หน่วยที่

5

เคมีนิวเคลียร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

โดย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ตริตาภรณ์ ชูศรี

ตอนที่

5.1

เคมีนิวเคลียร์

ปฏิกริยาเคมีที่นักศึกษาได้เรียนรู้มาทั้งหมดนั้น ส่วนของอะตอมที่เกี่ยวข้องในปฏิกิริยาเคมีคือ อิเล็กตรอน ส่วนนิวเคลียสของอะตอมซึ่งอยู่ลึกเข้าไปในอะตอมแทบจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงในระหว่างเกิดปฏิกิริยาเคมี ทั้งๆ ที่ประจุของนิวเคลียสมีผลต่อสมบัติของอะตอมหลายอย่าง เช่น รัศมีอะตอม สภาพไฟฟ้าลบและพลังงานการแตกตัวเป็นไอออน เป็นต้น แต่นิวเคลียสของอะตอมเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ และการศึกษาปฏิกิริยาที่นิวเคลียสของอะตอมมีการเปลี่ยนแปลง คือ การศึกษาทางเคมีนิวเคลียร์ซึ่งเป็นเรื่องราวในหน่วยนี้

1. เคมีนิวเคลียร์

การศึกษาทางด้านเคมีนิวเคลียร์เริ่มต้นขึ้นเมื่อ อองตวน แบ็กเกอแรล (Antoine Becquerel, ค.ศ. 1852-1908) นักวิทยาศาสตร์ชาวฝรั่งเศส ค้นพบกัมมันตภาพรังสีที่มีอยู่ในธรรมชาติ และต่อมาได้พัฒนามากขึ้นจากการศึกษาทดลองของนักวิทยาศาสตร์คนอื่นๆ เช่น ปีแอร์ กูรี (Pierre Curie, ค.ศ. 1859-1906) และมารี กูรี (Marie Curie, ค.ศ. 1867-1934)

คำว่า "นิวเคลียร์" อาจจะเป็นคำเดียวทางวิทยาศาสตร์กายภาพ ที่ทำให้ผู้คนมีการตอบสนองค่อนข้างจะรุนแรง คำว่านิวเคลียร์ ทำให้มีการคิดถึงการทิ้งระเบิดนิวเคลียร์ที่เมืองฮิโรชิมาและนางาซากิของญี่ปุ่นในช่วงปลายสงครามโลกครั้งที่ 2 ทำให้คิดถึงฝุ่นกัมมันตรังสีที่ตกลงมาจากการทดสอบระเบิดนิวเคลียร์ ทำให้คิดถึงการเป็นมะเร็งและความผิดปกติของทารกที่เกิดมาอันเนื่องมาจากรังสี คิดถึงความเสี่ยงต่ออุบัติเหตุทางนิวเคลียร์ และการ melt down ของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ และความพะวงต่อปัญหาการกำจัดกากกัมมันตรังสี และการทำลายล้างด้วยอาวุธนิวเคลียร์ แต่ในอีกแง่หนึ่งพลังงานนิวเคลียร์ผลิตกระแสไฟฟ้าได้ การใช้กัมมันตภาพรังสีและปรากฏการณ์นิวเคลียร์อื่นๆ ในทางการแพทย์เพื่อวินิจฉัยและรักษาอาการเจ็บป่วยหลายอย่าง และการใช้เทคโนโลยีของวัสดุนิวเคลียร์ในทางอุตสาหกรรม การประยุกต์ปรากฏการณ์นิวเคลียร์ที่ด้านหนึ่งก็มีประโยชน์ อีกด้านหนึ่งก็อันตราย ทำให้ผู้คนมีข้อถกเถียงกันถึงประโยชน์และความเสี่ยงจากการใช้พลังงานนิวเคลียร์นี้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งโรงงานไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์

สำหรับประเทศไทยนั้น กำลังมีข้อขัดแย้งเกี่ยวกับพลังงานนิวเคลียร์อยู่เช่นกัน ปัจจุบัน หน่วยงานที่ดูแลรับผิดชอบเกี่ยวกับการใช้พลังงานนิวเคลียร์คือสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติซึ่งตั้งอยู่ที่บางเขน กรุงเทพมหานคร ทางรัฐบาลต้องการให้หน่วยงานนี้ย้ายที่ตั้งออกไปอยู่บริเวณนอกเมืองและได้มีการตกลงที่จะไปสร้างศูนย์นิวเคลียร์แห่งใหม่ที่อำเภอองครักษ์ จังหวัดนครนายก โดยโครงการได้รับการอนุมัติตั้งแต่ ปี พ.ศ. 2536 ทั้งนี้จะมีการสร้างเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขนาด 10 เมกะวัตต์ขึ้นใหม่ เพื่อผลิตไอโซโทปให้กับวงการแพทย์และอุตสาหกรรม (เครื่องปฏิกรณ์ที่บางเขนมีขนาดเพียง 2 เมกะวัตต์ และใช้ในงานวิจัยเท่านั้น) แต่โครงการได้ยืดเยื้อมาจนปัจจุบันเพราะยังไม่ได้รับใบอนุญาตในการติดตั้งเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ เนื่องจากติดปัญหาเรื่องระบบความปลอดภัยที่ยังมีข้อมูลไม่เพียงพอในด้านการระบายความร้อนของระบบ และยังไม่ได้ใบรับรองความปลอดภัยจากสถาบันห้องทดลองปฏิบัติการแห่งชาติอาร์กอนของสหรัฐอเมริกา จนกระทั่งกลางปี พ.ศ. 2546 จึงได้รับใบรับรอง คณะกรรมการพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ จึงมีมติให้ออกใบอนุญาตก่อสร้างเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ เมื่อวันที่ 29 กันยายน พ.ศ. 2546 ข้อขัดแย้งเกิดขึ้นเนื่องจากประชาชนในอำเภอองครักษ์ เพิ่งรับรู้ว่าจะมีการก่อสร้างศูนย์นิวเคลียร์องครักษ์ในปี พ.ศ. 2541 จึงเกิดความหวาดกลัวในอันตรายเพราะชาวบ้านทราบมาว่าจะมีการนำเอากากกัมมันตรังสีจากทั่วประเทศมาไว้ที่นี่ด้วย นอกจากนี้การพิจารณารายงานผลกระทบสิ่งแวดล้อม (EIA : Environmental Impact Assesment) ก็ยังไม่แล้วเสร็จ ชาวบ้านจึงเรียกร้องให้รัฐบาลยกเลิกโครงการศูนย์วิจัยนิวเคลียร์องครักษ์ เพราะชาวบ้านไม่แน่ใจในความปลอดภัย นอกจากนี้ยังมีปัญหาเรื่องรอยเลื่อนแผ่นดินไหวที่องครักษ์ ซึ่งยังไม่แน่ใจว่าเป็นรอยเลื่อนที่มีพลังหรือไม่ จึงไม่ต้องการให้โครงการนิวเคลียร์นี้มาอยู่ในพื้นที่ สำหรับผู้ที่สนใจในเรื่องศูนย์นิวเคลียร์องครักษ์ จะอ่านได้เพิ่มเติมจากเอกสารที่ทางสำนักงานปรมาณูเพื่อสันตินำเสนอในที่ประชุมนานาชาติ ประเทศเยอรมัน เมื่อวันที่ 17-20 เมษายน 2544 ที่ http://www.frm2.tu-muenchen.de/igorr/igorr8/papers/rusch.pdf

2. สัญกรณ์ทางนิวเคลียร์

ในการติดตามวิถีการสลายตัวของกัมมันตรังสี และการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในนิวเคลียสของอะตอมจากกัมมันตภาพรังสีของอะตอม และเพื่อให้เข้าใจธรรมชาติของอนุภาคแอลฟา อนุภาคบีตา และรังสีแกมมา จะมีการใช้สัญกรณ์, (notation) ที่แสดงทั้งเลขมวลและเลขอะตอมของไอโซโทปหรืออนุภาคย่อยในอะตอม โดยเขียนเลขมวลไว้ที่มุมบนด้านซ้ายของสัญลักษณ์ของธาตุ และเลขอะตอมอยู่ที่มุมล่างด้านซ้ายของสัญลักษณ์ของธาตุ ซึ่งทำให้ทราบทั้งมวลและประจุรวมของนิวเคลียสได้

สำหรับอนุภาคย่อยที่มีประจุไฟฟ้า บางครั้งอาจเขียนแสดงไว้ที่มุมบนด้านขวาของสัญลักษณ์ของธาตุ แต่บ่อยครั้งที่จะเขียนเพียงสัญลักษณ์ของธาตุกับประจุ หรือสัญลักษณ์ของธาตุเพียงอย่างเดียว ยกตัวอย่างกรณีไอโซโทปของไฮโดรเจนดังนี้

ไอโซโทปปกติของ hydrogen	โพรเทียม (protium)	${}_{1}^{1}H$	เกิดในธรรมชาติ และ
ไอโซโทปที่พบน้อย	ดิวทีเรียม (deuterium, D)	${}_{1}^{2}H$	ไม่เป็นกัมมันตรังสี
ไอโซโทปที่พบน้อยมาก	ทริเทียม (tritium)	${}_{1}^{3}H$	มีสมบัติเป็นกัมมันตรังสี

หรือตัวอย่างในกรณีอื่นๆ ดังนี้

ไอโซโทปที่เสถียรของฮีเลียม	${}_{2}^{4}He$	ซึ่งมีนิวเคลียสเป็น	${}_{2}^{4}He^{2+}$
ไอโซโทปที่เสถียรของฟลูอรีน	${}_{9}^{19}F$	หรือเขียนว่า	fluorine-19, F-19

สำหรับธาตุอื่นๆ นั้น ก็เช่นเดียวกับไฮโดรเจนที่สามารถพบได้ในรูปที่เป็นไอโซโทปที่เสถียรและเกิดเองในธรรมชาติ หรือสังเคราะห์ขึ้นมาให้มีสมบัติเป็นไอโซโทปกัมมันตรังสีตัวอย่างเช่น อะตอมคาร์บอนประมาณ 98.9% จะเป็นไอโซโทปที่เสถียร ${}_{6}^{12}C$ ส่วนที่เหลือคือ ${}_{6}^{13}C$ ซึ่งเป็นไอโซโทปที่เสถียรเช่นเดียวกัน นอกจากนั้นมีคาร์บอนกัมมันตรังสี ${}_{6}^{14}C$ ซึ่งบางทีรู้จักกันในชื่อ carbon-14, C-14 ซึ่งเกิดในธรรมชาติเช่นกัน แต่มีปริมาณน้อยยิ่ง ซึ่งนำมาประยุกต์ในการหาอายุของวัตถุโบราณได้ ซึ่งได้กล่าวไว้ในหัวข้อของการใช้ประโยชน์พลังงานนิวเคลียร์ (ตอนที่ 5.4)

3. กัมมันตภาพรังสี

ในปี ค.ศ. 1895 วิลเฮลม์ เรินต์เกน (Wilhelm Roentgen) ได้พบว่ามีรังสีเอกซ์ปล่อยออกมาจากแอโนดของหลอดรังสีแคโทดความต่างศักย์สูง ในเวลา 1 ปี ต่อมาอองตวน แบ็กเกอแรล ได้พบสิ่งที่เขาคิดว่าเป็นแหล่งของรังสีเอกซ์ในธรรมชาติ คือ โปแตสเซียมยูเรนิลซัลเฟต (potassium uranyl sulfate, $K_2UO_2(SO_4).2H_2O$ แต่ในภายหลังเขาก็ตัดสินใจว่ารังสีที่ปล่อยออกมาจากสารนี้และสารประกอบของยูเรเนียมตัวอื่นๆ แตกต่างไปจากรังสีเอกซ์ของ เรินต์เกน ผู้ใช้คำว่ากัมมันตภาพรังสี (radioactivity) ในการอธิบายการเกิดรังสีดังกล่าว คือ แบ็กเกอแรล

ในที่สุด ได้มีการจำแนกและศึกษากัมมันตรังสีที่ปล่อยออกมาตามธรรมชาติ 3 ชนิด ซึ่งพบว่าทั้งหมดถูกปล่อยออกมาจากนิวคลีไอของอะตอมในขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบหรือโครงสร้าง ได้แก่ รังสีแอลฟา รังสีบีตา และรังสีแกมมา ในปัจจุบันเรียกรังสีแอลฟาว่าอนุภาคแอลฟา เพราะประกอบด้วยลำอนุภาคพลังงานสูงของนิวคลีไอของฮีเลียมซึ่งมีโปรตอนและนิวตรอนอย่างละ 2 ตัว จะเกิดขึ้นในระหว่างการสลายตัวทางกัมมันตรังสี อนุภาคแอลฟาเดินทางด้วยความเร็ว 5-7% ของความเร็วแสง ที่จริงแล้วอนุภาคแอลฟาประกอบด้วยอะตอมฮีเลียมจำนวนมากที่เสียอิเล็กตรอนไป 2 ตัว ที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงนั่นเอง จึงเขียนแทนได้เป็น ${}_{2}^{4}He^{2+}$ (4 คือ เลขมวล 2 คือเลขอะตอม และ 2+ คือประจุ) หรือเขียนอีกแบบได้ว่า ${}_{2}^{4}\alpha$ หรือเพียง α

อนุภาคแอลฟา เดินทางทะลุทะลวงสสารได้น้อยมาก เนื่องจากมีประจุและมีมวลถึง 4 amu จึงไม่สามารถผ่านเข้าไปในสสารซึ่งมีอะตอมอยู่เป็นจำนวนมากได้ดีนัก การชนกับอะตอมของสสารทำให้อนุภาคแอลฟามีพลังงานลดลง กระดาษแผ่นบางๆ ก็สามารถหยุดการเคลื่อนที่ของอนุภาคแอลฟาได้ และเนื่องจากนิวเคลียสที่ปล่อยอนุภาคแอลฟาออกมาจะสูญเสียโปรตอนและนิวตรอนไปอย่างละ 2 ตัว เลขอะตอมและเลขมวลของอะตอมนั้นจะลดลงไป 2 และ 4 amu ตามลำดับ

อนุภาคบีตาประกอบด้วยลำอิเล็กตรอนพลังงานสูง เคลื่อนที่ด้วยความเร็วประมาณ 90% ของความเร็วแสง อิเล็กตรอนพลังงานสูงนี้มีประจุ –1 และไม่มีมวล จึงแตกต่างจากอนุภาคแอลฟา และจะไม่ใช้เลขมวลหรือเลขอะตอมในการเขียนสัญกรณ์ของอนุภาคบีตา แต่จะเขียนแทนเป็น $^{0}_{-1}e$ (0 หมายถึงไม่มีโปรตอนและนิวตรอน และ –1 แสดงประจุไฟฟ้าของอนุภาคบีตา ซึ่งทำหน้าที่ลักษณะเดียวกับเลขอะตอมซึ่งแทนจำนวนโปรตอน หรือประจุบวกของนิวเคลียสของอะตอม) หรืออาจเขียนอีกแบบได้ว่า $^{0}_{-1}\beta$ หรือเพียง β^{-}, β เนื่องจากอนุภาคบีตามีประจุเพียง –1 และมีมวลน้อยมากๆ อนุภาคบีตา จึงสามารถทะลุทะลวงผ่านสสารได้ดีกว่าอนุภาคแอลฟาประมาณ 100 เท่า โดยที่ผ้าหนาๆ หรือผนังห้องสามารถหยุดยั้งอนุภาคบีตาได้

เมื่อนิวเคลียสของอะตอมสูญเสียอนุภาคบีตาซึ่งมีประจุ –1 ไปหนึ่งหน่วย นิวเคลียสจะต้องดุลประจุโดยการเพิ่มประจุ +1 ขึ้นอีกหนึ่งหน่วยในขณะเดียวกัน โดยการเปลี่ยนนิวตรอนเป็นโปรตอน ทั้งนี้มวลทั้งหมดของนิวเคลียสไม่เปลี่ยนแปลงมากนักในขณะที่เลขอะตอมพิ่มขึ้น 1 หน่วย อาจจะมองภาพการเปลี่ยนแปลงตรงนี้ว่านิวตรอนมาจากการรวมกันระหว่างโปรตอนกับอิเล็กตรอนเพราะนิวตรอนเป็นกลางไม่มีประจุ เมื่อดึงอิเล็กตรอนออกไป มวลจะเปลี่ยนแปลงน้อยเพราะมวลของอิเล็กตรอนมีค่าน้อยมาก แต่ประจุจะเพิ่มขึ้นหนึ่งหน่วย

รังสีแกมมา เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเช่นเดียวกับแสงวิสิเบิล คลื่นวิทยุ และรังสีเอกซ์ เนื่องจากรังสีแกมมามีพลังงานสูงกว่ารังสีเอกซ์และสามารถทะลุทะลวงสสารได้ดี จึงทำอันตรายเชิงชีวภาพได้สูง รังสีแกมมาไม่มีมวลและประจุ จึงเขียนแทนได้เป็น $^{0}_{0}\gamma$ หรือ γ

รังสีแกมมาเดินทางด้วยความเร็วของแสง และมีพลังงานสูง การป้องกันรังสีแกมมาจึงต้องใช้คอนกรีตอย่างหนา หรือใช้แผ่นตะกั่วหนาๆ รังสีแกมมามีความสามารถในการทะลุทะลวงผ่านสสารได้มากกว่าอนุภาคบีตา 100 เท่า จึงมีการประยุกต์รังสีแกมมาในการตรวจสอบตำหนิของชิ้นส่วนโลหะและโครงสร้างในลักษณะเดียวกับการใช้รังสีเอกซ์ในการตรวจสอบการแตกหักของกระดูก แหล่งของรังสีแกมมาที่ใช้กันมาก คือ Co-60 ซึ่งเป็นธาตุไอโซโทปกัมมันตรังสี

เมื่ออนุภาคแอลฟา อนุภาคบีตา และรังสีแกมมาพลังงานสูง ชนกับสสารซึ่งเป็นกลางทางไฟฟ้า จะทำให้อิเล็กตรอนของอะตอมและโมเลกุลหลุดออกไป และเกิดเป็นคู่ไอออนขึ้น รังสีที่ทำให้เกิดการแตกตัวได้นี้ เรียกว่า ionizing radiation ซึ่งรวมทั้งรังสีคอสมิกและรังสีเอกซ์ด้วย

4. กัมมันตภาพรังสีในธรรมชาติ

เมื่อไม่มีอิทธิพลจากภายนอก นิวไคลด์หลายชนิดจะเสถียร แต่มีหลายชนิดเช่นกันที่ไม่เสถียร และจะมีการสลายตัวทางกัมมันตรังสี หรือบางทีเรียกว่าการแตกสลายของนิวเคลียร์ (nuclear disintegration) และเขียนแทนด้วยสมการนิวเคลียร์ ตัวอย่างเช่น ไอโซโทปกัมมันตรังสี ตัวแรกคือ ทริเทียม สลายตัวให้รังสีบีตาออกมา และเกิดเป็นไอโซโทปที่เสถียรของฮีเลียม

$$^{3}_{1}H \longrightarrow {}^{3}_{2}He + {}^{0}_{-1}e$$

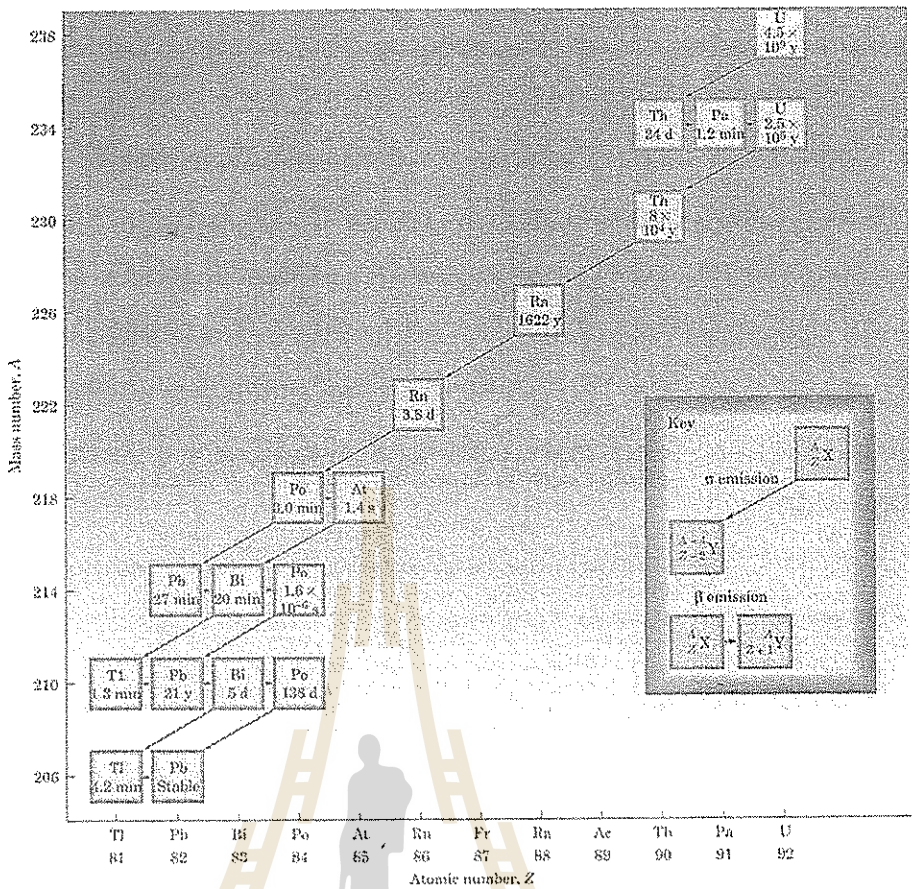
ซึ่งจะเห็นว่า เมื่อนิวเคลียสทริเทียมสูญเสียอิเล็กตรอน นิวตรอนตัวหนึ่งจะเปลี่ยนไปเป็นโปรตอน ถึงแม้เลขมวลจะคงที่ แต่การที่เลขอะตอมเพิ่มขึ้นหนึ่งหน่วยทำให้ได้ฮีเลียม สมการดังกล่าวแสดงการอนุรักษ์นิวคลีออน (โปรตอน + นิวตรอน) และอนุรักษ์ประจุ นั่นคือทางด้านซ้ายมือ มี 3 นิวคลีออน เท่ากับทางขวามือ และประจุบวก (จำนวนโปรตอน) เท่ากับ 1 ทั้ง 2 ด้าน เราจะเรียก $^{3}_{1}H$ ว่าเป็นนิวไคลด์ตั้งต้น (parent nuclide) และ $^{3}_{2}He$ ที่เกิดขึ้นเป็นนิวไคลด์ลูก (daughter nuclide) ตัวอย่างต่อไป คือการสลายตัวของ C-14 ซึ่งให้รังสีบีตาออกมาเช่นกัน และได้นิวไคลด์ลูกเป็นไอโซโทปของไนโตรเจนที่พบตามปกติ

$$^{14}_{6}C \longrightarrow {}^{14}_{7}N + {}^{0}_{-1}e$$

ส่วนกัมมันตภาพรังสีที่แบ็กเกอแรลค้นพบนั้น คือ อนุภาคแอลฟาจากการสลายตัวของไอโซโทปยูเรเนียม $^{238}_{92}U$ ซึ่งเป็นไอโซโทปกัมมันตรังสีที่มีเลขมวลและเลขอะตอมสูงสุดที่พบมากในธรรมชาติ 99% ของยูเรเนียมในธรรมชาติจะอยู่ในรูป U-238 พบในแร่พิทชเบลนด์ (pitchblende,) U-238 จะมีการสลายตัวทั้งหมด 14 ขั้นตอน (ดูภาพที่ 5.1) โดยขั้นตอนแรก มีการเปลี่ยนเป็น Thorium-234 โดยสูญเสียอนุภาคแอลฟา

$$^{238}_{92}U \longrightarrow {}^{234}_{90}Th + {}^{4}_{2}He$$

และมีการปล่อยรังสีแกมมาออกมาด้วย แต่เนื่องจากรังสีแกมมาไม่มีมวลและประจุ จึงไม่เขียนแสดงในสมการ เพราะจะไม่มีผลใดๆ ต่อเลขมวล และเลขอะตอมของนิวไคลด์ทั้งสองด้านของสมการ หลังจากนั้นจะมีการสลายตัวต่อไปอีก 13 ขั้นตอน ปฏิกิริยาจะหยุดลงที่ไอโซโทปที่เสถียร ของตะกั่ว $^{206}_{82}Pb$ ในขั้นตอนของการสลายตัวทางกัมมันตรังสี จะเกิด Rn-222 ขึ้น เรดอนตัวนี้เป็นแก๊สและถือได้ว่าเป็นสารมลพิษทางอากาศในอาคารบ้านเรือนซึ่งได้กล่าวถึงไว้แล้วในหน่วยที่ 7 ซึ่งเป็นเรื่องของเคมีสิ่งแวดล้อม Rn-222 เป็นอันตรายเพราะเมื่อสลายตัวต่อไปจะได้นิวไคลด์ลูกเป็นของแข็ง ดังนั้นถ้าหายใจเอา Rn-222 เข้าไป อาจทำให้มีธาตุกัมมันตรังสีอื่นๆ จับอยู่ในปอดได้ ซึ่งทำให้เกิดอันตรายต่อเนื้อเยื่อต่างๆ ในร่างกายได้



ภาพที่ 5.1 ลำดับของการสลายตัวทางกัมมันตรังสีของ U-238 ไปเป็น Pb-206

ดังนั้นจะเห็นว่า ถ้านิวเคลียสไม่เสถียร จะมีการสลายตัว และถ้านิวไคลด์ลูกที่ได้ไม่เสถียร ก็จะสลายตัวต่อไป กระบวนการนี้จะดำเนินต่อไปเรื่อยๆ จนได้ไอโซโทปที่เสถียร กระบวนการเช่นนี้เรียกว่า **อนุกรมการสลายตัวของกัมมันตรังสี** ซึ่งอนุกรมการสลายตัวของ U-238 คือตัวอย่างอันหนึ่ง

นอกจากการสลายตัวโดยให้อนุภาคแอลฟา อนุภาคบีตาและรังสีแกมมาแล้ว ต่อมาพบว่า มีกระบวนการสลายตัวอีกลักษณะหนึ่งคือ การจับอิเล็กตรอน (electron capture, EC) ในกระบวนการนี้ นิวเคลียสจะดึงอิเล็กตรอนจากภายนอกเข้าไปในนิวเคลียส ตัวอย่างเช่น การสลายตัวของ K-40 ซึ่งในการเปลี่ยนแปลง เลขมวลจะคงที่ในขณะที่เลขอะตอมลดลงหนึ่งหน่วย ตามปกติแล้วอิเล็กตรอนตัวที่ถูกจับเข้าไปในนิวเคลียสมักจะเป็นอิเล็กตอนใน K-shell ซึ่งอยู่ใกล้กับนิวเคลียสมากที่สุด และเรียกกระบวนการนี้ว่า K-capture

$$^{40}_{19}\mathrm{K} + {}^{0}_{-1}\mathrm{e} \xrightarrow{\mathrm{EC}} {}^{40}_{18}\mathrm{Ar}$$

5. จลนพลศาสตร์ของการสลายตัวทางกัมมันตรังสี

อัตราเร็วของการสลายตัวของนิวเคลียสเป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนนิวคลีไอที่สลายตัวที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง จะเขียนสมการทางจลนพลศาสตร์แสดงอัตราเร็วของการสลายตัวได้ดังนี้

$$\text{อัตราของการสลายตัว} = \frac{dN}{dt} = kN$$

เมื่อ N = จำนวนนิวคลีไอตั้งต้นในสารตัวอย่าง

k = ค่าคงตัวอัตรา

t = เวลา

สมการนี้ อธิบายปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง ซึ่งเป็นจลนพลศาสตร์ของการสลายตัวทางกัมมันตรังสีทุกประเภท

จากสมการของกฎอัตราเร็วดังกล่าว จะเขียนแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\ln N = -kt + \ln No$$

เมื่อ N = จำนวนนิวคลีไอตั้งต้นที่เวลา t

N_0 = จำนวนนิวคลีไอที่เวลา t = 0

เขียนสมการใหม่ได้เป็น $\ln \frac{N}{No} = -kt$

สมการนี้จะให้สัดส่วนของนิวคลีไอที่ไม่เสถียรที่เหลืออยู่ ภายหลังช่วงเวลา t

ตัวอย่าง ค่าคงตัวอัตรา เมื่อ $^{222}_{86}Rn$ สลายตัวให้อนุภาคแอลฟา มีค่า 0.18/วัน เมื่อเวลาผ่านไป 8.5 วัน Rn-222 จำนวน 4.5×10^{-5} กรัม จะเหลืออยู่เท่าใด

จากความสัมพันธ์ $\ln \frac{x}{x_0} = -kt$

จะได้ว่า $\ln \frac{x}{4.5\times10^{-5} \text{ กรัม}} = -(0.18/\text{วัน})(8.5 \text{ วัน})$

$$x = 9.7\times10^{-6} \text{ กรัม}$$

เราจะวัดความเสถียรของนิวไคลด์ได้โดยการวัดเวลาครึ่งชีวิต (half life, $t_{\frac{1}{2}}$) ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่ต้องใช้ในการทำให้สารตั้งต้นหายไปครึ่งหนึ่ง ดังนั้น สำหรับการสลายตัวทางกัมมันตรังสี จะเขียนได้ว่า

$$\ln \frac{\left(\frac{N_0}{2}\right)}{N_0} = -kt_{\frac{1}{2}}$$

หรือ

$$t_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln 2}{k} = \frac{0.693}{k}$$

ตัวอย่าง จากข้อมูลในตัวอย่างที่แล้ว จงคำนวณหาเวลาครึ่งชีวิตของ Rn-222

$$t_{\frac{1}{2}} = \frac{0.693}{k} = \frac{0.693}{0.18 \text{ วัน}^{-1}}$$

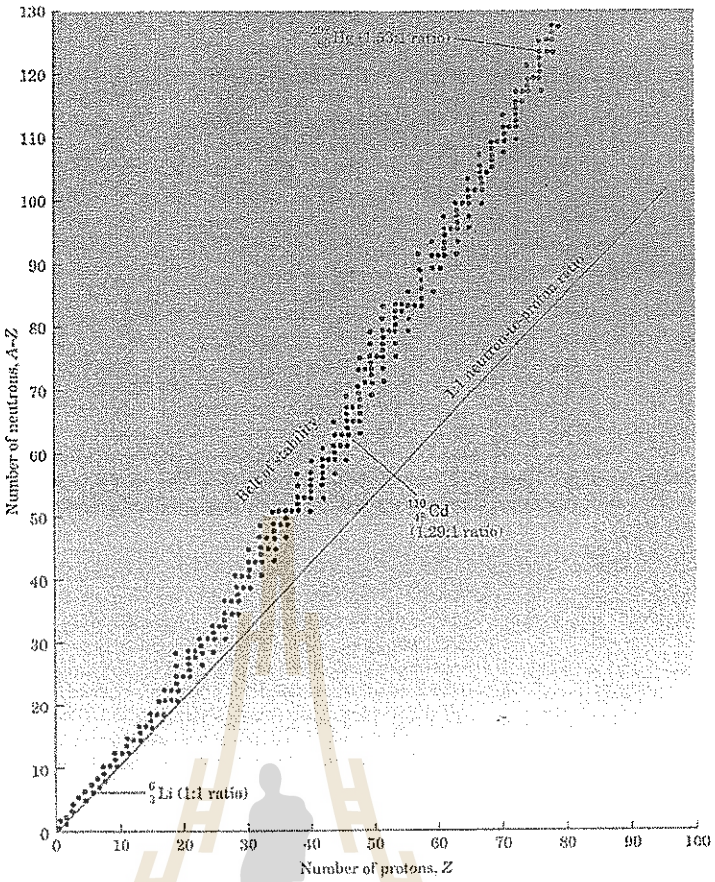
$$= 3.8 \text{ วัน}$$

6. เสถียรภาพทางนิวเคลียร์

ในที่นี้จะไม่กล่าวถึงแฟกเตอร์ที่มีส่วนต่อความเสถียร หรือความไม่เสถียร ของนิวคลีไอโดยละเอียด แต่จะมีข้อสังเกตบางข้อดังนี้ ในข้อแรกจะพบว่าถ้ายกเว้น ${}^{1}_{1}H$ แล้ว นิวคลีไอที่เสถียรทั้งหมดจะมีนิวตรอนอย่างน้อย 1 ตัว ข้อที่สองคือ ในบรรดานิวคลีไอที่เสถียรนั้น เมื่อจำนวนโปรตอนในนิวเคลียสเพิ่มขึ้น อัตราส่วนนิวตรอนต่อโปรตอนจะเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งดูเหมือนว่านิวตรอนที่เพิ่มขึ้นนั้นจะช่วยทำให้นิวเคลียสไม่แตกกระจายไปจากกันเพราะแรงผลักระหว่างโปรตอน และยิ่งจำนวนโปรตอนเพิ่มมากขึ้นเท่าไร นิวเคลียสจะต้องการอัตราส่วนนิวตรอนต่อโปรตอนที่มากขึ้นในการที่จะทำให้นิวเคลียสเสถียรอยู่ได้ ข้อที่สามคือ เมื่อนิวเคลียสมีโปรตอนมากกว่า 83 ตัว นิวตรอนจะไม่สามารถช่วยให้นิวเคลียสคงสภาพอยู่ได้ ในตารางธาตุ บิสมัท (bismuth, Bi) ซึ่งมีเลขอะตอม 83 จะเป็นธาตุตัวสุดท้ายที่มีนิวไคลด์ที่เสถียร

แถบเสถียรภาพ (Belt of stability)

เมื่อนำเอาจำนวนนิวตรอนและโปรตอนของนิวคลีไอที่เสถียรทั้งหมดมาพล็อตจะได้กราฟดังแสดงไว้ในภาพที่ 5.2 ซึ่งจะแสดงแถบเสถียรภาพ ซึ่งเป็นบริเวณของกราฟซึ่งอัตราส่วนนิวตรอนกับโปรตอนมีค่าเข้าใกล้ 1 ในธาตุเบาๆ แต่มีค่ามากขึ้นในธาตุที่มีโปรตอนมากขึ้น เช่นใน ${}^{6}_{3}Li$ อัตราส่วนนิวตรอนต่อโปรตอนมีค่า 1:1 ใน ${}^{110}_{48}Cd$ เป็น 1.29:1 และใน ${}^{202}_{80}Hg$ เป็น 1.53:1



ภาพที่ 5.2 แถบเสถียรภาพจากการพล็อตระหว่างจำนวนนิวตรอน และจำนวนโปรตอนของนิวเคลียส

ในการพล็อตลักษณะนี้ นิวคลีไอที่ไม่เสถียรจะอยู่นอกแถบเสถียรภาพ โดยอาจจะอยู่ทางด้านบน ด้านล่างหรืออยู่พ้นปลายแถบออกไป นิวคลีไอที่อยู่ทางด้านบน จะมีอัตราส่วนนิวตรอนต่อโปรตอนสูงเกินไป นิวคลีไอที่อยู่ทางด้านล่าง จะมีอัตราส่วนดังกล่าวต่ำเกินไป ส่วนที่พ้นปลายแถบออกไปมีจำนวนนิวคลีออนมากเกินกว่าที่จะมีเสถียรภาพอยู่ได้ นิวคลีไอในบริเวณนี้มีแนวโน้มที่จะเปลี่ยนไปเป็นนิวคลีไอซึ่งอยู่ในบริเวณแถบเสถียรภาพ หรืออย่างน้อยก็อยู่ใกล้แถบเสถียรภาพ

นิวคลีไอที่อยู่ทางด้านบนของแถบเสถียรภาพ จะพยายามลดอัตราส่วนนิวตรอนต่อโปรตอนโดยการสลายตัวให้รังสีบีตา หรือปล่อยนิวตรอนออกมา ตัวอย่างของการสลายตัวให้รังสีบีตา คือการสลายตัวของ $^{133}_{54}\mathrm{Xe}$ ดังปฏิกิริยา

$$^{133}_{54}\mathrm{Xe} \longrightarrow {}^{133}_{55}\mathrm{Cs} + {}^{0}_{-1}\mathrm{e}$$

ในกรณีนี้ นิวไคลด์ลูกคือ Cs-133 เป็นนิวไคลด์ที่เสถียร แต่ในบางครั้งอาจต้องมีการสลายตัวหลายขั้นตอน กว่าจะได้นิวไคลด์ที่เข้ามาอยู่ใกล้แถบเสถียรภาพ ดังเช่นในกรณีของ Sb-131 จะสลายตัวให้รังสีบีตาออกมา 3 ครั้ง ต่อเนื่องกัน จึงจะได้นิวเคลียสที่เสถียร

$$^{131}_{51}\mathrm{Sb} \longrightarrow {}^{131}_{52}\mathrm{Te} + {}^{0}_{-1}\mathrm{e}$$

$$^{131}_{52}\mathrm{Te} \longrightarrow {}^{131}_{53}\mathrm{I} + {}^{0}_{-1}\mathrm{e}$$

$$^{131}_{53}\mathrm{I} \longrightarrow {}^{131}_{54}\mathrm{Xe} + {}^{0}_{-1}\mathrm{e}$$

ตัวอย่างของการสลายตัวโดยให้นิวตรอนออกมาเพื่อลดอัตราส่วนนิวตรอนต่อโปรตอนคือกรณีของ $^{90}_{36}\mathrm{Kr}$ ดังสมการ

$$^{90}_{36}\mathrm{Kr} \longrightarrow {}^{89}_{36}\mathrm{Kr} + {}^{1}_{0}\mathrm{n}$$

ส่วนนิวคลีไอที่อยู่ทางด้านล่างของแถบเสถียรภาพ จะเพิ่มอัตรานิวตรอนต่อโปรตอนโดยการสลายตัวให้โพสิตรอน (positron, $^{0}_{1}\mathrm{e}$, β^{+}) หรือ โดยการจับอิเล็กตรอน ตัวอย่างเช่น

$$^{105}_{48}\mathrm{Cd} \longrightarrow {}^{105}_{47}\mathrm{Ag} + {}^{0}_{1}\mathrm{e}$$

$$^{157}_{54}\mathrm{Xe} + {}^{0}_{-1}\mathrm{e} \xrightarrow{\mathrm{EC}} {}^{127}_{53}\mathrm{I}$$

และพลังงานที่สูญเสียไปในกระบวนการจับอิเล็กตรอน จะถูกปล่อยออกมาในรูปของรังสีเอกซ์

ในบางครั้งการสลายตัวไม่ได้มีสาเหตุมาจากอัตราส่วนนิวตรอนต่อโปรตอนที่ไม่เหมาะสม แต่จำนวนนิวคลีออนที่มีอยู่ทั้งหมดมีอยู่มากเกินไป จนแรงยึดเหนี่ยวของนิวเคลียสไม่สามารถจับยึดนิวคลีออนไว้ได้ กรณีนี้คือกรณีของนิวไคลด์ที่อยู่พ้นปลายแถบเสถียรภาพออกไป สภาวะเช่นนี้ มักทำให้เกิดการปล่อยอนุภาคแอลฟาออกมา เพราะการทำเช่นนี้ ทำให้นิวเคลียร์กำจัดโปรตอน 2 ตัว และนิวตรอน 2 ตัว ออกไปได้ในคราวเดียวกัน

$$^{211}_{84}\mathrm{Po} \longrightarrow {}^{207}_{82}\mathrm{Pb} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$$

และถ้านิวไคลด์ลูกที่เกิดขึ้นยังอยู่ห่างจากแถบเสถียรภาพ อาจจะมีการสลายตัวต่อไปอีกหลายครั้ง ดังกรณีการสลายตัวของ U-238 ในภาพที่ 5.1

ตอนที่ 5.2

ปฏิกิริยานิวเคลียร์

ในสมัยโบราณ นักเล่นแร่แปรธาตุ (alchemist) ได้ใช้ความพยายามกันอย่างมากในการที่จะเปลี่ยนธาตุที่ไม่มีค่าไปเป็นธาตุที่มีค่า เช่น พยายามเปลี่ยนตะกั่วให้เป็นทอง แต่ก็ไม่เคยมีผู้ใดประสบความสำเร็จ แต่ในปัจจุบันนักวิทยาศาสตร์สามารถเปลี่ยนธาตุหนึ่งไปเป็นอีกธาตุหนึ่งได้ โดยใช้ปฏิกิริยานิวเคลียร์ ซึ่งแตกต่างไปจากปฏิกิริยาเคมีโดยทั่วไป เพราะเป็นปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงภายในนิวเคลียสของอะตอมของธาตุ

1. ปฏิกิริยานิวเคลียร์

นิวเคลียสทุกชนิด ยกเว้นไฮโดรเจน ($^{1}_{1}H$) ประกอบด้วยอนุภาคพื้นฐาน 2 ชนิด คือโปรตอน และนิวตรอน ธาตุบางธาตุมีสมบัติเป็นธาตุกัมมันตรังสี (radioactive element) จะสลายตัวให้กัมมันตภาพรังสี (radioactivity) ออกมาตลอดเวลา ธาตุที่มีเลขอะตอมมากกว่า 83 จะเป็นธาตุกัมมันตรังสี มีการให้กัมมันตภาพรังสีออกมา และอาจกลายเป็นธาตุใหม่ได้ ปรากฏการณ์นี้มีทั้งที่เกิดเองในธรรมชาติและที่เกิดโดยการสังเคราะห์ ทั้งสองกรณีคือปฏิกิริยานิวเคลียร์ ซึ่งมีความแตกต่างจากปฏิกิริยาเคมีตามที่แสดงไว้ในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 การเปรียบเทียบปฏิกิริยาเคมีกับปฏิกิริยานิวเคลียร์

ปฏิกิริยาเคมี	ปฏิกิริยานิวเคลียร์
1. อะตอมมีการจัดเรียงตัวใหม่หลังจากเกิดการสลายพันธะและการสร้างพันธะใหม่	1. ธาตุ,ไอโซโทปของธาตุเปลี่ยนไปเป็นธาตุหรือไอโซโทปตัวใหม่
2. อิเล็กตรอนที่อยู่รอบนอกของนิวเคลียสเท่านั้นที่เกี่ยวข้องในการสลายและสร้างพันธะในปฏิกิริยา	2. โปรตอน นิวตรอน และอิเล็กตรอน ต่างเกี่ยวข้องในปฏิกิริยา
3. จะมีการดูดกลืนพลังงาน หรือคายพลังงานออกมาในระหว่างการทำปฏิกิริยา แต่ในปริมาณไม่สูงนัก	3. มีการดูดกลืนพลังงานหรือการคายพลังงานปริมาณมหาศาล
4. อัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์ต่างๆ คือ อุณหภูมิ ความดัน ความเข้มข้น และตัวเร่งปฏิกิริยา	4. อัตราการเกิดปฏิกิริยาไม่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ความดัน และตัวเร่งปฏิกิริยา

การดุลสมการนิวเคลียร์

สมการนิวเคลียร์จะแตกต่างจากปฏิกิริยาเคมี เพราะนอกจากต้องเขียนสัญลักษณ์ของธาตุที่เกี่ยวข้องแล้ว ยังต้องแสดงจำนวนโปรตอนและจำนวนนิวตรอนที่มีอยู่ในอะตอมของธาตุนั้นๆ ด้วย

สัญกรณ์ (notation) ของอนุภาคพื้นฐานต่างๆ มีดังนี้

โปรตอน $_{1}^{1}p$, $_{1}^{1}H$

นิวตรอน $_{0}^{1}n$

อิเล็กตรอน $_{-1}^{0}e$, $_{-1}^{0}\beta$

โพสิตรอน $_{+1}^{0}e$, $_{+1}^{0}\beta$

อนุภาคแอลฟา $_{2}^{4}He$, $_{2}^{4}\alpha$

ตัวยก : หมายถึงเลขมวลซึ่งเป็นผลรวมของจำนวนนิวตรอนและจำนวนโปรตอน

ตัวห้อย : เลขอะตอม หรือจำนวนโปรตอน

ดังนั้น จากสัญกรณ์ของอนุภาคพื้นฐานข้างบน จะได้ว่า

โปรตอน จะมีเลขอะตอมเท่ากับ 1 เพราะมีโปรตอนเพียงตัวเดียว และมีเลขมวลเท่ากับ 1 ด้วย เพราะมีแต่โปรตอนไม่มีนิวตรอน

นิวตรอน จะมีเลขอะตอมเป็นศูนย์ เพราะไม่มีโปรตอน และมีเลขมวลเท่ากับ 1 เพราะมีนิวตรอนตัวเดียว

อิเล็กตรอน มีเลขอะตอม –1 เพราะอิเล็กตรอนมีประจุลบทางไฟฟ้า 1 หน่วย และมีเลขมวลเป็นศูนย์ เพราะไม่มีทั้งโปรตอน และนิวตรอน

โพสิตรอน เป็นอนุภาคที่มีมวลเท่ากับอิเล็กตรอน แต่มีประจุบวก 1 หน่วย

อนุภาคแอลฟา มีเลขอะตอมเท่ากับ 2 เพราะมีโปรตอน 2 ตัว และมีเลขมวลเท่ากับ 4 เพราะมีโปรตอนและนิวตรอนอย่างละ 2 ตัว

มีข้อสังเกตเกี่ยวกับการใช้สัญกรณ์ของอิเล็กตรอนดังนี้ จะใช้ $_{-1}^{0}e$ เมื่อเป็นอิเล็กตรอนของออร์บิทัลของอะตอม แต่ถ้าเป็นอิเล็กตรอนจากนิวเคลียสจะใช้ $_{-1}^{0}\beta$

การดุลสมการนิวเคลียร์ จะเป็นไปตามกฎเกณฑ์ดังนี้

- จะต้องมีการอนุรักษ์เลขมวล นั่นคือ จำนวนโปรตอนและจำนวนนิวตรอนทั้งหมดในสารตั้งต้นจะเท่ากับของสารผลิตภัณฑ์
- จะต้องมีการอนุรักษ์เลขอะตอม นั่นคือ จำนวนประจุของนิวเคลียสของสารตั้งต้นจะเท่ากับของสารผลิตภัณฑ์

ดังนั้น ถ้ารู้เลขอะตอมและเลขมวลของสารต่างๆ ในสมการนิวเคลียร์ แต่ไม่รู้อยู่ 1 ตัวจะหาเลขอะตอมของสารนั้นได้โดยใช้กฎเกณฑ์ที่กล่าวมาแล้ว

ตัวอย่าง จงดุลสมการนิวเคลียร์ต่อไปนี้ (คือการหาว่า x คืออะไรนั่นเอง)

ก. $^{212}_{84}Po \longrightarrow {}^{208}_{82}Pb + x$

ข. $^{137}_{55}Cs \longrightarrow {}^{137}_{56}Ba + x$

ค. $^{20}_{11}Na \longrightarrow {}^{20}_{10}Ne + x$

วิธีทำ ก. จากการอนุรักษ์เลขมวล แสดงว่า x ต้องมีเลขมวลเท่ากับ 4

จากการอนุรักษ์เลขอะตอมแสดงว่า x ต้องมีเลขอะตอมเท่ากับ 2

นั่นคือ x = อนุภาคแอลฟา $^{4}_{2}He$

สมการที่ดุลแล้วคือ

$$^{212}_{84}Po \longrightarrow {}^{208}_{82}Pb + {}^{4}_{2}He$$

ข. จากการอนุรักษ์เลขมวล แสดงว่า x ต้องมีเลขมวลเท่ากับ 0

จากการอนุรักษ์เลขอะตอม แสดงว่า x ต้องมีเลขอะตอมเท่ากับ –1

การที่เลขอะตอมของผลิตภัณฑ์มากกว่าสารตั้งต้น 1 หน่วย แสดงว่านิวตรอน 1 ตัวในนิวเคลียสของ Cs ต้องเปลี่ยนไปเป็นโปรตอนและอิเล็กตรอน ; $^{1}_{0}n \longrightarrow {}^{1}_{1}p + {}^{0}_{-1}\beta$ (เลขมวลไม่เปลี่ยนแปลง)

นั่นคือ x = อนุภาคบีตา

สมการที่ดุลแล้วคือ

$$^{137}_{55}Cs \longrightarrow {}^{137}_{56}Ba + {}^{0}_{-1}\beta$$

ค. จากการอนุรักษ์เลขมวล แสดงว่า x ต้องมีเลขมวลเท่ากับ 0

จากการอนุรักษ์ เลขอะตอม แสดงว่า x ต้องมีเลขอะตอมเท่ากับ 1

การที่เลขอะตอมของสารผลิตภัณฑ์น้อยกว่าสารตั้งต้น 1 หน่วย แสดงว่า โปรตอน 1 ตัวในนิวเคลียสของ Na ต้องเปลี่ยนไปเป็นนิวตรอนและโพสิตรอน ; $^{1}_{1}p \longrightarrow {}^{1}_{0}n + {}^{0}_{+1}\beta$ (เลขมวลไม่เปลี่ยนแปลง)

นั่นคือ x = โพสิตรอน

สมการที่ดุลแล้วคือ

$$^{20}_{11}Na \longrightarrow {}^{20}_{10}Ne + {}^{0}_{+1}\beta$$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2. ปฏิกิริยาการแปรนิวเคลียส (Nuclear transmutation)

การสลายตัวทางธรรมชาติของธาตุกัมมันตรังสีทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงจากธาตุหนึ่งไปเป็นอีกธาตุหนึ่งได้ ถ้าการสลายตัวนั้นทำให้เลขอะตอมเปลี่ยนแปลง ปฏิกิริยาดังกล่าวเป็นชนิดหนึ่งของปฏิกิริยาการแปรธาตุ (transmutation reaction) ในช่วงก่อน ปี ค.ศ. 1919 ยังไม่เคยมีนักวิทยาศาสตร์คนไหน คิดที่จะใช้ปฏิกิริยานี้ในการเปลี่ยนไอโซโทปที่เสถียรของธาตุตัวหนึ่งไปเป็นธาตุอีกตัวหนึ่ง จนกระทั่งในปีนั้น รัทเทอร์ฟอร์ดใช้อนุภาคแอลฟาที่ได้จากการสลายตัวของเรเดียมระดมยิงไนโตรเจน และพบว่าทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงธาตุได้ดังนี้

$$^{14}_{7}N + ^{4}_{2}He \longrightarrow \left[^{18}_{9}F \right] \longrightarrow ^{17}_{8}O + ^{1}_{1}H$$

โดยมี F-18 ซึ่งมีพลังงานสูงเป็นสารมัธยันตร์ (บางครั้งเรียกนิวเคลียสลักษณะนี้ว่า นิวเคลียสสารประกอบ, compound nucleus) เพราะมีเวลาครึ่งชีวิตน้อยกว่า 10^{-12} วินาที และจะสลายตัวให้ O-17 ซึ่งเป็นไอโซโทปที่เสถียรกับโปรตอน

อาจเขียนสมการของการแปรนิวเคลียสลักษณะนี้ในแบบย่อได้เป็น

$$^{14}_{7}N\ (\alpha, p)\ ^{17}_{8}O$$

โดยในวงเล็บ จะเขียนอนุภาคที่ใช้ระดมยิงเอาไว้ก่อนอนุภาคที่ปล่อยออกมาและเขียนนิวไคลด์ตั้งต้นไว้ทางด้านซ้าย นิวไคลด์ลูกไว้ทางขวา ในกรณีการสลายตัวกัมมันตรังสีที่เกิดได้เองตามธรรมชาติในสมการจะมีนิวไคลด์ตั้งต้นทางด้านซ้ายเพียงตัวเดียว

ตามปกติ ธาตุเบาจะไม่มีกัมมันตภาพรังสี แต่ทำให้เป็นธาตุกัมมันตรังสีได้ ถ้าระดมยิงนิวเคลียสด้วยอนุภาคที่เหมาะสม เช่น การระดมยิงลิเทียมด้วยนิวตรอนจะได้ทริเทียม ซึ่งเป็นไอโซโทปกัมมันตรังสีและจะสลายตัวให้อนุภาคบีตาออกมา

$$^{6}_{3}Li + ^{1}_{0}n \longrightarrow ^{3}_{1}H + ^{4}_{2}He$$

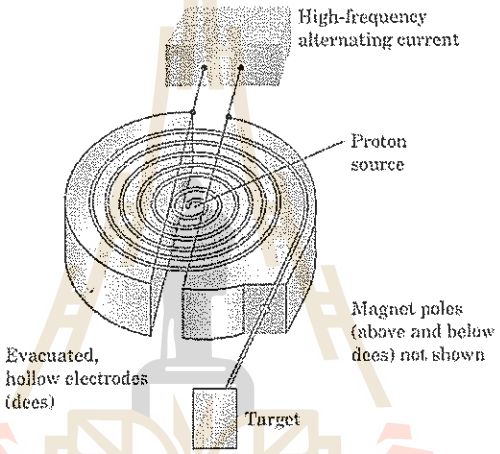
$$^{3}_{1}H \longrightarrow ^{3}_{2}He + ^{0}_{-1}\beta \qquad t_{\frac{1}{2}} = 12.5 \text{ ปี}$$

กระบวนการเหนี่ยวนำ หรือทำให้เกิดไอโซโทปกัมมันตรังสีขึ้นแบบนี้ จะทำได้สะดวกขึ้นเมื่อใช้การระดมยิงธาตุเป้าหมายด้วยอนุภาคนิวตรอน เพราะนิวตรอนไม่มีประจุจึงไม่มีแรงผลักจาก

นิวเคลียส แต่ถ้าใช้อนุภาคที่มีประจุเช่นอนุภาคแอลฟา หรือโปรตอน อนุภาคที่ใช้จะต้องมีพลังงานจลน์สูงมาก จึงจะเอาชนะแรงผลักจากนิวเคลียสของธาตุเป้าหมายได้ เช่น ในการสังเคราะห์ฟอสฟอรัสจากอะลูมิเนียมโดยการระดมยิงด้วยอนุภาคแอลฟา

$$^{27}_{13}\mathrm{Al} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} \longrightarrow {}^{30}_{15}\mathrm{P} + {}^{1}_{0}\mathrm{n}$$

ในปัจจุบัน ได้มีการใช้เครื่องเร่งอนุภาค เช่น เครื่องไซโคลตรอน (cyclotron) เครื่องซินโครตรอน (synchrotron) และเครื่องเร่งอนุภาคแนวตรง (linear accelerator) ในการทำให้อนุภาคที่มีประจุมีพลังงานสูงมากพอจนทำให้เกิดปฏิกิริยาแปรนิวเคลียสขึ้นได้ ในภาพที่ 5.3 เป็นแผนภาพของเครื่องเร่งอนุภาคไซโคลตรอน



ภาพที่ 5.3 แผนภาพของเครื่องไซโคลตรอน

เครื่องไซโคลตรอน จะประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าทำด้วยโลหะภายในกลวงเรียกว่า 'dees' อยู่ระหว่างขั้วแม่เหล็กขนาดใหญ่ (ไม่ได้แสดงในภาพ) ต่ออยู่กับเครื่องกำเนิดกระแสสลับความถี่สูง อนุภาคที่ต้องการจะเร่งเช่นโปรตอนจะเริ่มตรงจุดกลางของเครื่อง สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจะทำให้อนุภาคเคลื่อนที่เป็นวงโคจรแบบก้นหอย เมื่อพ้นเครื่องออกมาอนุภาคจะมีพลังงานสูงพอที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ขึ้นได้เมื่อชนกับเป้า เครื่องเร่งอนุภาคที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันสามารถทำให้อนุภาคมีพลังงานสูงได้มากกว่า 1000 BeV (billion electronvolts)

จากการใช้เครื่องเร่งอนุภาคเช่นนี้ ทำให้นักวิทยาศาสตร์สังเคราะห์ไอโซโทปกัมมันตรังสีที่มีเลขอะตอมมากกว่ายูเรเนียม (Z = 92) ได้อีกหลายตัว ธาตุตัวแรกที่ทำขึ้นมาได้คือเนปจูเนียม (neptunium, Z = 93) โดยการระดมยิง U-238 ด้วยดิวเทอเรียม

$$^{238}_{92}\mathrm{U} + {}^{2}_{1}\mathrm{H} \longrightarrow {}^{238}_{92}\mathrm{Np} + 2\ {}^{1}_{0}\mathrm{n}$$

หลังจากนั้นได้ทำธาตุในกลุ่มนี้ได้อีก 20 ธาตุ ทุกตัวเป็นไอโซโทปกัมมันตรังสีและเรียกชื่อธาตุกลุ่มนี้ว่า กลุ่มแทรนส์ยูเรเนียม (transuranium element) ดังแสดงไว้ในตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 **ธาตุในกลุ่มแทรนส์ยูเรเนียม**

เลขอะตอม	ชื่อ	สัญลักษณ์	ปฏิกิริยาการสังเคราะห์
93	Neptunium	Np	$^{238}_{92}U + {}^{1}_{0}n \longrightarrow {}^{239}_{93}Np + {}^{0}_{-1}\beta$
94	Plutonium	Pu	$^{239}_{93}Np \longrightarrow {}^{239}_{94}Pu + {}^{0}_{-1}\beta$
95	Americium	Am	$^{239}_{94}Pu + {}^{1}_{0}n \longrightarrow {}^{240}_{95}Am + {}^{0}_{-1}\beta$
96	Curium	Cm	$^{239}_{94}Pu + {}^{4}_{2}\alpha \longrightarrow {}^{242}_{96}Cm + {}^{1}_{0}n$
97	Berkelium	Bk	$^{241}_{95}Am + {}^{4}_{2}\alpha \longrightarrow {}^{243}_{97}Bk + 2{}^{1}_{0}n$
98	Californium	Cf	$^{242}_{96}Cm + {}^{4}_{2}\alpha \longrightarrow {}^{245}_{98}Cf + {}^{1}_{0}n$
99	Einsteinium	Es	$^{238}_{92}U + 15\,{}^{1}_{0}n \longrightarrow {}^{253}_{99}Es + 7{}^{0}_{-1}\beta$
100	Fermium	Fm	$^{238}_{92}U + 17{}^{1}_{0}n \longrightarrow {}^{255}_{100}Fm + 8{}^{0}_{-1}\beta$
101	Mendelevium	Md	$^{253}_{99}Es + {}^{4}_{2}\alpha \longrightarrow {}^{256}_{101}Md + {}^{1}_{0}n$
102	Nobelium	No	$^{246}_{96}Cm + {}^{12}_{6}C \longrightarrow {}^{254}_{102}No + 4{}^{1}_{0}n$
103	Lawrencium	Lr	$^{252}_{98}Cf + {}^{10}_{5}B \longrightarrow {}^{257}_{103}Lr + 5{}^{1}_{0}n$
104	Rutherfordium	Rf	$^{249}_{98}Cf + {}^{12}_{6}C \longrightarrow {}^{257}_{104}R_f + 4{}^{1}_{0}n$
105	Hahnium	Ha	$^{249}_{98}Cf + {}^{15}_{7}N \longrightarrow {}^{260}_{105}Ha + 4{}^{1}_{0}n$
106	Seaborgium	Sg	$^{249}_{98}Cf + {}^{18}_{8}O \longrightarrow {}^{263}_{106}Sg + 4{}^{1}_{0}n$
107	Neilsbohrium	Ns	$^{209}_{83}Bi + {}^{54}_{24}Cr \longrightarrow {}^{202}_{107}Ns + {}^{1}_{0}n$
108	Hassium	Hs	$^{208}_{82}Pb + {}^{58}_{26}Fe \longrightarrow {}^{265}_{108}Hs + {}^{1}_{0}n$
109	Meitnerium	Mt	$^{209}_{83}Bi + {}^{58}_{26}Fe \longrightarrow {}^{266}_{109}Mt + {}^{1}_{0}n$

ดังนั้น ปฏิกิริยาการแปรนิวเคลียสจึงทำให้ความฝันของนักเล่นแร่แปรธาตุเป็นจริง แต่คงไม่ได้ทำให้เกิดความร่ำรวยตามที่หวัง เพราะในการสร้างทองขึ้นมานั้นจะต้องใช้โลหะแพลทินัมบริสุทธิ์เป็นสารตั้งต้น แล้วระดมยิงด้วยนิวตรอนเพื่อให้แพลทินัมเปลี่ยนเป็นทอง แต่โลหะแพลทินัมบริสุทธิ์มีราคาสูงกว่าทองมาก

$$^{198}_{78}Pt + {}^{1}_{0}n \longrightarrow {}^{199}_{78}Pt$$

$$^{199}_{78}Pt \longrightarrow {}^{199}_{79}Au + {}^{0}_{-1}\beta$$

3. ปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิชชัน (Nuclear fission reaction)

ตามที่ได้กล่าวมาแล้วว่านิวเคลียสจะมีเสถียรภาพ ถ้าอัตราส่วนนิวตรอนต่อโปรตอนมีค่า 1:1 หรือเข้าใกล้ค่านี้ เช่น โพรเทียม ($^{1}_{1}H$) และดิวเทอเรียม ($^{2}_{1}H$) จะเป็นไอโซโทปที่เสถียรของไฮโดรเจนในขณะที่ทริเทียม ($^{3}_{1}H$) เป็นไอโซโทปกัมมันตรังสี C-12 และ C-13 ก็เป็นไอโซโทปของคาร์บอนที่เสถียร แต่ C-14 ซึ่งมีอัตราส่วนนิวตรอนต่อโปรตอนสูงขึ้นจะเป็นกัมมันตรังสี หรือการเพิ่มนิวตรอนให้กับ Pt-198 จะทำให้เกิดการแปรนิวเคลียสเป็น Au-199 พร้อมทั้งคายอนุภาคบีตาออกมา ดังนั้นวิธีง่ายๆ ในการทำให้นิวเคลียสเสถียรน้อยลงคือการเพิ่มจำนวนนิวตรอนให้กับนิวเคลียส

ในปี ค.ศ. 1938 หนึ่งปีก่อนเกิดสงครามโลกครั้งที่ 2 Otto Hahn นักเคมีรังสีชาวเยอรมันและเพื่อนร่วมงาน Fritz Strassmann ได้ศึกษาการยิงยูเรเนียมด้วยนิวตรอน และพบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นไอโซโทปของแบเรียม ซึ่งมีเลขมวลและเลขอะตอมน้อยกว่ายูเรเนียมประมาณสองในสาม ซึ่งอธิบายไม่ได้ว่าเพราะเหตุใดจึงเป็นเช่นนั้น จึงได้ปรึกษากับ Lise Meitner นักฟิสิกส์ชาวออสเตรียที่เคยทำงานร่วมกันมาก่อนเกี่ยวกับกัมมันตภาพรังสี และในที่สุดก็ได้ข้อสรุปตรงกันว่านิวตรอนทำให้นิวเคลียสของยูเรเนียม แตกออกเป็นส่วนๆ ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่ไม่เคยพบกันมาก่อน Lise Meitner ได้ใช้คำว่า 'nuclear fission' เป็นคนแรกสำหรับการแตกออกของนิวเคลียส

ต่อมาไม่นาน ก็เป็นที่รู้กันว่าปฏิกิริยาฟิชชันแตกต่างจากปฏิกิริยานิวเคลียร์อื่นๆ ที่รู้จักกันในสมัยนั้น ปฏิกิริยาฟิชชันจะปลดปล่อยพลังงานมหาศาล มากกว่าที่ได้ออกมาจากการสลายตัวตามปกติของกัมมันตรังสีที่ให้อนุภาคเล็กๆ ออกมา และเนื่องจากขณะนั้นใกล้เกิดสงครามโลก และการรับรู้ถึงพลังงานมหาศาลที่จะได้ออกมาจากปฏิกิริยาฟิชชัน ทำให้การวิจัยศึกษาทางด้านนิวเคลียร์เป็นไปอย่างรีบเร่ง เพราะปฏิกิริยาฟิชชันมีศักยภาพในการทำระเบิดที่มีอานุภาพร้ายแรง

การศึกษาทดลองพบว่า การเติมนิวตรอนให้กับ U-235 จะทำให้เกิดปฏิกิริยาฟิชชันได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าการใช้ U-238 ซึ่งเป็นไอโซโทปที่มีมากที่สุดของยูเรเนียมในธรรมชาติ (U-238 มีอยู่มากกว่า 99% ส่วน U-235 มีน้อยกว่า 0.75% ในธรรมชาติ)

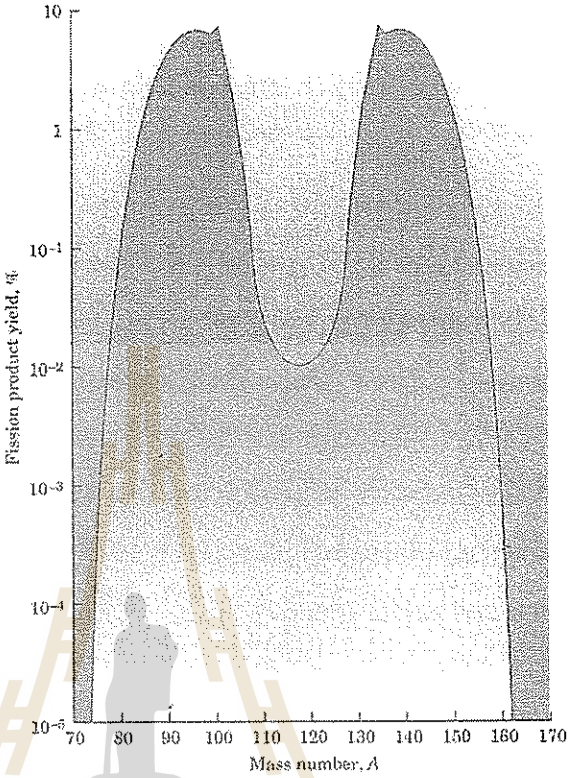
U-235 เกิดปฏิกิริยาฟิชชันได้หลายแบบด้วยกัน และทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ได้หลายชุด เช่น

$$^{235}_{92}U + ^{1}_{0}n \longrightarrow ^{137}_{52}Te + ^{97}_{40}Zr + 2\,^{1}_{0}n$$

$$^{235}_{92}U + ^{1}_{0}n \longrightarrow ^{140}_{56}Ba + ^{93}_{36}Kr + 3\,^{1}_{0}n$$

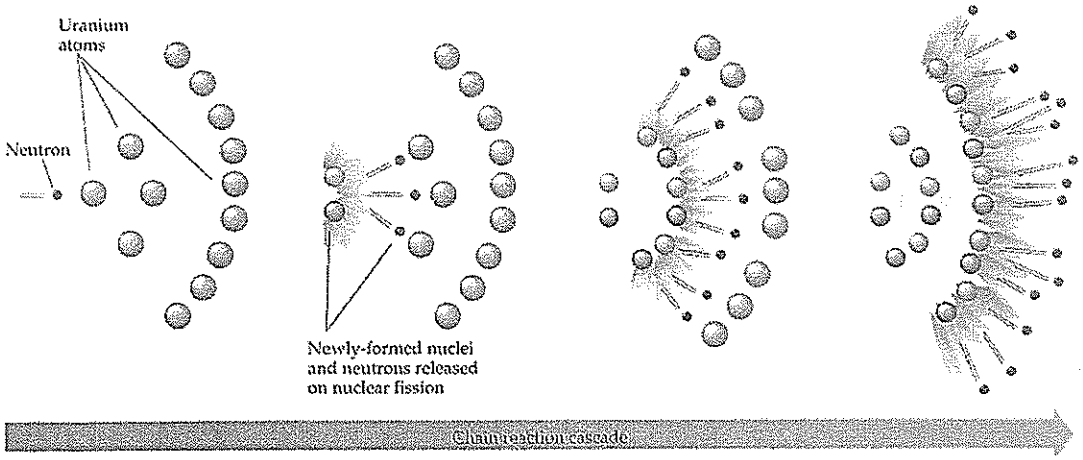
$$^{235}_{92}U + ^{1}_{0}n \longrightarrow \left[^{236}_{92}U\right] \longrightarrow ^{90}_{38}Sr + ^{144}_{54}Xe + 2\,^{1}_{0}n$$

และอาจเกิดปฏิกิริยาฟิชชันในแบบอื่นๆ ได้อีก ผลิตภัณฑ์ที่ได้จึงมีไอโซโทปมากกว่า 200 ชนิดของธาตุ 35 ตัว ซึ่งมีมวลต่างๆ กัน ภาพที่ 5.4 แสดงปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาฟิชชันของ U-235



ภาพที่ 5.4 **ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาฟิชชันของ U-235**

นอกจากไอโซโทปชนิดต่างๆ แล้ว ปฏิกิริยาฟิชชันยังปลดปล่อยนิวตรอนจำนวนหนึ่งออกมาด้วย นิวตรอนเหล่านี้สามารถทะลุทะลวงเข้าไปในนิวเคลียสของ U-235 ตัวอื่นๆ และทำให้เกิดปฏิกิริยาฟิชชันต่อเนื่องเป็นแบบลูกโซ่ (chain reaction) ขึ้นได้ (ดูภาพที่ 5.5) โดยเฉลี่ยในภาพรวมแล้ว ปฏิกิริยาฟิชชันของ U-235 หนึ่งปฏิกิริยาจะได้นิวตรอนออกมา 2.5 ตัว และถ้านิวตรอนที่ได้ออกมาทุกตัวทำให้เกิดปฏิกิริยาฟิชชันต่อไปได้ จะได้ว่าการแตกออกของ U-235 สองนิวเคลียส จะได้นิวตรอนออกมาในการทำให้ U-235 แตกตัวได้อีกห้านิวเคลียส ดังนั้นการแตกตัวของ U-235 เพียงหนึ่งนิวเคลียสจะทำให้เกิดปฏิกิริยาฟิชชันต่อเนื่องเป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ และใช้ U-235 ที่มีอยู่ทั้งหมด และปลดปล่อยพลังงานจำนวนมหาศาลออกมาได้ทันที ดังนั้นถ้าสามารถควบคุมให้ปฏิกิริยาค่อยๆ ปล่อยพลังงานออกมา เราจะกักเก็บพลังงานนั้นนำไปใช้ผลิตกระแสไฟฟ้า และใช้ในรูปแบบต่างๆ ได้มากมาย แต่ถ้าปล่อยให้พลังงานทั้งหมดออกมาในคราวเดียวกันก็จะกลายเป็นการระเบิดครั้งใหญ่



ภาพที่ 5.5 แผนภาพแสดงการเกิดปฏิกิริยาฟิชชันต่อเนื่องเป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ โดยเริ่มต้นจากนิวตรอนเพียง 1 ตัว

มวลวิกฤต (critical mass)

จากการที่มีความคิดในการทำอะตอมิกบอมบ์ที่สามารถเปลี่ยนพลังงานที่ถูกปลดปล่อยออกมาทันทีทันใดจากปฏิกิริยาลูกโซ่ให้เป็นแรงระเบิดอย่างรุนแรงเพื่อใช้เป็นอาวุธในการทำลายล้าง สิ่งที่ต้องการรู้คือ ค่ามวลวิกฤติของ U-235 ซึ่งเป็นปริมาณมวลน้อยที่สุดของวัสดุที่เกิดปฏิกิริยาฟิชชันได้อย่างต่อเนื่อง ซึ่งปริมาณมวลจะเข้าใกล้ค่ามวลวิกฤติเมื่อมวลนั้นมีมากพอที่จะทำให้นิวตรอนทั้งหมดที่ปล่อยออกมาเข้าไปชนนิวเคลียสของธาตุที่แตกตัวได้ และทำให้เกิดปฏิกิริยาแตกตัวแบบลูกโซ่ไปเรื่อยๆ ทำให้ได้พลังงานออกมาอย่างต่อเนื่อง

ไอโซโทปที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ต่อเนื่องมิได้มีแต่ U-235 เท่านั้น Pu-239 เป็นไอโซโทปกัมมันตรังสีอีกตัวหนึ่งที่มีในธรรมชาติที่เกิดปฏิกิริยาฟิชชันแบบต่อเนื่องได้และยังเกิดได้ดีกว่า U-235 พร้อมทั้งให้พลังงานออกมามากกว่าถึง 20%

ปฏิกิริยาฟิชชันที่นักวิทยาศาสตร์ทำให้เกิดขึ้นในลักษณะนี้ เป็นปฏิกิริยาที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ และในการทำระเบิดนิวเคลียร์ นอกจากการใช้วิธีเหนี่ยวนำทำให้เกิดปฏิกิริยาฟิชชันได้แล้ว ปฏิกิริยาฟิชชันอาจเกิดได้เองตามธรรมชาติอีกด้วย โดยนิวเคลียร์ที่อยู่ทางด้านปลายของแถบเสถียรภาพ อาจจะเกิดปฏิกิริยาฟิชชันแตกออกเป็นส่วนๆ แทนที่จะปล่อยอนุภาคแอลฟาออกมา ถึงแม้จะเกิดไม่บ่อยนักก็ตาม U-235 เป็นไอโซโทปตัวหนึ่งที่เกิดปฏิกิริยาฟิชชันได้เองในธรรมชาติ ดังนี้

$$^{235}_{92}\mathrm{U} \longrightarrow {}^{140}_{56}\mathrm{Ba} + {}^{92}_{36}\mathrm{Kr} + 3{}^{1}_{0}\mathrm{n}$$

การเปลี่ยนแปลงมวลและพลังงานระหว่างปฏิกิริยาฟิชชัน

ตามที่ได้กล่าวมาแล้วว่ากระบวนการทางนิวเคลียร์จะให้พลังงานจำนวนมหาศาลออกมา พลังงานเหล่านี้มาจากไหน? และทำไมจึงมีจำนวนมหาศาล? คำตอบของปัญหานี้ได้มาจากสมการของไอน์สไตน์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าถึงแม้พลังงานและมวลจะแตกต่างกัน แต่มวลและพลังงานสามารถเปลี่ยนไปมาซึ่งกันและกันได้ดังสมการ

$$E = mc^2$$

ในปฏิกิริยาฟิชชัน จะมีมวลบางส่วนหายไป นั่นคือ มวลรวมของผลิตภัณฑ์จะน้อยกว่ามวลของสารตั้งต้น ดังตัวอย่างในปฏิกิริยานิวเคลียร์

$$^{235}_{92}U + ^{1}_{0}n \longrightarrow ^{94}_{38}Sr + ^{139}_{54}Xe + 3\,^{1}_{0}n$$

มวลของอนุภาค

$^{235}_{92}U = 235.0439$ amu

$^{94}_{38}Sr = 93.9154$ amu

$^{139}_{54}Xe = 138.9178$ amu

$^{1}_{0}n = 1.0087$ amu

การเปลี่ยนแปลงมวลในการเกิดปฏิกิริยาฟิชชันของ U-235 หาได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\Delta m &= \sum(\text{มวล})_{\text{สารผลิตภัณฑ์}} - \sum(\text{มวล})_{\text{สารตั้งต้น}} \\ &= [93.9154 + 138.9178 + 3(1.0087)] - [235.0493 + (1.0087)] \text{ amu} \\ &= -0.1933 \text{ amu}\end{aligned}$$

เครื่องหมายลบแสดงว่าระบบมีการสูญเสีย 0.1933 amu ต่อยูเรเนียม 1 อะตอม หรือเท่ากับการสูญเสีย $0.1933\ \text{g mol}^{-1}$ หรือ $1.933\times10^{-4}\ \text{kg mol}^{-1}$ เมื่อทราบความเร็วของแสง $(2.998\times10^{8}\ \text{ms}^{-1})$ จะใช้สมการของไอน์สไตน์ คำนวณหาพลังงานซึ่งสมมูลกับมวลที่หายไปได้ดังนี้

$$\begin{aligned}E &= mc^2 \\ &= (1.933\times10^{-4}\ \text{kg mol}^{-1})(2.998\times10^{8}\ \text{ms}^{-1})^2 \\ &= 1.737\times10^{13}\ \text{kg m}^2\ \text{s}^{-2}\ \text{mol}^{-1} \\ &= 1.737\times10^{13}\ \text{J mol}^{-1} \quad (1\ \text{J} = 1\ \text{kg m}^2\ \text{s}^{-2}) \\ &= 1.737\times10^{10}\ \text{kJ mol}^{-1}\end{aligned}$$

ผลลัพธ์ คือ พลังงานที่ได้ออกมาจากปฏิกิริยาฟิชชันของ U-235 หนึ่งโมล ซึ่งเป็นพลังงานที่มีค่ามหาศาล มีค่ามากกว่าปฏิกิริยาเคมีชนิดคายความร้อนประมาณล้านเท่า ในปฏิกิริยาฟิชชันนี้ประมาณ 88% ของพลังงานที่ปล่อยออกมาจะอยู่ในรูปพลังงานจลน์ของอนุภาคผลิตภัณฑ์และอีก 12% อยู่ในรูปของพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

พลังงานยึดเหนี่ยวนิวเคลียส (Nuclear binding energy)

ค่าพลังงานยึดเหนี่ยวนิวเคลียสจะบอกถึงเสถียรภาพของนิวเคลียส เพราะจะเป็นค่าพลังงานที่ปล่อยออกมา เมื่อโปรตอนและนิวตรอนรวมตัวกันเป็นนิวเคลียส ตัวอย่างเช่นในการเกิดเป็น $^{57}_{27}\mathrm{Co}$ ซึ่งมีมวล 56.9215 amu จากโปรตอน 27 ตัว และนิวตรอน 30 ตัว โดยที่มวลของโปรตอนและนิวตรอนมีค่า 1.00728 amu และ 1.00866 amu ตามลำดับจะมีการสูญเสียมวลดังนี้

มวลของโปรตอน 27 ตัว	= 27 (1.00728)	= 27.1966 amu
มวลของนิวตรอน 30 ตัว	= 30 (1.00866)	= 30.2598 amu
		= 57.4564 amu
มวลของนิวเคลียส $^{57}_{27}\mathrm{Co}$		= 56.9215 amu
มวลที่สูญเสียไป		= 0.5349 amu

เปลี่ยนเป็นจำนวนกรัมได้

$$= 0.5349 \text{ amu} \times \frac{1\text{g}}{6.022\times10^{23} \text{ amu}}$$

$$= 8.882\times10^{-25} \text{ g}$$

$$= 8.882\times10^{-28} \text{ kg}$$

ซึ่งคิดเป็นพลังงานที่สมมูลกันได้ดังนี้

$$E = mc^2$$

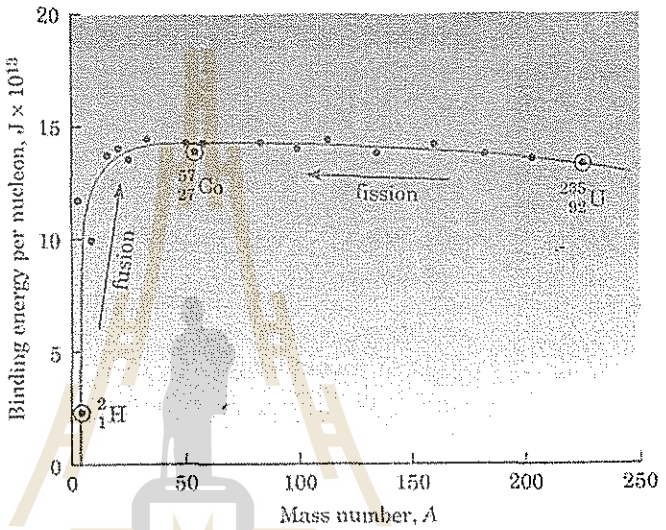
$$= (8.882\times10^{-28} \text{ kg})(2.998\times10^{8} \text{ ms}^{-1})^2$$

$$= 7.984\times10^{-11} \text{ J}$$

ซึ่งตามปกติพลังงานยึดเหนี่ยวนิวเคลียสจะแสดงในรูปของพลังงานต่อจำนวนนิวคลีออน (จำนวนโปรตอน + จำนวนนิวตรอน) ดังนั้นจะได้พลังงานยึดเหนี่ยวนิวเคลียสต่อนิวคลีออน

$$\frac{7.984\times10^{-11} \text{ J}}{57 \text{ nucleons}} = 1.401\times10^{-12} \text{ J nucleon}^{-1}$$

ค่าพลังงานยึดเหนี่ยวนิวเคลียสต่อจำนวนนิวคลีออน ทำให้เราเปรียบเทียบเสถียรภาพของนิวเคลียสทุกชนิดได้บนฐานเดียวกัน ภาพที่ 5.6 แสดงการแปรผันของพลังงานยึดเหนี่ยวนิวเคลียสกับเลขมวล จะเห็นว่ากราฟจะชันขึ้นอย่างรวดเร็วทางด้านที่เลขมวลมีค่าน้อยและจะมีค่าสูงสุดเมื่อนิวเคลียสมีเลขมวลปานกลาง (40 – 100) และแสดงให้เห็นด้วยว่า U-235 จะเกิดปฏิกิริยาฟิชชันโดยแตกเป็นสองส่วนที่เบากว่าเดิม และมีเลขมวลอยู่ตรงช่วงกลางของกราฟ และจะมีเสถียรภาพเพิ่มขึ้น เพราะพลังงานยึดเหนี่ยวนิวเคลียสต่อจำนวนนิวคลีออนเพิ่มขึ้น ซึ่งจะสมมูลกับพลังงานที่ปล่อยออกมาในระหว่างปฏิกิริยาฟิชชัน



ภาพที่ 5.6 พลังงานยึดเหนี่ยวนิวเคลียส

4. ปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิวชัน (Nuclear fusion reaction)

จากกราฟของพลังงานยึดเหนี่ยวนิวเคลียสในภาพที่ 5.6 จะเห็นว่า การเปลี่ยนนิวคลีไอเบาๆ ด้านซ้ายมือไปเป็นนิวคลีไอที่หนักขึ้น จะทำให้พลังงานยึดเหนี่ยวนิวเคลียสต่อนิวคลีออนเพิ่มขึ้นเช่นกัน และจะปลดปล่อยพลังงานมหาศาลออกมามากกว่าปฏิกิริยาฟิชชันเสียอีก กระบวนการทางนิวเคลียร์ลักษณะนี้ เรียกว่า ปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิวชัน เพราะนิวคลีไอขนาดเล็ก มารวมตัวกันเป็นนิวคลีไอที่ใหญ่ขึ้นกว่าเดิม แต่ต้องใช้อุณหภูมิสูงมากระดับ 10 ล้าน-100 ล้านองศาเซลเซียส เพราะต้องเอาชนะแรงผลักระหว่างนิวเคลียส

แหล่งกำเนิดพลังงานของดวงอาทิตย์มาจากปฏิกิริยาหลายขั้นตอน แต่ผลสุทธิ คือ ปฏิกิริยาฟิวชันของโปรตอน 4 ตัว กลายเป็นนิวเคลียสของฮีเลียม 1 อนุภาค ปฏิกิริยาแบบหนึ่งที่เกิดขึ้นได้คือ

$$^{1}_{1}H + {}^{1}_{1}H \longrightarrow {}^{2}_{1}H + {}^{0}_{1}e$$

$$^{2}_{1}H + {}^{1}_{1}H \longrightarrow {}^{3}_{2}He$$

$$^{3}_{2}He + {}^{1}_{1}H \longrightarrow {}^{4}_{2}He + {}^{0}_{1}e$$

ปฏิกิริยาสุทธิ $4\,{}^{1}_{1}H \longrightarrow {}^{4}_{2}He + 2\,{}^{0}_{1}e$

การประยุกต์ปฏิกิริยาฟิวชันในปัจจุบันมีเพียงการนำไปทำระเบิดไฮโดรเจน ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อระเบิดนิวเคลียร์ การที่ยังไม่สามารถนำปฏิกิริยาฟิวชันมาเป็นแหล่งพลังงานเช่นเดียวกับปฏิกิริยาฟิชชัน เพราะที่อุณหภูมิ 100 ล้านองศาเซลเซียส ไม่มีโมเลกุลชนิดใดอยู่ได้ อะตอมส่วนใหญ่จะไม่มีอิเล็กตรอนเหลืออยู่ สสารในสถานะที่เป็นแก๊สและประกอบด้วยไอออนบวกและอิเล็กตรอนเรียกว่า พลาสมา ปัญหาคือไม่สามารถหาภาชนะมาบรรจุพลาสมาได้ มีการวิจัยทดลองใช้สนามแม่เหล็กกักเก็บพลาสมา ส่วนการทำให้ได้อุณหภูมิสูงระดับนั้นก็มีการทดลองใช้เลเซอร์หลายชุดยิงเข้าไปที่เชื้อเพลิงไฮโดรเจนเม็ดเล็กๆ ซึ่งทำให้เม็ดเชื้อเพลิงได้รับความร้อนจนทำให้เกิดการระเบิดเข้า (implode) คือ ยุบตัวเข้าภายในและมีปริมาตรเล็กลง ซึ่งทำให้เกิดปฏิกิริยาฟิวชันขึ้นได้

ถ้าสามารถแก้ปัญหาตรงนี้ได้ ปฏิกิริยาฟิวชันจะเป็นแหล่งของพลังงานมหาศาลของโลกเราได้ เพราะปริมาณของดิวทีเรียม ($^{2}_{1}H$) ในโลกนี้มีอยู่มาก โลกของเรามีน้ำอยู่ถึง 1.5×10^{21} ลิตรและปริมาณดิวทีเรียมในธรรมชาติก็มีอยู่ถึง 1.5×10^{-2} % ซึ่งทำให้มีปริมาณดิวทีเรียมอยู่ทั้งหมดโดยประมาณ 4.5×10^{21} g หรือ 5.0×10^{15} ตัน และค่าใช้จ่ายที่ต้องใช้ในการแยกดิวทีเรียมก็ไม่สูงนักด้วย

5. เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์

เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์คืออุปกรณ์ที่ทำให้เกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิชชันขึ้นในสภาวะที่ควบคุมได้ เพื่อที่จะได้นำพลังงานที่ได้ออกมาใช้ประโยชน์ เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์มีอยู่หลายชนิด แต่ที่สำคัญมีอยู่ 3 แบบ คือ เครื่องปฏิกรณ์น้ำเบา (light water reactor) เครื่องปฏิกรณ์น้ำหนัก (heavy water reactor) และ เครื่องปฏิกรณ์บรีเดอร์ (breeder reactor)

เครื่องปฏิกรณ์น้ำเบา

ในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์นั้น จะควบคุมให้มีนิวตรอนที่มาจากการแตกตัวของนิวเคลียสเพียงตัวเดียวเท่านั้นที่จะไปทำให้เกิดปฏิกิริยาฟิชชันต่อไปได้ เพื่อทำให้ควบคุมปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่เกิดขึ้นได้ ในการทำให้ปฏิกิริยาฟิชชันเกิดได้อย่างมีประสิทธิภาพนั้น ความเร็วของนิวตรอนเป็นแฟกเตอร์หนึ่งที่สำคัญ นิวตรอนที่มีความเร็วต่ำ (slow neutron) มีประสิทธิภาพในการแยกนิวเคลียสของ U-235

ได้ดีกว่านิวตรอนที่มีความเร็วสูง (fast neutron) แต่เนื่องจากปฏิกิริยาฟิชชันที่เกิดขึ้นนั้นปล่อยความร้อนออกมาสูงมาก นิวตรอนที่เกิดขึ้นจึงมีความเร็วสูง จึงต้องทำให้ความเร็วลดลงก่อนจะทำให้เกิดปฏิกิริยาฟิชชัน การลดความเร็วของนิวตรอนทำได้โดยใช้มอเดอเรเตอร์ (moderator) ซึ่งเป็นสารที่ลดพลังงานจลน์ของนิวตรอนได้ มอเดอเรเตอร์ที่เหมาะสม ควรเป็นของไหลเพื่อที่จะใช้เป็นสารหล่อเย็นได้ด้วย ควรมีความร้อนจำเพาะสูง ไม่เป็นพิษและราคาไม่สูงนักและไม่เปลี่ยนเป็นสารกัมมันตรังสีเมื่อถูกระดมยิงด้วยนิวตรอน ซึ่งน้ำนับว่าเป็นมอเดอเรเตอร์ที่เหมาะสม เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ที่ใช้น้ำเป็นตัวลดพลังงานของนิวตรอนเรียกว่าเครื่องปฏิกรณ์น้ำเบา เพราะโพรเทียม ($^{1}_{}H$) เป็นไอโซโทปที่เบาที่สุดของไฮโดรเจน

เชื้อเพลิงนิวเคลียร์ที่ใช้คือ ยูเรเนียมในรูปของสารประกอบออกไซด์ U_3O_8 ในธรรมชาติมี U-235 อยู่ประมาณ 0.7% ซึ่งเป็นความเข้มข้นที่ต่ำเกินไปที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาฟิชชันต่อเนื่องเป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ได้ จึงต้องนำไปเพิ่มความเข้มข้นจนถึง 3-4% ก่อนนำมาใช้เพื่อทำให้เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ชนิดน้ำเบาทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่วนการควบคุมจำนวนนิวตรอนนั้น ทำได้โดยใช้แท่งแคดเมียมหรือแท่งบอรอนแทรกลงไประหว่างแท่งเชื้อเพลิง (ดูภาพที่ 5.7) แคดเมียมและบอรอนมีสมบัติในการจับนิวตรอนได้ดี

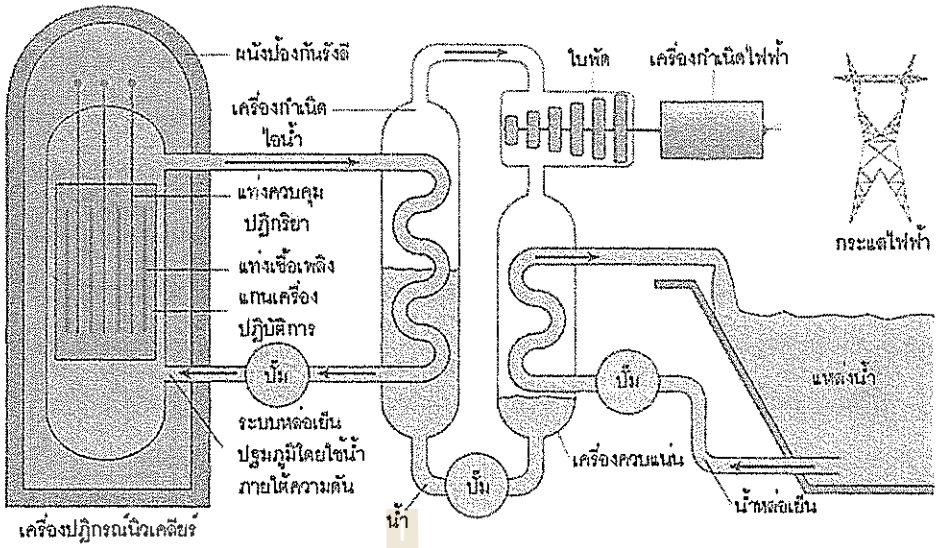
$$^{113}_{48}Cd + ^{1}_{0}n \longrightarrow ^{114}_{48}Cd + \gamma$$

$$^{10}_{5}B + ^{1}_{0}n \longrightarrow ^{7}_{3}Li + ^{4}_{2}He$$

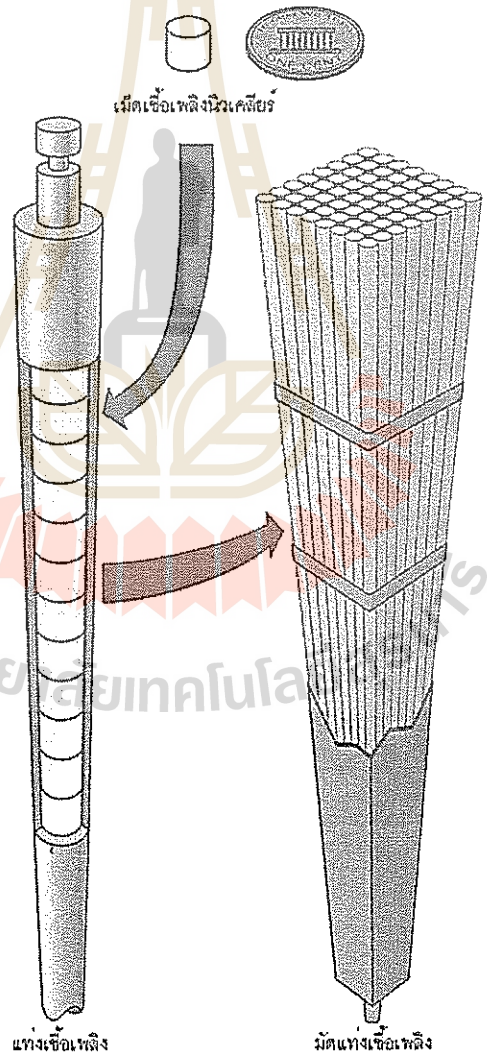
โดยที่ γ หมายถึงรังสีแกมมา ถ้าไม่ใช้แท่งควบคุม ความร้อนที่เกิดขึ้นจะทำให้แกนเชื้อเพลิงหลอมเหลว (melt down) และปล่อยสารกัมมันตรังสีออกสู่สิ่งแวดล้อม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ก)



ข)



ภาพที่ 5.7 ก) แผนภาพของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์

ข) การประกอบแท่งเชื้อเพลิง

จากภาพที่ 5.7 จะเห็นว่าความร้อนที่ได้จากปฏิกิริยาฟิชชันถูกนำออกจากแกนของเครื่องปฏิกรณ์โดยตัวหล่อเย็นปฐมภูมิ แล้วถ่ายทอดความร้อนต่อไปให้กับน้ำในเครื่องกำเนิดไอน้ำซึ่งจะไปหมุนใบพัดของเทอร์ไบน์เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าต่อไป บางที่สามารถเปลี่ยนน้ำจำนวน 33,000 แกลลอน ให้เป็นไอน้ำได้ภายใน 1 นาที และเนื่องจากโรงไฟฟ้านิวเคลียร์จำเป็นต้องใช้น้ำหล่อเย็นจำนวนมากในการควบแน่นไอน้ำกลับมาใช้ใหม่ ส่วนมากจึงมีสถานที่ตั้งใกล้กับแม่น้ำ ทะเลสาบ หรือทะเล ซึ่งทำให้เกิดมลพิษทางความร้อนขึ้นได้ เหมือนกับโรงไฟฟ้าอื่นๆ ที่ต้องใช้น้ำจำนวนมากในวัตถุประสงค์เดียวกัน (ที่ประเทศไทยมีปัญหาเรื่องนี้จากโรงงานไฟฟ้า ที่ตำบลท่าขนอม จ.นครศรีธรรมราช อุณหภูมิของน้ำที่สูงขึ้นเพียงเล็กน้อย ทำให้ตัวอ่อนของสัตว์น้ำต่างๆ ตายได้)

เครื่องปฏิกรณ์น้ำหนัก

เครื่องปฏิกรณ์ชนิดนี้ใช้ D_2O หรือน้ำหนักเป็นมอเดอเรเตอร์แทนน้ำ แต่เนื่องจาก D_2O ลดความเร็วของนิวตรอนได้ไม่ดีเท่า H_2O เครื่องปฏิกรณ์ชนิดนี้จึงไม่จำเป็นต้องใช้ U-235 ความเข้มข้นสูงในการทำปฏิกิริยาฟิชชัน เพราะนิวตรอนมีความเร็วสูงจึงเคลื่อนที่ได้ระยะทางไกล และโอกาสที่จะไปชนเป้า U-235 ก็สูงด้วย U-235 ส่วนใหญ่จึงมีส่วนในการเกิดปฏิกิริยาฟิชชัน

ดังนั้น จึงไม่จำเป็นต้องมีเครื่องมือราคาแพงในการเพิ่มความเข้มข้นของ U-235 แต่จะต้องเตรียม D_2O ในปริมาณมาก ซึ่งทำได้โดยการกลั่นลำดับส่วนน้ำธรรมดา หรืออาจใช้วิธีการแยกโดยกระแสไฟฟ้า แต่ค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง

เครื่องปฏิกรณ์บรีเดอร์

ในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ 2 ชนิดแรกนั้นมีปัญหาเกิดขึ้นอยู่ 2-3 ประการคือ ปริมาณเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ที่ต้องได้มาโดยไม่เสียค่าใช้จ่ายสูงจนเกินไป การกำจัดเชื้อเพลิงที่ใช้แล้วและความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจของการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยพลังงานนิวเคลียร์

ตามที่ได้กล่าวมาแล้วว่าเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ที่เกิดปฏิกิริยาฟิชชันได้ดีคือ U-235 ซึ่งมีอยู่น้อยในธรรมชาติ ได้มีการประเมินกันว่าในอัตราการผลิตพลังงานเท่าที่เป็นอยู่ในปัจจุบัน เราจะนำ U-235 มาใช้โดยเสียค่าใช้จ่ายในระดับที่ยอมรับได้อีกเพียง 50-100 ปี เท่านั้น

หนทางหนึ่งที่จะยืดอายุปริมาณเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ออกไปอีกราว 100 เท่า หรือมากกว่านั้นทำได้โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ชนิดใหม่ที่เรียกว่าเครื่องปฏิกรณ์บรีเดอร์ ซึ่งเป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่ผลิตเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ได้มากกว่าที่ถูกใช้ไป เครื่องปฏิกรณ์บรีเดอร์มีอยู่หลายแบบโดยใช้เชื้อเพลิงนิวเคลียร์และชุดของปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่แตกต่างกัน เครื่องปฏิกรณ์บรีเดอร์ชนิดหนึ่งใช้ U-238 (เป็นเชื้อเพลิงที่เกิดปฏิกิริยาฟิชชันได้ไม่ดีนัก แต่มีอยู่ปริมาณมากในธรรมชาติ) ร่วมกับ Pu-239 โดยปฏิกิริยาต่างๆ ที่เกี่ยวข้องมีดังนี้

เมื่อนิวตรอนความเร็วสูงที่ได้จากการแตกตัวของ Pu-239 หรือกระบวนการอื่นที่เกิดขึ้นเองได้วิ่งเข้าชน U-238 จะเกิด Pu-239 ซึ่งเป็นไอโซโทปที่เกิดปฏิกิริยาฟิชชันได้ดี

$$^{238}_{92}U + ^{1}_{0}n \longrightarrow ^{239}_{92}U$$

$$^{239}_{92}U \longrightarrow ^{239}_{93}Np + ^{0}_{-1}\beta \qquad t_{\frac{1}{2}} = 23.4 \text{ นาที}$$

$$^{239}_{93}Np \longrightarrow ^{239}_{94}Pu + ^{0}_{-1}\beta \qquad t_{\frac{1}{2}} = 2.35 \text{ วัน}$$

ดังนั้นในระหว่างการเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ซึ่งให้พลังงานออกมา ก็มีการสร้างเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ Pu-239 ขึ้นมาด้วยในขณะเดียวกัน โดยเทคนิคนี้จะทำให้เรายืดอายุปริมาณเชื้อเพลิงต่อไปได้อีกหลายพันปี จากการที่เครื่องปฏิกรณ์ชนิดนี้ใช้นิวตรอนความเร็วสูงและใช้โซเดียมในสภาวะของเหลวเป็นตัวหล่อเย็น บางทีจึงเรียกเครื่องปฏิกรณ์ชนิดนี้ว่า 'liquid metal fast breeder (LMFB) reactor

ไอโซโทปที่สำคัญอีกชนิดหนึ่งที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องปฏิกรณ์บรีเดอร์ได้คือ Th-232 ซึ่งจับนิวตรอนความเร็วต่ำแล้วกลายเป็น U-233 ซึ่งเกิดปฏิกิริยาฟิชชันได้

$$^{232}_{90}Th + ^{1}_{0}n \longrightarrow ^{233}_{90}Th$$

$$^{233}_{90}Th \longrightarrow ^{233}_{91}Pa + ^{0}_{-1}\beta \qquad t_{\frac{1}{2}} = 22 \text{ นาที}$$

$$^{233}_{91}Pa \longrightarrow ^{233}_{92}U + ^{0}_{-1}\beta \qquad t_{\frac{1}{2}} = 27.4 \text{ วัน}$$

จะเห็นว่าเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ชนิดบรีเดอร์นี้มีข้อเด่นทางด้านการผลิตพลังงาน อายุการใช้งานก็นานกว่า และค่าใช้จ่ายในการผลิตก็ต่ำกว่าเครื่องปฏิกรณ์ 2 แบบแรก แต่จะต้องลงทุนในตอนแรกค่อนข้างสูง และยังมีปัญหาทางด้านเทคนิคและการเมืองเข้ามาเกี่ยวข้องทำให้ไม่มีการก่อสร้างเครื่องปฏิกรณ์บรีเดอร์กันมากนัก และส่วนใหญ่ใช้ในการวิจัยมากกว่าจะทำในเชิงธุรกิจ ปัญหาใหญ่ทางการเมืองคือ เครื่องปฏิกรณ์บรีเดอร์สามารถผลิต Pu-239 ซึ่งสามารถนำไปผลิตอาวุธนิวเคลียร์ได้ การใช้เครื่องปฏิกรณ์บรีเดอร์กันมากๆ อาจทำให้ Pu-239 ตกไปอยู่ในการครอบครองของผู้ไม่หวังดีได้ นอกจากนี้ Pu-239 ยังมีอันตรายร้ายแรงต่อสุขภาพด้วย เพราะ Pu-239 จะปล่อยอนุภาคแอลฟาออกมา ถ้ามี Pu-239 เข้าสู่ร่างกาย ส่วนใหญ่จะไปจับอยู่ที่ปอด ไขกระดูกและอวัยวะอื่นๆ การกิน Pu-239 เข้าไป แม้เพียง 1 ไมโครกรัม ก็จะทำให้เกิดมะเร็งได้แล้ว

เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ที่ศูนย์วิจัยนิวเคลียร์องครักษ์

สำหรับเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์เครื่องใหม่ของสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติที่จะสร้างขึ้นที่อำเภอองครักษ์ จังหวัดนครนายกนั้น เป็นชนิดเครื่องปฏิกรณ์น้ำเบา จะมีแท่งเชื้อเพลิง 16 แท่ง แท่งควบคุม

ปฏิกิริยาซึ่งทำด้วยบอรอนคาร์ไบด์ (BC) 4 แท่ง เชื้อเพลิงที่ใช้คือ UErZrH โดยทำให้มีความเข้มข้นถึง 19.7% โดยน้ำหนัก พร้อมทั้งมีโรงงานที่จะดำเนินการเกี่ยวกับกากกัมมันตรังสีทั้งหมดของประเทศด้วย แต่ขณะนี้ยังมีข้อขัดแย้งกันอยู่กับชาวบ้านในพื้นที่

6. ระเบิดนิวเคลียร์

หลังจากที่ค้นพบศักยภาพของปฏิกิริยาฟิชชันที่เกิดแบบต่อเนื่องเป็นลูกโซ่ ที่จะให้พลังงานจำนวนมหาศาลออกมา และเนื่องจากอยู่ในภาวะใกล้สงครามโลกครั้งที่ 2 ทำให้การค้นคว้าทดลองในการที่จะสร้างระเบิดอำนาจทำลายล้างสูงเกิดขึ้น โดยเฉพาะสหรัฐอเมริกาซึ่งกลัวว่าเยอรมันจะทำระเบิดได้ก่อน จึงเริ่มดำเนินการ Manhattan Project เพื่อหาวิธีในการสร้างระเบิดนิวเคลียร์อย่างรีบด่วน มีสถานที่หลายแห่งซึ่งดำเนินการค้นคว้าวิจัยอย่างเป็นความลับ เช่นที่ Oak Ridge รัฐเทนเนสซี, Hanford รัฐวอชิงตัน และที่ Los Alamos รัฐนิวเม็กซิโก

ในกระบวนการผลิตระเบิดนิวเคลียร์ ขั้นตอนแรกต้องมีการแยก U-235 ออกจาก U-238 เสียก่อน โดยการเปลี่ยนแร่ยูเรเนียมซึ่งมีไอโซโทปทั้งสองชนิดอยู่ด้วยกันให้เป็นยูเรเนียมเฮซะฟลูออไรด์ (UF_6) ซึ่งอยู่ในสถานะแก๊สเสียก่อน แล้วจึงใช้สมบัติทางกายภาพที่แตกต่างกันระหว่าง $^{235}_{92}UF_6$ และ $^{238}_{92}UF_6$ แยกเอา U-235 ออกมาจากของผสมซึ่งมี U-238 เป็นส่วนใหญ่ได้โดยใช้เทคนิคการแพร่ของแก๊ส $^{235}UF_6$ เบากว่า $^{238}UF_6$ 3 amu จึงสามารถเคลื่อนที่ได้เร็วกว่าเล็กน้อย เมื่อให้แก๊สผสมของทั้งสองไอโซโทปแพร่ผ่านแผ่นเยื่อรูพรุนเล็กๆ $^{235}UF_6$ จะแพร่ผ่านแผ่นเยื่อได้เร็วกว่า $^{238}UF_6$ หลังจากนั้นจึงเปลี่ยน $^{235}UF_6$ ให้เป็นธาตุยูเรเนียมที่บริสุทธิ์ และเพื่อมิให้โครงการล้มเหลว การศึกษาจึงทำกันหลายทาง นอกเหนือจาก U-235 ก็ยังมีการศึกษาการใช้ Pu-239 ในการทำระเบิดด้วย และเป็นครั้งแรกที่มีการทดลองเปลี่ยนธาตุในสเกลขนาดใหญ่ มีการผลิต Pu-239 โดยการควบคุมปฏิกิริยาการจับนิวตรอนของ U-238 ที่ได้เคยกล่าวมาแล้ว หลังจากที่ผลิต U-235 และ Pu-239 ซึ่งเป็นเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ที่เกิดปฏิกิริยาฟิชชันได้แล้ว จึงมีการสร้างระเบิดนิวเคลียร์ขึ้น โดยหลักการคือ ต้องมีเชื้อเพลิงในปริมาณของมวลย่อยของมวลวิกฤตขนาดต่างๆ กัน แล้วออกแบบให้มวลย่อยของมวลวิกฤตนี้เข้ามารวมกันได้ค่ามวลวิกฤตซึ่งจะทำให้เกิดปฏิกิริยาฟิชชันแบบปฏิกริยาลูกโซ่ในทันที

ในครั้งนั้น สหรัฐฯ ได้ผลิตระเบิดนิวเคลียร์จากปฏิกิริยาฟิชชันแบบลูกโซ่ขึ้น 2 แบบ แบบแรกใช้ U-235 เป็นเชื้อเพลิงระเบิดมีขนาดความยาว 3 เมตร กว้าง 0.7 เมตร ให้ชื่อว่า 'Little Boy' ส่วนอีกแบบใช้ Pu-239 เป็นเชื้อเพลิงมีความยาว 3.25 เมตร กว้าง 1.5 เมตร ให้ชื่อว่า 'Fat man' ซึ่งในภายหลังได้นำระเบิดทั้งสองลูกนี้ไปถล่มเมืองฮิโรชิมา ในเช้าวันที่ 6 สิงหาคม ค.ศ. 1945 และเมืองนางาซากิในเช้าวันที่ 9 สิงหาคม ค.ศ. 1945 ทำให้ชาวญี่ปุ่นบาดเจ็บล้มตายไปกว่า 200,000 คน นอกจากนี้ผู้ที่รอดชีวิตจากความร้อนและแรงระเบิด ยังทนทุกข์ทรมานจากปริมาณรังสีที่ได้รับเข้าไปในระดับ

สูงต่อมาในภายหลังด้วย ระเบิดยูเรเนียมที่บอมบ์ฮิโรชิมานั้นมีพลังเทียบเท่ากับระเบิด TNT จำนวน 13,500 ปอนด์ ความร้อนระดับ 3000°C เผาผลาญอาคารบ้านเรือนในรัศมี 2 ไมล์ จากศูนย์กลางระเบิด ภายหลังจากการทิ้งระเบิด นักบินผู้ช่วยของเครื่องบิน B-29 ที่ได้เห็นลูกไฟ และกลุ่มเมฆรูปดอกเห็ดได้บันทึกเอาไว้ในภายหลังว่า "โอ้ พระเจ้า เราได้ทำอะไรลงไปนี่" สาเหตุหนึ่งที่สหรัฐฯ เลือกทิ้งระเบิดเมืองทั้งสองนี้ ก็เพราะว่าเมืองฮิโรชิมาและเมืองนางาซากิยังไม่โดนโจมตีมาก่อน ทำให้สามารถประเมินผลจากระเบิดนิวเคลียร์ได้ง่ายขึ้นและหลังจากนั้นอีกไม่กี่วัน ญี่ปุ่นก็ประกาศยอมแพ้และสงครามโลกครั้ง ที่ 2 ก็สิ้นสุดลง

นอกจากการนำปฏิกิริยาฟิชชันมาประยุกต์ทำระเบิดนิวเคลียร์แล้ว ยังมีการนำเอาปฏิกิริยาฟิวชันมาประยุกต์ทำระเบิดนิวเคลียร์อีกชนิดหนึ่งคือระเบิดไฮโดรเจนได้ ตามที่กล่าวแล้วว่าปฏิกิริยาฟิวชัน เป็นปฏิกิริยาตรงกันข้ามกับปฏิกิริยาฟิชชัน แต่จะให้พลังงานออกมามากกว่า ในปฏิกิริยาฟิชชัน 1 โมล ของ U-235 จะได้พลังงานออกมา 1.737×10^{10} kJ หรือในปฏิกิริยาฟิชชันของ U-235 1 กิโลกรัม มีการเปลี่ยนแปลงมวล 0.78 g ไปเป็นพลังงาน เราจะมาดูกันว่าในกรณีของปฏิกิริยาฟิวชัน 1 กิโลกรัมของไฮโดรเจน จะมีการเปลี่ยนมวลเป็นพลังงานเท่าใด

จากปฏิกิริยาฟิวชัน

$$4\,{}^{1}_{1}\mathrm{H} \longrightarrow {}^{4}_{2}\mathrm{He} + 2\,{}^{0}_{1}\mathrm{e}$$

มวลของโพรเทียม 4 อนุภาค $= 4\times1.0078 = 4.0312$ amu

มวลของอนุภาคฮีเลียม $= 4.0025$ amu

มวลที่เปลี่ยนเป็นพลังงาน $= 4.0312 - 4.0026 = 0.0286$ amu

เมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์จะได้ $= \dfrac{0.0286}{4.0312}\times100 = 0.709\%$ ของมวลโพรเทียม 4 อนุภาค

เมื่อคิดเป็นกิโลกรัมของโพรเทียม จะได้ $= 0.709\,\%\times100$ g

$= 7.09$ g

ซึ่งมากกว่าปฏิกิริยาฟิวชันของ U-235 จำนวน 1 กิโลกรัม ประมาณ 9 เท่า

ดังนั้นถ้าทำระเบิดโดยใช้ปฏิกิริยาฟิวชันแล้วน่าจะได้ระเบิดที่มีพลังสูงกว่าระเบิดจากยูเรเนียมมาก แต่ในทางปฏิบัติแล้ว ปฏิกิริยาฟิวชันของโพรเทียม 4 อะตอมเกิดได้ช้ามากจนไม่เกิดการระเบิด แต่ถ้าใช้ปฏิกิริยาฟิวชันของอะตอมดิวทีเรียม กับอะตอมทริเทียม จะทำให้ได้ระเบิดไฮโดรเจน

$${}^{2}_{1}\mathrm{H} + {}^{3}_{1}\mathrm{H} \longrightarrow {}^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{1}_{0}\mathrm{n}$$

โดยการใช้ระเบิดขนาดเล็กจากปฏิกิริยาฟิชชันในระเบิดไฮโดรเจน จะทำให้อุณหภูมิสูงมากพอ (หลายสิบล้านองศาเซลเซียส) ที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาฟิวชันได้

สำหรับดิวทีเดียมที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงของระเบิดไฮโดรเจนจะเตรียมได้จากน้ำทะเล เพราะดิวทีเรียมมีอยู่มากในธรรมชาติ ส่วนทริเทียมจะต้องเตรียมโดยใช้ปฏิกิริยานิวเคลียร์ โดยการระดมยิง Li-6 ด้วยนิวตรอน

$$^{6}_{3}\mathrm{Li} + {}^{1}_{0}\mathrm{n} \longrightarrow {}^{3}_{1}\mathrm{H} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตอนที่

5.3

ผลของรังสีทางชีววิทยา

ถึงแม้ว่าในชีวิตประจำวัน มนุษย์จะได้รับปริมาณกัมมันตภาพรังสีไม่สูงนัก เมื่อเทียบกับปริมาณรังสีที่ร่างกายได้รับเป็นปกติอยู่แล้วจากรังสีคอสมิกจากห้วงอวกาศ จากรังสีเอกซ์ในการเอกซ์เรย์ทรวงอก หรือในการทำฟัน ดังนั้น ถ้าจะคิดเอาเองว่ากัมมันตภาพรังสีไม่มีอันตราย ก็จะเป็นความผิดพลาดอย่างมหันต์ นักวิทยาศาสตร์รุ่นแรกๆ ที่ศึกษาเกี่ยวกับกัมมันตภาพรังสี รวมทั้ง มารี กูรี (Mary Curie, ค.ศ. 1867-1934) ต่างก็ไม่ตระหนักถึงอันตรายที่แฝงเร้นอยู่ในการทดลองที่ศึกษาอยู่ มาดาม กูรี เสียชีวิตจากมะเร็งเม็ดเลือดขาว จากการได้รับปริมาณกัมมันตภาพรังสีที่มากเกินไป แต่ก่อนจะไปดูผลของรังสีที่มีต่อร่างกายของมนุษย์นั้น ควรทำความเข้าใจเกี่ยวกับหน่วยวัดปริมาณรังสีก่อน ดังนี้

1. หน่วยวัดปริมาณรังสี

หน่วยพื้นฐานที่ใช้วัดปริมาณรังสีมีอยู่ 2 แบบ ชนิดแรกจะบอกถึงความเข้มของกัมมันตภาพรังสี มีหน่วยเป็นคูรี (curie, Ci) โดยที่ 1 คูรี มีค่าเท่ากับการสลายตัวทางนิวเคลียร์ 3.70×10^{10} ครั้งต่อวินาที ค่าดังกล่าวคืออัตราการสลายตัวของเรเดียม 1 กรัมใน 1 วินาที หน่วยย่อยของคูรีคือ มิลลิคูรี (millicurie, mCi), 10 mCi ของ C-14 คือปริมาณ C-14 ที่มีการสลายตัวเท่ากับ

$$(10\times10^{-3})(3.70\times10^{10}) = 3.70\times10^{8} \text{ ครั้ง/วินาที}$$

แต่หน่วยเป็นคูรีนี้ มีข้อจำกัดเกี่ยวกับผลของรังสี เพราะนอกจากจะต้องรู้ความเข้มของรังสีแล้วยังจะต้องรู้ว่ารังสีถูกดูดกลืนโดยเนื้อเยื่อมากน้อยเพียงใดอีกด้วย

หน่วยวัดปริมาณรังสีที่บอกขนาดของรังสีที่ถูกดูดกลืนคือ *แรด (rad, radiation absorbed dose) คือ ปริมาณรังสี เมื่อสารที่ได้รับรังสีดูดกลืนพลังงาน* 1×10^{-5} J *ต่อกรัมของสารนั้น* และเนื่องจากผลทางชีววิทยาของรังสี ขึ้นอยู่กับว่าเป็นส่วนใดของร่างกายที่ได้รับรังสีและเป็นรังสีชนิดใด จึงต้องมี

แฟกเตอร์ที่ใช้คูณกับค่า แรด ที่เรียกว่า อาร์บีอี (RBE, röentgen biological effectiveness) ผลลัพธ์คือค่า *เร็ม (rem, röentgen equivalent for men) ซึ่งเป็นหน่วยที่ใช้วัดผลของรังสีต่อร่างกายโดยกำหนดให้เป็นปริมาณของรังสีที่ทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนที่มีผลทางชีววิทยาเท่ากับผลจากรังสีเอกซ์ 1 หน่วย*

$$\text{rem} = \text{rad} \times \text{RBE}$$

ดังนั้น ค่า RBE จึงเป็นตัวเลขที่แสดงให้รู้ว่ารังสีแต่ละชนิด มีความสามารถในการทำให้อะตอมของธาตุต่างๆ เกิดการแตกตัวเป็นไอออนได้มากน้อยต่างกันอย่างไร อนุภาคแอลฟาซึ่งมีขนาดใหญ่และมีประจุสูง จะทำให้เกิดไอออนได้มากกว่าอนุภาคบีตาซึ่งเบากว่าและมีประจุน้อยกว่า ในขณะที่รังสีแกมมา ถึงแม้จะทำให้เกิดไอออนได้น้อยกว่า แต่กลับมีอำนาจในการทะลุทะลวงได้สูงกว่าอนุภาคแอลฟา ได้กำหนดให้ค่า RBE ของรังสีแกมมาและอนุภาคบีตาเท่ากับ 1 ส่วนค่า RBE ของอนุภาคแอลฟามีค่าเท่ากับ 10 และชิ้นส่วนนิวเคลียร์จากการแตกตัวในปฏิกิริยาฟิชชันที่มีขนาดใหญ่ขึ้นมีค่า RBE เป็น 20 ส่วนนิวตรอนจะมีค่า RBE อยู่ระหว่าง 2.5-10.5 ขึ้นอยู่กับพลังงานและความเร็วของนิวตรอนนั้น รังสีแกมมาและรังสีเอกซ์ ซึ่งมีค่า RBE เท่ากับ 1 จะมีค่า rads และ rems เป็นตัวเลขเดียวกันและในการดูดกลืนรังสีปริมาณเท่ากัน ค่า rems ของอนุภาคขนาดใหญ่จะมีค่ามากกว่า rads นั่นคือ จะมีการทำลายทางชีววิทยามากกว่านั่นเอง นักศึกษาเห็นหรือไม่ว่า 1 rad ของรังสีแกมมา และ 0.1 rad ของอนุภาคแอลฟา จะมีค่า 1 rem เท่ากันและมีผลทางชีววิทยาเหมือนกัน

2. ผลของรังสีทางชีววิทยา

ตามที่ได้กล่าวในตอนต้นแล้วว่า ในชีวิตประจำวันตามปกติ คนเราจะมีโอกาสได้รับกัมมันตภาพรังสีไม่มากนัก แต่กัมมันตภาพรังสีมีอันตรายเพราะเราจะได้รับรังสีโดยที่ไม่สามารถรู้ตัวได้ เพราะไม่สามารถสัมผัสจับต้องได้เหมือนสิ่งอันตรายประเภทอื่นๆ อนุภาคแอลฟา อนุภาคบีตา และรังสีแกมมา ล้วนแต่มีพลังงานที่สูงมากพอที่จะทำให้อะตอมและโมเลกุลที่ได้รับรังสีเกิดการแตกตัว เช่นเดียวกับการได้รับรังสีอัลตราไวโอเล็ต ที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโมเลกุล และมีผลกระทบอย่างมากต่อสิ่งมีชีวิต สำหรับกัมมันตภาพรังสีแล้ว เซลล์ที่จะถูกทำลายได้มากที่สุด คือเซลล์ที่มีการแบ่งตัวอย่างรวดเร็ว จึงมีการใช้รังสีในการบำบัดมะเร็งบางชนิดได้ แต่ในขณะเดียวกัน ไขกระดูก และเม็ดเลือดขาว จะถูกทำลายได้ง่ายมากจากการได้รับรังสี อาการเริ่มต้น

röentgen : คือปริมาณของรังสีแกมมาหรือรังสีเอกซ์ที่ทำให้เกิดไอออน ซึ่งมีประจุไฟฟ้าสถิต 1 หน่วย ในอากาศแห้งปริมาตร 1 ลบ.ซม. ที่สภาวะอุณหภูมิและความดันมาตรฐาน ชื่อนี้ตั้งตามชื่อนักฟิสิกส์ชาวเยอรมัน วิลเฮลม์ เรินต์เกน (Wilhelm Roentgen) ที่ค้นพบรังสีเอกซ์ใน ปี ค.ศ. 1895

ของความเจ็บป่วยจากการได้รับรังสี จึงเป็น อาการโลหิตจาง และการติดเชื้อได้ง่าย นอกจากนี้ รังสียังอาจทำให้ DNA เปลี่ยนแปลง ซึ่งเป็นสาเหตุของมะเร็ง หรือเกิดการผ่าเหล่าของยีนส์ขึ้นได้

ในปัจจุบัน ได้มีความระมัดระวังกันมากขึ้นในการป้องกันการได้รับรังสีของบุคลากรที่ปฏิบัติงานเกี่ยวกับกัมมันตภาพรังสี เช่น บุคลากรทางการแพทย์ และพนักงานห้องปฏิบัติการ สิ่งที่ใช้ป้องกันรังสีคือตะกั่วและโลหะหนักอื่นๆ ซึ่งจะดูดกลืนรังสีที่ปล่อยออกมาได้ ผู้ที่ปฏิบัติงานเกี่ยวกับรังสีอยู่ตลอดเวลา จะต้องติดแถบวัดรังสีไว้กับตัว เพื่อทำให้รู้ว่า ร่างกายได้รับรังสีในระดับใดแล้ว ถ้าได้รับรังสีถึงปริมาณที่กำหนดไว้ ก็ต้องหยุดทำงานด้านนี้ชั่วคราวเพื่อความปลอดภัย สำหรับบุคคลโดยทั่วไป คงไม่สามารถป้องกันการได้รับรังสีถึง 100% เพราะโลก วัสดุสิ่งก่อสร้างที่ได้มาจากโลก หรือแม้แต่เพื่อนที่อยู่ข้างๆ ล้วนแต่มีกัมมันตภาพรังสีทั้งสิ้น เพราะมีอะตอมที่เป็นกัมมันตรังสีโดยธรรมชาติอยู่แล้ว แหล่งของรังสีเหล่านี้จะปล่อยรังสีปริมาณต่ำๆ (background radiation) ออกมา คนเราจะได้รับรังสีพื้นฐานนี้มากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับสถานที่ที่อยู่ สภาพบ้านที่อยู่อาศัย จำนวนผู้คนที่อยู่ด้วยและความใกล้ชิดกับบุคคลเหล่านั้น ไอแซค อซิมอฟ (Isaac Asimov) นักเขียนนิยายวิทยาศาสตร์ที่มีชื่อเสียง ได้เขียนไว้ในหนังสือของเขาเล่มหนึ่งว่า ร่างกายมนุษย์ ประกอบด้วยอะตอมคาร์บอนประมาณ 3×10^{26} อะตอม และในจำนวนนี้มีอะตอมของ C-14 ซึ่งเป็นกัมมันตรังสีอยู่ถึง 3.5×10^{14} อะตอม และในการหายใจแต่ละครั้งเราจะหายใจ C-14 เข้าไปถึง 3 ล้านอะตอม

3. ผลของการได้รับรังสีขนาดต่างๆ กัน

รังสี ทั้งที่เป็นอนุภาคและรังสีที่ปล่อยออกมาจากสารกัมมันตรังสี มีอันตรายกับร่างกายเพราะสามารถทะลุทะลวงเข้าไปในร่างกายแล้วทำให้โมเลกุลเชิงชีวภาพของเราเกิดการแตกตัว อันตรายจะมากน้อยเพียงใด ขึ้นกับปริมาณรังสีที่ได้รับดังนี้

1000 – 5000 rems	ท้องเสีย มีไข้ เคมีของเลือดเสียสมดุล และจะเสียชีวิตภายใน 1-14 วัน
600 – 1000 rems	เซลล์เม็ดเลือดขาวถูกทำลาย การขับถ่ายผิดปกติภายใน 4-6 สัปดาห์ มีโอกาสเสียชีวิต 80 – 100%
200 – 600 rems	เซลล์เม็ดเลือดขาวลดจำนวนลง ผิวหนังเปลี่ยนสีภายใน 4-6 สัปดาห์ มีโอกาสเสียชีวิต 50%
100 – 200 rems	ไม่มีอันตรายร้ายแรงแบบเฉียบพลัน แต่ในระยะยาวมีความเสี่ยงต่อการเป็นมะเร็งเพิ่มขึ้น
0 – 100 rems	คลื่นไส้ อาเจียน ไม่มีอันตรายร้ายแรง
0.2 rems	เป็นขนาดรังสีที่ได้รับจากการเอกซเรย์ทางการแพทย์

ส่วนผลของรังสีที่มีต่ออวัยวะต่างๆ ในร่างกาย มีดังนี้

สมอง - รังสีปริมาณสูงมีอันตรายร้ายแรงต่อสมองส่วนหน้า ถ้าเป็นรังสีปริมาณต่ำจะทำให้ผมร่วง

ต่อมไทรอยด์,ปอด,หน้าอก,ตับไต - เกิดมะเร็ง

ลำไส้ - รังสีปริมาณสูงจะทำลายผนังลำไส้

อวัยวะสืบพันธุ์ - เกิดความผิดปกติทางพันธุกรรมในเด็ก

ไขกระดูก - ในไขกระดูกจะมีเซลล์ที่กำลังแบ่งตัวของระบบภูมิคุ้มกัน จึงไวต่อรังสี ซึ่งจะทำลายความสามารถของร่างกายในการต่อต้านการติดเชื้อโรคต่างๆ ได้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตอนที่ 5.4

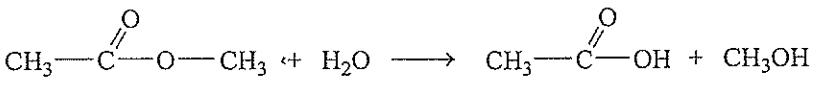
การใช้ประโยชน์พลังงานนิวเคลียร์

การใช้ประโยชน์พลังงานนิวเคลียร์ของประเทศไทยในขณะนี้ ยังอยู่ในวงจำกัด ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของการนำเอารังสีมาประยุกต์ เช่น การใช้รังสีถนอมอาหาร การใช้รังสีฆ่าเชื้อโรคอุปกรณ์ทางการแพทย์ การใช้รังสีเพื่อทำให้อัญมณีมีคุณภาพดีขึ้น เป็นต้น และเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ที่มีอยู่ในประเทศยังเป็นขนาดเล็ก และใช้เพื่อทำการวิจัยเท่านั้น เครื่องปฏิกรณ์ดังกล่าวเป็นของสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ (ปส) ซึ่งหน่วยงานลักษณะนี้ของประเทศต่างๆ จะถูกกำกับดูแลโดยหน่วยงานระหว่างชาติที่มีชื่อว่า International Atomic Energy Agency, IAEA ซึ่งมีสำนักงานใหญ่อยู่ที่กรุงเวียนนา ประเทศออสเตรีย

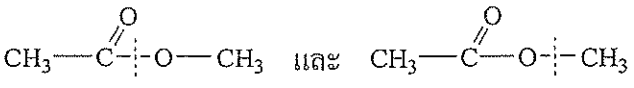
1. การใช้ไอโซไทปในการศึกษากลไกของปฏิกิริยาเคมี

การศึกษากลไกของปฏิกิริยาเคมีจะทำให้ทราบว่าปฏิกิริยาดังกล่าวเกิดขึ้นจริงๆ โดยมีขั้นตอนอย่างไร หลังจากที่นักเคมีได้ศึกษาและได้นำเสนอกลไกของปฏิกิริยาเคมีใดปฏิกิริยาหนึ่งแล้ว จะต้องมีการยืนยันว่าปฏิกิริยาได้เกิดตามกลไกนั้นจริง การใช้ไอโซโทป เป็นวิธีหนึ่งที่จะยืนยันกลไกของปฏิกิริยาเคมีได้ ตัวอย่างเช่น ถ้านักเคมีต้องการทราบว่าในปฏิกิริยาระหว่างเมทิลแอซีเตทกับน้ำ พันธะ C – O พันธะใดที่แตกออก นักเคมีสามารถใช้ไอโซโทปของ O-18 ใส่เข้าไปในโมเลกุลของน้ำแทนที่ O-16 ของน้ำตามปกติ จะทำให้ตอบข้อสงสัยได้

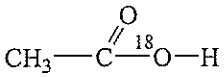
ปฏิกิริยาระหว่างเมทิลแอซีเตทกับน้ำ มีดังนี้



การแตกออกของพันธะ C – O ที่เป็นไปได้มี 2 ที่ คือ

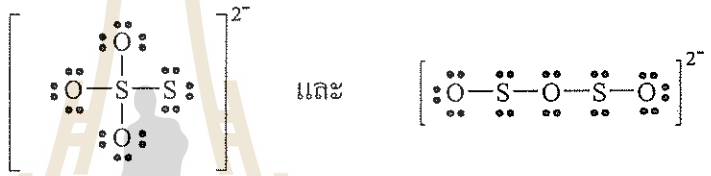


เมื่อใช้ O-18 ใส่เข้าไปในโมเลกุลของน้ำ ปรากฏว่า O-18 ไปปรากฏอยู่ในโมเลกุลของกรดแอซีติก แสดงว่าการแตกออกของพันธะ C – O เป็นไปตาม I เพราะถ้าเป็นไปตาม II กรดแอซีติกที่ได้จะมีอะตอมออกซิเจนของเดิมอยู่ทั้ง 2 อะตอม



2. การใช้ไอโซโทปในการศึกษาโครงสร้างของสาร

ไอออนไทโอซัลเฟตมีสูตรเคมีเป็น $S_2O_3^{2-}$ แต่เป็นเวลาหลายปีทีเดียวที่นักเคมีไม่แน่ใจนักว่าอะตอมซัลเฟอร์ทั้งสองอะตอมนั้น อยู่ในตำแหน่งที่เหมือนกันทุกประการหรือไม่ในโครงสร้างของไอออนไทโอซัลเฟต ถ้าจะเขียนโครงสร้างลูอิสของไอออนนี้อาจจะเขียนได้ 2 แบบ คือ



ไอออนไทโอซัลเฟตนั้น เตรียมได้จากปฏิกิริยาระหว่างไอออนซัลไฟต์กับธาตุซัลเฟอร์ดังสมการ

$$SO_3^{2-}(aq) + S(s) \longrightarrow S_2O_3^{2-}(aq)$$

ปฏิกิริยานี้ผันกลับได้เมื่อให้ทำปฏิกิริยากับกรดเจือจาง

$$S_2O_3^{2-}(aq) \xrightarrow{H^+} SO_3^{2-}(aq) + S(s)$$

ถ้าเริ่มต้นปฏิกิริยา โดยการใช้ซัลเฟอร์ที่ติดฉลากไอโซโทป คือ ใช้ไอโซโทป S-35 ไอออนไทโอซัลเฟตที่ได้ จะมีอะตอมซัลเฟอร์ตัวหนึ่งที่ติดฉลากไอโซโทป

$$SO_3^{2-}(aq) + {}^{35}S(s) \longrightarrow {}^{35}S\,SO_3^{2-}(aq)$$

ถ้าอะตอมซัลเฟอร์ทั้งสองอยู่ในสภาวะแวดล้อมที่เหมือนกันโดยทุกประการ ในขั้นตอนการทำให้เป็นกรด จะตรวจพบ S-35 ทั้งในตะกอนซัลเฟอร์และในกรดซัลฟูรัสในปริมาณที่เท่าๆ กัน ซึ่งจะสนับสนุนโครงสร้างแบบที่สอง แต่ปรากฏว่าจะพบ S-35 ในซัลเฟอร์ที่ตกตะกอนลงมาเท่านั้น ไม่

พบ S-35 ในสารละลายแต่อย่างใด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าซัลเฟอร์ทั้ง 2 อะตอมนั้นอยู่ในสภาวะแวดล้อมที่แตกต่างกัน คือโครงสร้างแบบแรก และได้มีการยืนยันแล้วว่าไอออนไทโอซัลเฟต มีโครงสร้างดังกล่าวจริงโดยการศึกษาทางสเปกโทรสโกปี

เทคนิคการใช้ไอโซโทปศึกษากลไกของปฏิกิริยาในหัวข้อที่ 1 และศึกษาโครงสร้างของสารในหัวข้อที่ 2 โดยติดตามวัดรังสีที่ได้จากการสลายตัวของไอโซโทปกับมันตรังสีที่ใช้เป็นตัวติดฉลากลักษณะนี้ เรียกว่าเทคนิคตัวตามรอยกัมมันตรังสี (radioactive tracers)

3. การศึกษาการสังเคราะห์แสงของพืช

ในการศึกษาการสังเคราะห์แสงของพืชก็เช่นกัน จะประยุกต์ไอโซโทปกัมมันตรังสีได้หลายลักษณะโดยใช้เทคนิคตัวตามรอยกัมมันตรังสี ปฏิกิริยารวมของการสังเคราะห์แสงจะเขียนได้ดังนี้

$$6\,CO_2 + 6\,H_2O \longrightarrow C_6H_{12}O_6 + 6O_2$$

เราสามารถใช้ไอโซโทป O-18 เพื่อบอกแหล่งที่มาของออกซิเจนได้ หรืออาจใช้ไอโซโทปกัมมันตรังสี C-14 ติดตามวิถีของคาร์บอนในการสังเคราะห์แสงได้ โดยเริ่มต้นด้วยการใช้ $^{14}CO_2$ หลังจากนั้นจะสามารถแยกสารมัธยันตร์ในระหว่างการสังเคราะห์แสงได้และวัดปริมาณกัมมันตภาพรังสีของสารประกอบที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ โดยวิธีการเช่นนี้ จะทำให้ทราบว่าวิถีการเปลี่ยนแปลงของ CO_2 ผ่านสารมัธยันตร์ต่างๆ จนมาเป็นคาร์โบไฮเดรตนั้น มีขั้นตอนมาอย่างไรได้

4. การหาอายุของวัตถุโดยใช้การสลายตัวทางกัมมันตรังสี

ได้มีการใช้เวลาครึ่งชีวิตของไอโซโทปกัมมันตรังสี ในการหาอายุของวัตถุบางชนิด การประยุกต์ที่สำคัญได้แก่ การหาอายุของวัตถุโบราณ งานทางศิลปะ ฟอสซิล หิน และอื่นๆ ตัวอย่างเช่น ใช้การสลายตัวของ $^{238}_{92}U$ ในการหาอายุของวัตถุ ซึ่งจะเรียกว่า **uranium dating** หรือการบอกอายุ ด้วยยูเรเนียม

U-238 มีการสลายตัวเป็นอนุกรม ในขั้นตอนแรกของอนุกรม U-238 สลายตัวเป็น Th-234 มีเวลาครึ่งชีวิต 4.5×10^9 ปี ซึ่งเป็นเวลาที่ยาวนาน เมื่อเทียบกับเวลาครึ่งชีวิตของสารกัมมันตรังสีในขั้นตอนอื่นๆ จึงสามารถใช้เวลาครึ่งชีวิตดังกล่าวเป็นขั้นตอนกำหนดอัตรา (rate determining step) ของกระบวนการทั้งหมดได้ ผลิตภัณฑ์ตัวสุดท้ายในอนุกรมการสลายตัวของ U-238 ซึ่งเป็น

ไอโซโทปที่เสถียร คือ Pb-206 โดยจำนวนอะตอมของ Pb-206 ที่เกิดขึ้นจะเท่ากับจำนวนอะตอมของ U-238 ที่มีการสลายตัว

$$^{238}_{92}U \longrightarrow {}^{206}_{82}Pb + 8\,{}^{4}_{2}He + 6\,{}^{0}_{-1}\beta \qquad t_{\frac{1}{2}} = 4.5\times10^{9} \text{ ปี}$$

ในแร่ยูเรเนียมที่เกิดเองในธรรมชาตินั้น เราจะพบ Pb-206 ซึ่งมาจากการสลายตัวของ U-238 อยู่ด้วยเสมอ ถ้าสมมุติว่าตอนที่เกิดแร่ยูเรเนียมขึ้นนั้น ไม่มี Pb-206 อยู่เลยและแร่นั้นไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีใดๆ ที่จะทำให้ Pb-206 แยกออกไปจากแร่ตั้งต้น จะสามารถประมาณอายุของหินได้จากอัตราส่วนมวลของ Pb-206 ต่อ U-238 เพราะตามสมการข้างบน จะเห็นว่า ทุกๆ 1 โมลของ U-238 (238 g) ที่สลายตัวไปอย่างสมบูรณ์ จะได้ 1 โมลของ Pb-206 (206 g) และถ้ามี U-238 สลายตัวไปเพียงครึ่งโมล จะได้อัตราส่วนมวล Pb-206 ต่อ U-238 เป็น

$$\frac{206\text{ g}/2}{238\text{ g}/2} = 0.866$$

และกระบวนการนี้จะต้องใช้เวลา 4.51×10^{9} ปี จึงจะสมบูรณ์ ดังนั้น ถ้าอัตราส่วนมวลมีค่าน้อยกว่า 0.866 แสดงว่าหินจะมีอายุน้อยกว่า 4.51×10^{9} ปี และถ้าอัตราส่วนมวลมีค่ามากกว่า 0.866 หินจะมีอายุมากกว่า 4.51×10^{9} ปี จากการศึกษาหาอายุของก้อนหินเก่าแก่โดยใช้การสลายตัวของยูเรเนียมและการสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสีอื่นๆ พบว่าก้อนหินที่มีอายุเก่าแก่ที่สุด ซึ่งอาจถือได้ว่าเป็นอายุของโลกเราด้วยนั้น มีอายุถึง 4.5×10^{9} หรือ 4.5 พันล้านปี

ตัวอย่าง พบว่าในตัวอย่างหินมี U-238 อยู่ 1.3×10^{-5} กรัม และมี Pb-206 อยู่ 3.4×10^{-6} กรัม ถ้าเวลาครึ่งชีวิตของ U-238 เท่ากับ 4.5×10^{9} ปี ให้หาอายุของก้อนหินนั้น

ต้องหาก่อนว่า U-238 ที่สลายตัวมีอยู่กี่กรัม

$$\text{จำนวนโมลของ Pb-206} = \frac{3.4\times10^{-6}\text{ กรัม}}{206\text{ กรัม/โมล}} = \text{จำนวนโมล U-238}$$

$$\text{เปลี่ยนเป็นน้ำหนักของ U-238} = \frac{3.4\times10^{-6}}{206}\text{ โมล} \times 238\text{ กรัม/โมล}$$
$$= 3.9\times10^{-6}\text{ กรัม}$$

$\therefore$ U-238 ที่มีตั้งแต่เริ่มต้น $= 1.3\times10^{-5}$ กรัม $+ 3.9\times10^{-6}$ กรัม

$= 1.7\times10^{-5}$ กรัม

สมมุติให้ x เป็นจำนวนกรัมของ U-238 ที่มีอยู่ในปัจจุบันที่เวลา t จะได้ว่า

$$\ln \frac{x}{x_0} = -kt$$

$$t = \frac{-\ln\left(\frac{x}{x_0}\right)}{k}$$

จากเวลาครึ่งชีวิต จะหาค่าคงตัวอัตรา หรือ k ได้ดังนี้

$$k = \frac{0.693}{t_{\frac{1}{2}}} = \frac{0.693}{4.5\times10^{9}\ \text{ปี}}$$

$$= 1.5\times10^{-10}\ \text{ปี}$$

จากการนำไปแทนที่ในสมการจะได้ว่า

$$t = \frac{-\ln\left(\frac{1.3\times10^{-5}}{1.7\times10^{-5}}\right)}{1.5\times10^{-10}/\text{ปี}}$$

$$= 1.8\times10^{9}\ \text{ปี}$$

การหาอายุโดยใช้ไอโซโทป K-40 เป็นเทคนิคที่สำคัญที่สุดในทางเคมีธรณี ไอโซโทปกัมมันตรังสี K-40 สลายตัวได้หลายลักษณะ แต่ที่นำมาประยุกต์ในการหาอายุ คือการสลายตัวแบบการจับอิเล็กตรอน (electron capture)

$$^{40}_{19}K + ^{0}_{-1}e \longrightarrow ^{40}_{18}Ar \qquad t_{\frac{1}{2}} = 1.2\times10^{9}\ \text{ปี}$$

ในแร่ธาตุต่างๆ ที่มี K-40 เป็นองค์ประกอบ เมื่อมีการสลายตัวจะได้แก๊สอาร์กอนออกมา ซึ่งจะถูกกักไว้ในแลตทิซของฝลึกแร่ และจะถูกปลดปล่อยออกมาถ้าแร่ธาตุนั้นเกิดการหลอมเหลว ดังนั้น

ในการวิเคราะห์แร่จึงสามารถวัดปริมาณ Ar-40 ที่ถูกกักเก็บไว้ได้โดยใช้เครื่องแมสสเปกโทรมิเตอร์ อัตราส่วนมวลระหว่าง Ar-40 ต่อ K-40 ในแร่ และเวลาครึ่งชีวิต จะนำมาคำนวณหาอายุของหินที่มีอายุหลายพันปีจนถึงหลายพันล้านปีได้

การหาอายุสิ่งของโดยใช้การสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสีที่น่าสนใจอีกวิธีหนึ่ง คือการใช้ C-14 ในการบอกอายุสิ่งของซึ่งเป็นสิ่งที่เคยมีชีวิตมาก่อนได้ C-14 ซึ่งเป็นไอโซโทปกัมมันตรังสีเกิดขึ้นในบรรยากาศของโลกได้ เมื่อเกิดปฏิกิริยาระหว่างรังสีคอสมิกจากห้วงอวกาศกับไนโตรเจนในบรรยากาศ เนื่องจากรังสีคอสมิกประกอบด้วยอิเล็กตรอน นิวตรอน และนิวเคลียสของอะตอมที่มีพลังงานสูง ปฏิกิริยาสำคัญชนิดหนึ่งที่เกิดขึ้นคือ การจับนิวตรอนของ N-14 กลายเป็นไอโซโทปกัมมันตรังสี C-14 และไฮโดรเจน อะตอม C-14 ที่เกิดขึ้นจะไม่เสถียร และจะกลายเป็น $^{14}CO_2$ ผสมปนเปไปกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ปกติ, $^{12}CO_2$, ในบรรยากาศ การสลายตัวของ C-14 จะได้อนุภาคบีตา และเป็นปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง โดยเขียนสมการของกฎอัตราได้ดังนี้

$$\text{rate} = kN$$

k = ค่าคงตัวอัตราของปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง

N = จำนวนนิวคลีไอของ C-14 ที่มีอยู่

$t_{\frac{1}{2}} = 5.73\times10^{3}$ ปี

จะได้ว่า $k = \dfrac{0.693}{5.73\times10^{3}} = 1.21\times10^{-4}$ /ปี

C-14 จะเข้ามาอยู่ในไบโอสเฟียร์ ซึ่งเป็นชั้นบรรยากาศที่เราอาศัยอยู่ เมื่อพืชใช้ CO_2 ในการสังเคราะห์แสง สัตว์ที่กินพืชจะหายใจให้ C-14 ออกมาใน CO_2 ในที่สุด C-14 ก็เป็นส่วนหนึ่งของวัฏจักรคาร์บอน ปริมาณ C-14 ที่สูญหายไปจากการสลายตัวจะมีการทดแทนอย่างสม่ำเสมอจาก C-14 ที่เกิดขึ้นใหม่จากปฏิกิริยาในบรรยากาศ ทำให้เกิดสมดุลพลวัต ซึ่งทำให้อัตราส่วนของ C-14/C-12 มีค่าคงที่ในสิ่งมีชีวิต แต่เมื่อสิ่งมีชีวิต ไม่ว่าพืชหรือสัตว์ตายไป จะไม่มีการทดแทนปริมาณ C-14 ที่สลายตัวไปอีก อัตราส่วน C-14/C-12 จะลดลงไปเรื่อยๆ ตามการสลายตัวของ C-14 การเปลี่ยนแปลงลักษณะนี้เกิดขึ้นได้เช่นเดียวกัน เมื่ออะตอมคาร์บอนถูกกักเก็บไว้ในถ่านหิน ปิโตรเลียม หรือไม้ที่ถูกรักษาสภาพไว้ภายใต้พื้นดิน และเกิดได้เช่นกันในมัมมี่ เมื่อเวลาผ่านไป C-14 ในมัมมี่จะมีสัดส่วนน้อยกว่าในร่างกายของผู้ที่ยังมีชีวิตอยู่ วิลลาร์ด แฟรงค์ ลิบบี (Willard Frank Libby, ค.ศ. 1908-1980) นักเคมีชาวอเมริกันได้เสนอว่า หลักการตรงนี้นำไปหาช่วงเวลาที่ C-14 ในตัวอย่างสลายตัวไปโดยไม่มีการทดแทนได้ นักวิทยาศาสตร์ผู้นี้ต่อมาได้รับรางวัลโนเบลในปี ค.ศ. 1960 ในผลงานการหาอายุโดยใช้การสลายตัวของคาร์บอนนี้

สำหรับปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง จะเขียนสมการได้ดังนี้

$$\ln \frac{No}{N} = kt$$

No, N = จำนวนนิวคลีไอ C-14 ที่มีอยู่ ที่เวลา t = 0 และ t = t ตามลำดับ

และเนื่องจากอัตราการสลายตัวจะแปรผันโดยตรงกับจำนวนนิวคลีไอ C-14 ที่มีอยู่จะเขียนสมการข้างบนได้ใหม่ดังนี้

$$t = \frac{1}{k} \ln \frac{No}{N}$$

$$= \frac{1}{1.21\times10^{-4} \text{ /ปี}} \ln \frac{\text{อัตราการสลายตัว เมื่อ } t = 0}{\text{อัตราการสลายตัว เมื่อ } t = t}$$

$$= \frac{1}{1.21\times10^{-4} \text{ /ปี}} \ln \frac{\text{อัตราการสลายตัวของตัวอย่างสด}}{\text{อัตราการสลายตัวของซาก}}$$

เมื่อทราบค่า k, อัตราการสลายตัวของตัวอย่างสดและซาก จะคำนวณหาค่า t ซึ่งเป็นอายุของซากได้ แต่ความสำเร็จในการหาอายุจะขึ้นกับความถูกต้องของการหาค่าอัตราการสลายตัว ในตัวอย่างสด อัตราส่วน $^{C\text{-}14}/_{C\text{-}12}$ มีค่าประมาณ $^{1}/_{10^{12}}$ เครื่องมือที่ใช้ในการติดตามการสลายตัว จึงต้องมีความไวมากในการวัด ส่วนการวัดในตัวอย่างของซาก จะมีความแม่นยำน้อยกว่า เพราะปริมาณ C-14 จะมีอยู่น้อยลงไปอีก อย่างไรก็ดี เทคนิคการหาอายุโดยใช้คาร์บอนนี้มีประโยชน์มากในการหาอายุของวัตถุโบราณ รูปวาด และสิ่งของอื่นๆ ที่มีอายุตั้งแต่ 1,000 – 50,000 ปี

การประยุกต์ที่สำคัญครั้งหนึ่งของการหาอายุโดยใช้คาร์บอน คือ การพิสูจน์ผ้าลินินชิ้นหนึ่งว่าใช่ผ้าห่อหุ้มร่างกายของพระเยซูหรือไม่ ผ้าผืนนี้เรียกชื่อกันว่า The Shroud of Turin เพราะมีการพบผ้าผืนนี้ที่เมือง Turin ประเทศอิตาลี โดยยังปรากฏร่องรอยใบหน้าและรูปร่างละม้ายใบหน้าพระเยซู จึงเป็นที่ถกเถียงกันมานานหลายทศวรรษว่าเป็นของจริงหรือมีผู้ทำขึ้น จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1988 มีห้องปฏิบัติการ 3 แห่งในยุโรป และสหรัฐอเมริกาได้ทำการทดลองหาอายุของผ้าลินินผืนดังกล่าว โดยใช้เทคนิคการสลายตัวของ C-14 และต่างได้คำตอบใกล้เคียงกันว่า ผ้าผืนนี้มีอายุอยู่ในช่วง A.D. 1260 - A.D. 1390 ซึ่งแสดงว่า The Shroud of Turin มิใช่ผ้าซึ่งเคยห่อหุ้มร่างกายของพระเยซู

ตัวอย่าง ได้มีการขุดพบวัตถุทางโบราณคดีชิ้นหนึ่ง ซึ่งมีอัตราส่วนของ $^{C\text{-}14}/_{C\text{-}12}$ เป็น 0.714 วัตถุนั้นมีอายุเท่าใด

จากเวลาครึ่งชีวิตของการสลายตัวโดยการคายรังสีบีตาของคาร์บอน-14 จะคำนวณหาค่าคงตัวอัตรา, k, ได้จาก

$$k = \frac{0.693}{t_{\frac{1}{2}}}$$

$$= \frac{0.693}{5730\,\text{ปี}} = 1.21\times10^{-4}/\,\text{ปี}$$

จาก

$$t = \frac{-\ln\left(\frac{x}{x_0}\right)}{k}$$

$$= \frac{-\ln 0.714}{1.21\times10^{-4}/\,\text{ปี}} = 2780\,\text{ปี}$$

5. การใช้ไอโซโทปทางการแพทย์

เทคนิคตัวตามรอยกัมมันตรังสี นำมาใช้ในการวินิจฉัยโรคทางการแพทย์ได้ด้วยเช่นกัน Na-24 ซึ่งเป็นตัวปล่อยรังสีบีตา และมีเวลาครึ่งชีวิต 14.8 ชั่วโมง เป็นตัวที่ใช้บอกความผิดปกติของระบบไหลเวียนของเลือดได้ว่าเส้นเลือดมีการตีบตันหรือมีการอุดตันอย่างไรหรือไม่ โดยการฉีดสารละลายเกลือของ Na-24 เข้าไปในเส้นเลือด และติดตามการไหลของเลือด โดยติดตามตัวตามรอยกัมมันตรังสี สำหรับการวินิจฉัยเกี่ยวกับความผิดปกติของต่อมไทรอยด์ จะทำได้โดยให้ผู้ป่วยดื่มสารละลายของ $Na^{131}I$ ที่ทราบปริมาณ แล้ววัดปริมาณกัมมันตภาพรังสีบริเวณเหนือต่อมไทรอยด์เพื่อดูว่าต่อมไทรอยด์ ดูดกลืนเอาไอโอดีนเข้าไปด้วยอัตราปกติหรือไม่ I-131 เป็นไอโซโทปที่ให้รังสีบีตา ที่มีเวลาครึ่งชีวิต 8 วัน การใช้ไอโซโทปกัมมันตรังสีลักษณะนี้ ต้องใช้ในปริมาณน้อย มิฉะนั้น ผู้ป่วยอาจได้รับอันตรายจากการทำลายอย่างถาวรของรังสีปริมาณสูงได้ ไอโซโทปกัมมันตรังสีของไอโอดีนอีกตัวหนึ่งคือ I-132 ซึ่งเป็นตัวให้รังสีแกมมา จะใช้ในการสร้างภาพของสมอง

6. การฉายรังสีอาหาร ผลิตผลการเกษตรและผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

ปัจจุบันมีประเทศต่างๆ มากกว่า 20 ประเทศ ที่ใช้วิธีการฉายรังสีอาหาร และผลิตผลการเกษตร เพื่อยืดอายุอาหารสด เพื่อควบคุมการงอก เพื่อควบคุมการขยายพันธุ์ของแมลงระหว่างการเก็บรักษาธัญพืช รังสีที่ใช้ในการฉายรังสีมาจาก Co-60 และ Cs-137 ผลิตผลการเกษตรที่นิยมใช้การฉายรังสีได้แก่ หอมหัวใหญ่ มันฝรั่ง มะม่วง มะละกอ ข้าวสาร มะเขือเทศ ในเมืองไทยยังมีการฉายรังสีมะขามหวานและแหนมด้วย หน่วยงานที่ให้บริการคือ ศูนย์ฉายรังสีอาหารและผลิตผล ของสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ การฉายรังสีจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมี ซึ่งทำให้แบคทีเรีย เชื้อราต่างๆ ไม่เจริญเติบโต ทำให้ผลไม้สุกช้าลงและควบคุมการงอกของพืชประเภทหัว เช่น หอมหัวใหญ่และกระเทียมได้

นอกจากนี้ยังมีการฉายรังสีเพื่อฆ่าเชื้อโรคผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์ เภสัชภัณฑ์ เครื่องสำอาง บรรจุภัณฑ์พลาสติก อาหารสัตว์ อุตสาหกรรมอัญมณีก็ใช้เทคนิคการฉายรังสีเพื่อเปลี่ยนสีพลอยด้วยเช่นกัน โดยใช้รังสีแกมมาและอนุภาคนิวตรอน พลอยที่ใช้เป็นพลอยเนื้ออ่อน เช่น บุษราคัม ทัวมารีน และหินเขี้ยวหนุมาน การฉายรังสีทำให้ได้บุษราคัมสีฟ้า ทัวมารีนสีชมพูแดง และ หินเขี้ยวหนุมานสีชา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตอนที่

5.5

ด้านที่สองของเหรียญ

ถึงแม้ว่าพลังงานนิวเคลียร์จะมีประโยชน์นำไปประยุกต์ได้ในงานหลายชนิดนอกเหนือจากเป็นพลังงานในการผลิตกระแสไฟฟ้าแล้ว แต่เหรียญย่อมมีสองด้านเสมอ พลังงานนิวเคลียร์ก็เช่นเดียวกัน ถึงแม้ว่านักวิทยาศาสตร์จะได้ศึกษาพัฒนาองค์ความรู้ด้านนิวเคลียร์ได้ในระดับสูงแล้ว แต่ก็ยังมีอุบัติเหตุทางนิวเคลียร์ ซึ่งเกิดทั้งการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ที่ไม่ถูกต้อง และจากความผิดพลาดของผู้ปฏิบัติงาน นอกจากนี้ปัญหาเกี่ยวกับกากกัมมันตรังสีก็ทวีเพิ่มมากขึ้นทุกขณะ การจัดการเกี่ยวกับกากกัมมันตรังสีที่ไม่ถูกต้องในอดีต ส่งผลกระทบต่อผู้คนในเวลาปัจจุบันในหลายสถานที่

1. อุบัติเหตุทางนิวเคลียร์

อุบัติเหตุทางนิวเคลียร์ที่ส่งผลกระทบในวงกว้าง ส่วนใหญ่จะเกิดมาจากโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ (Nuclear power plant) ที่เป็นเหตุการณ์ใหญ่ๆ ในช่วง 50 ปีที่ผ่านมามีอยู่ 7 ครั้งด้วยกัน เกิดขึ้นในเกือบจะทุกประเทศที่มีโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ อุบัติเหตุที่เกิดขึ้น เรียงลำดับตามเหตุการณ์ได้ดังนี้

ค.ศ. 1952 12 ธันวาคม ; Chalk River, Ottawa, Canada

เกิดความผิดพลาดในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ เมื่อมีการดึงเอาแท่งควบคุมปฏิกิริยานิวเคลียร์ออกไป 4 แท่ง โดยบังเอิญ ทำให้แกนเชื้อเพลิงยูเรเนียมเกิดการหลอมละลาย (melt down) ไปบางส่วน ถึงแม้จะมีน้ำที่ปนเปื้อนกัมมันตรังสีหลายล้านแกลลอนในเครื่องปฏิกรณ์ แต่ก็ไม่มีผู้ได้รับอันตราย

ค.ศ. 1957 7 ตุลาคม ; Windscale Pile No 1, Liverpool, England

เกิดไฟไหม้ขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ที่ใช้แกรไฟต์เป็นตัวหล่อเย็นทำให้มีกัมมันตภาพรังสี แผ่กระจายไปทั่วบริเวณชนบทโดยรอบ เกิดการปนเปื้อนกัมมันตรังสีในพื้นที่มากกว่า 200 ตารางไมล์

ค.ศ. 1976 Greifswald, East Germany

แกนกัมมันตรังสีของเครื่องปฏิกรณ์ในโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ Lubmin เกือบจะเกิดการหลอมละลายเนื่องจากระบบความปลอดภัยล้มเหลวขณะเกิดไฟไหม้

ค.ศ. 1979 28 มีนาคม ; Three Mile Island, Harrisburg, Pennsylvavia, USA

ระบบหล่อเย็นของเครื่องปฏิกรณ์เครื่องหนึ่งในสองเครื่องล้มเหลว ทำให้เกิดความร้อนมากเกิน และแกนยูเรเนียมบางส่วนหลอมละลาย ทำให้มีน้ำและแก๊สซึ่งปนเปื้อนกัมมันตรังสีบางส่วนถูกปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม

ค.ศ. 1986 26 เมษายน ; Chernobyl, Kiev, Ukraine

เกิดการระเบิดและมีไฟไหม้ในแกนแกรไฟต์ของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์เครื่องหนึ่งในสี่เครื่องของโรงไฟฟ้า ทำให้มีการกระจายวัสดุกัมมันตรังสีเป็นบริเวณกว้าง คือ พื้นที่ส่วนหนึ่งของรัสเซีย, ยุโรปตะวันออก, สแกนดิเนเวีย และภายหลังก็ไปถึงยุโรปตะวันตกด้วย ในเหตุการณ์ครั้งนั้นรัสเซียแถลงว่ามีผู้เสียชีวิต 31 ราย แต่ ตัวเลขที่แท้จริงไม่ทราบ เป็นอุบัติเหตุทางนิวเคลียร์ที่ร้ายแรงที่สุดที่เคยมีมา

ค.ศ. 1999 30 กันยายน ; Tokaimura, Japan

เป็นอุบัติเหตุที่เกิดขึ้นในโรงงานผลิตเชื้อเพลิงยูเรเนียม เมื่อไม่สามารถควบคุมปฏิกิริยานิวเคลียร์ลูกโซ่ ที่เกิดขึ้นได้ มีการพ่นกระจายเอาแก๊ส ซึ่งมีกัมมันตรังสีปริมาณสูงออกไปสู่อากาศ ทำให้คนงานเสียชีวิต 1 คนและบาดเจ็บมากอีก 2 คน เป็นอุบัติเหตุทางนิวเคลียร์ครั้งที่ร้ายแรงที่สุดของญี่ปุ่น

เหตุการณ์ที่ Chernobyl ถือได้ว่าเป็นอุบัติเหตุทางนิวเคลียร์ครั้งที่ร้ายแรงที่สุด สาเหตุสำคัญคือข้อบกพร่องในการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ ผู้ปฏิบัติงานยังไม่มีความเชี่ยวชาญเพียงพอและระบบความปลอดภัยไม่เหมาะสม ในเหตุการณ์ครั้งนั้น ทำให้แก๊สซีนอนทั้งหมดและประมาณครึ่งหนึ่งของ I-131 และ Cs-137 ซึ่งล้วนแต่เป็นกัมมันตรังสี (ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาฟิชชัน) และประมาณ 5% ของเชื้อเพลิงกัมมันตรังสีที่เหลืออยู่ในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ ถูกปล่อยออกไปสู่บรรยากาศ และไปสะสมอยู่รอบๆ บริเวณในรูปของฝุ่นและขยะกัมมันตรังสี กระแสลมยังพัดพาเอาส่วนที่มีน้ำหนักเบากระจายไปทั่ว Ukraine, Belarus, Russia บางส่วนไปไกลถึง Scandinevia และยุโรป ผู้ที่เสียชีวิตคือพนักงานดับเพลิงที่เข้าไปดับเพลิงในโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ในช่วงแรกจำนวน 31 ราย ในช่วงปี ค.ศ. 1986-1987 มีผู้ที่เข้าไปเกี่ยวข้องในการจัดเก็บและทำความสะอาดกัมมันตภาพรังสีกว่า 200,000 คน ซึ่งทำให้ได้รับรังสีในปริมาณค่อนข้างสูงประมาณ 100,000 มิลลิเร็ม (การเอกซ์เรย์ทรวงอก 1 ครั้ง จะได้รับรังสีประมาณ 6 มิลลิเร็ม) มีประมาณ 20,000 คน ที่ได้รับรังสีถึง 250,000 มิลลิเร็ม และบางคนอาจได้รับถึง 500,000 มิลลิเร็ม มีเด็กๆ จำนวนมาก รอบๆ โรงไฟฟ้าที่ได้รับรังสีมากพอที่ทำให้เป็นมะเร็งต่อมไทรอยด์ มะเร็งชนิดนี้ไม่อันตรายมากถ้าตรวจพบในตอนแรกๆ และได้รับการรักษาทันท่วงที รังสีที่ได้รับช่วงแรกมาจากไอโซโทปกัมมันตรังสี I-131 และ Cs-137 ซึ่งมีเวลาครึ่งชีวิตสั้น หลังจากเกิดอุบัติเหตุแล้ว 1 สัปดาห์ จึงมีการอพยพประชาชนในรัศมี 10 กิโลเมตรของโรงไฟฟ้าออกจากพื้นที่ และต่อมาก็อพยพ ผู้ที่อยู่ในรัศมี 30 กิโลเมตร ออกไปอีก รวมประชากร

ที่ต้องอพยพทั้งสิ้นเกือบสองแสนคน ผู้อพยพต่างได้รับรังสีขนาด 50,000-100,000 มิลลิเร็ม ปัจจุบันได้กันพื้นที่ห้ามผู้คนเข้ามาอยู่อาศัยและทำมาหากินไว้ 4,300 ตารางกิโลเมตรรอบ Chernobyl ในปี ค.ศ. 1995 องค์การอนามัยโลกระบุว่า มีผู้เป็นมะเร็งต่อมไทรอยด์ซึ่งเชื่อมโยงกับการได้รับรังสีถึง 700 ราย ผู้ที่ได้รับรังสีปริมาณน้อย ยังมีความเสี่ยงในระยะยาวต่อการเป็นลิวคีเมียหรือมะเร็งเม็ดเลือดขาวได้ เมื่อไม่นานมานี้ มีนักวิทยาศาสตร์ทางด้านจุลชีววิทยาเข้าไปศึกษาในพื้นที่รอบๆ Chernobyl เพื่อค้นหาเชื้อราตัวใหม่ๆ ที่อาจเกิดขึ้นได้จากการผ่าเหล่าจากการได้รับรังสีปริมาณสูง เพื่อนำมาสกัดยาปฏิชีวนะตัวใหม่ๆ ที่เชื้อราเหล่านั้นสร้างขึ้น เพื่อนำมาใช้เป็นยารักษาโรคแทนยาปฏิชีวนะตัวเก่าๆ ที่ไม่สามารถทำอันตรายเชื้อโรคต่างๆ ได้อีกเพราะเกิดการดื้อยากันไปหมดแล้ว ผลดีอย่างหนึ่งที่เกิดขึ้นหลังจากอุบัติเหตุที่ Chernobyl คือทำให้นักวิทยาศาสตร์หลังม่านเหล็ก มีความตระหนักมากขึ้นเกี่ยวกับความปลอดภัยในการใช้เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ มีการเดินทางมาศึกษาดูงานโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ของโลกตะวันตกกันเป็นจำนวนมาก และยังมีการตกลงทำความร่วมมือกันอีกด้วย นอกจากนี้ยังเกิดโปรแกรมนานาชาติขึ้นหลายโปรแกรม โดย IAEA เป็นผู้ดำเนินการเพื่อให้มีความปลอดภัยในการดำเนินงานเกี่ยวกับเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์มากขึ้น

ส่วนทางโลกตะวันตกนั้น อุบัติเหตุทางนิวเคลียร์ที่เกิดขึ้นที่โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ Three Mile Island เมือง Harrisburg รัฐเพนซิลเวเนีย ถือได้ว่าเป็นอุบัติเหตุทางนิวเคลียร์ที่ร้ายแรงมากที่สุดของสหรัฐอเมริกา เหตุการณ์เริ่มต้นเมื่อเวลา 4.00 น. ของวันที่ 28 มีนาคม ค.ศ. 1978 เมื่อปั๊มน้ำในส่วนของโรงงานที่ไม่เกี่ยวข้องกับกัมมันตรังสีเกิดขัดข้องหยุดทำงานทำให้มีความร้อนสะสมมากขึ้น ส่งผลให้เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์หยุดทำงานโดยอัตโนมัติ ในขณะเดียวกันปั๊มน้ำฉุกเฉินก็เกิดขัดข้องเช่นเดียวกัน ผลสุดท้ายคือการหล่อเย็นเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ไม่พอเพียง ทำให้เกิดเหตุการณ์หลายอย่างเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง เชื้อเพลิงนิวเคลียร์จำนวนมากเกิดการหลอมละลาย ทำให้กัมมันตภาพรังสีของน้ำหล่อเย็นเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์เพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว และเกิดรั่วไหลลงไปในชั้นใต้ดินภายใต้เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์และส่วนอื่นๆ ของโรงงาน ทำให้เกิดการปนเปื้อนกัมมันตรังสีในระดับสูง แต่การดำเนินการต่ออุบัติเหตุที่เกิดขึ้นค่อนข้างรวดเร็ว หน่วยงาน Nuclear Regulatory Commission (NRC) ในพื้นที่ได้รับแจ้งเหตุในเวลา 7.45 น. และสำนักงานใหญ่ของ NRC ที่กรุงวอชิงตันดีซีได้รับรู้เวลา 8.00 น. และทำเนียบขาวได้รับรายงานเมื่อเวลา 9.00 น. หน่วยงานต่างๆ ที่เกี่ยวข้องส่งทีมหลายทีมเข้าไปตรวจสอบ ในช่วงแรกของอุบัติเหตุมีการรั่วไหลของแก๊สซีนอนซึ่งมีกัมมันตภาพรังสีระดับต่ำออกสู่สิ่งแวดล้อมอย่างต่อเนื่อง ทีมงานได้เริ่มเก็บตัวอย่างอากาศเหนือโรงงานเพื่อไปตรวจสอบสภาพกัมมันตภาพรังสีตั้งแต่ตอนกลางวัน ผู้ว่าการรัฐเพนซิลเวเนีย สั่งให้อพยพเด็กก่อนวัยเรียนและสตรีมีครรภ์ที่อาศัยอยู่ในรัศมี 5 ไมล์ของโรงไฟฟ้าออกจากพื้นที่ในอีก 2 วันถัดมา และแนะนำให้ผู้ที่อาศัยอยู่ในรัศมี 10 ไมล์ของโรงไฟฟ้าให้อยู่แต่ภายในบ้าน และให้ปิดประตูหน้าต่างตลอดเวลา ภายในวันที่ 4 เมษายน ทางการสามารถควบคุมสถานการณ์ไว้ได้

สำหรับผลกระทบต่อสุขภาพนั้น จากการศึกษาของหน่วยงานต่างๆ ประเมินได้ว่าขนาดของรังสีโดยเฉลี่ยที่ประชากรประมาณ 2 ล้านคนในพื้นที่ได้รับคือ 1 มิลลิเร็ม เปรียบเทียบกับปริมาณรังสีพื้นฐานที่ประชาชนในพื้นที่นั้นได้รับตามธรรมชาติอยู่แล้วโดยเฉลี่ย 100-125 มิลลิเร็มต่อปี ดังนั้นปริมาณรังสีที่ได้รับจากอุบัติเหตุจึงน้อยมาก ส่วนผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมนั้น จากการศึกษาของหน่วยงานจำนวนมากและจากตัวอย่างที่เก็บมาศึกษาซึ่งมีทั้ง อากาศ น้ำ นม พืช ดิน และอาหารจำนวนหลายพันตัวอย่าง ทำให้สรุปได้ว่า ถึงแม้อุบัติเหตุจะทำความเสียหายร้ายแรงกับเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แต่กัมมันตภาพรังสีส่วนใหญ่ถูกกักเก็บไว้ได้ ส่วนที่หลุดรอดออกมามีผลกระทบต่อสุขภาพของแต่ละบุคคลและสิ่งแวดล้อมน้อยมาก อย่างไรก็ดี หลังจากเหตุการณ์ที่ Three Mile Island ทำให้ NRC มีความเข้มงวดเกี่ยวกับความปลอดภัยในการใช้พลังงานนิวเคลียร์มากขึ้น มีการปรับกฎเกณฑ์ต่างๆ ถึง 300 ข้อ ส่วนเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ที่เกิดปัญหาถูกปิดอย่างถาวร การนำเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ที่ยังเหลืออยู่ออกไปเริ่มดำเนินการในเดือนตุลาคม ค.ศ. 1985 และเสร็จสิ้นเมื่อเดือนมกราคม ค.ศ. 1990 ส่วนน้ำหล่อเย็นที่มีการปนเปื้อนกัมมันตรังสีจำนวน 2.23 ล้านแกลลอนนั้น ก็ได้รับการกำจัดกัมมันตรังสีและเริ่มระเหยทิ้งไปโดยเริ่มตั้งแต่เดือนมกราคม ค.ศ. 1991 เสร็จสิ้นสมบูรณ์ในเดือนสิงหาคม ค.ศ. 1993

นอกจากอุบัติเหตุทางนิวเคลียร์ที่เกิดในโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์แล้ว กิจกรรมทางทหาร ก็เป็นอีกแหล่งหนึ่งที่ทำให้เกิดอันตรายจากกัมมันตภาพรังสีได้ มีอยู่ 2 กรณีที่น่าจะกล่าวถึง ซึ่งเป็นเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในช่วงหลังสงครามโลกครั้งที่ 2 ซึ่งมีสงครามเย็นเกิดขึ้นระหว่างมหาอำนาจสองฝ่ายคือโซเวียตรัสเซียกับสหรัฐอเมริกา ซึ่งต่างก็แข่งขันกันในการพัฒนาอาวุธนิวเคลียร์ กรณีของโซเวียตรัสเซีย คือเหตุการณ์ที่ Chelyabinsk ซึ่งทำให้พื้นที่ดังกล่าวมีการปนเปื้อนกัมมันตภาพรังสีสูงที่สุดในโลก อีกกรณีหนึ่งคือเหตุการณ์ที่ Bikini Atoll (Atoll คือหมู่เกาะเล็กๆ ที่เกิดจากการทับถมของปะการัง มีลักษณะเรียงต่อกันเกือบเป็นวงแหวนล้อมรอบทะเลสาบไว้ภายใน) กลางมหาสมุทรแปซิฟิก ที่สหรัฐใช้เป็นสถานที่ทดสอบอาวุธนิวเคลียร์ ซึ่งทำให้เกิดอันตรายต่อชีวิตของชาวเกาะในบริเวณนั้น และยังทำให้มีการปนเปื้อนกัมมันตรังสีมาจนถึงทุกวันนี้

ในช่วงปี ค.ศ. 1945 ทางการทหารของโซเวียตรัสเซีย จัดสร้างเมืองลับ ขึ้น 3 แห่ง ใกล้จังหวัด Chelyabinsk เพื่อดำเนินการพัฒนาอาวุธและงานวิจัยต่างๆ ทางด้านนิวเคลียร์ บริเวณดังกล่าวอยู่ใกล้ทะเลสาบ Kyzyltash ซึ่งมีทางเชื่อมต่อกับทะเลสาบอื่นๆ และยังอยู่ทางตอนบนของแม่น้ำ Techa อีกด้วย เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ที่นี่มีระบบหล่อเย็นเป็นแบบเปิด มีการสูบน้ำจากทะเลสาบ Kyzyltash เข้าไปหล่อเย็นเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์โดยตรง และภายใน 18 เดือน นักฟิสิกส์โซเวียตก็สามารถผลิตพลูโทเนียมได้ เป็นเวลากว่า 6 ปี ในช่วงก่อนปี ค.ศ. 1951 ที่ห้องปฏิบัติการนิวเคลียร์ที่นี่ได้ทิ้งกากกัมมันตรังสีลงไปในแม่น้ำ Techa ซึ่งเป็นแหล่งน้ำเพียงแห่งเดียวของหมู่บ้าน 24 แห่ง ที่ตั้งเรียงรายตามลำน้ำ โดยไม่มีการอพยพผู้คนออกไป เพียงแต่นำลวดหนามมากั้นไว้และสั่งห้ามประชาชนจับปลาในแม่น้ำ ห้ามเก็บลูกเบอรี่และเห็ดป่า หรือตัดหญ้าในบริเวณนั้น จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1951

ถึงได้พบว่ากระแสน้ำในแม่น้ำพัดพาเอากัมมันตภาพรังสีออกไปถึงมหาสมุทรอาร์กติก จึงได้มีการเปลี่ยนแปลงนโยบายเกี่ยวกับการทิ้งกากกัมมันตรังสี โดยขุดสระจำนวนมากเพื่อกักเก็บน้ำที่มีกัมมันตภาพรังสีเอาไว้ไม่ให้ไหลออกไปภายนอก ส่วนกากกัมมันตรังสีจากโรงงานนำไปทิ้งในทะเลสาบ Karachay ซึ่งเป็นทะเลสาบปิดแทน ทำให้ในทะเลสาบมีการสะสมกัมมันตภาพรังสีสูงถึง 120 ล้านคูรีจาก Cs-137 และ Sr-90 ต่อมาในปี ค.ศ. 1967 เกิดภาวะความแห้งแล้ง ระดับน้ำในทะเลสาบลดลง และลมพายุได้พัดพาเอาฝุ่นกัมมันตรังสี กระจายไปทั่วพื้นที่กว่า 25,000 ตารางกิโลเมตร ทำให้ประชากรกว่า 500,000 คน ได้รับกัมมันตภาพรังสี 5 ล้านคูรี นอกจากนั้นในปี ค.ศ. 1957 ระบบหล่อเย็นของสถานที่เก็บกากกัมมันตรังสีเกิดขัดข้อง และเกิดระเบิดขึ้น ประชากรกว่า 250,000 คนได้รับกัมมันตภาพรังสี 2 ล้านคูรีที่กระจายไปทั่วบริเวณ ยังมีเหตุการณ์ทำนองนี้เกิดขึ้นอีกหลายครั้ง ในพื้นที่ของจังหวัด Chelyabinsk ที่ทำให้มีกัมมันตรังสีกระจายออกไปสู่สิ่งแวดล้อม ในปัจจุบันกัมมันตภาพรังสีในน้ำผิวดินบริเวณทะเลสาบ Karachay ได้แพร่กระจายออกไปไกลกว่า 2 กิโลเมตร ถ้าให้คนเราไปยืนริมทะเลสาบ จะได้รับรังสีถึง 600 เรินเกนต์ ซึ่งเป็นขนาดที่ทำให้เสียชีวิตได้ภายใน 1 ชั่วโมง มีการนำวัสดุต่างๆ เช่นแท่งคอนกรีตโปร่ง หิน ดิน ไปถมทะเลสาบเพื่อลดปริมาณการกระจายของกัมมันตภาพรังสี ส่วนแม่น้ำ Techa ยังคงมีลวดหนามเก่าๆ กั้นอยู่ แต่ประชาชนต่างไม่นำพาต่อคำสั่งที่ไม่มีการกวดขัน นอกจากนั้น ยังมีสระน้ำจำนวนหลายสระข้างๆ แม่น้ำที่เป็นสระเปิดเก็บกักน้ำกัมมันตรังสีเอาไว้มากกว่า 400 ล้านลูกบาศก์เมตร จึงทำให้พื้นที่บริเวณ Chelyabinsk มีการปนเปื้อนกัมมันตรังสีปริมาณสูงที่สุดในโลก ผู้ที่สนใจไปอ่านเพิ่มเติมได้จาก http://www.logtv.com/chelya/cheldis.html

กรณี Bikini Atoll ซึ่งเป็นฝีมือของสหรัฐอเมริกาก็น่าสนใจไม่แพ้กัน ภายหลังสิ้นสุดสงครามโลกครั้งที่ 2 ในเดือนธันวาคม ค.ศ. 1945 ประธานาธิบดีแฮร์รี่ ทรูแมน ได้มีคำสั่งให้กองทัพบกและกองทัพเรือสหรัฐฯ ทำการทดลองอาวุธนิวเคลียร์ร่วมกัน เพื่อดูผลของอะตอมิกบอมบ์ที่มีต่อเรือรบของสหรัฐฯ ทางกองทัพได้เลือกเอาพื้นที่บริเวณ Bikini Atoll ซึ่งอยู่ตอนกลางของมหาสมุทรแปซิฟิกและอยู่ห่างเส้นทางคมนาคมตามปกติ เป็นสถานที่ในปฏิบัติการ 'Operation Crossroads' ในเดือนกุมภาพันธ์ ค.ศ. 1946 นายพลเรือจัตวา Ben H. Wyatt ผู้ว่าการหมู่เกาะมาร์แชล (Bikini Atoll เป็นส่วนหนึ่งของหมู่เกาะมาร์แชล ซึ่งเป็นบริเวณที่รู้จักกันในชื่อ Micronesia) ได้สั่งอพยพชาวเกาะ Bikini โดยประกาศว่าสหรัฐฯ ต้องการทดสอบอะตอมิกบอมบ์เพื่อประโยชน์ของมนุษยชาติ และเพื่อยุติสงครามโลกทั้งหมด ชาวเกาะ 167 คน ถูกนำไปไว้ที่ Rongerik Atoll ห่างออกไป 125 ไมล์ทางด้านตะวันออกของ Bikini Atoll เกาะนี้ไม่มีผู้คนอาศัยเพราะขาดแคลนน้ำจืดและอาหารและชาวเกาะเชื่อว่าเป็นที่อยู่ของภูตผีปีศาจ ซึ่งทำให้ชาวเกาะมีความเดือดร้อนอดอยากเป็นอันมาก ในระหว่างนั้น สหรัฐฯ ได้ทดลองระเบิดนิวเคลียร์ 2 ลูก ซึ่งมีพลังงานใกล้เคียงกับระเบิดนิวเคลียร์ที่สหรัฐฯ นำไปบอมบ์ที่เมืองนางาซากิ ประเทศญี่ปุ่น ในระหว่างช่วงเดือนธันวาคม ค.ศ. 1946 ถึงมกราคม ค.ศ. 1947 หน่วยงานของสหประชาชาติ United Nations Strategic Trust Territory (TT) ได้

มอบพื้นที่ Micromesia ให้อยู่ภายใต้การดูแลของสหรัฐอเมริกา โดยสหรัฐฯ จะต้องปฏิบัติตามข้อตกลงของสหประชาชาติในการที่จะ "สนับสนุนการพัฒนาทางเศรษฐกิจ และการพึ่งพาตนเองของผู้ที่อาศัยในพื้นที่ และจะต้องปกป้องผู้อาศัยในพื้นที่จากการสูญเสียที่ดิน และทรัพยากรอย่างถึงที่สุด" ซึ่งก็เป็นช่วงเวลาเดียวกับที่ชาวเกาะ Bikini โดนขับไล่จากเกาะที่เคยอยู่อาศัยและถูกปล่อยให้มีความอดอยาก พร้อมกับการทิ้งระเบิดนิวเคลียร์ในพื้นที่ของเขา จนกระทั่งหลังจากมีนักข่าวมาพบสภาพของชาวเกาะ และนำไปเขียนเป็นข่าว และหลังจากที่หน่วยงาน TT ได้ขอให้นักวิชาการทางด้านมนุษยวิทยาไปสำรวจสภาพของชาวเกาะ Bikini จึงมีการอพยพชาวเกาะไปที่ Kwajalein Atoll โดยให้อยู่ในเต็นท์ใกล้ฐานบินของกองทัพสหรัฐฯ และสุดท้ายก็โดนอพยพอีกครั้งไปเกาะ Kili ซึ่งเป็นเกาะร้างอีกเช่นกันในเดือนพฤศจิกายน ค.ศ. 1948 เป็นการย้ายชุมชนถึง 3 ครั้ง ในช่วงเวลา 2 ปี โดยที่อาหารไม่พอเพียง และต้องได้รับการสนับสนุนอาหารจากภายนอก ต่อมาในเดือนมกราคม ค.ศ. 1954 กองทัพสหรัฐฯ เตรียมปฏิบัติการ 'Operation Castle' เป็นการทดสอบการทิ้งระเบิดไฮโดรเจนทางอากาศเป็นครั้งแรก เพราะขณะนั้นโซเวียตรัสเซียสามารถผลิตระเบิดไฮโดรเจนได้แล้วตั้งแต่ปี ค.ศ. 1952 มีการทดสอบทิศทาง และความเร็วลมที่ระดับความสูง 10,000-25,000 ฟุต และวัดความดันอากาศทุก 2 ชั่วโมง เมื่อถึงวันที่กำหนด ปรากฏว่าลักษณะของลมไม่เหมาะสม เพราะลมพัดไปในทิศทางหมู่เกาะที่มีคนอาศัยอยู่ แต่ผู้นำระดับสูงสั่งให้เดินหน้าปฏิบัติการต่อไป ในช่วงเช้าของวันที่ 1 มีนาคม ค.ศ. 1954 ระเบิดไฮโดรเจน 'Bravo' จึงระเบิดขึ้นทางด้านตะวันตกเฉียงเหนือของ Bikini Atoll ลูกไฟขนาดใหญ่อุณหภูมิหลายล้านองศาพุ่งขึ้นสู่ท้องฟ้าด้วยความเร็วมากกว่า 300 ไมล์ต่อชั่วโมง และอีกไม่กี่นาทีต่อมาชิ้นส่วนนิวเคลียร์ต่างๆ ก็ถูกนำขึ้นไปสูงกว่า 20 ไมล์ และทำให้เกิดแรงลมซึ่งมีความเร็วหลายร้อยไมล์ต่อชั่วโมง ทำให้เกิดไฟไหม้หมู่เกาะใกล้ๆ ทำลายต้นมะพร้าวที่มีอยู่ แรงระเบิดยังทำให้ทราย ปะการัง พืช สัตว์ทะเล จำนวนหลายล้านตันจากแนวปะการังของเกาะ Bikini และเกาะอีก 3 เกาะ ถูกส่งขึ้นไปในอากาศ หลังการระเบิด 3-4 ชั่วโมง ฝุ่นเถ้ากัมมันตรังสีถูกพัดพาไปตกลงยังเกาะ Rongelap Atoll และ Ailinginae Atoll ซึ่งมีคนอาศัยอยู่ ชาวเกาะซึ่งไม่เคยรับรู้ว่าเกิดอะไรขึ้น ต่างได้รับรังสีปริมาณสูง มีอาการคลื่นไส้ อาเจียน ผมร่วง ซึ่งเกิดขึ้นหลังจากการสัมผัสกับฝุ่นกัมมันตรังสีไม่นานนัก ระเบิดไฮโดรเจนลูกนี้มีพลังงานมากกว่าระเบิดนิวเคลียร์ 'Fat Man' และ 'Little Boy' หลายพันเท่า (Fat Man และ Little Boy คือระเบิดนิวเคลียร์ที่สหรัฐฯ นำไปบอมบ์นางาซากิ และฮิโรชิมา ประเทศญี่ปุ่นในช่วงปลายสงครามโลกครั้งที่ 2) หลังจากการทดลองระเบิด ระดับกัมมันตภาพรังสีในพื้นที่สูงขึ้น มีการกำหนดพื้นที่ห้ามเข้าเพิ่มเติมจาก Bikini Atoll อีก 4 แห่ง แต่ปรากฏว่าไม่มีการอพยพผู้คนออกจากเกาะเหล่านั้นเลย ทั้งๆ ที่หลังจากนั้นก็มีการทดลองอาวุธนิวเคลียร์บน Bikini Atoll กันต่อไปและทำให้บริเวณที่มีการปนเปื้อนรังสีขยายวงกว้างออกไปอีก ต่อมาในปี ค.ศ. 1967 รัฐบาลสหรัฐฯ ได้พิจารณาที่จะนำชาวเกาะ Bikini กลับสู่มาตุภูมิและได้กำหนดแผนการ 8 ปี ในการกำจัดกัมมันตภาพรังสี รวมทั้งจัดการปลูกต้นมะพร้าวขึ้นทดแทน ในปี ค.ศ. 1972 การปลูกต้นมะพร้าวเสร็จสิ้นสมบูรณ์ แต่หน่วยงาน Atomic Energy Commission (AEC)

พบว่า ปูมะพร้าวบนเกาะ Bikini เวลาที่ลอกคราบแล้วจะกินเปลือกของมันที่ลอกคราบออกมา ปรากฏว่าเปลือกปูดังกล่าวมีกัมมันตภาพรังสีในปริมาณสูง AEC จึงประกาศว่าปูมะพร้าวยังเป็นกัมมันตรังสี ควรจะจำกัดปริมาณในการนำมาเป็นอาหาร ชาวเกาะ Bikini ส่วนใหญ่จึงไม่ยินยอมอพยพกลับตามเวลาที่สหรัฐฯ กำหนดไว้ แต่เนื่องจากความอดอยาก ทำให้ชาวเกาะ Bikini บางส่วนทยอยเดินทางกลับมาตุภูมิ จนปี ค.ศ. 1975 ก็มีชาวเกาะกลับไปอยู่อาศัยมากขึ้น จนกระทั่งเดือนมิถุนายน ค.ศ. 1975 การตรวจวัดระดับกัมมันตภาพรังสี พบว่าระดับกัมมันตภาพรังสีมีสูงเกินกว่าที่คาดไว้มาก เจ้าหน้าที่ของ Department of Interior ของสหรัฐฯ กล่าวว่า เกาะ Bikini มีระดับรังสีสูงเกินจนอาจไม่ปลอดภัย ต่อมา AEC ก็ประกาศว่าอาหารที่มาจากพืชที่ปลูกบนเกาะ Bikini มีปริมาณกัมมันตรังสีสูงเกินกว่าที่จะใช้เป็นอาหารได้ ในเดือนตุลาคม ค.ศ. 1975 ชาวเกาะ Bikini ซึ่งตื่นตระหนก และสับสนกับรายงานสภาวะกัมมันตภาพรังสีบนเกาะได้ยื่นฟ้องต่อ U.S. federal court ให้ทำการสำรวจทางวิทยาศาสตร์โดยละเอียดในบริเวณ Bikini Atoll และหมู่เกาะมาร์แชลตอนเหนือ แต่สหรัฐฯ ก็มิได้ดำเนินการใดๆ ในขณะที่ชาวเกาะก็ยังคงอาศัยอยู่บน Bikini Atoll ที่มีการปนเปื้อนกัมมันตรังสีในปริมาณสูงต่อไป ในเดือนกันยายน ค.ศ. 1978 เจ้าหน้าที่ของ Trust Territory จึงมาทำการอพยพชาวเกาะที่อาศัยอยู่บน Bikini Atoll ออกไปอีกครั้งหนึ่ง และในทุกวันนี้ชาวเกาะ Bikini ก็ยังอาศัยอยู่อย่างกระจัดกระจายตามเกาะต่างๆ ของหมู่เกาะมาร์แชล และตามส่วนต่างๆ ของโลก และกำลังรอการทำความสะอาดเพื่อกำจัดกัมมันตภาพรังสีบนแผ่นดินแม่ของพวกเขาอยู่ต่อไป ผู้ที่สนใจในเรื่องนี้อ่านรายละเอียดเพิ่มเติมได้ที่ http://www.bikiniatoll.com/history.html

2. กากกัมมันตรังสี

ปัญหาใหญ่ที่สุดเกี่ยวกับการใช้พลังงานนิวเคลียร์ก็คือจะจัดการกับของเสียนิวเคลียร์จากโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ได้อย่างไรโดยปลอดภัย ความพะวงในเรื่องนี้มิได้มาจากความกลัวว่าจะเกิดการระเบิดของสารนิวเคลียร์ แต่มาจากความกลัวในกัมมันตภาพรังสีที่ปล่อยออกมาจากธาตุกัมมันตรังสีในขณะสลายตัว และความสามารถของอนุภาคแอลฟา อนุภาคบีตา และรังสีแกมมา ที่ทำให้อะตอมและโมเลกุลของสารแตกตัวมากกว่า เชื้อเพลิงนิวเคลียร์ที่ใช้งานแล้วแต่ยังมีกัมมันตภาพรังสีในปริมาณสูง ยังคงทำให้มีรังสีปริมาณสูงต่อไปอีกเป็นเวลานานเพราะไอโซโทปกัมมันตรังสีหลายตัวมีเวลาครึ่งชีวิตที่ยาวนานมาก ตัวอย่างเช่น Pu-239 มีเวลาครึ่งชีวิต 2.4×10^{4} ปี U-235 มีเวลาครึ่งชีวิต 7×10^{8} ปี และ U-238 มีเวลาครึ่งชีวิต 4.5×10^{9} ปี เป็นต้น

ปัญหาจากการใช้ยูเรเนียมเป็นเชื้อเพลิงในโรงไฟฟ้านิวเคลียร์เกิดขึ้นเพราะว่า ถึงแม้ยูเรเนียมเพียง 1 กิโลกรัม จะให้พลังงานเทียบเท่ากับถ่านหิน 2000 ตัน และการทำเหมืองยูเรเนียมจะมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยกว่าการทำเหมืองถ่านหินก็ตาม แต่วัฏจักรการใช้ยูเรเนียมเป็นเชื้อเพลิงทำให้เกิดอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมาก ก่อนที่จะนำยูเรเนียมจากเหมืองมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้

จะต้องทำให้มีความเข้มข้นเพิ่มมากขึ้นเสียก่อน ในประเทศสหรัฐอเมริกาช่วงก่อนปี ค.ศ. 1970 มีการทิ้งหางแร่ยูเรเนียมไว้ใกล้ๆ โรงถลุงแร่และบางส่วนถูกใช้ในการถมที่ ที่เมือง Grand Junction รัฐโคโลราโด มีการทิ้งหางแร่ยูเรเนียมกระจายในพื้นที่เป็นบริเวณกว้าง ซึ่งต่อมามีการปลูกบ้านพักอาศัยในพื้นที่นั้นมากกว่า 4000 หลัง ผู้ที่อาศัยในบ้านเหล่านั้นจะได้รับรังสีในปริมาณเทียบเท่ากับการเอกซ์เรย์ทรวงอกสัปดาห์ละครั้ง อัตราการเป็นมะเร็งเม็ดเลือดขาวของประชาชนในบริเวณนี้สูงกว่าบริเวณอื่นถึงสองเท่า และในที่สุดก็ต้องมีการขุดเอาทรายกัมมันตรังสีออกไปโดยเสียค่าใช้จ่ายสูงมาก

โรงงานไฟฟ้านิวเคลียร์ยังทำให้เกิดกากกัมมันตรังสีซึ่งมีรังสีระดับต่ำ ซึ่งเป็นอันตรายมากว่า 300 ปี ในประเทศสหรัฐอเมริกา ได้นำเอากากกัมมันตรังสีดังกล่าวซึ่งมาจากโรงงานไฟฟ้า โรงพยาบาล และจากแหล่งการใช้อื่นๆ จำนวนมากกว่า 3 ล้านลูกบาศก์ฟุตไปฝังกลบไว้ในหลุมตื้นๆ ซึ่งที่จริงแล้วจะต้องมีการกำจัดกากกัมมันตรังสีเหล่านี้ แต่รัฐบาลกลางและรัฐบาลของรัฐเองต่างเพิกเฉยต่อปัญหาดังกล่าว กัมมันตภาพรังสีส่วนใหญ่มีการรั่วไหลเข้าสู่สิ่งแวดล้อม ทั้งดินและน้ำบาดาล ส่วนกากกัมมันตรังสีที่มีกัมมันตภาพรังสีสูงจากโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ซึ่งเป็นเชื้อเพลิง U-235 ที่ใช้แล้ว และผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาฟิชชันของ U-235 ได้แก่ I-131, Cs-137, Sr-90 ก็มีอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมอย่างใหญ่หลวงเช่นกัน เพราะจะยังคงมีกัมมันตภาพรังสีเป็นเวลาหลายหมื่นปี ปัญหาเรื่องการกำจัดกากกัมมันตรังสีเป็นเรื่องใหญ่ เหมือนเผือกร้อนที่ไม่มีใครอยากรับเอาไว้ ชาวบ้านก็ไม่อยากให้มีกัมมันตภาพรังสีมาอยู่ใกล้บริเวณที่อยู่อาศัย ผลก็คือมีการนำกากกัมมันตรังสีที่เป็นของเหลวหลายล้านลิตรและมีกัมมันตภาพรังสีปริมาณสูงบรรจุใส่ถังเหล็กเก็บไว้ใกล้ๆ กับเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ ถังเหล็กเหล่านี้ผุกร่อนได้ และต้องมีการเปลี่ยนถังใหม่เป็นครั้งคราว แต่กฎข้อบังคับก็ยังไม่ชัดเจน ทำให้ประชาชนไม่ทราบว่ามีการเก็บกากกัมมันตรังสีไว้ที่ใดบ้าง

นอกจากกากกัมมันตรังสีที่มาจากโรงไฟฟ้านิวเคลียร์แล้ว กิจกรรมทางทหารก็ผลิตของเสียนิวเคลียร์มากกว่าปีละ 2 ตัน ทางการสหรัฐฯ คาดว่า ภายใน ปี ค.ศ. 2010 จะมีกากกัมมันตรังสี ซึ่งมีกัมมันตภาพรังสีระดับสูง ที่ต้องจัดการมากกว่า 100,000 ตัน

สหรัฐฯ เองยังมีปัญหาเกี่ยวกับสถานที่ถาวรในการจัดเก็บกากกัมมันตรังสีระดับสูง เพราะกากกัมมันตรังสีลักษณะนี้ต้องใช้วิธีขุดอุโมงค์ฝังในชั้นดินที่ลึกและมั่นคง ไม่มีปัญหาจากแผ่นดินไหวหรือภูเขาไฟระเบิด หรือแม้แต่วินาศภัยจากการจารกรรมใดๆ ทั้งสิ้น มีชั้นธรณีลึกที่เหมาะสม รวมถึงชั้นของหินอัคนี ชั้นของหินตะกอนหรือหินแปรเป็นต้น ซึ่งรัฐบาลกลางสหรัฐฯ ก็ได้ระบุพื้นที่ที่เหมาะสมเอาไว้คือที่รัฐเนวาดา เท็กซัส วอชิงตัน และมิสซิสซิปปี แต่ก็อย่างที่กล่าวมาแล้วว่า ปัญหาทางนิวเคลียร์เกี่ยวกับปัญหาทางการเมือง และรัฐแต่ละรัฐก็มีกฎหมายของตัวเอง ส่วนใหญ่ก็ใช้นโยบาย NIMBY (not in my back yard) นอกจากนี้ก็ยังมีผลกระทบต่อชาวดินเดียนแดงที่อาศัยอยู่ในเขตสงวนสำหรับอินเดียนแดง ซึ่งเป็นพื้นที่เป้าหมายด้วย

ดังนั้น จะเห็นว่าการจัดการกับพลังงานนิวเคลียร์มิใช่ของง่าย ประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งมีการศึกษาพัฒนาความรู้ทางด้านนิวเคลียร์ จนเป็นชาติมหาอำนาจชาติหนึ่งของโลก ก็ยังประสบปัญหามากมาย จึงไม่น่าแปลกใจที่ชาวบ้าน อำเภอองครักษ์ จังหวัดนครนายก ก็ใช้นโยบาย NIMBY ต่อต้านศูนย์วิจัยนิวเคลียร์องครักษ์ของรัฐบาลไทยเช่นกัน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี