บทที่ ๔

ผลสรุปและข้อเสนอแนะ

๔.๑ ผลสรุปและข้อเสนอแนะจากการคำนวณ

ผลการคำนวณสามารถสรุปผลได้ดังนี้

๑. นำผลที่ได้จากการคำนวณค่าปริมาณสารกัมมันตรังสีที่ยอมให้มีได้มากที่สุดในอาหารทะเลของสารกัมมันตรังสีบางตัว ในตารางที่ ๓.๒ เปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณไว้ในประเทศอังกฤษ ในตาราง ที่ ๔.๑ ซึ่งได้จากการคำนวณจากผู้บริโภคอาหารทะเลเข้าไปประมาณ ๑๐๐ กรัมต่อวัน

ตัวอย่างเช่น Zn^{65} ในตารางที่ ๔.๑ = 2.2×10^{-3} $\mu Ci/gm$

ในตารางที่ ๓.๒ = 1.4×10^{-3} $\mu Ci/gm$

จะเห็นว่าผลของการคำนวณที่ได้จากตารางทั้งสองอยู่ในอันดับตัวเลข(order of magnitude) เดียวกัน

๒. พิจารณาผลที่ได้จากการคำนวณค่าปริมาณสารกัมมันตรังสีที่ยอมให้มีได้มากที่สุดในน้ำทะเลของสารกัมมันตรังสี จากตารางที่ ๓.๓ ซึ่งได้มาจากการวิเคราะห์จากตัวอย่างสัตว์ในทะเลที่ศรีราชา และจากตารางที่ ๓.๔ ซึ่งได้มาจากการนำค่าความเข้มข้นมาตรฐานที่กำหนดไว้ในตารางที่ ๒.๔ มาใช้คำนวณ

ตัวอย่างเช่น Zn^{65} ในตารางที่ ๓.๓ (พวกปลา) = 1.0×10^{-6} $\mu Ci/cc.$

(พวกหอย) = 1.0×10^{-7} $\mu Ci/cc.$

ในตารางที่ ๓.๔ (พวกปลา) = 2.8×10^{-7} $\mu Ci/cc.$

(พวกหอย) = 2.8×10^{-8} $\mu Ci/cc.$

จากตัวอย่างถ้าเปรียบเทียบกันเองแล้ว จะเห็นว่าถ้าอัตราส่วนความเข้มข้นของสัตว์พวกไหน

มากจะได้ผลคำนวณค่าปริมาณสารกัมมันตรังสีที่ยอมให้มีได้มากที่สุดในน้ำทะเลมีค่าน้อยลง เพื่อให้อยู่ในความปลอดภัยมากที่สุด จึงควรถือเอาผลคำนวณที่มีค่าน้อยที่สุดเป็นตัวเลขที่กำหนด จากตัวอย่าง Zn^{65} จะได้ว่าค่าปริมาณสารกัมมันตรังสีที่ยอมให้มีได้มากที่สุดในน้ำทะเล จะมีค่าเท่ากับ 2.8×10^{-8} $\mu Ci/cc.$

สำหรับสารกัมมันตรังสีอื่น ๆ จะมีค่าปริมาณสารกัมมันตรังสีที่ยอมให้มีได้มากที่สุดในน้ำทะเล ดังแสดงในตารางที่ ๔.๒

นำผลที่ได้จากการคำนวณและกำหนดไว้ในตารางที่ ๔.๒ มาเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณไว้ในประเทศอินเดียในตารางที่ ๔.๓ ซึ่งได้มาจากโรงไฟฟ้าปรมาณูที่ Tarapur ตั้งอยู่บนชายฝั่งทะเล เช่นเดียวกัน ตัวอย่างเช่น Zn^{65} ในตารางที่ ๔.๒ $= 2.8 \times 10^{-8}$ $\mu Ci/cc.$

ในตารางที่ ๔.๓ $= 1.7 \times 10^{-6}$ $\mu Ci/cc.$

จะเห็นว่า ผลของการเปรียบเทียบจากตารางทั้งสองจะมีอันดับตัวเลขแตกต่างกันมากเกือบ ๑๐๐ เท่า ผลที่แตกต่างกันนี้เนื่องจากค่าอัตราส่วนความเข้มข้นของสัตว์แต่ละพวกในเขตทะเลที่ต่าง ๆ กัน หามาได้แตกต่างกัน เนื่องจากปลาหรือสัตว์ทะเลเป็นคนละชนิดกัน

๓. ผลการคำนวณค่าอัตราการระบายกากกัมมันตรังสีลงสู่ทะเล ดังแสดงในตารางที่ ๓.๕ ตารางที่ ๓.๖ ตารางที่ ๓.๗ และตารางที่ ๓.๘ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกันเองแล้ว ธาตุชนิดเดียวกันได้ค่าอัตราการระบายกากกัมมันตรังสีแตกต่างกัน ดังนั้นค่าที่คำนวณออกมาได้น้อยที่สุดควรจะถือได้ว่าเป็นค่าที่ปลอดภัยที่สุด เมื่อนำมาใช้ในการปฏิบัติ เนื่องจากว่าถ้าเรากำหนดให้ระบายออกไปได้น้อยเท่าใด ก็จะมีความปลอดภัยได้มากเท่านั้น ค่าอัตราการระบายกากกัมมันตรังสีลงสู่ทะเลที่คำนวณได้จากตารางต่าง ๆ ที่กล่าวมาแล้ว อาจกำหนดได้ดังแสดงในตารางที่ ๔.๔

นำผลจากตารางที่ ๔.๔ เปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้จากข้อมูลและค่าที่กำหนดให้ทำการระบายของโรงไฟฟ้าปรมาณูในที่ต่าง ๆ ในประเทศอังกฤษ ในตารางที่ ๔.๕

ตัวอย่างเช่น Zn^{65} ในตารางที่ ๔.๔ $= 0.25$ Ci/yr

ในตารางที่ ๔.๕ (อังกฤษ)

ค่าที่คำนวณได้จากข้อมูล = 250 Ci/yr

ค่าที่กำหนดให้ระบายได้ = 5 Ci/yr

จากการเปรียบเทียบ จะเห็นว่าผลของการคำนวณที่ได้จากข้อมูลต่าง ๆ ที่ศรีราชา เทียบกับผลคำนวณที่ได้จากข้อมูลต่าง ๆ ในประเทศอังกฤษ จะมีค่าต่างกันมาก เนื่องจากสภาพท้องทะเลหรือบริเวณที่ทำการระบายกากกัมมันตรังสีนั้นมีลักษณะไม่เหมือนกัน นั่นคือการรับปริมาณสารรังสีของทะเลที่จะรับได้มากที่สุดโดยไม่เป็นอันตรายต่อประชาชนในที่ต่าง ๆ กัน ก็จะมีค่าต่างกันไปด้วยตามข้อมูลของท้องทะเลนั้น ๆ แต่เป็นที่น่าสังเกตว่า ค่าที่กำหนดให้ระบายได้ในประเทศอังกฤษน้อยกว่าที่น่าจะระบายได้ตามที่คำนวณไว้ อาจจะเนื่องมาจากกากกัมมันตรังสีชนิดนั้น ๆ มีให้ระบายได้เท่านั้นก็ได้

ถ้านำผลจากตารางที่ ๔.๔ เปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้จากการออกแบบโรงไฟฟ้าปรมาณูที่มีขนาด ๑๐๐๐ เมกกะวัตต์ โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูแบบ PWR ในตารางที่ ๔.๖

ตัวอย่างเช่น Mn^{54} ในตารางที่ ๔.๔ = 1.0 Ci/yr

ในตารางที่ ๔.๖ = 1.19×10^{-6} Ci/yr

จากตารางที่ ๔.๖ เป็นค่าที่ได้คำนวณหาจากการออกแบบสร้างโรงไฟฟ้าปรมาณูที่ต้องใช้ปริมาณเชื้อเพลิงในปริมาณที่กำหนดให้ ทำให้ได้กากกัมมันตรังสีออกมาชนิดต่าง ๆ เมื่อผ่านระบบการขจัดกากกัมมันตรังสีในระบบต่าง ๆ ตามที่ออกแบบไว้ จะเหลือกากกัมมันตรังสีที่ควรจะระบายออกจากโรงไฟฟ้าปรมาณู ดังตัวอย่างที่แสดงไว้ในตารางที่ ๔.๖ ถ้าหากเราติดตั้งแบบนี้ จะเห็นว่า ค่าที่คำนวณให้ระบายได้สำหรับประเทศไทยนั้น จะมากกว่าค่าที่ปล่อยออกมาจริงมาก

ตารางที่ ๔.๑

ปริมาณสารกัมมันตรังสีที่ยอมให้มีได้มากที่สุดใน

อาหารทะเล (DWL) ที่คำนวณในประเทศอังกฤษ (๕)

ไอโซโทป	DWL * (μCi/gm)
Fe^{55}	1.8×10^{-2}
Co^{60}	1.1×10^{-3}
Zn^{65}	2.2×10^{-3}
Sr^{90}	8.8×10^{-6}
Zr^{95}	1.3×10^{-3}
Ru^{106}	2.2×10^{-4}
Ce^{144}	2.2×10^{-4}
Cs^{137}	4.4×10^{-4}
Pu^{239}	1.1×10^{-4}

* DWL ได้มาจากข้อมูลของโรงไฟฟ้าปรมาณูต่าง ๆ ใน United Kingdom ซึ่งได้ถูกควบคุมโดย The Fisheries Radiological Laboratory ที่ Lowestoft ซึ่งจะควบคุมเกี่ยวกับพวกกากของเหลว (liquid waste)

ตารางที่ ๔.๒

ปริมาณสารกัมมันตรังสีที่ยอมให้มีได้มากที่สุด

ในน้ำทะเลที่ได้จากการคำนวณ

ไอโซโทป	ปริมาณสารที่ยอมให้มีได้มากที่สุด $\mu Ci/cc.$
Zn^{65}	2.8×10^{-8}
Co^{60}	2.3×10^{-6}
Mn^{54}	1.4×10^{-7}
P^{32}	2.7×10^{-8}
Cr^{51}	2.7×10^{-4}
Fe^{55}	5.5×10^{-6}
Sr^{90}	1.4×10^{-6}
Zr^{95}	2.6×10^{-5}
Ru^{106}	1.4×10^{-6}
I^{131}	2.7×10^{-8}
Cs^{137}	9.0×10^{-6}
Ba^{140}	1.3×10^{-4}
Ce^{144}	5.0×10^{-6}
Pu^{239}	5.0×10^{-6}

ตารางที่ ๔.๓

ปริมาณสารกัมมันตรังสีที่ยอมให้มีได้มากที่สุด

ในน้ำทะเล (DWL_{sw}) ที่คำนวณในประเทศอินเดีย(๖)

ไอโซโทป	DWL_{sw} * (μCi/cc.)
Sr^{90}	7.0×10^{-7}
Cs^{137}	3.6×10^{-6}
Zn^{65}	1.7×10^{-6}
Mn^{54}	4.3×10^{-7}
P^{32}	1.2×10^{-8}

* เป็นผลที่คำนวณได้จากกลุ่มคนที่นำปลามาบริโภคเป็นอาหาร โดยมีปริมาณอาหารโดยประมาณ ๑๒๐ กรัมต่อวัน

ตารางที่ ๔.๔

อัตราการระบายกากกัมมันตรังสีลงสู่ทะเลจากโรงไฟฟ้า

ปรมาณูที่กำหนดให้ระบายลงสู่ทะเลที่ศรีราชาได้

ไอโซโทป	อัตราการระบายกากกัมมันตรังสี Ci/yr
Zn^{65}	0.25
Co^{60}	19.0
Mn^{54}	1.0
P^{32}	0.24
Cr^{51}	2430.0
Fe^{55}	49.5
Sr^{90}	12.6
Zr^{95}	234.0
Ru^{106}	12.6
I^{131}	0.24
Cs^{137}	81.0
Ba^{140}	1165.0
Ce^{144}	45
Pu^{239}	45

ตารางที่ ๔.๕

อัตราการระบายกากกัมมันตรังสีลงสู่ทะเลจากโรงไฟฟ้าปรมาณูในประเทศอังกฤษ(๗)

สถานที่	ไอโซโทป	อัตราการระบายกากกัมมันตรังสี (Ci/yr)	
		ค่าที่คำนวณจากข้อมูลสิ่งแวดล้อม(a)	ค่าที่กำหนดให้ระบายได้
Bradwell	Zn^{65}	250	5
	Cs^{137}	$> 10^5$	200
Dungeners	Cs^{137}	$> 10^5$	200
Hinkley Point	Cs^{137}	4500	200
Berkeley	Cs^{137}	$4x10^4$	200

(a) ข้อมูลที่เกี่ยวกับจำนวนของผู้บริโภคอาหารทะเล , ภระแสน้ำในบริเวณที่ทำการระบายกากกัมมันตรังสี

ตารางที่ ๔.๖

อัตราการระบายกากกัมมันตรังสีที่คำนวณได้จาก
การออกแบบโรงไฟฟ้าปรมาณูที่มีขนาด ๑๐๐๐ เมกกะวัตต์
โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูแบบ PWR*(๘)

ไอโซโทป	อัตราการระบายกากกัมมันตรังสี (Ci/yr)
Mn^{54}	1.19×10^{-6}
Co^{60}	4.27×10^{-6}
Sr^{90}	0.44×10^{-6}
I^{131}	8.65×10^{-3}
Cs^{137}	1.38×10^{-4}
Ba^{140}	3.49×10^{-6}
Ce^{144}	1.25×10^{-5}

*PWR = Pressurized Water Reactor.

หอสมุดกลาง จุฬาลงกรณมหาวิทยาลัย

ผลของการสรุปทำให้เราได้ข้อเสนอแนะหลายข้อคือ

๑. ผลที่ได้จากการคำนวณค่าปริมาณสารกัมมันตรังสีที่ยอมให้มีได้มากที่สุดในอาหารทะเลนั้น อาจจะไม่ดีนัก เนื่องจากข้อมูลที่เกี่ยวกับการบริโภคอาหารทะเลของประชาชนที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียงกับที่ตั้งโรงไฟฟ้าปรมาณูที่อ่าวไผ่ ศรีราชานั้น ได้มาจากการสุ่มตัวอย่างประชาชนบางกลุ่ม ซึ่งไม่สามารถให้รายละเอียดในการบริโภคประเภทอาหารทะเลต่าง ๆ ได้ ทำให้ต้องสมมติว่าการบริโภคอาหารปลาและหอยนั้นมีปริมาณเท่ากัน เท่ากับ ๑๖๐ กรัม ดังนั้นในการวิจัยเรื่องการบริโภคอาหารนี้ควรทำให้ได้รายละเอียดในการบริโภคอาหาร โดยให้ประชาชนกลุ่มที่สุ่มตัวอย่างนั้นได้ทำการบันทึกว่าในแต่ละวันได้บริโภคอาหารประเภทใดบ้าง วันละประมาณเท่าใด ในระยะเวลานาน ๆ เพื่อให้ได้ค่าเฉลี่ยในการบริโภคอาหารประเภทต่าง ๆ ได้ ใกล้เคียงกับความเป็นจริงในการบริโภคอาหารนั้น ๆ

๒. ผลที่ได้จากการคำนวณหาค่าปริมาณสารกัมมันตรังสีที่ยอมให้มีได้มากที่สุดในน้ำทะเลนั้นคำนวณหามาได้จากค่าอัตราส่วนความเข้มข้นของธาตุต่าง ๆ ซึ่งในประเทศไทยได้ข้อมูลเพียง ๓ ธาตุ คือ Zn Mn และ Co เมื่อเปรียบเทียบกับค่าอัตราส่วนความเข้มข้นจากต่างประเทศแล้ว ค่าที่คำนวณได้ในประเทศไทยยังมีค่าที่น้อยกว่าของต่างประเทศ เป็นผลทำให้ผลคำนวณค่าปริมาณสารกัมมันตรังสีที่ยอมให้มีได้มากที่สุดในน้ำทะเลเพิ่มมากขึ้นด้วย ส่วนธาตุอื่น ๆ ที่เป็นส่วนหนึ่งของกากกัมมันตรังสีได้ขอยืมค่าอัตราส่วนความเข้มข้นจากต่างประเทศมาช่วยในการคำนวณ ดังนั้นเพื่อจะให้ได้ค่าปริมาณสารกัมมันตรังสีที่ยอมให้มีได้มากที่สุดเป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับประเทศไทยนั้น ทางเราก็ควรจะหาค่าอัตราส่วนความเข้มข้นของธาตุอื่น ๆ เพิ่มเติมอีก

๓. จากข้อสรุปผลอัตราการระบายกากกัมมันตรังสีลงสู่ทะเลนั้น พบว่ามีธาตุ Zn^{65} P^{32} และ I^{131} ที่มีอัตราการระบายน้อยกว่า ๑ คูรีต่อปี ซึ่งถ้าปล่อยเกินกว่านั้นก็จะเป็นอันตรายได้ จะเห็นว่าอัตราการระบายนั้นน้อยมาก จะเป็นผลให้เกิดอันตรายได้มากเหมือนกัน พิจารณาดูจะเห็นว่า ธาตุทั้ง ๓ ชนิดนี้ มีอายุครึ่งชีวิตสั้น เช่น I^{131} มีอายุครึ่งชีวิตเพียง ๘ วัน P^{32} มีอายุครึ่งชีวิตเพียง ๑๔ วัน จะเห็นว่า ทั้งสองธาตุไม่ค่อยมีปัญหา เพราะอาจจะสลายตัวหมดชีวิตก่อนที่จะทำการระบายกากลงสู่ทะเล ส่วน Zn^{65} มีอายุครึ่งชีวิต ๒๔๕ วัน ซึ่งมีอายุครึ่งชีวิตยาวกว่าตัวอื่นที่กล่าวมานี้ ก็คงเป็นปัญหาบ้างที่อาจจะถูกระบายออกสู่ทะเล แต่ก็คงไม่เป็นปัญหามากนักเพราะอายุครึ่งชีวิตไม่ยาวมากเกินไป เมื่อออกสู่ทะเลไม่นานนักก็คงสลายตัวหมดไปเอง

๔. สำหรับธาตุที่มีอายุครึ่งชีวิตยาว ได้แก่ Sr^{90} และ Cs^{137} ก็มีปัญหาในการระบายกากกัมมันตรังสีได้เหมือนกัน เนื่องจากธาตุทั้งสองมีอายุครึ่งชีวิตยาวมาก เมื่อทำการระบายกากกัมมันตรังสีย่อมมีธาตุทั้งสองปนออกมาด้วย ดังนั้นธาตุทั้งสองก็จะอยู่ในน้ำทะเลเป็นระยะเวลานานกว่าจะหมด ปัญหาก็คือ Sr^{90} หรือ Cs^{137} นั้น อาจจะมีอยู่แล้ว เนื่องจากฝุ่นละอองกัมมันตรังสีที่มาจากระเบิด-ปรมาณูที่ทำการทดลองในประเทศอื่นปะปนอยู่ด้วย ทำให้เราไม่รู้ว่า Sr^{90} หรือ Cs^{137} ที่เราทำการวัดรังสีนั้นมาเนื่องจากอะไร แต่ถ้าทำการวัดผลอย่างสม่ำเสมอ เราก็อาจทราบได้ว่า Sr^{90} หรือ Cs^{137} นั้นมาจากฝุ่นกัมมันตรังสีหรือเปล่า

๔.๒ <u>ข้อเสนอแนะและผลสรุปเรื่องการตรวจวัดรังสีในบริเวณใกล้เคียงกับที่ตั้งโรงไฟฟ้าปรมาณู</u>

ในการสร้างโรงไฟฟ้าปรมาณูจะต้องมีการตรวจวัดกัมมันตภาพรังสีในบริเวณใกล้เคียงกับที่ตั้งโรงไฟฟ้าปรมาณูก่อนทำการตั้งโรงไฟฟ้าปรมาณู เพื่อจะได้ทราบข้อมูลเกี่ยวกับรังสีตามธรรมชาติที่มีอยู่ในบริเวณนั้น และหลังจากที่ทำการตั้งโรงไฟฟ้าปรมาณู จนกระทั่งเดินเครื่องทำงานแล้วก็ยังคงทำการตรวจวัดรังสีอย่างสม่ำเสมอ เพื่อควบคุมระดับรังสีในบริเวณดังกล่าว ที่อาจจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากการระบายกากกัมมันตรังสีให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัยที่จะไม่เป็นอันตรายต่อประชาชนตามที่ได้กำหนดให้ ในการตรวจวัดรังสีดังกล่าวอาจทำการตรวจวัดรังสีแกมม่า และรังสีเบต้า โดยนำตัวอย่างสัตว์ และน้ำทะเลในบริเวณดังกล่าวมาตรวจวัดรังสี เราสามารถแบ่งการพิจารณาออกได้ดังนี้

๔.๒.๑ <u>การตรวจวัดรังสีในน้ำทะเล</u> อาจหาได้ ๒ วิธีคือ

ก. เอาน้ำมาระเหยจนเป็นตะกอนให้หมด แล้วนำไปเข้าเครื่องตรวจวัดรังสีไกเกอร์(Geiger Muller Counter) หรือเครื่องตรวจวัดรังสีซินทิลเลชั่น(Scintillation Counter) โดยสมมติให้เครื่องวัดนั้นมีประสิทธิภาพ ๑๐ เปอร์เซนต์ และมีภูมิหลัง(back ground) ของเครื่องเท่ากับ ๑๐ ครั้งต่อนาที ซึ่งในตอนแรกทำการตรวจวัดรังสีตามธรรมชาติของน้ำทะเลเนื่องจาก K^{40} ก่อนทำการตั้งโรงไฟฟ้าปรมาณู พบว่าเครื่องวัดสามารถนับจำนวนรังสีได้ 133±36.5 ครั้งต่อชั่วโมง มีค่าความคลาดเคลื่อนในการวัดโดยประมาณ ๒๗ เปอร์เซนต์ ครั้งหลังทำการตรวจวัดรังสีของน้ำทะเลหลังจากที่ทำการตั้งโรงไฟฟ้าปรมาณู และเดินเครื่องแล้ว สมมติว่าการระบายกากกัมมันต-รังสีลงสู่ทะเลมีธาตุ Sr^{90} ซึ่งยอมให้มีได้มากที่สุดในน้ำทะเล 1.4×10^{-6} ไมโครคูรี่ต่อลูกบาศก์เซ็นติ-เมตร ในการตรวจวัดรังสีนี้ พบว่า เครื่องสามารถนับจำนวนรังสีได้ 186±40.6 ครั้งต่อชั่วโมง มีค่า

ความคลาดเคลื่อนในการวัดโดยประมาณ ๒๒ เปอร์เซนต์

ถ้าเราเปลี่ยนมาใช้เครื่องวัดที่ดีกว่า ซึ่งมีภูมิหลังของเครื่องเพียง ๑ ครั้งต่อนาทีบ้าง ในการตรวจวัดก่อนทำการตั้งโรงไฟฟ้าปรมาณู สามารถวัดรังสีตามธรรมชาติได้จำนวนของรังสี 133±15.9 ครั้งต่อชั่วโมง และมีค่าความคลาดเคลื่อนในการวัด ๑๒ เปอร์เซนต์ เมื่อทำการวัดหารังสีเนื่องจาก Sr^{90} หลังจากที่ตั้งโรงไฟฟ้าปรมาณูแล้ว ได้จำนวนของรังสีเนื่องจาก Sr^{90} 186± 23.9 ครั้งต่อชั่วโมง มีค่าความคลาดเคลื่อนในการวัดโดยประมาณ ๑๓ เปอร์เซนต์

จะเห็นว่าผลของการวัดจากเครื่องทั้งสองจะได้เครื่องตรวจวัดแบบหลังมีความแม่นยำกว่าเครื่องแรก และเครื่องวัดทั้งสองก็สามารถจะนำมาใช้วัดได้เหมือน ๆ กัน เพราะว่าจะเห็นผลแตกต่างของการวัดก่อนตั้งโรงไฟฟ้า และหลังทำการตั้งแล้วได้ชัดเจนเหมือนกัน

ข. ทำการตรวจวัดรังสีแกมม่า โดยนำหัววัดของเครื่องตรวจวัดรังสีซินทิล-เลชั่นจุ่มลงในน้ำทะเล แล้วลากไปเรื่อย ๆ ในน้ำทะเล โดยที่หัววัดของเครื่องวัดมีขนาด 3 x 3 นิ้ว และสมมติให้เครื่องวัดมีประสิทธิภาพ ๔ เปอร์เซนต์ และคิดว่าเครื่องวัดนี้ไม่มีภูมิหลังของเครื่องวัด ในตอนแรกที่ทำการวัดรังสีตามธรรมชาติเนื่องจาก K^{40} พบว่า เครื่องวัดสามารถวัดได้ประมาณ ๗ ครั้งต่อนาที หลังจากที่ทำการตั้งโรงไฟฟ้าปรมาณูและเดินเครื่องแล้ว สมมติว่ากากกัมมันตรังสีที่ระบายลงสู่ทะเลนั้น ตรวจพบธาตุ Zn^{65} และ Co^{60} ซึ่งยอมให้มีได้มากที่สุดในน้ำทะเล $2.8x10^{-8}$ และ $2.3x10^{-6}$ ไมโครคูรี่ต่อลูกบาศก์เซ็นติเมตรตามลำดับ ในการตรวจวัดพบว่า เครื่องวัดสามารถนับจำนวนรังสีจาก Zn^{65} ได้ 2 ± 4 ครั้งต่อนาที และของ Co^{60} ได้ 624 ± 25.3 ครั้งต่อนาที

เมื่อเปรียบเทียบการตรวจวัดทั้ง ๒ วิธี จะเห็นได้ว่าวิธีที่วัดในน้ำทะเลโดยตรงมีความสะดวกสบายกว่ามาก แต่ผลของการวัดทำได้ยาก เพราะใช้เวลาน้อย ดังนั้นธาตุไหนที่มีความเข้มของรังสีต่ำ ก็อาจทำการวัดได้ยาก เช่น Zn^{65} จะเห็นว่าในเวลา ๑ นาทีอาจจะวัดได้หรือไม่ได้เลย แต่สำหรับ Co^{60} ก็วัดออกมาได้มาก ซึ่งจริง ๆ แล้ว ธาตุทั้งสองอยู่ปนกันในน้ำทะเล ถ้าเราวัดจำนวนการนับออกมาได้มาก ๆ อาจจะเป็นผลของ Zn^{65} มีมากเกินไปก็วัดออกมาได้มาก ดังนั้นวิธีนี้จึงไม่ดีเท่าที่ควร ถ้าเราต้องการจะตรวจวัดรังสีเนื่องจากธาตุกัมมันตรังสีต่าง ๆ วิธีที่เรานำไประเหยไปทำเป็นตะกอนนั้น มีความยุ่งยากกว่า เสียเวลานานกว่า แต่ผลของการตรวจวัดสามารถวัดได้ดีกว่า จึงเป็นวิธีที่ดีกว่าด้วย

๔.๒.๒ <u>การตรวจวัดรังสีจากตัวอย่างสัตว์ทะเล</u> การตรวจวัดนี้ เราทำโดยวิธีเดียวกันกับน้ำทะเล โดยเอาตัวอย่างสัตว์ทะเลนั้นนำมาตากให้แห้งแล้วนำไปเผา และปนให้ละเอียดเป็นตะกอนนำเข้าเครื่องวัด ก่อนทำการตั้งโรงไฟฟ้าปรมาณู เราถือว่าสัตว์ทะเลเหล่านั้นไม่มีสารกัมมันตรังสีปนอยู่เลย แต่อาจวัดได้บ้างเนื่องจากกินน้ำทะเลเข้าไป ซึ่งมีน้อยมาก ดังนั้นเราจะไม่กล่าวถึง หลังจากที่ทำการตั้งโรงไฟฟ้าปรมาณูแล้ว มีสารกัมมันตรังสีปะปนในน้ำทะเลมากขึ้น โอกาสที่สัตว์ทะเลจะกินเข้าไปมีมากขึ้น ทำให้การตรวจวัดเป็นไปได้ง่ายมากขึ้น สมมติว่าในการตรวจวัดรังสีจากตัวอย่างสัตว์ทะเลนั้น มีธาตุ Zn^{65} และ Co^{60} อยู่ในสัตว์ทะเล เนื่องจากธาตุทั้งสองให้รังสีแกมม่า จึงตรวจวัดด้วยเครื่องวัด ซินทิลเลชั่น โดยให้เครื่องวัดมีประสิทธิภาพ ๔ เปอร์เซนต์ และมีภูมิหลังของเครื่อง ๑๐๐๐ ครั้งต่อนาที จากการตรวจวัดพบว่า เครื่องวัดสามารถนับจำนวนรังสีจาก Zn^{65} ได้ 10320±110.9 ครั้งต่อนาที และการวัดมีความคลาดเคลื่อน ๑.๐๗ เปอร์เซนต์ ส่วน Co^{60} วัดได้ 5400±86 ครั้งต่อนาที และการวัดมีความคลาดเคลื่อน ๑.๖ เปอร์เซนต์ ถ้าใช้เครื่องวัดที่มีภูมิหลังของเครื่องน้อยลง ผลของการวัดก็จะมีความแม่นยำมากขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบการตรวจวัดรังสีในตัวอย่างของสัตว์ทะเล ซึ่งสามารถจะรับปริมาณสารกัมมันตรังสีได้มากกว่าน้ำทะเล จะเห็นผลของการวัดรังสีได้ชัดเจนกว่า และใช้เวลาในการวัดน้อยกว่าก็สามารถจะเห็นผลความแตกต่างของระดับรังสีได้ดีกว่า การตรวจวัดจากตัวอย่างน้ำทะเล และการตรวจวัดในตัวอย่างสัตว์ทะเลนั้นก็เป็นการตรวจวัดรังสี ซึ่งจะมีผลโดยตรงกับมนุษย์มากกว่าในน้ำทะเล เพราะว่ามนุษย์ใช้สัตว์ทะเลนำมาบริโภคโดยตรง ส่วนน้ำทะเลนั้น เราไม่ได้ใช้บริโภค แต่อาจจะมีผลบ้าง เนื่องจากเราอยู่ในบริเวณใกล้เคียงกับน้ำทะเล แล้วโดนการแผ่รังสีจากน้ำทะเล ดังนั้นเมื่อตั้งโรงไฟฟ้าปรมาณูแล้ว มีการระบายกากกัมมันตรังสีลงสู่ทะเล ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงระดับรังสีตามธรรมชาติที่มีอยู่แล้วในทางที่เพิ่มขึ้นต่อสิ่งแวดล้อม การตรวจวัดรังสีในตัวอย่างสัตว์ทะเล เป็นวิธีที่ดีกว่าซึ่งใช้เวลาในการวัดน้อยกว่า และสามารถวัดผลได้ดีกว่าตัวอย่างน้ำทะเล

๓.๓ การระบายกากกัมมันตรังสีที่มีไอโซโทปตั้งแต่ ๒ ธาตุปนกัน(๒)

ในตารางที่ ๔.๔ เป็นค่ามากที่สุดสำหรับอัตราการระบายกากกัมมันตรังสีลงสู่ทะเลของไอโซโทปแต่ละธาตุที่ยอมให้ระบายลงสู่ทะเลได้ ซึ่งในทางปฏิบัติจริง ๆ กากกัมมันตรังสีที่ถูกระบายออกมานั้นจะมีไอโซโทปหลายธาตุถูกระบายออกมาพร้อม ๆ กัน ดังนั้นเราจึงจำเป็นที่จะต้องคำนึงถึงผลของรังสีทั้งหมดของไอโซโทปเหล่านั้นที่มีต่อประชาชนด้วย ซึ่งเราจะต้องหาว่าถ้าระบายออกมาพร้อม ๆ กันแล้ว อัตราการระบายกากกัมมันตรังสีของไอโซโทปแต่ละธาตุนั้นควรจะเป็นเท่าไรจึงจะอยู่ในระดับของความปลอดภัย เราจะจำกัดระดับของอัตราการระบายกากของไอโซโทปนี้ได้ด้วยเทอมผลบวกทางพีชคณิตของสัดส่วนของอัตราการระบายกากกัมมันตรังสีที่ต้องการหานี้กับค่าอัตราการระบายกากกัมมันตรังสีที่คำนวณไว้ของแต่ละไอโซโทป ซึ่งมีผลต่ออวัยวะวิกฤตส่วนเดียวกันมารวมกัน แล้วจะได้ค่ามากที่สุดเท่ากับหนึ่ง

ตัวอย่างการคำนวณ สมมติว่าในการระบายกากกัมมันตรังสีนี้มีไอโซโทปของ Sr^{90} และ Ru^{106} ปนกัน

ให้ D_1 เป็นอัตราการระบายของ Sr^{90} ตามที่คำนวณไว้

D_2 เป็นอัตราการระบายของ Ru^{106} ตามที่คำนวณไว้

และ x เป็นอัตราการระบายของ Sr^{90} กรณีที่มี Ru^{106} ปนออกมาด้วย

y เป็นอัตราการระบายของ Ru^{106} กรณีที่มี Sr^{90} ปนออกมาด้วย

Sr^{90} มีผลต่ออวัยวะวิกฤตที่กระดูกและ Ru^{106} มีผลต่ออวัยวะวิกฤตส่วนที่เป็นระบบย่อยอาหาร

เราจะพิจารณาเทอมผลบวกทางพีชคณิตของไอโซโทปทั้งสองที่มีผลต่ออวัยวะวิกฤตส่วนเดียวกัน

เมื่อพิจารณาให้เป็น Ru^{106} มีผลต่อกระดูกนั้น จะมีอันตรายน้อยกว่าส่วนระบบย่อยอาหาร ๑๐๐ เท่า เราจะเขียนสมการได้เป็น

$$\frac{x}{D_1} + \frac{y}{100D_2} = 1 \qquad \text{.....(4.1)}$$

เมื่อพิจารณา Sr^{90} ให้มีผลต่อระบบย่อยอาหารบ้าง Sr^{90} จะมีอันตรายน้อยกว่าส่วนที่เป็นกระดูก ๕๐๐ เท่า เราจะเขียนสมการได้เป็น

$$\frac{x}{500D_1} + \frac{y}{D_2} = 1 \quad \text{.....(4.2)}$$

ค่าที่คำนวณไว้ของ D_1 และ D_2 จากตารางที่ ๔.๔ คือ

อัตราการระบายของ Sr^{90} = 12.6 Ci/yr.

และ อัตราการระบายของ Ru^{106} = 12.6 Ci/yr.

โดยการแทนค่า D_1 และ D_2 ลงในสมการ (๔.๑) และ (๔.๒) เราสามารถจะหาได้ว่า

x = 12.4 Ci/yr.

y = 12.5 Ci/yr.

ผลที่คำนวณได้ของ x และ y นี้ จะเห็นว่าไม่แตกต่างไปจากค่าของ D_1 และ D_2 เท่าใดนัก

ในทำนองเดียวกัน ถ้ามีหลาย ๆ ไอโซโทป เราก็จะเขียนได้ในเทอมผลบวกทางพีชคณิต และพิจารณาเกี่ยวกับอวัยวะวิกฤตส่วนต่าง ๆ ของแต่ละไอโซโทปนั้น ๆ