหลัง คือ มะเร็งในกระดูก ในคนไข้ที่สูงอายุและมีประวัติได้รับเรเดียมในปริมาณสูง เป็นระยะเวลานาน พบว่ากระดูกส่วนที่รองรับน้ำหนักตัวหรือกระดูกซี่โครงทำงานผิดปกติ (15,35)

ในสัตว์ทดลอง เช่น หนู และสุนัข ที่ได้รับเรเดียม-226 ในปริมาณสูงและเป็นเวลานาน จะแสดงอาการที่ฟัน กล่าวคือ กระดูกฟัน, รากฟันถูกทำลายและฟันหลุดอันเป็นผลเนื่องมาจากส่วนที่ยึดฟันกับเหงือก (cemento-enamel junction) ถูกทำลายรูปร่างของฟันเปลี่ยนแปลงไป ทำให้ความแข็งของฟันลดลงและเป็นเหตุให้สีของฟันกลายเป็นสีชมพู (pinkish) นอกจากนั้นเรเดียม-226 ยังมีผลยับยั้งต่อการงอกของฟัน ซึ่งได้ตรวจพบเดนตินและอินาเมล (dentin and enamel) บริเวณกระดูกขากรรไกร, ทำให้เกิดเนื้องอกตรงบริเวณเนื้อเยื่อที่ติดกับฟันกรามและเมื่อเพิ่มปริมาณเรเดียม-226 ขึ้นจะพบว่า ทำให้เกิดเนื้องอกที่กระดูกเพิ่มขึ้นและช่วงชีวิต (life span) สั้นลง หลังจากนั้นอาจมีการทำลายเซลล์ของกระดูก (osteomyelitis) และเซลล์ที่สร้างเม็ดเลือดแดง (marrow stem cell) แต่ไม่พบว่าเรเดียม-226 มีผลต่อเกล็ดเลือด (blood platelet) (8, 35-39)

Aub และคณะ (33) ได้รายงานถึงพิษของเรเดียม-226 ที่เกิดกับเนื้อเยื่อได้แก่ การเกิดเนื้องอกที่เนื้อเยื่อ ซึ่งอยู่ติดกับกระดูก และภายหลังเปลี่ยนไปเป็น-มะเร็ง บริเวณที่ตรวจพบ ได้แก่ เนื้อเยื่อตรงรอยต่อ ของกระดูกเข่า, ข้อศอกและในโพรงจมูก สำหรับพลังงานของเรเดียมที่มีผลต่อเนื้อเยื่อ มีค่าเท่ากับ 110 MeV (40) ในกรณีที่เรเดียมไม่ได้เข้าสู่ร่างกายพบว่า ผู้ที่ทำงานเกี่ยวข้องกับเรเดียม-226 เป็นเวลานาน เกิดอาการผิวหนังไหม้ (skin burn) อันเป็นผลการทำลายจากรังสีเบตาและแกมมาที่ถูกปลดปล่อยออกมา (19)

จากการศึกษาถึงผลของเรเดียม-226 ต่อดวงตาของสุนัขทดลอง พบว่าในดวงตาจะมีความสามารถในการเก็บสะสมเรเดียม-226 มากกว่าในกระดูกโครงร่างถึง 10 เท่า ซึ่งเป็นความสามารถพิเศษเฉพาะของเนื้อเยื่อดวงตาที่ทนต่ออนุภาคอัลฟาได้มาก (41) และเมื่อเพิ่มปริมาณเรเดียม-226 ในระดับที่สูงขึ้นจะทำให้เกิดเนื้องอกที่ดวงตาและในภายหลังตาจะถลน (enucleation) ซึ่งแสดง-ถึงอาการมะเร็งที่ดวงตา (Malignant melannoma) จากการศึกษาด้วยการ-ถ่ายภาพทางรังสีและทางเรดิโอเคมี พบว่า มีเรเดียม-226 เป็นจำนวนมากไปสะสมบริเวณส่วนที่เป็นเม็ดสี (pigment) (42-44)

สำหรับผลของเรเดียม-226 ที่มีต่อพันธุกรรม ได้มีรายงานถึงการศึกษากับกบ พบว่า ตัวอสุจิของกบที่ได้รับเรเดียม-226 เมื่อไปผสมกับไข่ ตัวอ่อนที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะผิดปกติ (45)

การดูดซึมและเก็บสะสมเรเดียม-226 พบว่า ฟันมีการสะสมเรเดียมมากที่สุด รองลงมาคือ ขากรรไกร, กระโหลกศีรษะ, กระดูกสันหลังและกระดูกเชิงกราน ในจำพวกเนื้อเยื่อ ไตและม้ามรับเรเดียมได้มากที่สุด ตับรับได้ช้าที่สุด ปอด, สมองและตับอ่อนรับได้ในอัตราปานกลาง ในโลหิตพบว่า มีการสะสมเรเดียม-226 ได้น้อยมากและกระจายไปเท่า ๆ กันระหว่างเม็ดเลือดแดงและพลาสมา (7)

1.5.3 การเปรอะเปื้อนของเรเดียม-226 ต่อสิ่งแวดล้อม

จากการที่เรเดียม-226 เป็นเรดิโอไอโซโทปที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติปะปนอยู่กับแร่ธาตุต่าง ๆ ซึ่งถูกชะล้างออกได้ง่าย จึงพบเป็นธาตุจำนวนน้อย (trace element) ในสารต่าง ๆ ในธรรมชาติแทบทุกชนิด มนุษย์รับเอาเรเดียม-226 เข้าสู่ร่างกายมากที่สุดจากน้ำดื่ม รองลงมาได้แก่ อาหาร ซึ่งจากชนิดของอาหารทั้งหมด พบว่า ในข้าว, แป้ง และมันฝรั่ง มีปริมาณเรเดียมสูงที่สุด คือ มีค่าตั้งแต่ 10^{-15}-10^{-14} กรัมเรเดียมต่อกรัมน้ำหนักอาหาร ในประเทศบราซิลพบว่า ผลไม้เปลือกแข็ง ที่เรียกว่า Brazil nuts มีปริมาณเรเดียมสูงถึง 10^{-12} กรัมเรเดียมต่อกรัม (6) ในอาหารประจำวันของคนอังกฤษ ปริมาณเรเดียม-226 สูงสุดที่รายงานไว้ มีค่าเท่ากับ 5.9 พิโคคูรีต่อวัน (46)

ในปี 1960 Muth และคณะ (47) ได้รายงานถึงการวิเคราะห์เรเดียม-226 ด้วย emanation method ในน้ำประปาและน้ำแม่น้ำที่เยอรมัน พบว่า ในน้ำประปามีค่าเท่ากับ 0.03-0.34 พิโคคูรีต่อลิตร ส่วนในน้ำแม่น้ำมีค่าอยู่ระหว่าง 0.07-0.84 พิโคคูรีต่อลิตร

ในปี 1966 ได้มีการศึกษาถึงสาเหตุของมะเร็งในกระดูกของประชาชนที่อยู่ในพื้นที่ของรัฐไอโอวาและอิลินอยส์ ซึ่งมีอุบัติการของโรคนี้สูง และพบว่า ปริมาณเรเดียม-226 ที่อยู่ในน้ำดื่มมีค่าสูงกว่าระดับที่อนุญาตให้มีได้ (48)

Starik และคณะ (49) ได้รายงานถึงปริมาณเรเดียม-226 ในน้ำทะเลจากทะเลดำและในดินตะกอนพื้นทะเล (bottom sediment) มีค่าเท่ากับ 10^{-13} กรัมเรเดียมต่อลิตร และ 3 ถึง $9 \cdot 10^{-13}$ กรัมเรเดียมต่อกรัมน้ำหนักโคลน ตามลำดับ

Fisenne และ Keller (50) พบว่า เรเดียม-226 ที่มีอยู่ในน้ำประปาที่นิวยอร์คและซานฟรานซิสโก สหรัฐอเมริกา มีค่าเท่ากับ 0.011 และ 0.015 พิโคคูรีต่อลิตร ตามลำดับ

Jawarowski และคณะ (51) รายงานปริมาณเรเดียม-226 ที่พบในถ่านหินบิทูมินัส ประเทศโปแลนด์และประเทศสาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนจีนว่า มีค่าเท่ากับ 0.62 ± 0.12 และ 0.20 ± 0.05 พิโคคูรีต่อกรัม ตามลำดับ ในขี้เถ้าของถ่านหินหลังจากใช้แล้วที่ประเทศโปแลนด์ มีค่าเท่ากับ 0.63 ± 0.07 พิโคคูรีต่อกรัม และในดินที่ประเทศอิตาลี มีค่าเท่ากับ 0.72 พิโคคูรีต่อกรัม

ในปี 1972 De Bortoli และ Gaglione(52) รายงานถึงผลการสำรวจวิเคราะห์ปริมาณเรเดียม-226 ในสารตัวอย่างจากสิ่งแวดล้อม เช่น ผัก, นม, ดิน, น้ำจากทะเลสาบ 4 แห่ง และปลา โดยใช้ emanation technique เพื่อศึกษาความแตกต่างของเรเดียม-226 ในสิ่งแวดล้อม สำหรับปริมาณเรเดียม-226 ที่วิเคราะห์ได้ในผักมีค่าระหว่าง 0.72-1.2 พิโคคูรีต่อกรัมน้ำหนักสด, ในนม 0.18-0.19 พิโคคูรีต่อลิตร, ในดิน 0.72 ± 0.11 พิโคคูรีต่อกรัมน้ำหนักแห้ง, ในน้ำจากทะเลสาบ 4 แห่ง อยู่ในช่วงระหว่าง 0.014-0.020 พิโคคูรีต่อลิตร และในปลามีค่าระหว่าง 1.4-3.2 พิโคคูรีต่อกิโลกรัม ในรายงานฉบับเดียวกันนี้ ยังได้รายงานการวิเคราะห์เรเดียม-226 ในน้ำจืด (fresh water) ที่ทำการวิเคราะห์ในยุโรปไว้ดังนี้

ในเนเธอร์แลนด์ วิเคราะห์ปริมาณเรเดียม-226 ในน้ำแม่น้ำและน้ำทะเลสาบพบว่า มีค่าระหว่าง 0.04-0.15 พิโคคูรีต่อลิตร

ในยูโกสลาเวีย ทำการวิเคราะห์ในน้ำแม่น้ำ มีค่าอยู่ในช่วง 0.3-1.1 พิโคคูรีต่อลิตร

และที่มีค่าสูงสุด เป็นการวิเคราะห์ในน้ำแร่ที่ประเทศอิตาลี มีค่าสูงถึง 48 พิโคคูรีต่อลิตร

1.5.4 <u>กรรมวิธีวิเคราะห์เรเดียม-226</u>

ในปี 1969 Kelkar และ Ioshi(9) ได้รายงานถึงวิธีการวัดเรเดียมและเรดอนในน้ำที่มีระดับความแรงรังสีมากกว่า 1-2 พิโคคูรีต่อลิตร กล่าวคือ ทำการตกตะกอนร่วมเรเดียม, ตะกั่ว และโพโลเนียมในน้ำ 1 ลิตรด้วยแบเรียม โดยการเติมกรดซัลฟูริค 36 โมลาร์ ทีละหยด คนให้เข้ากัน จากนั้นเติมสังกะสีซัลไฟด์ชนิดซิลทิลเลชั่นเกรด จำนวน 400 มิลลิกรัม เขย่าประมาณ 2 นาที แล้วจึงกรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 42 เส้นผ่านศูนย์กลาง 4 เซนติเมตร ภายใต้สูญญากาศ ล้างตัวอย่างด้วยอัลกอฮอล์บริสุทธิ์ (absolute alcohol) จากนั้นนำไปทำให้แห้งภายใต้หลอดไฟอินฟราเรด (Infrared lamp) เป็นเวลา 1-2 นาที วัดสาร-ตัวอย่างด้วย Photomultiplier scaler โดยใน 3 ชั่วโมงแรกวัดทุก ๆ 30 นาที จากนั้นจึงวัดอีกครั้งหลังจาก 24 และ 72 ชั่วโมง ตามลำดับ วิธีนี้เหมาะสำหรับการทำในสนามและมีเคมิคัลยิลด์ มากกว่าร้อยละ 95

ในปี 1971 Jawarowski และคณะ (51) ได้ทำการวิเคราะห์ปริมาณของเรเดียม-226 ในถ่านหิน, หิมะ และน้ำแข็ง โดยใช้ emanation method ปริมาณ-เรเดียม-226 ที่วิเคราะห์ได้ในถ่านหิน มีค่าเฉลี่ย 0.3 พิโคคูรีต่อกรัม สำหรับการวิเคราะห์ในหิมะ ได้เก็บตัวอย่างหิมะจากระยะทางห่างจากที่ตั้งเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู 0, 1, 2, 4, 30 และ 45 กิโลเมตร ตามลำดับ โดยเก็บมาแห่งละ 12 กิโลกรัม ระเหยจนแห้งเป็นตะกอน, ละลายตะกอนในกรดไฮโดรคลอริค แล้วจึงดำเนินการ-วิเคราะห์ปริมาณเรเดียม-226 ต่อไป ค่าที่ได้อยู่ในช่วง 0.019-0.980 พิโคคูรีต่อ-กิโลกรัม โดยตัวอย่างที่เก็บในระยะใกล้เครื่องปฏิกรณ์ฯ มีค่าเรเดียม-226 อยู่ในปริมาณสูง ส่วนตัวอย่างน้ำแข็งค่าที่วิเคราะห์ได้เท่ากับ 0.206± 0.028 พิโคคูรีต่อ-กิโลกรัม

ในปี 1974 Kobal และคณะ (53) ได้รายงานถึงการพัฒนาวิธีวิเคราะห์ปริมาณเรเดียม-226 ในน้ำด้วย Sorption emanation method อาศัยเทคนิคการ-แลกเปลี่ยนอิออน กล่าวคือ นำน้ำจำนวน 20 ลิตร ที่ผ่านการกรองมาเติมสารละลาย 10% แบเรียมคลอไรด์และปรับความเป็นกรดด่างเท่ากับ 2-3 จากนั้นนำไปผ่านลงในเรซินชนิด Dowex 50WX8 แล้วไล่กาซเรดอนออกด้วยกาซไนโตรเจน เก็บไว้ในภาชนะพิเศษที่ปิดสนิท 5-10 วัน จึงวัดโดยใช้ scintillation cell ความไว (sensitivity) ของวิธีนี้เท่ากับ 0.03 พิโคคูรีต่อลิตร ซึ่งสูงกว่า emanation method ที่ Kobal และ Kristan รายงานไว้ในปี 1972 ว่า มีค่าเท่ากับ 1 พิโคคูรีต่อลิตร วิธีที่พัฒนาแล้วนี้ได้นำมาทดสอบเพื่อหาความเชื่อมั่นโดยวิเคราะห์หาเรเดียม-226 ในน้ำประปา, น้ำกลั่น และน้ำแร่สังเคราะห์ที่ทราบปริมาณเรเดียม-226 ปรากฏว่า ได้ผลเป็นที่พอใจ

ในปี 1975 Willard S.Moore (54) ได้เสนอวิธีการแยกเรเดียม-226 ออกจากน้ำที่ใช้สำหรับดื่ม การทดลองนี้ใช้น้ำบ่อ 1300 ลิตร ผ่านลงในเส้นใยอะครีลิค (acrylic fibre) ที่มีแมงกานีสอยู่ร้อยละ 12-15 โดยน้ำหนักเมื่อเส้นใยแห้ง หลังจากนั้น นำน้ำที่ผ่านเส้นใยไปวิเคราะห์ปริมาณเรเดียม-226 ด้วยเทคนิค emanation ผลปรากฏว่า ปริมาณเรเดียม-226 ที่วิเคราะห์ได้ มีค่าน้อยกว่า 3 พิโคคูรีต่อลิตร หรือต่ำกว่าระดับที่กระทรวงสาธารณสุขอเมริกาได้กำหนดไว้ วิธีนี้-สามารถใช้ได้กับตัวอย่างน้ำชนิดอื่น เช่น น้ำทะเลหรือน้ำกร่อย ซึ่งให้ผลเป็นที่น่าพอใจ ถึงแม้ว่า ในน้ำทะเลและน้ำกร่อยจะมีปริมาณแคลเซียมและแมกนีเซียมสูงมากก็ตาม

ในปี 1979 Kwapulinski และคณะ (55) รายงานผลการทดลองที่ศึกษาในช่วง 2 ปี ระหว่างปี 1975-1976 วิเคราะห์หาปริมาณเรเดียม-226 ใน-ตะกอนและในน้ำพื้นผิว (surface water) บริเวณเขตอุตสาหกรรมและเขตชนบท โดยการกรองน้ำตัวอย่างผ่านกระดาษกรองชนิดไม่มีเถ้า นำตะกอนบนกระดาษกรองและสารละลายที่ได้ไปทำการวิเคราะห์หาปริมาณเรเดียม-226 ใช้วิธีตกตะกอนร่วม-เรเดียมด้วยตัวพาแบเรียมและตะกั่วในรูปเรเดียม-แบเรียมซัลเฟต วัดความแรงรังสีด้วยหัววัดแบบ scintillation SSA-IP ชนิดสังกะสีซัลไฟด์ ซึ่งต่อกับเรดิโอมิเตอร์

007291

MSP-3a เป็นเวลา 50 นาที ผลการทดลองสรุปได้ว่า ปริมาณเรเดียม-226 ในตะกอนเป็นสัดส่วนกับแร่ธาตุที่มีอยู่ ถ้าหากปริมาณแร่ธาตุที่มีอยู่เพิ่มขึ้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณเรเดียม-226 จะเพิ่มขึ้น 7.0 ±1.2 พิโคคูรีต่อลิตร ส่วน-ปริมาณเรเดียม-226 ในน้ำ พบว่าในเขตอุตสาหกรรมมีค่าสูงกว่าในเขตชนบทมาก

ในปี 1980 Sedlacck และคณะ (56) เสนอวิธีการเพิ่มความเข้มข้นของเรเดียม-226 ในน้ำก่อนที่จะทำการวิเคราะห์ ปริมาณเรเดียม-226 กล่าวคือ ทำการ-ตกตะกอนร่วมเรเดียมด้วยแคลเซียม ฟอสฟอโมลิบเดท ในโพลิเอทธิลีน ไกลคอล ทิ้งให้ตะกอนตกสมบูรณ์เป็นเวลา 2-3 ชั่วโมง กรองตะกอนผ่านเยื่อบาง ๆ (membrane filter) เส้นผ่านศูนย์กลาง 47 มิลลิเมตร จากนั้นนำตะกอนไปละลายในสาร-ละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1.5 โมลาร์ และสารละลาย EDTA 0.25 โมลาร์ ซึ่งมีปริมาตรรวมกัน 10 ลบ.ซม. อุ่นให้ร้อน ปรับสารละลายที่ได้ให้มีปริมาตร 25 ลบ.ซม. นำไปวิเคราะห์ปริมาณเรเดียม-226 ด้วย emanation method ต่อไป วิธีนี้ได้นำมาเปรียบเทียบกับวิธีอื่นอีก 2 วิธี คือ การระเหยให้ปริมาตรลดลง และการตกตะกอนร่วมเรเดียมด้วยแบเรียม ซัลเฟตแล้วจึงละลายตะกอนในสารละลายด่างของ EDTA ปรากฏว่า วิธีที่เสนอไว้ให้ผลการแยกเรเดียม-226 ได้สูงสุด (ปริมาณ-ร้อยละ 99.9) นอกจากนี้ ยังเป็นวิธีที่เหมาะสำหรับการหาปริมาณเรเดียมที่ละลายปนอยู่ในน้ำ, ดินตะกอน (sediment) และสิ่งแขวนลอย (suspended solids) ที่อยู่ในน้ำพื้นผิวและในกากของเหลวกัมมันตรังสี โดยให้ทั้งความแม่นยำและเที่ยงตรง

ในปี พ.ศ.2523 ขนิษฐา กมลรัตน์ (57) ได้พัฒนาวิธีทางเคมีวิเคราะห์สำหรับการหาเรเดียม-226 โดยวิธีการตกตะกอน กล่าวคือ กระทำโดยการตก-ตะกอนเรเดียมออกจากสารตัวอย่างในรูปของสารประกอบเรเดียม-แบเรียม ซัลเฟต โดยใช้แบเรียม-133 เป็นสารติดตาม (tracer) เพื่อหาเคมิคัลยิลด์ แล้วทำให้บริสุทธิ์ด้วยการสกัด โดยใช้ TTA เป็นสารสกัด วัดความแรงรังสีหลังจากปล่อยทิ้งไว้ 2-3 อาทิตย์ เพื่อให้เรเดียม-226 อยู่ในภาวะสมดุลย์กับ daughter products ขีดจำกัดต่ำสุดของวิธีนี้มีค่า 0.02 พิโคคูรี และวิธีนี้ใช้ได้ดีกับสารตัวอย่างที่มีปริมาณแคลเซียมไม่สูงมากนัก เช่น น้ำ แต่อาจจะไม่เหมาะสมนักถ้านำมาใช้กับสารตัวอย่าง

ที่มีแคลเซียมเป็นองค์ประกอบหลัก เช่น กระดูกและนม เป็นต้น วิธีนี้นับว่าเป็นวิธีที่-เหมาะสม เนื่องจากมีความไวสูงพอสมควรและไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องมือนับรังสีที่มีอุปกรณ์ซับซ้อน ยุ่งยากและราคาแพง เหมือนเช่นวิธีวิเคราะห์โดย emanation method

นอกจากนี้ ยังมีรายงานถึงวิธีอื่น ๆ อีก เช่น chromatography (58) และ electrochromatography (59,60) emission spectrometry (61), photographic emulsion (62-64) และ colorimetric method (65,66) ซึ่งเป็นวิธีที่ไม่แพร่หลายและไม่นิยมใช้ในการวิเคราะห์เรเดียม-226