

มารู้จัก

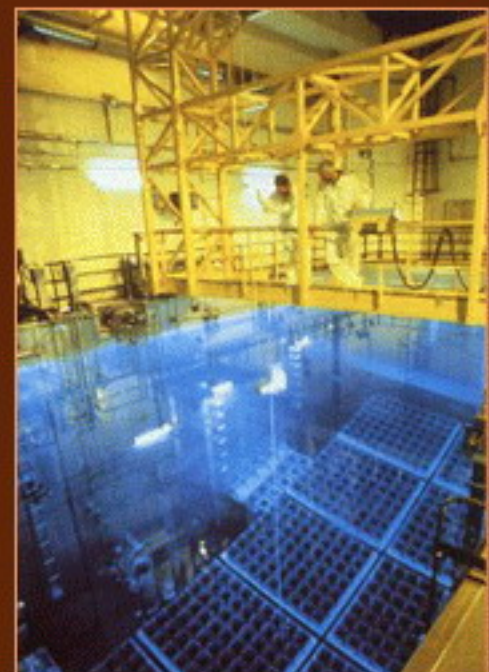
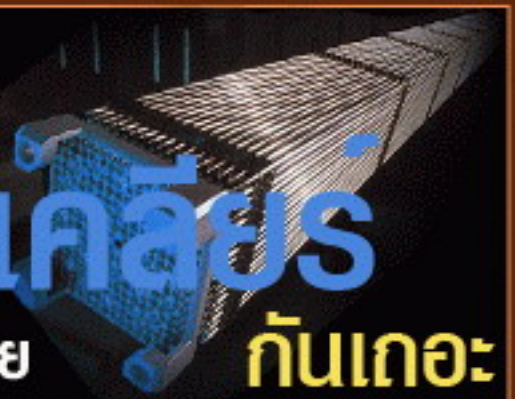
เชื้อเพลิงนิวเคลียร์



สมาคมนิวเคลียร์แห่งประเทศไทย

ISBN 974-91570-1-Z

กันเถอะ



สนับสนุนโดย

กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี



คณะกรรมการบริหารสมาคมนิวเคลียร์แห่งประเทศไทย
ปี พ.ศ. 2547-2548

ที่ปรึกษา	: นายสุชาติ มงคลพันธุ์ : รศ.ดร. ธัชชัย สุมิตร : นายวิวัฒน์ พุกกะวัน : ศ. นพ. สาโรจน์ วรรณพุกษ์ : ดร. มนูญ อร่ามรัตน์	: ศ.นพ. ร่มไทร สุวรรณิก : ศ.ดร. ถิรพัฒน์ วิลัยทอง : นายปฐม แหยมเกตู : นายวิเชียร อธิสุข
นายกเฟื่องผ่านพ้น	: ผศ.ดร. บุญส่ง ศิวโมกษธรรม	
นายกสมาคม	: ผศ.ดร. สมพร จองคำ	
อุปนายกสมาคม	: รศ.พล.ต.ดร. ชัยณรงค์ เชิดชู : ผศ. ปรีชา การสุทธิ	
เลขาธิการ	: นายอารีรัตน์ คอนดวงแก้ว	
ผู้ช่วยเลขาธิการ	: นายวิเชียร รตนธงชัย	
ประธานฝ่ายวิชาการ	: ดร. วรรณมา เชื้ออินตะ	
เหรียญก	: ดร. สิรินาฏ เลาะห์โรจนพันธ์	
นายทะเบียน	: รศ. มลลิต์ ตันทวีรุฬห์	
ปฏิคม	: นางรจนา ชินพิทักษ์	
ประชาสัมพันธ์	: นายสุพัฒน์ ปัญญามาก	
ผู้ช่วยประชาสัมพันธ์	: ร.อ. วรพจน์ โปธิกนิษฐ์	: นายสุมล ใจมล
บรรณาธิการ	: รศ. นเรศร์ จันทน์ขาว	
บรรณารักษ์	: นางวไลลักษณ์ แพทย์วิบูลย์	
กรรมการกลาง	: ดร. อาชอำพล ชัมพานนท์ : นายวิฑิต เกษคุปต์ : รศ. สมยศ ศรีสถิตย์ : นางสาวยุพา จันทะชุม : นายประเวทย์ แก้วช่วง	: ศ.ดร. สิรินุช ลามศรีจันทร์ : รศ.พญ. ภาวนา ภูสุวรรณ : นายยุทธพงศ์ ประชาสิทธิศักดิ์ : นายมานิตย์ ช้อนสุข : นายมนต์ชัย ราปรินทวีสุข
อนุกรรมการฝ่ายประชาสัมพันธ์	: นางยศพิณ สิริเวชชะพันธ์ : นางศศิพันธุ์ คณะวีรัตน์	: นายธีรวิฑูร มหาเปารยะ
อนุกรรมการฝ่ายวิชาการ	: ดร. ปราบรณา คิ้วสุวรรณ	: ดร. เกศินี เหมวิเชียร
คณะกรรมการสาขาต่างจังหวัด	: รศ.ดร.ธวัช ชิตตระการ : ผศ.นพวรรณ ศรีรัตนประสิทธิ์	: รศ.ดร.วิจิตร เกิดผล
สำนักงาน :	สมาคมนิวเคลียร์แห่งประเทศไทย C/O สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ 16 ถนนวิภาวดีรังสิต จตุจักร กทม. 10900 โทร. 02-5620119 โทรสาร 02-5613013 เว็บไซต์ : http://www.nst.or.th	

คำนำ

ประเทศไทยเรามีวัตถุดิบสำหรับผลิตเชื้อเพลิงนิวเคลียร์หรือไม่? เป็นคำถามยอดฮิตในยามที่การใช้พลังงานของโลกอยู่ในขั้นวิกฤตเนื่องจากน้ำมันดิบมีราคาสูงขึ้นเรื่อยๆ ปริมาณเชื้อเพลิงสำรองประเภทฟอสซิลอันได้แก่ ก๊าซธรรมชาติ น้ำมันดิบและถ่านหินมีอยู่อย่างจำกัด และรองรับปริมาณการใช้พลังงานของโลกได้อีกไม่นานนัก คาดกันว่าอีกประมาณ 100 ปี เชื้อเพลิงเกือบทุกชนิดก็จะหมดไปจากโลกหรือถ้ามีเหลือก็เสาะหาได้ยากเต็มที คำถามที่ควรจะถามอีกคือ แล้วถึงเวลานั้นลูกหลานของเราจะเอาเชื้อเพลิงที่ไหนมาใช้?

ปัจจุบันประเทศไทยเรามีความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าในอัตราเพิ่มขึ้นประมาณปีละ 1,000 เมกกะวัตต์ ซึ่งโดยส่วนใหญ่เราใช้ก๊าซธรรมชาติในการผลิตกระแสไฟฟ้าจำนวนมากกว่า 70% ส่วนที่เหลือผลิตจากถ่านหิน น้ำมันเตาและพลังน้ำจากเขื่อน พลังงานทดแทนชนิดต่าง ๆ เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลมและพลังงานชีวมวลนั้นมีข้อจำกัดไม่สามารถผลิตไฟฟ้าปริมาณมากตามความต้องการได้ สามารถเป็นได้เพียงพลังงานเสริมด้วยปริมาณที่ไม่มากนัก

พลังงานนิวเคลียร์จึงเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับอนาคตของลูกหลานเราที่จะนำมาใช้ผลิตกระแสไฟฟ้า สมาคมนิวเคลียร์แห่งประเทศไทยจึงมีการเตรียมพร้อมในการเผยแพร่ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับเชื้อเพลิงนิวเคลียร์เพื่อให้ผู้สนใจได้ทราบถึงที่มาและวิธีการผลิต ตลอดจนการจัดการเกี่ยวกับเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ที่ใช้แล้ว เป็นเรื่องที่สามารถเข้าใจสาระและความรู้ เขียนโดยอาจารย์ปรีชา การสุทธิ และอาจารย์วิฑิต เกษคุปต์ ซึ่งท่านเคยเป็นผู้ตรวจเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ประจำทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ (IAEA) (ปัจจุบันพ.ศ. 2548 มีการใช้โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ 425 โรงใน 24 ประเทศ) ความรู้และประสบการณ์ตรงที่ท่านได้ถ่ายทอดออกมาเป็นเรื่องราวที่น่าอ่าน น่าติดตามอย่างยิ่ง เหมาะสำหรับผู้อ่านทั่วไปแม้ว่าจะไม่มีความรู้พื้นฐานทางนิวเคลียร์มาก่อนก็ตาม

สมาคมนิวเคลียร์แห่งประเทศไทย ขอขอบคุณต่ออาจารย์ปรีชา การสุทธิ และอาจารย์วิฑิต เกษคุปต์ สำหรับงานเขียนอันมีคุณค่าต่อประชาชนเล่มนี้

สมาคมนิวเคลียร์แห่งประเทศไทย

ตุลาคม พ.ศ. 2548

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
มารู้จัก เชื้อเพลิงนิวเคลียร์กันเถอะ	1
ปฏิกิริยาฟิชชัน	6
ปฏิกิริยาฟิวชัน	7
ยูเรเนียม-235	8
พลูโทเนียม-239	11
ยูเรเนียม-233	11
ไฮโดรเจน-2 หรือ ดิวเทอเรียม	12
ไฮโดรเจน-3 หรือ ทริเทียม	12
วัฏจักรเชื้อเพลิงนิวเคลียร์	13
Mining & Milling	14
การเปลี่ยนสภาพของยูเรเนียม จาก U_3O_8 เป็น UF_6	15
การเสริมสมรรถนะ	16
การประกอบแท่งเชื้อเพลิง	18
การจัดการเกี่ยวกับเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ใช้แล้ว	20
การแปรสภาพเชื้อเพลิงใช้แล้ว	22
การวัดการแผ่รังสีจากแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้ว	24
เอกสารอ้างอิง	24

มารู้จัก เชื้อเพลิงนิวเคลียร์กันเถอะ

วิจิต เกษกุลต์
ปรีชา การสุทธิ

เมื่อกล่าวถึงคำว่า “ เชื้อเพลิง (fuel) ” ผู้เขียนเชื่อว่าทุกคนคงรู้จัก และมีความเข้าใจว่าเชื้อเพลิงเมื่อเผาไหม้จะให้ความร้อนออกมา โดยความร้อนนี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่างๆได้ เชื้อเพลิงดังกล่าว เป็นเชื้อเพลิงธรรมดา การให้ความร้อนซึ่งเป็นพลังงานรูปหนึ่งออกมานั้น เป็นผลจากการเกิดปฏิกิริยาเคมี

แต่เมื่อกล่าวถึงคำว่า เชื้อเพลิงนิวเคลียร์ (nuclear fuel) ผู้อ่านบางท่านอาจสั่นหัวบอกไม่รู้จัก บางท่านอาจขมวดคิ้วแล้วบอกว่ารู้จักแต่คำว่า เชื้อเพลิงปรมาณู บางท่านอาจบอกว่าเคยผ่านหูผ่านตาจากการฟัง อ่าน ข่าว เรื่องโครงการนิวเคลียร์ของเกาหลีเหนือและอิหร่าน บางท่านอาจบอกว่ารู้จักคำนี้แต่ไม่แน่ใจว่าคืออะไร ช่วยเล่าให้ฟังหน่อยซิ

นี่เองเป็นที่มาของเรื่อง “ มารู้จัก เชื้อเพลิงนิวเคลียร์ กันเถอะ ” ซึ่งผู้เขียนจะขอเล่าไปเรื่อยๆ แบบกว้างๆ ไม่เป็นวิชาการมากนัก

ก่อนเข้าเรื่อง ผู้เขียนขอเล่าอะไรเล็กน้อยเพื่อให้ได้รู้จักคำศัพท์ บางคำที่ต้องเอ่ยถึงในเรื่องนี้ สมมุติว่า ท่านผู้อ่าน มีก้อนทองคำบริสุทธิ์ร้อยเปอร์เซ็นต์อยู่ก้อนหนึ่ง หรือเป็นก้อนของธาตุบริสุทธิ์อะไรก็ได้ แล้วให้ลองคิดดูซิว่า ถ้าแบ่งก้อนดังกล่าวนี้ให้เล็กลงไปเรื่อยๆ มันจะไปสิ้นสุดตรงไหน

จากแนวความคิดของนักปรัชญา ประกอบกับผลการค้นคว้าวิจัยของนักวิทยาศาสตร์สมัยแรกๆ สรุปได้ว่าเมื่อแบ่งไป แบ่งไปเรื่อยๆจะไปสิ้นสุดที่ส่วนเล็กที่สุดที่ยังคงมีคุณสมบัติทางเคมีของธาตุนั้นๆอยู่ และเรียกส่วนที่เล็กที่สุดนี้ว่าอะตอม (atom) ดังนั้นจะมีทองคำอะตอม ไฮโดรเจนอะตอม ออกซิเจนอะตอม ยูเรเนียมอะตอม ฯลฯ

อะตอมเป็นคำทับศัพท์จากภาษาอังกฤษ สมัยก่อนมีการแปลเป็นไทยว่า ปรมาณู แต่ปัจจุบันไม่ค่อยนิยมใช้กัน

จากนี้ไป ขอให้ผู้อ่านทำใจให้สงบ แล้วนึกให้เห็นภาพตามการอ่านไปเรื่อยๆ เหมือนนวนิยายที่มีตัวละครชื่อต่างๆ

เมื่อพบว่าอะตอมมีอยู่จริง นักวิทยาศาสตร์ก็ค้นคว้าต่อไปว่าอะตอมนั้นเป็นอย่างไร ซึ่งก็พบว่าอะตอมเป็นสิ่งที่เล็กที่สุดในแง่คุณสมบัติทางเคมี แต่ไม่เป็นสิ่งที่เล็กที่สุดในแง่คุณสมบัติทางฟิสิกส์ ทั้งนี้โดยพบว่าอะตอมมีองค์ประกอบอยู่ 2 ส่วน คือ ส่วนที่หนึ่งเป็นแกนกลาง ที่เรียกว่า นิวเคลียส (nucleus) ส่วนที่สองเป็นกลุ่มอนุภาคอิเล็กตรอน (electron) โคจรรอบนิวเคลียสเป็นชั้นๆ เหมือนดาวเคราะห์โคจรรอบดวงอาทิตย์อนุภาคอิเล็กตรอนมีประจุไฟฟ้าลบ หนึ่งหน่วย

สำหรับแกนกลางหรือนิวเคลียส นักวิทยาศาสตร์ยังพบอีกว่า ประกอบด้วยกลุ่มอนุภาคที่สำคัญอยู่ 2 ชนิด รวมอยู่ด้วยกัน คือ โปรตอน (proton) ซึ่งแต่ละอนุภาคมีประจุไฟฟ้าบวกหนึ่งหน่วยและ นิวตรอน (neutron) ซึ่งเป็นอนุภาคที่ไม่มีประจุไฟฟ้า การที่อนุภาคทั้งสองกลุ่มนี้อยู่รวมกันได้ในนิวเคลียสก็ด้วยมีแรงนิวเคลียส (nuclear) ยึดเหนี่ยวกันไว้

ตามความจริงในนิวเคลียส ยังมีอนุภาคย่อยๆ อีกหลายอนุภาค เช่น นิวทริโน แอนตินิวทริโน มีซอน แต่ในที่นี้จะไม่กล่าวถึงเพราะไม่มีบทบาทในเรื่องที่เราจะพูดกัน

ในสภาพปกติ แต่ละอะตอมจะมีจำนวนโปรตอนเท่ากับจำนวนอิเล็กตรอน นั่นคือเป็นกลางในแง่ของประจุไฟฟ้า

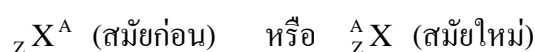
นอกจากนี้ นักวิทยาศาสตร์ยังพบอีกว่าธาตุแต่ละธาตุ ไม่ได้มีอะตอมหรือนิวเคลียสชนิดเดียว แต่จะมีหลายชนิดโดยแต่ละชนิดในนิวเคลียสจะมีจำนวนโปรตอนเท่ากัน แต่จำนวนนิวตรอนไม่เท่ากัน ตัวอย่างเช่น ธาตุไฮโดรเจน มีอะตอมหรือนิวเคลียส 3 ชนิด **ชนิดแรก** เป็นอะตอมที่นิวเคลียสมีโปรตอนหนึ่งอนุภาคเท่านั้น ไม่มีนิวตรอน **ชนิดที่สอง** เป็นอะตอมที่นิวเคลียสมีโปรตอนหนึ่งอนุภาคกับนิวตรอนหนึ่งอนุภาค **ชนิดที่สาม** เป็นอะตอมที่นิวเคลียสมีโปรตอนหนึ่งอนุภาคกับนิวตรอนสองอนุภาค

ในทางวิทยาศาสตร์ ไม่เรียกว่าชนิด แต่เรียกว่าไอโซโทป ดังนั้นจึงต้องพูดว่า ไฮโดรเจน มี 3 ไอโซโทป ออกซิเจน มี 13 ไอโซโทป ยูเรเนียมมี 16 ไอโซโทป พลูโทเนียม มี 15 ไอโซโทป เป็นต้น

ไอโซโทปของแต่ละธาตุ บางไอโซโทปมีอยู่แล้วในธรรมชาติ บางไอโซโทป ซึ่งเป็นส่วนใหญ่จะเป็นไอโซโทปที่มนุษย์ทำให้เกิดขึ้น อาจจะโดยจงใจ หรือ โดยบังเอิญก็ตาม

คุณสมบัติทางเคมีของแต่ละไอโซโทปของธาตุเดียวกันจะเหมือนกัน เพราะปฏิกิริยาเคมีจะเกิดกับอิเล็กตรอน ที่โคจรรอบนิวเคลียส ซึ่งทุกไอโซโทปของธาตุนั้นๆ จะมีจำนวนอิเล็กตรอนเท่ากัน แต่ถ้าเป็นคุณสมบัติทางฟิสิกส์และทางนิวเคลียร์จะต่างกัน เพราะมีจำนวนนิวตรอนที่ต่างกันเข้ามาเกี่ยวข้องด้วยนั่นเอง

เนื่องจากธาตุแต่ละธาตุมีหลายไอโซโทปดังกล่าวแล้วดังนั้นการจะพูดถึงไอโซโทปใด จะต้อง มีหลักเกณฑ์บ่งบอกให้เข้าใจตรงกัน ซึ่งที่ใช้กันคือ การเขียนแบบข้างล่างนี้



เมื่อ $X =$ สัญลักษณ์ของธาตุ

$A =$ เลขเชิงมวล (mass number) มีค่าเท่ากับจำนวนโปรตอนบวกกับจำนวนนิวตรอน ในนิวเคลียสของไอโซโทปนั้น

$Z =$ เลขเชิงอะตอม (atomic number) มีค่าเท่ากับจำนวนโปรตอน ในนิวเคลียสของไอโซโทปนั้น

ถ้าเอาค่า Z ลบออกจากค่า A เราจะได้ค่าจำนวนนิวตรอนในนิวเคลียสนั้น

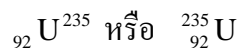
ตัวอย่าง ถ้าต้องการกล่าวถึง ยูเรเนียมไอโซโทปที่ในนิวเคลียสมีนิวตรอน 143 อนุภาค จะเขียนบอกอย่างไร

สิ่งแรก ต้องทราบว่า ยูเรเนียม มีสัญลักษณ์ของธาตุว่าอะไร ซึ่งก็คือ U

สิ่งต่อไป ต้องหาว่าธาตุยูเรเนียมมีโปรตอนอยู่ในนิวเคลียสจำนวนเท่าไร หรือมีค่าเลขเชิงอะตอมเท่าไร ซึ่งก็พบว่าเท่ากับ 92

จากนี้เราก็สามารถหาค่าเลขเชิงมวลได้ว่าเท่ากับ $92 + 143 = 235$

ดังนั้น จึงเขียนสัญลักษณ์ยูเรเนียมไอโซโทปดังกล่าวได้ดังนี้



มีบางคน รวมทั้งผู้เขียนด้วยที่ไม่อยากเขียนตัวเลขห้อยข้างบน ห้อยข้างล่าง เลยเขียนแบบง่ายๆ ว่า $U-235$ แล้วอ่านว่า ยูเรเนียม 235 โดยตัดค่า 92 ออกไป เพราะอย่างไรยูเรเนียมไอโซโทปทุกตัวต่างก็มีจำนวนโปรตอนในนิวเคลียสเท่ากับ 92 เหมือนกันอยู่แล้ว ดังนั้น จึงละไว้ในฐานเข้าใจได้

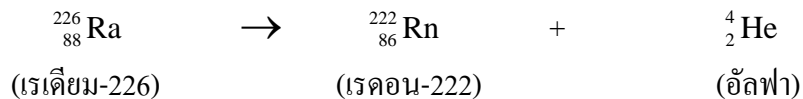
มีคำศัพท์ที่น่าทราบอีกคำหนึ่ง คือ นิวไคลด์ (nuclide) เป็นคำที่ใช้เรียกอะตอม หรือนิวเคลียสใดๆ ที่ต้องมีการบ่งบอกถึงจำนวนโปรตอนและนิวตรอนในนิวเคลียส เป็นคำที่ใช้แบบกว้างๆ เช่น Na-23 , Na-24 , Na-25 , K-40 เป็นนิวไคลด์ที่แตกต่างกัน ส่วน Na-23 Na-24 Na-25 เป็นไอโซโทปของโซเดียม

ถ้า “ไอโซโทป” กับ “นิวไคลด์” จะพบว่ามีการใช้สลับแทนกันไปแทนกันมาเสมอ ซึ่งก็ยอมรับกัน

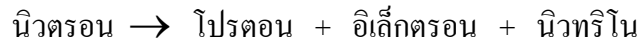
มาถึงตอนนี้เรารู้จักคำ อะตอม นิวเคลียส โปรตอน นิวตรอน อิเล็กตรอน เลขเชิงอะตอม เลขเชิงมวล ไอโซโทป นิวไคลด์ แล้ว ต่อไปมาเข้าเรื่องกัน

จากการค้นคว้าวิจัยของนักวิทยาศาสตร์ต่อมา ทำให้พบว่า ไอโซโทป หรือนิวไคลด์ บางตัว มีพลังงานในรูปของรังสีแผ่ออกมาด้วย ซึ่งเมื่อตรวจรังสีดังกล่าวก็พบว่ามันที่สำคัญ และมีการกล่าวถึงเสมอ อยู่ 3 ชนิด คือ

1. เป็นกระแสของอนุภาคชนิดหนึ่ง ซึ่งแต่ละอนุภาคประกอบด้วยโปรตอน 2 อนุภาคกับ นิวตรอน 2 อนุภาค มีจุไฟฟ้าบวกสองหน่วย รังสีนี้มีชื่อเรียกว่า รังสีอัลฟา (alpha ray ; alpha radiation) ส่วนอนุภาคเรียกว่า อนุภาคอัลฟา จะสังเกตเห็นว่าอนุภาคอัลฟานี้มีลักษณะเช่นเดียวกับ นิวเคลียสของนิวไคลด์ ซีเลียม - 4 สำหรับนิวไคลด์ นี้แผ่รังสีอัลฟาออกไปแล้ว ตัวเองจะกลายเป็น นิวไคลด์ของธาตุใหม่ทันที ทั้งนี้เพราะโปรตอนหายไป 2 อนุภาค และ นิวตรอนหายไป 2 อนุภาค นั่นเอง เช่น เรเดียม-226 เมื่อแผ่รังสีอัลฟาออกไปแล้วตัวเองจะกลายเป็นเรดอน-222 ดังสมการ

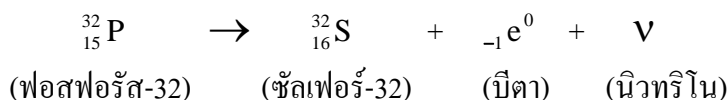


2. เป็นกระแสของอนุภาคอิเล็กตรอน อนุภาคอิเล็กตรอน มีประจุไฟฟ้าลบหนึ่งหน่วย รังสีนี้มีชื่อว่า รังสีบีตา (beta rays ; beta radiation) ส่วนอนุภาคอิเล็กตรอนที่แผ่ออกมามีชื่อเรียกว่า อนุภาค บีตา (beta Particle) คงสงสัยว่าในนิวเคลียสมีแต่โปรตอนกับนิวตรอนทำไมมีอิเล็กตรอนแผ่ออกมาได้ คำอธิบายคือ ในนิวเคลียสนั้นเกิดความไม่เสถียรระดับหนึ่ง ทำให้นิวตรอน สลายตัวเป็นโปรตอนกับ อิเล็กตรอนและนิวตริโน (neutrino) ดังสมการ



โปรตอนที่เกิดขึ้นนี้จะคงอยู่ในนิวเคลียส ส่วนอิเล็กตรอนและนิวตริโน จะถูกผลักออกจาก นิวเคลียส สำหรับนิวตริโนเป็นอนุภาคย่อย ที่ไม่มีมวลและไม่มีประจุ เป็นสิ่งที่นักวิทยาศาสตร์ใช้อธิบายการคงอยู่ของพลังงานในการสลายตัวแบบแผ่รังสีบีตา ปรัชญาการณนี้ดูแปลกๆ สำหรับพวกเรา แต่ในขั้นนี้ขอให้อ่านนักวิทยาศาสตร์บอกไว้เพราะเขาพิสูจน์แล้ว

สำหรับนิวไคลด์ที่แผ่รังสีบีตาออกไปแล้ว ตัวเองจะกลายเป็นนิวไคลด์ของธาตุใหม่ทันที ทั้งนี้เพราะมีโปรตอนที่เกิดจากการสลายตัวของนิวตรอนเพิ่มขึ้นมาอีกหนึ่งอนุภาคนั่นเอง เช่น ฟอสฟอรัส - 32 เมื่อแผ่รังสีบีตาออกไปแล้ว ตัวเองจะกลายเป็นซัลเฟอร์-32 ดังสมการ



3. เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ที่มีความถี่สูงมาก รังสีนี้มีชื่อเรียกว่า รังสีแกมมา (gamma ray ; gamma radiation) รังสีแกมมานี้มีคุณสมบัติความเป็นอนุภาคด้วยเช่นกัน ปกติการแผ่รังสีแกมมาจะ ร่วมมาด้วยการแผ่รังสีอัลฟา หรือ บีตา

ไอโซโทปหรือนิวไคลด์ที่แผ่รังสีดังกล่าวข้างบน เราเรียกว่า ไอโซโทปรังสี (radioisotope) หรือ นิวไคลด์รังสี (radionuclide) ทำนองเดียวกับวัสดุใดแผ่รังสี เราก็เรียกว่าวัสดุกัมมันตรังสี (radioactive material)

ปกติเมื่อพูดถึง ไอโซโทปรังสี นิวไคลด์ รังสี หรือ วัสดุกัมมันตรังสี ขอให้นึกถึงภาพที่มีอะตอม หรือนิวเคลียสที่ไม่เสถียรจำนวนมากมาขย่มมหาศาลนับไม่ถ้วนรวมอยู่ด้วยกัน สำหรับการแผ่รังสีก็ไม่ได้ เกิดขึ้นพร้อมกันทีเดียวหมดทุกนิวเคลียส แต่จะเกิดขึ้นแบบสะเปะสะปะ ไม่มีใครเห็นหรือวิธีใดบอกได้ ว่า นิวเคลียสไหนจะแผ่รังสีอย่างไรก็ตาม เมื่อนิวเคลียสไหนแผ่รังสี นิวเคลียสนั้นแผ่รังสีนิวเคลียสนั้นแผ่รังสี เมื่อรวมกันก็กลายเป็นว่ามีรังสีแผ่ออกมาอยู่ตลอดเวลา สำหรับนิวเคลียสที่แผ่รังสีออกไปแล้ว จะกลายเป็นนิวเคลียสของธาตุใหม่ขึ้นมา นั่นหมายความว่า จำนวนนิวเคลียสหรืออะตอมตัวเดิมจะลดลง และจะมีจำนวนนิวเคลียสหรืออะตอมใหม่เพิ่มขึ้น ในทางวิชานิวเคลียร์ เราเรียกนิวเคลียส หรืออะตอม หรือนิวไคลด์หรือไอโซโทป ตัวเดิมที่แผ่รังสีนี้ว่า แม่ (parent) ส่วนตัวใหม่ที่เกิดขึ้น เรียกว่า ลูก (daughter)

การที่นิวเคลียสหนึ่ง แม่รังสีแล้วตัวเองกลายเป็นอีกนิวเคลียสหนึ่ง ซึ่ง เป็นธาตุต่างชนิดกันนั้น เราเรียกว่า เกิดการสลาย ในตำราภาษาอังกฤษบางเล่มใช้คำว่า decay บางเล่มใช้ disintegration บางเล่ม ใช้คำว่า transformation

การสลาย ทำให้จำนวนนิวไคลด์แม่ ลดลงเรื่อยๆการลดลงนี้เป็นการลดด้วยอัตราคงที่ ซึ่ง แต่ละนิวไคลด์รังสีจะลดลงไม่เหมือนกันหน่วยที่ใช้บอกเรื่องนี้ คือ ค่าครึ่งชีวิต (half life) ซึ่งบอกถึง ระยะเวลาที่จำนวนนิวไคลด์รังสีลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของจำนวนนิวไคลด์ รังสีเริ่มต้น ตัวอย่างเช่น โคบอลต์-60 มีค่าครึ่งชีวิต เท่ากับ 5.27 ปี หมายความว่า สมมติครั้งแรกมีโคบอลต์-60 อยู่ 100 นิวเคลียส เมื่อเวลาผ่านไป 5.27 ปี จะเหลือโคบอลต์-60 อยู่ 50 นิวเคลียส และถ้าผ่านไปอีก 5.27 ปี จะเหลือโคบอลต์-60 อยู่ 25 นิวเคลียส การลดลงจะเป็นแบบนี้ไปเรื่อยๆจนเมื่อเวลาผ่านไปนานๆ ก็ จะเหลือโคบอลต์-60 ปริมาณน้อยมาก

ค่าครึ่งชีวิตของนิวไคลด์ รังสีมีตั้งแต่สั้นกว่าวินาทีจนถึงหลายล้านปี เช่น คาร์บอน-16 มี ค่าครึ่งชีวิต 0.75 วินาที คาร์บอน-14 มีค่าครึ่งชีวิต 5730 ปี ยูเรเนียม-235 มีค่าครึ่งชีวิต 704 ล้านปี

ขออนุญาตนอกเรื่องชั่วคราวเกี่ยวกับค่าครึ่งชีวิตนี้ เพราะมีประโยชน์ต่อการเลือกใช้นิวเคลียส รังสีในการศึกษา ค้นคว้าวิจัยและใช้จริงๆในงานต่างๆไม่ว่าจะในทางการแพทย์ ในทางอุตสาหกรรม ในทางเกษตรหรืออื่นๆ นั่นคือเลือกใช้พวกที่มีค่าครึ่งชีวิตไม่ยาวนาน พอใช้แล้วหรือใช้ไปเรื่อยๆไม่ นานก็จะเหลือรังสีน้อยมากจนถือว่าไม่มีอันตราย นอกจากนี้ในการขจัดกากกัมมันตรังสีถ้ารู้ว่ากากนั้น เป็นพวกมีค่าครึ่งชีวิตเท่าไร เราก็เพียงกักเก็บกากนั้นไว้เฉยๆ รอจนปริมาณรังสีลดน้อยลงจนถึงระดับ ที่ไม่ก่อให้เกิดอันตราย ก็จัดการขจัดกากดังกล่าวเหมือนกากหรือขยะธรรมดา

สำหรับกากกัมมันตรังสีที่มีค่าครึ่งชีวิตยาวมากก็ต้องมีวิธีการในการจัดการกับกากนั้นเป็น การพิเศษ

ผู้อ่านอาจมีคำถามว่าทำไมผู้เขียนเดี่ยวใช้คำอะตอม เดี่ยวใช้คำนิวเคลียส เดี่ยวใช้คำไอโซโทป อ่านแล้วงง ซึ่งขอตอบว่าเพื่อให้ผู้อ่านคุ้นกับคำเหล่านี้ เพราะตามความจริง เป็นการกล่าวถึงสิ่งเดียวกันแต่ผู้อ่านต้องสร้างมโนภาพให้เป็นรูปร่างขึ้นมาเอง เช่นดังพูดถึงอะตอมก็ให้มองว่ามีนิวเคลียสอยู่ตรงกลางมีอิเล็กตรอนโคจรอยู่รอบเป็นชั้นๆ ถ้าพูดถึงนิวเคลียสก็เฉพาะนิวเคลียสที่อยู่ตรงกลาง ส่วนอิเล็กตรอนไม่คิดถึง ทั่วๆที่อิเล็กตรอนก็ยังโคจรอยู่รอบนิวเคลียสนั้นๆอยู่ สำหรับนิวไคลด์และไอโซโทป ก็เป็นอย่างที่อธิบายมาแล้ว

การสลายของนิวเคลียสที่ไม่เสถียรโดยการแผ่รังสีอัลฟา รังสีบีตา รังสีแกมมา ดังกล่าวแล้วถือว่าเป็นการเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์แบบหนึ่ง และการเกิดปรากฏการณ์เช่นนี้ทำให้นักวิทยาศาสตร์เชื่อว่าภายในนิวเคลียสจะต้องมีพลังงานอยู่เป็นจำนวนมากซึ่งทำให้มีการศึกษาค้นคว้าเพื่อนำพลังดังกล่าวออกมาใช้

ผลจากการศึกษาค้นคว้า นักวิทยาศาสตร์ก็ประสบผลสำเร็จโดยพบว่ามีปฏิกิริยานิวเคลียร์อยู่ 2 แบบ ที่สามารถทำให้เกิดพลังงานจำนวนมากมหาศาลออกมาในช่วงเวลาอันสั้นได้ นั่นคือปฏิกิริยาแบ่งแยกนิวเคลียส หรือฟิชชัน (fission) และปฏิกิริยาการหลอมนิวเคลียส หรือฟิวชัน (fusion)

ปฏิกิริยาฟิชชัน และปฏิกิริยาฟิวชัน เป็นอย่างไร

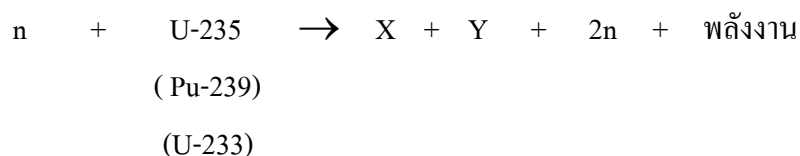
ปฏิกิริยาฟิชชัน

เป็นปฏิกิริยาที่นิวเคลียสของธาตุที่หนักถูกทำให้แยกออกจากกัน แล้วมีพลังงานมหาศาลออกมาด้วย ปัจจุบันธาตุที่ว่ามีเพียงธาตุยูเรเนียม และพลูโทเนียมเท่านั้น อย่างไรก็ตามใช้ว่าไอโซโทปของธาตุยูเรเนียมหรือพลูโทเนียมจะเกิดปฏิกิริยาฟิชชันได้ทุกตัว จะมีเพียงไอโซโทปบางตัวเท่านั้นที่เกิดปฏิกิริยาฟิชชันและนำพลังงานที่ออกมาไปใช้ประโยชน์ นั่นคือยูเรเนียม-235 ซึ่งมีอยู่ในธรรมชาติ และยูเรเนียม-233 กับพลูโทเนียม-239 ซึ่งไม่มีอยู่ในธรรมชาติ เราต้องผลิตขึ้นมาใช้เอง

สำหรับกระสุนที่ใช้ยิงเพื่อให้นิวเคลียสของทั้งสามไอโซโทปดังกล่าวแยกออกจากกันคืออนุภาคนิวตรอนที่มีความเร็วพอเหมาะ

ปฏิกิริยาฟิชชันนี้ถูกนำไปใช้ในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ (บางคนเรียกเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู) และทำระเบิดปรมาณู

สำหรับสมการปฏิกิริยาฟิชชันสามารถเขียนแบบเข้าใจง่ายๆ คือ

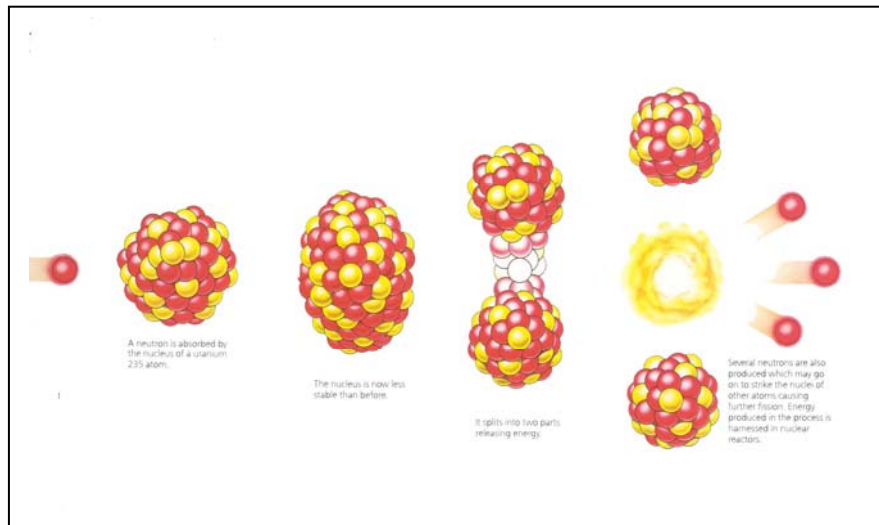


เมื่อ n = อนุภาคนิวตรอนตามสมการข้างบนเขียน $2n$ แต่ความจริงอาจเป็น $1n, 3n, 4n$ ก็ได้ สำหรับค่าเฉลี่ยคือ $2.5n$

X, Y = ผลผลิตการแบ่งแยกนิวเคลียส

จากสมการจะเห็นว่าเริ่มต้นมีอนุภาคนิวตรอนเพียงหนึ่งอนุภาค แต่เกิดปฏิกิริยาฟิชชันแล้วจะได้นิวตรอนสองอนุภาคที่เกิดขึ้นก็จะทำให้เกิดปฏิกิริยาฟิชชันต่อไป เกิดนิวตรอนเป็นสี่อนุภาค แล้วนิวตรอนสี่อนุภาคนี้ก็ไปทำให้เกิดปฏิกิริยาฟิชชันต่อไปอีก ซึ่งปรากฏการณ์นี้จะมีต่อไปเรื่อยๆ พลังงานที่เกิดขึ้นก็จะทวีคูณขึ้นเรื่อยๆ แบบนี้ เราเรียกว่าเกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ (chain reaction)

ในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ (เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู) เราทำการควบคุมปฏิกิริยาลูกโซ่ไม่ให้เกิดเกินขีดจำกัดที่ตั้งไว้ แต่ในระเบิดปรมาณูเราไม่ควบคุม ดังนั้นจึงต่างกัน เามาเปรียบเทียบหรืออ้างอิงถึงกันในเรื่องการก่อให้เกิดอันตรายไม่ได้โดยสิ้นเชิง

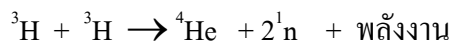
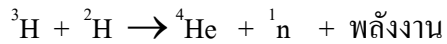
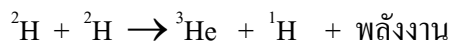
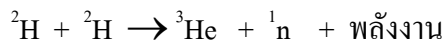


รูปที่ 1 ยูเรเนียมฟิชชัน

ปฏิกิริยาฟิวชัน

เป็นปฏิกิริยาที่นิวเคลียสของธาตุที่เบาสองนิวเคลียสรวมกัน แล้วกลายเป็นนิวเคลียสที่หนักกว่าพร้อมกับมีพลังงานมหาศาลออกมาด้วย การเกิดปฏิกิริยานี้ นิวเคลียสเบา นั้นจะมีความเร็วสูงมาก หรืออยู่ในสภาพที่มีความร้อนสูงมากหลายร้อยล้านองศาจึงจะรวมกันได้ ปัจจุบันธาตุที่เบาที่เกิดปฏิกิริยาฟิวชันคือ ไฮโดรเจน ธาตุไฮโดรเจนมี 3 ไอโซโทปคือ ไฮโดรเจน-1 กับไฮโดรเจน-2 ที่มีชื่อเฉพาะเรียกว่า ดิวเทอเรียม (deuterium) ซึ่งมีอยู่ทั่วไปในธรรมชาติ และไฮโดรเจน-3 ที่ไม่มีอยู่ในธรรมชาติ มนุษย์ต้องผลิตขึ้นมาโดยตรงหรือเกิดขึ้นโดยผลที่มนุษย์ทำขึ้นมา ไฮโดรเจน-3 นี้มีชื่อเฉพาะเรียกว่า ทริเทียม (tritium)

เท่าที่พบแล้วมีปฏิกิริยาฟิวชันหลายแบบที่เกิดจากไอโซโทปทั้ง 3 ชนิดของไฮโดรเจน แต่อย่างไรก็ตามมีอยู่ 4 แบบที่คาดว่าจะเกิดขึ้นได้เร็ว และพอเพียงในอุณหภูมิและความเร็วที่สามารถทำขึ้นได้ โดยสมการเขียนได้ดังนี้



เมื่อ ${}^2\text{H}$ = ดิวเทอเรียม

${}^3\text{H}$ = ทริเทียม

${}^3\text{He}$ = ฮีเลียม-3

${}^4\text{He}$ = ฮีเลียม-4

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในดวงอาทิตย์คือ ปฏิกิริยาฟิวชัน

ปฏิกิริยาฟิวชันใช้ในทำการระเบิดไฮโดรเจน

ขณะนี้มีการค้นคว้าวิจัยเรื่องปฏิกิริยาฟิวชันกันอยู่ในประเทศใหญ่ๆ โดยหวังว่าถ้าสามารถทำให้เกิดขึ้นได้และรักษาให้ดำรงอยู่ตลอดไป และสามารถควบคุมได้ เราก็จะมีพลังงานนิวเคลียร์ใช้อย่างมากมายมหาศาลและเป็นพลังงานที่สะอาดด้วย เท่าที่ผู้เขียนทราบมีการทำให้เกิดขึ้นได้แล้ว แต่ปรากฏเกิดขึ้นได้ในช่วงเวลาสั้นมากยังไม่สามารถนำมาใช้ในเชิงพาณิชย์ได้ คงต้องใช้เวลานาน

จากที่กล่าวมาแล้วจึงพอสรุปได้ว่า เชื้อเพลิงนิวเคลียร์ของปฏิกิริยาฟิวชัน คือ ยูเรเนียม-235 พลูโทเนียม-239 ส่วนเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ของปฏิกิริยาฟิวชันคือ ไฮโดรเจน-2 (ดิวเทอเรียม) และ ไฮโดรเจน-3 (ทริเทียม)

ต่อไปเรามาดูรายละเอียดของแต่ละเชื้อเพลิง

ยูเรเนียม-235

ธาตุยูเรเนียมมีหลายไอโซโทป แต่ไอโซโทปที่มีอยู่แล้วในธรรมชาติมี 3 ชนิด คือ ยูเรเนียม-234 มีประมาณ 0.01% (0.0057%) ยูเรเนียม-235 มีประมาณ 0.7% (0.7204%) และยูเรเนียม-238 มีประมาณ 99.3% (99.2739%) ปกติจะมีการพุดถึงยูเรเนียม-235 กับยูเรเนียม-238 เท่านั้น ส่วนยูเรเนียม-234 จะไม่ค่อยพุดถึงกันเพราะมีปริมาณน้อยมากนั่นเอง

ในการพุดถึงเชื้อเพลิงยูเรเนียม ปกติเขาจะใช้เปอร์เซ็นต์ของยูเรเนียม-235 ที่มีอยู่ในยูเรเนียมเป็นหลักในการแบ่งกลุ่มของยูเรเนียม ปัจจุบันมีการแบ่งเป็นกลุ่มใหญ่อยู่ 3 กลุ่มคือ

1. ยูเรเนียมที่มียูเรเนียม-235 อยู่ 0.7% เรียกว่า แนชเชอริล ยูเรเนียม (natural uranium) หรือยูเรเนียมธรรมชาติ
2. ยูเรเนียมที่มียูเรเนียม-235 มากกว่า 0.7% เรียกว่า เอ็นริช ยูเรเนียม (enriched uranium) หรือ ยูเรเนียมเสริมสมรรถนะ ซึ่งก็แบ่งเป็นกลุ่มย่อยอีก 2 กลุ่ม คือ ถ้ามียูเรเนียม-235 น้อยกว่า 20% เรียกว่า โลว์ เอ็นริช ยูเรเนียม (low enriched uranium) แต่ถ้ามียูเรเนียม-235 เท่ากับหรือเกิน 20% เรียกว่า ไฮ เอ็นริช ยูเรเนียม (high enriched uranium)
3. ยูเรเนียมที่มียูเรเนียม-235 น้อยกว่า 0.7% เรียกว่า ดีพลิตเท็ด ยูเรเนียม (depleted uranium) หรือ ยูเรเนียมด้อยสมรรถนะ

จากข้างบนข้อที่ 2 คือ ยูเรเนียมเสริมสมรรถนะ ถือว่าสำคัญเพราะจะใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ทั้งเพื่อการวิจัยและในโรงไฟฟ้านิวเคลียร์เป็นส่วนใหญ่ ตลอดจนใช้เป็นเชื้อเพลิงในระเบิดนิวเคลียร์ (ระเบิดปรมาณู) ด้วย สำหรับข้อที่ 1 คือ ยูเรเนียมธรรมชาติ ก็มีการใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงไฟฟ้านิวเคลียร์แบบแคนดู (CANDU = Canadian Deuterium Uranium) เหมือนกัน ส่วนข้อที่ 3 ยูเรเนียมด้อยสมรรถนะ ใช้เป็นเชื้อเพลิงไม่ได้ เขาจึงใช้ในงานที่ต้องการวัสดุที่หนัก ความหนาแน่นสูง แต่มีปริมาณหรือขนาดเล็ก เช่น ใช้เป็นภาชนะบรรจุวัสดุกัมมันตรังสี ใช้สำหรับถ่วงให้เกิดการสมดุลในเครื่องบิน หรืออาจใช้เป็นต้นกำเนิดผลิตพลูโทเนียม-239

เชื้อเพลิงที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์เพื่อการวิจัยที่ตั้งอยู่ที่สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติหลังมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ที่บางเขน เป็นยูเรเนียมที่มีค่าเอ็นริชमेंต์ (enrichment) เท่ากับ 20% สำหรับเชื้อเพลิงที่ใช้ในการระเบิดนิวเคลียร์จะต้องเป็นยูเรเนียมที่มีค่าเอ็นริชमेंต์มากกว่า 95%

ดังนั้นประเทศใดที่ต้องการทำเชื้อเพลิงยูเรเนียมเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์หรือทำระเบิดนิวเคลียร์ด้วยตนเองต้องมีโรงงานที่ทำยูเรเนียมธรรมชาติให้เป็นเอ็นริชยูเรเนียมให้ได้ โรงงานนี้มีชื่อเรียกว่า ยูเรเนียม เอ็นริชमेंต์ พลานต์ (Uranium Enrichment Plant) หรือเรียกย่อๆ ว่า เอ็นริชमेंต์ พลานต์

หลักการทำนั้นมีหลักง่ายๆ คือ ทำอย่างไรก็ได้ให้ขจัดอะตอมของยูเรเนียม-238ออกไปให้ได้มากๆ เพื่อว่าสัดส่วนของยูเรเนียม-235 เมื่อเทียบกับยูเรเนียม-238 ที่เหลืออยู่จะได้สูงขึ้น นั่นคือเปอร์เซ็นต์ของยูเรเนียม-235จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เมื่อยูเรเนียม-238 ถูกขจัดออกมากขึ้นๆ

สำหรับกระบวนการที่ใช้ที่รู้จักกัน คือ

1. แก๊สซีเอส ดิฟฟิวชัน (Gaseous Diffusion) กระบวนการคือทำยูเรเนียมให้อยู่ในสภาพ เป็นแก๊สในรูปของยูเรเนียมเฮกซะฟลูออไรด์ (UF_6) แล้วส่งผ่านเข้า diffusion chamber ซึ่งทำตัวเหมือนเป็นแผ่นเยื่อ (membrane) โดยการนี้อะตอมของยูเรเนียม-238ที่มีขนาดใหญ่และวิ่งช้ากว่าอะตอมของยูเรเนียม-235 จะถูกสกัดออกไปบางส่วน เมื่อวิ่งผ่านแฮมเบอร์แต่ละครั้ง ดังนั้นถ้าให้วิ่งผ่านแฮมเบอร์ต่อไปเรื่อยๆ สัดส่วนของยูเรเนียม-235ต่อยูเรเนียม-238 จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนได้เอ็นริชमेंต์ตามที่ต้องการ

เพื่อให้เข้าใจง่าย ขอให้ดูตัวอย่างข้างล่าง สมมติเริ่มแรกมียูเรเนียม-235 จำนวน 28 อะตอมกับ ยูเรเนียม-238 จำนวน 3972 อะตอม โดยให้ผ่านแชนเบอร์ 3 ตัว

U-238 = 3972	→	U-238 = 400	→	U-238 = 20	→	U-238 = 1
U-235 = 28	→	U-235 = 27	→	U-235 = 27	→	U-235 = 26
ยูเรเนียมมี		ยูเรเนียมมี		ยูเรเนียมมี		ยูเรเนียมมี
ยูเรเนียม-235 0.7%		เอ็นริชเมนต์ 6.3%		เอ็นริชเมนต์ 57.4%		เอ็นริชเมนต์ 96.3%

(ยูเรเนียมธรรมชาติ)

จากตัวอย่างข้างบนจะพบว่าเริ่มแรกเป็นยูเรเนียมธรรมชาติ แต่พอถึงขั้นสุดท้ายจะได้ยูเรเนียมที่มี ยูเรเนียม-235 เท่ากับ 96.3% ส่วนยูเรเนียม-238 จำนวน 3972 - 1 = 3971 อะตอมกับยูเรเนียม-235 จำนวน 28 - 26 = 2 อะตอมที่ถูกสกัดไว้จะกลายเป็นยูเรเนียมที่มียูเรเนียม-235 อยู่ 0.5% ซึ่งจะ กลายเป็น ยูเรเนียมด้อยสมรรถนะ

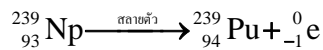
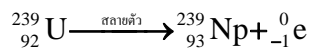
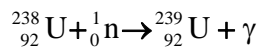
2. กระบวนการแก๊สเซ็นทริฟิวจ์ (Gas Centrifuge process) ทำโดยการปั่นแก๊สยูเรเนียมเฮกซะ ฟลูออไรด์ในท่อทรงกระบอกด้วยความเร็วสูง ซึ่งก็จะทำให้อะตอมของยูเรเนียม-235 ถูก เหวี่ยงกระเด็นออกจากยูเรเนียม-238 เอาส่วนที่มียูเรเนียม-235 เพิ่มขึ้นไปเรื่อยๆ ต่อไปเรื่อยๆ ในที่สุดก็จะได้เอ็นริชยูเรเนียมตามที่ต้องการ
3. การแบ่งแยกโดยใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Separation) หลักการคือ การทำ ให้ยูเรเนียมกลายเป็นแก๊สที่แตกตัว (ionized gas) แล้วนำไปผ่านสนามแม่เหล็กไฟฟ้ากำลัง สูง โดยการนี้ยูเรเนียม-235 และยูเรเนียม-238 จะถูกเบี่ยงเบนเป็นทางโค้งด้วยมุมต่างกัน จากนั้นก็รวบรวมส่วนที่ตกลงตรงส่วนที่มียูเรเนียม-235 ตกลงมา นำกลับไปทำซ้ำอีกเรื่อยๆ จะ ได้เอ็นริชยูเรเนียมตามที่ต้องการ เครื่องมือแบบนี้มีชื่อเรียกว่า แคลูทรอน (calutrons)
4. เทอร์มัล ดีฟิวชัน (Thermal diffusion) หลักการของกระบวนการนี้ถือหลักที่ว่าอะตอม หรือโมเลกุลที่เบาจะสะสมในเขตที่มีอุณหภูมิสูงกว่า ดังนั้นถ้าเรามี diffusion columns ที่ข้าง ในมีท่อ 2 ท่อที่มีจุดศูนย์กลางร่วมกัน โดยท่อในทำให้ร้อน ส่วนท่อนอกทำให้เย็น จากนั้น ให้ยูเรเนียมวิ่งผ่านที่ว่างระหว่างสองท่อนั้น ยูเรเนียม-235 ก็จะมาเกาะติดสะสมได้แต่ละส่วน ไปผ่าน diffusion columns ต่อไปอีก ทำอย่างไปเรื่อยๆ ก็จะได้เอ็นริชยูเรเนียมตามที่ ต้องการ

ทั้งสี่วิธีที่กล่าวถึงนี้วิธีที่สองคือ แก๊สเซ็นทริฟิวจ์ เป็นวิธีที่นิยมใช้กันในปัจจุบันในประเทศที่มี การผลิต ยูเรเนียมเสริมสมรรถนะ

พลูโทเนียม-239

ธาตุพลูโทเนียม เป็นธาตุที่ไม่มีในธรรมชาติ เราต้องผลิตขึ้นเอง ธาตุพลูโทเนียมมีหลายไอโซโทปแต่ไอโซโทปที่สามารถก่อให้เกิดปฏิกิริยาฟิชชันได้คือ พลูโทเนียม-239

เราผลิตพลูโทเนียม-239 ได้โดยการให้อนุภาคนิวตรอนวิ่งไปชนแล้วทำปฏิกิริยากับนิวเคลียสของยูเรเนียม-238 ดังสมการดังนี้



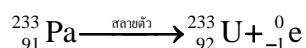
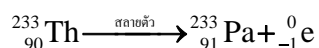
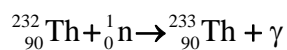
เมื่อทราบว่าพลูโทเนียม-239 เกิดจากยูเรเนียม-238 และทราบว่าเชื้อเพลิงที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ไม่ว่าชนิดใด จะเพื่อการค้นคว้าวิจัยหรือเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า ต่างใช้ยูเรเนียมเป็นเชื้อเพลิง นั่นคือมีทั้งยูเรเนียม-235 และยูเรเนียม-238 ด้วยเหตุผลนี้เมื่อเดินเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ ยูเรเนียม-235 จะเกิดปฏิกิริยาฟิชชันจำนวนยูเรเนียม-235 จะลดลงเรื่อยๆ ส่วนยูเรเนียม-238 จะกลายเป็นพลูโทเนียม-239 เพิ่มขึ้นเรื่อยๆซึ่งก็สามารถสกัดออกมาใช้ได้

พลูโทเนียม-239 เป็นเชื้อเพลิงที่ใช้ในระเบิดปรมาณู เช่นเดียวกับยูเรเนียม-235

มีการพยายามที่จะใช้พลูโทเนียม-239 เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์เพื่อการผลิตไฟฟ้า ขณะนี้อยู่ในขั้นทดลองใช้เท่านั้น เชื้อเพลิงที่ว่ามีชื่อว่า ม็อก พูเอล (MOX fuel) เป็นเชื้อเพลิงที่มียูเรเนียมผสมรวมกับพลูโทเนียม

ยูเรเนียม-233

ยูเรเนียม-233 ไม่มีในธรรมชาติ เราต้องผลิตขึ้นมาเอง สมการการเกิดยูเรเนียม-233 คือ



จากสมการข้างบนจะเห็นว่า ยูเรเนียม-233 เกิดจากทอเรียม-232 (Thorium-232) ซึ่งมีอยู่ในธรรมชาติ ดังนั้นการผลิต คือ เอาทอเรียม-232 ใส่เข้าไปในแกนเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ หลังจากนั้นนำมาสกัดเอายูเรเนียม-233ออกมา เหมือนกับการสกัดเอาพลูโทเนียม-239 ออกมาดังที่กล่าวมาแล้ว

ทอเรียม-232 พบมากในแร่โมนาไซต์

แร่โมนาไซต์จะพบปนอยู่ในทรายโมนาไซต์ (monazite sand) หรือพบในหางแร่ดิบบุก

ประเทศไทยในอนาคตข้างหน้า ถ้าเราไม่ขายทรายโมนาไซต์หรือหางแร่ดิบบุกให้ต่างประเทศจนหมดประเทศเราจะมีแหล่งต้นกำเนิดของเชื้อเพลิงยูเรเนียม-233 กับเขาบ้าง

ปัจจุบันการศึกษาค้นคว้าวิจัยเรื่องของยูเรเนียม-233 เพื่อนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ยังมีไม่มากนัก ดังนั้นจึงไม่มีการกล่าวถึงยูเรเนียม-233 กันมากนัก

ไฮโดรเจน-2 หรือดิวเทอเรียม

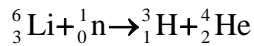
ไอโซโทปของธาตุไฮโดรเจนที่มีอยู่ในธรรมชาติ คือ ไฮโดรเจน-1 (H-1) มี 99.985 % และไฮโดรเจน-2 (H-2) มี 0.015% ได้มีการใช้หรือศึกษากระบวนการแยกไอโซโทปหลายแบบเพื่อให้เปอร์เซ็นต์ของไฮโดรเจน-2 เพิ่มขึ้นจาก 0.015% เป็น 99.7 % หรือมากกว่า แต่ปรากฏว่ายังไม่มีกระบวนการอะไรที่ดีกว่ากระบวนการอื่นๆ แบบให้เห็นเด่นชัด อย่างไรก็ตามมีวิธีหนึ่งที่ใช้ในโครงการแมนแฮตตัน (Manhattan Project) ซึ่งเป็นโครงการศึกษาค้นคว้าสร้างระเบิดปรมาณูของอเมริกา คือใช้ catalytic steam-hydrogen exchange กับ water distillation เพื่อให้ได้ไฮโดรเจน-2 ที่มีเปอร์เซ็นต์เพิ่มขึ้นระดับหนึ่งก่อนที่จะเข้าสู่กระบวนการ electrolysis ในขั้นสุดท้ายนอกจากนี้ภายหลังสงครามโลกครั้งที่สอง ได้มีการใช้ระบบ dual temperature chemical exchange แล้วต่อยอดด้วย water distillation และจบลงด้วย electrolysis

น้ำธรรมดาที่เราจู้จกกันเขียนเป็นสูตรเคมีว่า H_2O โดย H คือไฮโดรเจน-1 แต่ถ้าเป็นน้ำที่เป็นโมเลกุลของไฮโดรเจน-2 หรือ ดิวเทอเรียม จะเขียนเป็นสูตรเคมีว่า D_2O นี้เรียกว่า “น้ำมวลหนัก” (heavy water) มีเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์บางแบบใช้น้ำมวลหนักเป็นตัวหน่วงความเร็ว (moderator) นิวตรอน

ตามที่กล่าวมาแล้วว่า เชื้อเพลิงของปฏิกิริยาฟิวชัน คือ ดิวเทอเรียม ดังนั้นจะเห็นว่าถ้าเราสามารถผลิตและควบคุมปฏิกิริยาฟิวชันได้ เราจะมีเชื้อเพลิงนิวเคลียร์จำนวนมากมหาศาลทีเดียว เพราะที่ได้มีไฮโดรเจนที่นั่นจะมีดิวเทอเรียมด้วย

ไฮโดรเจน-3 หรือทริเทียม

ไฮโดรเจน-3 หรือทริเทียม (T) เป็นไอโซโทปของธาตุไฮโดรเจนที่ไม่มีในธรรมชาติ เราต้องผลิตขึ้นมาเอง สมการการเกิดทริเทียมคือ



วิธีการโดยการนำลิเทียมเข้าไปอบนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์จากนั้นนำไปแยกเอา
ตรีเทียมออกมา ตรีเทียมนอกจากใช้เป็นเชื้อเพลิงของปฏิกิริยาฟิวชันแล้ว ยังใช้ประโยชน์ในการผสม
กับสารเรืองแสงเพื่อให้เกิดแสงเรืองแสงตลอดเวลาโดยไม่ต้องพึ่งแสงสว่างไปกระตุ้น ทั้งนี้เพราะตรี
เทียมแผ่รังสีบีตาอยู่ตลอดเวลาแล้วรังสีบีตานั้นจะเป็นตัวกระตุ้นสารเรืองแสงให้แผ่แสงเรืองออกมา
นอกจากนี้ก็ใช้เป็นตัวศึกษาการเคลื่อนที่ของน้ำในระบบสิ่งมีชีวิตต่างๆ

เมื่ออ่านมาถึงตอนนี้ ผู้อ่านคงรู้จักเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ทุกอย่างแล้ว

เมื่อรู้ว่าอะไรเป็นเชื้อเพลิงนิวเคลียร์แล้ว ต่อไปเรามาลองคิดดูว่า เราจะได้มาอย่างไร

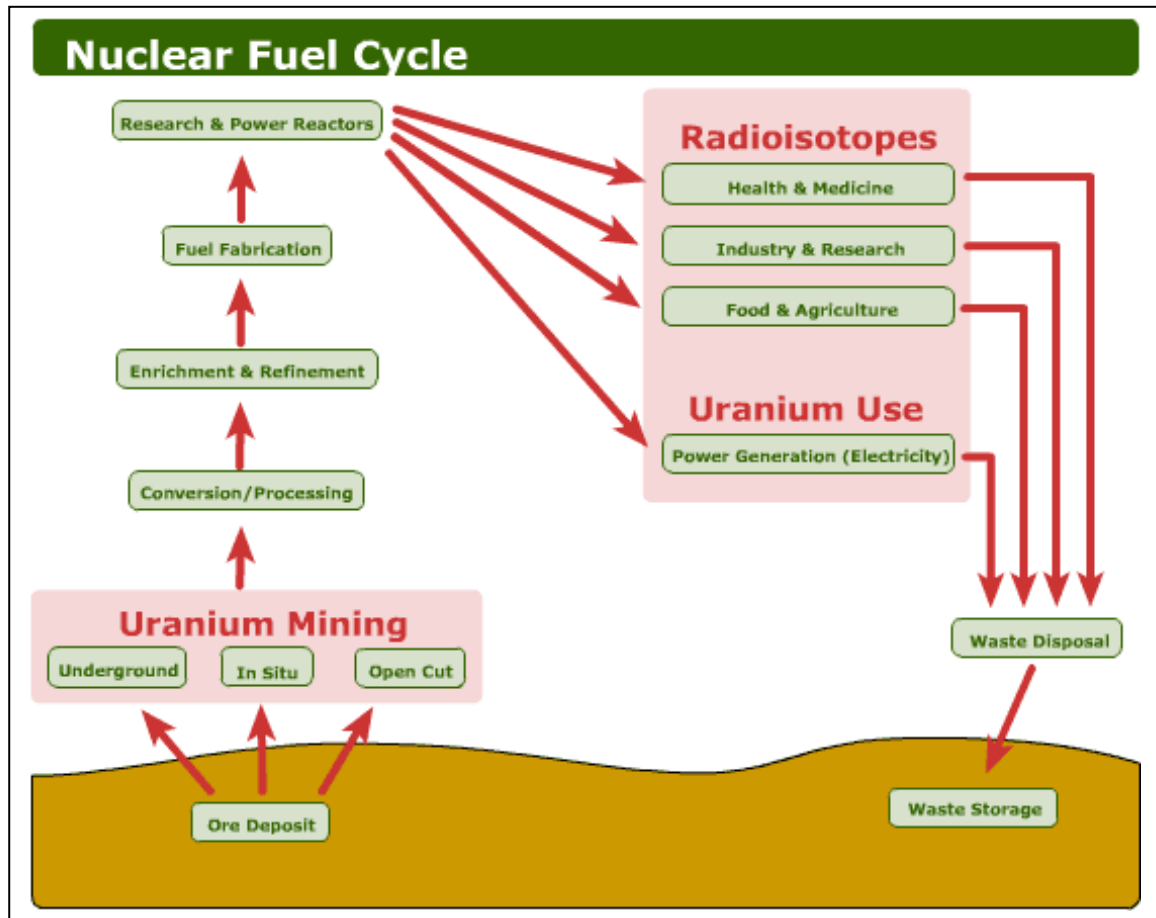
สำหรับเรื่องที่จะขอเล่าต่อไปนี้ ผู้เขียนจะไม่ขอพูดถึงเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ของปฏิกิริยาฟิวชัน
เพราะปฏิกิริยาฟิวชันนั้นยังอยู่ในระดับการค้นคว้าวิจัยเพื่อหาทางควบคุมปฏิกิริยาให้สามารถคงอยู่ได้
เป็นเวลานานๆเพื่อใช้ในทางสันติได้ แต่จะเล่าถึงเฉพาะเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ที่ก่อให้เกิดปฏิกิริยาฟิชชัน
ที่มีการใช้กันอย่างกว้างขวางในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ทั่วโลก นั่นคือยูเรเนียม-235

ดังได้กล่าวมาตอนแรกๆแล้วว่า ยูเรเนียม-235เป็นไอโซโทปหนึ่งของธาตุยูเรเนียม ที่มีอยู่ใน
ธรรมชาติ

เมื่อมีอยู่ในธรรมชาติ ก็หมายความว่าต้องมีแร่ยูเรเนียมในธรรมชาติ เป็นจุดเริ่มต้น

แร่ยูเรเนียมในธรรมชาติ ที่มีการพบแล้วอยู่ในรูปของ หินทราย (Sandstone) หรือ หินแข็ง
(Hard rock) ซึ่งเป็นแร่ยูเรเนียมที่มีคุณภาพระดับต่ำ ขนาดร้อยละ 0.1 ของยูเรเนียม กับระดับขนาด
ร้อยละ 20 ของยูเรเนียม และมีคุณสมบัติที่เหมาะสมที่จะสกัดเป็นเชื้อเพลิงต่อไป

เชื้อเพลิงนิวเคลียร์ชนิด U-235 ที่จะนำไปใช้เป็นต้นกำเนิดพลังงานในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ของ
โรงไฟฟ้านิวเคลียร์หรือเพื่อการศึกษาวิจัย จำเป็นต้องผ่านขบวนการหลายขั้นตอน โดยเริ่มจากแร่
ยูเรเนียมจากธรรมชาติ ผ่านขั้นตอนที่เรียกว่า mining & milling conversion enrichment การ
ปรับแต่งเป็นแท่งเชื้อเพลิง หลังจากใช้งานในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ ในช่วงระยะเวลาหนึ่งแล้ว
เชื้อเพลิงนิวเคลียร์นั้นจะเรียกว่าเป็นเชื้อเพลิงใช้แล้ว ซึ่งจะต้องผ่านขบวนการขั้นต่อไป การนำไปเก็บ
เป็นการชั่วคราว การแปรสภาพเชื้อเพลิงใช้แล้ว เพื่อนำกลับมาใช้เป็นเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ใหม่ รวมถึง
การจัดการเกี่ยวกับกากกัมมันตรังสี รวมถึงการเลิกดำเนินการด้วย การปฏิบัติการทุกขั้นตอนที่
เกี่ยวข้องกับเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ นี้ เรียกว่า เป็น วัฏจักรเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ (Nuclear Fuel Cycle)



รูปที่ 2 วัฏจักรเชื้อเพลิงนิวเคลียร์

ขั้นที่ 1 Mining & Milling

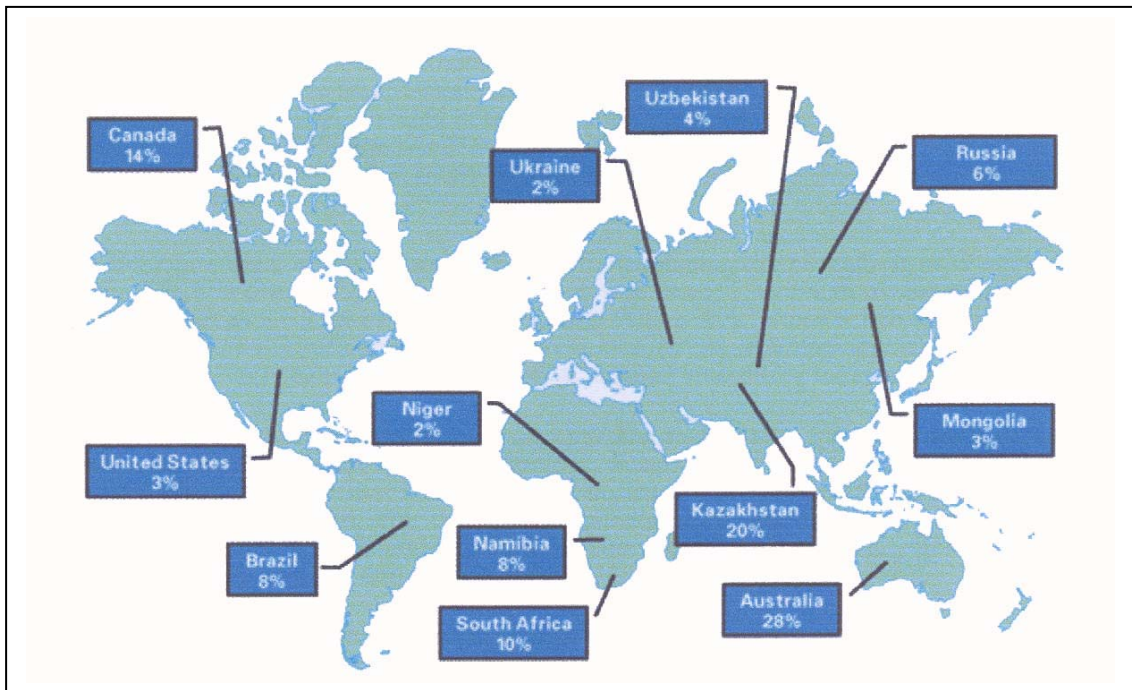
ผลจากการสำรวจแหล่งแร่ยูเรเนียมที่มีความเข้มข้นมากพอที่จะนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ในปัจจุบันนี้ ได้แก่ ออสเตรเลีย มีอยู่มากที่สุด 27% (ปริมาณของยูเรเนียมที่มีอยู่ในโลก ทั้งหมด ประมาณ 3.3 ล้านตันในรูปของ U_3O_8) Kazakhstan 17% Canada 15% South Africa 11% Namibia 8% Brasil 7% Russia 5% USA 4% และ Uzbekistan 4% แร่ยูเรเนียมจะผ่านขบวนการชะละลาย (leaching) ด้วยสารละลายกรด และทำให้บริสุทธิ์ ผลผลิตสุดท้ายได้ตะกอนอยู่ในรูปของ ยูเรเนียมออกไซด์ (U_3O_8) เป็นผงสีเหลือง เรียกกันว่า Yellow cake โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ขนาด 1000 MW_e ต้องการ Yellow cake ประมาณ 200 ตัน ต่อปี



รูปที่ 3 แร่ ยูเรเนียม



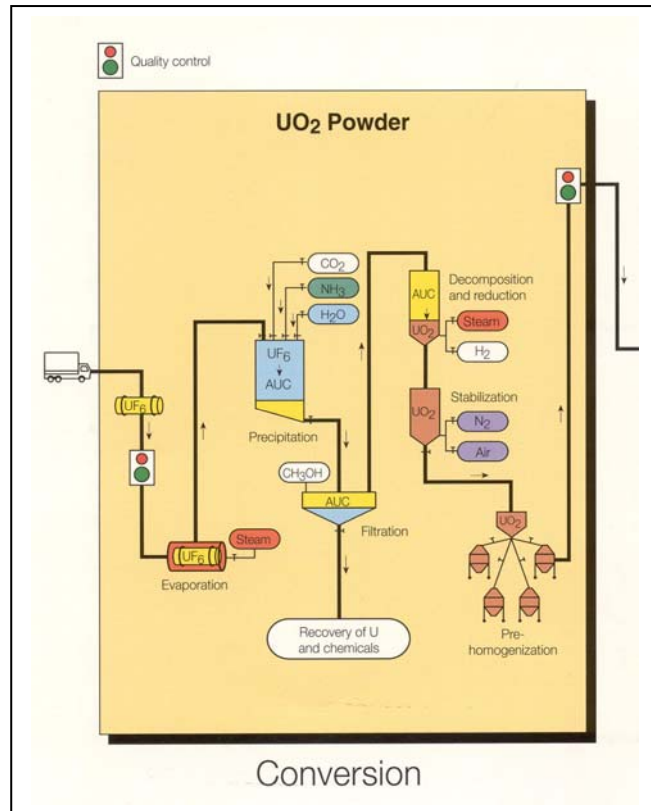
รูปที่ 4 Yellow cake



รูปที่ 5 แหล่งแร่ยูเรเนียมเชิงพาณิชย์

ขั้นที่ 2 การเปลี่ยนสภาพ ของ ยูเรเนียม จาก U_3O_8 เป็น UF_6

โดยทั่วไปเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ต้องการยูเรเนียมที่เสริมสมรรถนะ ยูเรเนียมที่อยู่ในรูปเป็น ยูเรเนียมเฮกซะฟลูออไรด์ (UF_6) มีความบริสุทธิ์ทางเคมีสูง อยู่ในสถานะที่เป็นแก๊ส และเหมาะสมกับขบวนการเสริมสมรรถนะต่อไป

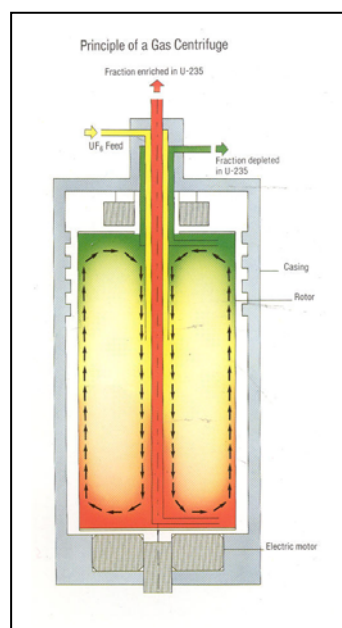
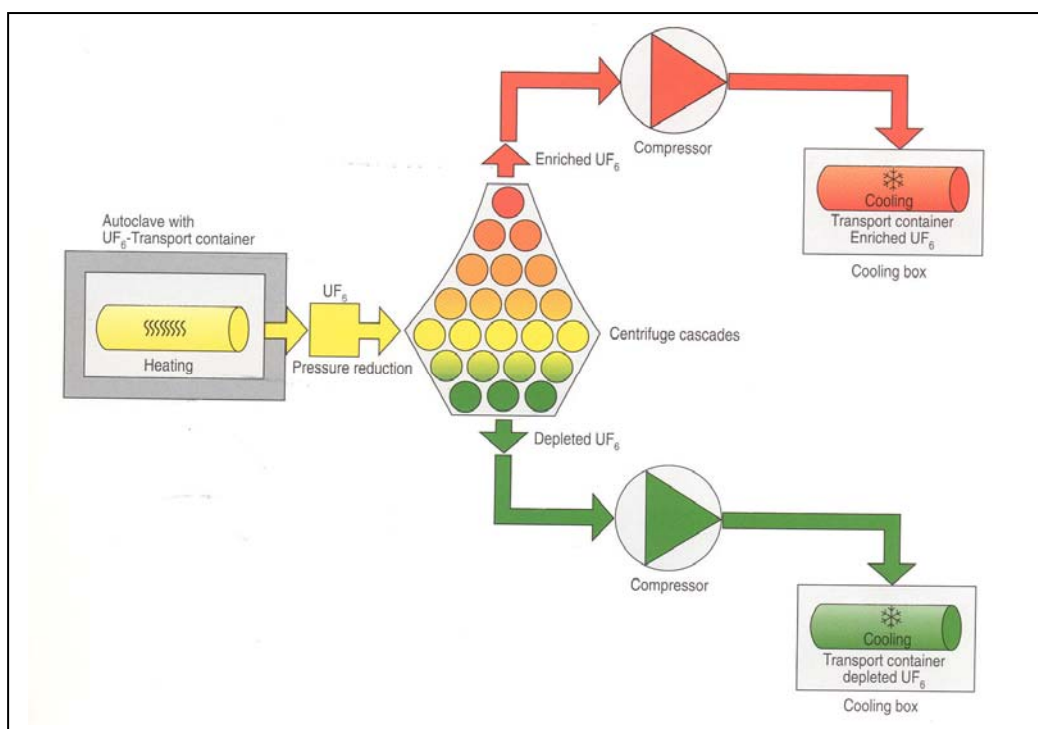


รูปที่ 6 ขบวนการผลิตผงยูเรเนียม

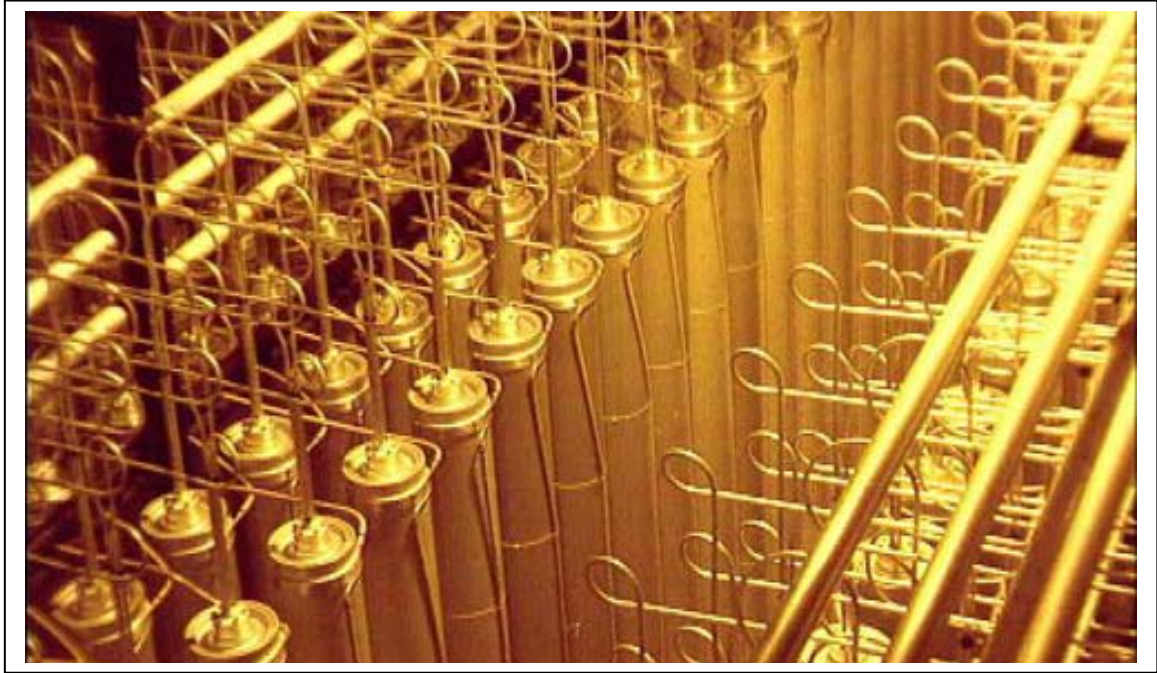
ขั้นที่ 3 การเสริมสมรรถนะ

เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์เพื่อการผลิตกระแสไฟฟ้าที่เดินเครื่องอยู่ในปัจจุบันนี้ ใช้เชื้อเพลิงยูเรเนียม-235 ที่เสริมสมรรถนะ 1 - 4% ในขบวนการเสริมสมรรถนะ ยูเรเนียม-238 จะถูกดึงออกไปถึง 85% ผลผลิตที่ได้จากขบวนการนี้จะเป็น 2 ทาง คือ ทางที่หนึ่งได้ ยูเรเนียมเสริมสมรรถนะตามต้องการ อีกทางหนึ่งจะได้ ยูเรเนียมที่มี U-235 น้อยกว่าที่มีในธรรมชาติ เรียกกันว่า ยูเรเนียมด้อยสมรรถนะ (Depleted Uranium) ซึ่งจะไม่ใช้ประโยชน์การเป็นเชื้อเพลิง ในการผลิตพลังงาน แต่เนื่องจาก ยูเรเนียมด้อยสมรรถนะนี้ มีความหนาแน่นสูง มากกว่า ตะกั่วถึง 1.7 เท่า จึงนำไปใช้ประโยชน์เป็นอุปกรณ์กำบังรังสีได้ดี

การเสริมสมรรถนะของยูเรเนียมทำได้หลายวิธี ได้แก่ การแพร่ของแก๊ส (gas diffusion) การหมุนเหวี่ยงของแก๊ส (gas centrifuge) laser technique เป็นต้น ในปัจจุบันเทคนิคการหมุนเหวี่ยงแก๊สเป็นที่นิยมใช้ในการเสริมสมรรถนะ เป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพสูง และสร้างเป็นโรงงานใช้สถานที่ไม่ใหญ่โตมาก ซึ่งใช้หลักการแยกไอโซโทป ยูเรเนียม-238 และ ยูเรเนียม-235 ในรูปแก๊สเฮกซะฟลูออไรด์ออกจากกันด้วยการหมุนที่ความเร็วสูงมากในเครื่องหมุนเหวี่ยงรูปทรงกระบอก ยูเรเนียม-238 ที่หนักกว่าจะถูกเหวี่ยงให้เคลื่อนที่อยู่รอบนอกชิดกับผนังของเครื่องหมุนเหวี่ยง ยูเรเนียม-235 ซึ่งเบากว่าจะถูกเหวี่ยงไปลอยขึ้นบริเวณตอนกลางของเครื่องหมุนเหวี่ยง และเข้าสู่เครื่องหมุนเหวี่ยงถัดๆไป ซึ่งต่อเรียงกันเป็นอนุกรม จนกว่าจะได้ยูเรเนียม-235 ที่มีสมรรถนะตามต้องการ



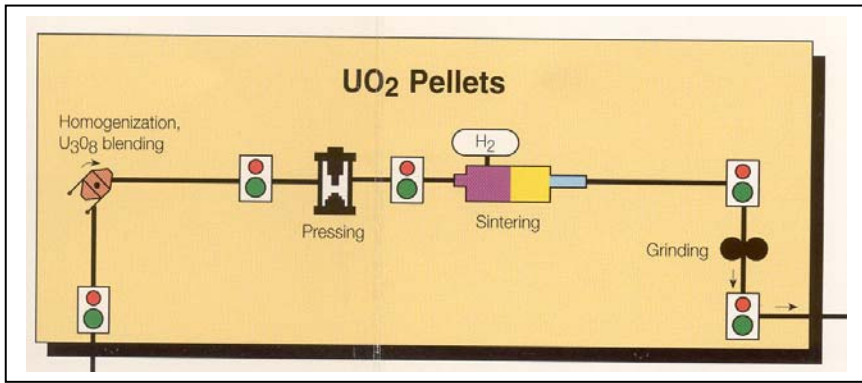
รูปที่ 7 การเสริมสมรรถนะของ ยูเรเนียม



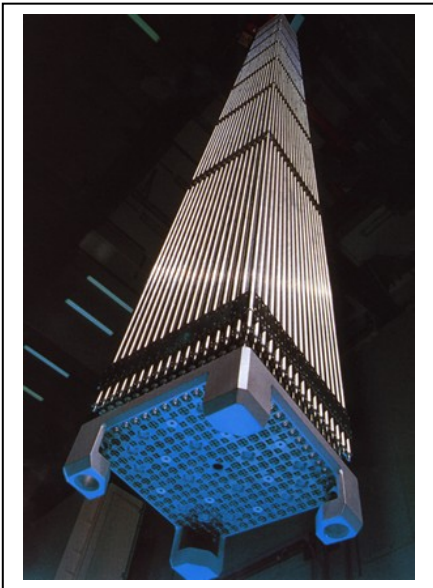
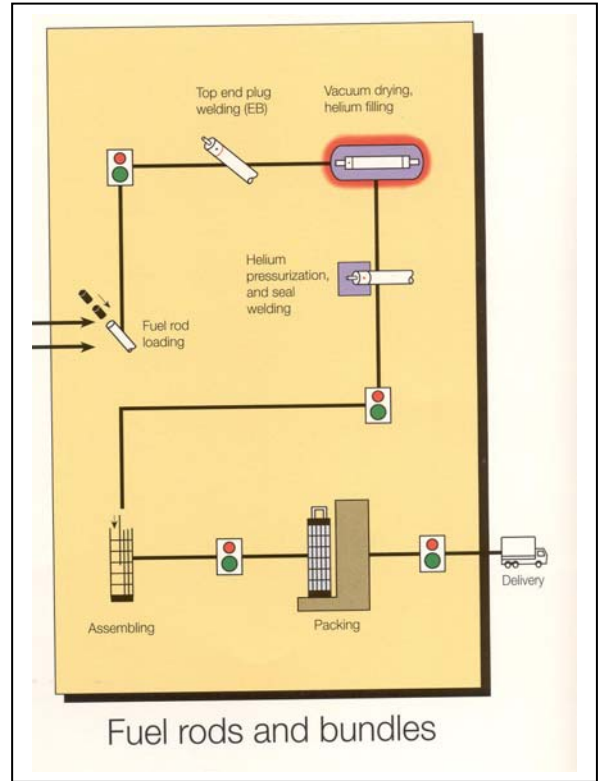
รูปที่ 8 โรงงานเสริมสมรรถนะของยูเรเนียม แบบการหมุนเหวี่ยงของแก๊ส

การประกอบแท่งเชื้อเพลิง (fuel fabrication)

เป็นขบวนการประกอบชุดเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ (fuel assembly) โดยการนำยูเรเนียมเฮกซาฟลูออไรด์ที่ได้เสริมสมรรถนะแล้วมาเปลี่ยนสภาพ เป็น ยูเรเนียมออกไซด์ (UO_2) ทำให้เป็นผงและอัดเป็นเม็ดทรงกระบอกที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 1 เซนติเมตร และสูงประมาณ 2 เซนติเมตร เรียกว่า เม็ดเชื้อเพลิง (fuel pellet) นำไปเผาในบรรยากาศ ของไฮโดรเจน เพื่อให้มีความหนาแน่นสูงและอยู่ในสภาพที่เป็นเซรามิกส์ เม็ดเชื้อเพลิงที่ได้แต่งผิวให้เรียบคัดเลือกแล้วบรรจุลงในท่อโลหะผสมเซอร์โคเนียม เชื่อมปิดปลายหัวท้ายท่อโลหะผสมเซอร์โคเนียม ท่อนี้ยาวประมาณ 3 เมตร เรียกว่า แท่งเชื้อเพลิง นำแท่งเชื้อเพลิงนี้มาประกอบเข้าด้วยกัน เรียกว่า ชุดเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ ชุดเชื้อเพลิงของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์แบบน้ำอัดความดัน (Pressurized water reactor ; PWR) ประกอบด้วยแท่งเชื้อเพลิงมัดรวมกันขนาดต่างๆ ขึ้นอยู่กับการออกแบบ เป็นชนิด 17 x17 16 x16 หรือ 15 x 15 แท่งเชื้อเพลิง แต่ถ้าเป็นโรงไฟฟ้านิวเคลียร์แบบน้ำเดือด (Boiling Water Reactor; BWR) ชุดเชื้อเพลิงนี้จะมีขนาดเล็กกว่า ประกอบด้วยแท่งเชื้อเพลิง ขนาด 6 x 6 หรือ 8 x 8 แท่ง



รูปที่ 9 ขั้นตอนการประกอบมัดเชื้อเพลิง



รูปที่ 10 มัดเชื้อเพลิง PWR



รูปที่ 11 มัดเชื้อเพลิง BWR

ตามปกติโรงไฟฟ้านิวเคลียร์จะเดินเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ เป็นเวลานาน 12 - 18 เดือน ติดต่อกัน และดับเครื่องปฏิกรณ์ฯ เพื่อเปลี่ยนเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ใหม่ประมาณ หนึ่งในสาม ดังนั้น เชื้อเพลิงนิวเคลียร์แต่ละมัดจะอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ประมาณ 3 ปี หลังจากนั้นเชื้อเพลิงนิวเคลียร์จะถูกนำออกจากเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์และเก็บไว้ในบ่อน้ำที่ใส่เก็บเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ (nuclear spent fuel) ใช้น้ำเพื่อรอการจัดการเกี่ยวกับเชื้อเพลิงใช้แล้วต่อไป

การจัดการเกี่ยวกับเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ใช้แล้ว

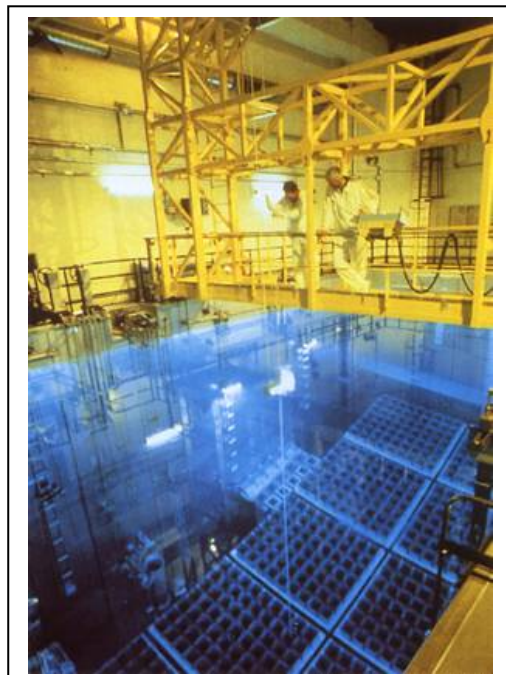
เชื้อเพลิงนิวเคลียร์ที่ประกอบขึ้นมาใหม่ (fresh fuel) ที่ใช้ในโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ ประกอบด้วย ยูเรเนียม- 235 1 – 4 % หรือที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์เพื่อการวิจัยโดยทั่วไปจะใช้เชื้อเพลิงนิวเคลียร์ มี ยูเรเนียม – 235 น้อยกว่า 20 % เมื่อถึงระยะเวลาของการใช้งานแล้ว และย้ายเอาเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ออกจากเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ เชื้อเพลิงนิวเคลียร์นี้ซึ่งเรียกว่า เชื้อเพลิงใช้แล้ว จากผลของการเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิชชัน ในแท่งเชื้อเพลิง จะมีพลูโทเนียมเกิดขึ้นมา ประมาณ 1 % ยูเรเนียม - 238 และ ยูเรเนียม – 235 ที่เหลืออยู่ ผลผลิตจากการแบ่งแยกนิวเคลียส (fission products) และ กลุ่มสารทราเนียมยูเรเนียม ที่มีเลขมวลมากกว่า 92 เชื้อเพลิงใช้แล้วเมื่อย้ายออกจากเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ใหม่ๆ จะยังคงร้อนอยู่และมีระดับรังสีสูงมาก ต้องเก็บไว้ในบ่อน้ำ บ่อน้ำที่ใส่เก็บเชื้อเพลิงใช้แล้วเรียกว่าเป็นการเก็บชั่วคราว ในการขนย้ายเชื้อเพลิงใช้แล้วสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายมาก จึงมีความจำเป็นที่จะต้องมียุเรเนียมที่เก็บไว้เป็นเวลานาน สำหรับเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์เพื่อการวิจัยจะออกแบบให้มีบ่อน้ำที่เก็บเชื้อเพลิงใช้แล้วได้นานถึง 30 - 40 ปี ก่อนที่จะส่งไปโรงงานแปรสภาพเชื้อเพลิง (reprocessing plant) หรือมีสถานที่เก็บเชื้อเพลิงใช้แล้วอย่างถาวร

เชื้อเพลิงใช้แล้วที่ส่งไปยังโรงงานแปรสภาพ จะเสียค่าใช้จ่ายสูง และไม่คุ้มกับมูลค่าของยูเรเนียม และ พลูโทเนียมที่ได้แยกออกมา แล้วนำไปผลิตเป็นแท่งเชื้อเพลิงเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่นอกจากนั้นผลจากการแปรสภาพเชื้อเพลิงใช้แล้วจะได้กากกัมมันตรังสีที่มีระดับรังสีสูงมากจะถูกส่งกลับมายังผู้ที่เป็นเจ้าของเชื้อเพลิงใช้แล้ว หรือโรงงานแปรสภาพ จะคิดค่าบริการเกี่ยวกับการจัดการกากกัมมันตรังสีสูงนี้และการเก็บรักษา

การจัดการเกี่ยวกับเชื้อเพลิงใช้แล้วขึ้นอยู่กับสถานภาพของแต่ละประเทศ ในบางประเทศเชื้อเพลิงใช้แล้วหลังจากเก็บไว้เป็นการชั่วคราวในโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ชั่วคราวระยะเวลาหนึ่งในบ่อน้ำ หลังจากนั้นจะจัดการเก็บในระยะยาวโดยไม่ส่งไปโรงงานแปรสภาพ โดยย้ายแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้วที่อยู่ในบ่อน้ำมาเป็นการเก็บแบบแห้ง ด้วยการเก็บอยู่ในบรรยากาศของแก๊สฮีเลียมในภาชนะคอนกรีตขนาดใหญ่ที่เหมาะสมต่อการป้องกันอันตรายจากการแผ่รังสี สถานที่เก็บระยะยาวนี้ก็จะอยู่ในอาณาเขตบริเวณของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ ในบางประเทศไม่มีโรงงานแปรสภาพเชื้อเพลิงใช้แล้วและไม่ประสงค์จะส่งไปยังโรงงานแปรสภาพที่ประเทศอื่นๆ แต่จะส่งเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ใช้แล้วไปยังโรงงานเปลี่ยน

สภาพจากชุดเชื้อเพลิงนิวเคลียร์โดยการแยกแท่ง เชื้อเพลิงออกเป็นแท่งๆ และเก็บแท่งเชื้อเพลิงที่ได้แยกออกมาแล้วโดยคงสภาพไว้เพื่อการแปรสภาพต่อไปในอนาคต โดยจะเก็บไว้ในสถานที่เก็บที่มีระบบป้องกันอันตรายจากการแผ่รังสีและอยู่ในสถานที่ปลอดภัยต่อการที่สารกัมมันตรังสีจะแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อม เช่นเหมืองเกลือที่เลิกใช้งานแล้ว

โรงงานแปรสภาพเชื้อเพลิงใช้แล้วที่ยังเดินเครื่องอยู่ในปัจจุบันนี้ มีอยู่ที่ประเทศฝรั่งเศส สหราชอาณาจักร และ ประเทศญี่ปุ่นซึ่งจะรับการแปรสภาพเชื้อเพลิงใช้แล้วจากโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ในประเทศเท่านั้น ในสหรัฐอเมริกาไม่อนุมัติให้มีการแปรสภาพเชื้อเพลิงใช้แล้วมาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1977 โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ในสหรัฐอเมริกาก็ต้องใช้วิธีการเก็บเชื้อเพลิงใช้แล้วในบ่อน้ำในโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ ในบางโรงงานมีการเก็บเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ใช้แล้วไว้ในบ่อน้ำเป็นเวลานานมากกว่า 20 ปี โดยไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โรงงานเก็บเชื้อเพลิงใช้แล้วซึ่งจะใช้เป็นส่วนกลางของรัฐคาดว่าจะเริ่มใช้งานได้ประมาณปี ค.ศ. 2010 ในปัจจุบันนี้เพื่อที่จะลดพื้นที่สถานที่เก็บเชื้อเพลิงใช้แล้ว โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ต่างๆ ในสหรัฐอเมริกาก็ใช้วิธีการในการลดพื้นที่ในการเก็บเชื้อเพลิงใช้แล้ว คือ



รูปที่ 12 บ่อเก็บเชื้อเพลิงใช้แล้ว

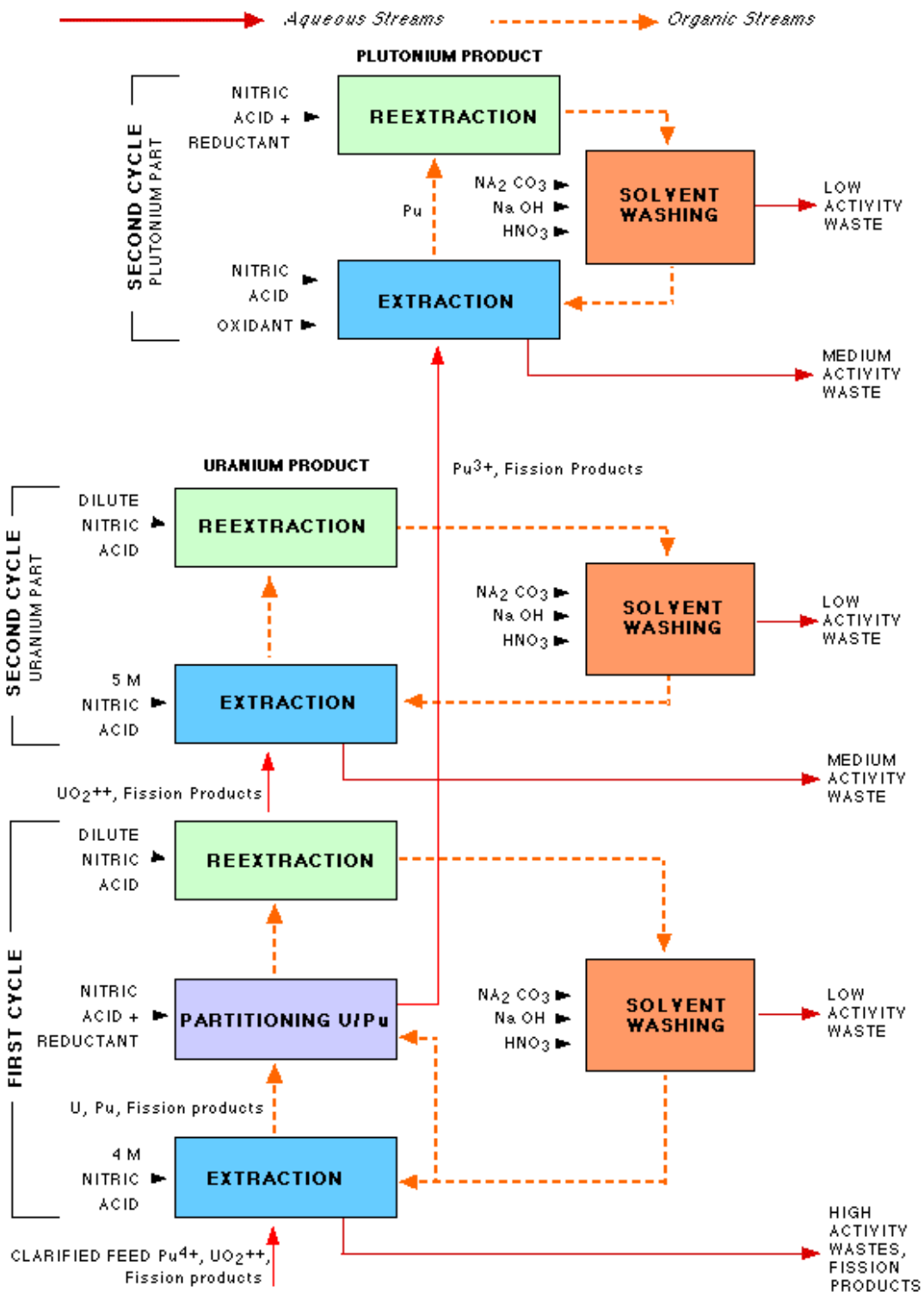
การเก็บแบบแห้งเป็นการเก็บเชื้อเพลิงใช้แล้วในสถานะที่เป็น โลหะหรือคอนกรีตและใช้แก๊สเป็นตัวระบายความร้อนและมีระบบป้องกันอันตรายจากการแผ่รังสี สถานที่เก็บอาจเป็นพื้นที่ภายในหรือภายนอกโรงไฟฟ้านิวเคลียร์

การแยกแ่งเชื้อเพลิงออกเป็นชิ้นส่วน เพื่อลดพื้นที่ในการเก็บรักษา มีระบบระบายความร้อนและใช้สถานะที่มีขนาดเล็กสะดวกต่อการขนย้าย

การแปรสภาพเชื้อเพลิงใช้แล้ว

โรงงานแปรสภาพเชื้อเพลิงใช้แล้วเชิงพาณิชย์ที่เดินเครื่องในปัจจุบันมี อยู่ที่ประเทศฝรั่งเศส 2 โรง อยู่ที่ Marcoule และที่ La Hague ประเทศอังกฤษ อยู่ที่ Sellafield และที่ประเทศญี่ปุ่น อยู่ที่ Tokai mura การแปรสภาพเชื้อเพลิงใช้แล้วใช้วิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย ซึ่งเป็นขบวนการรากฐานที่ใช้กันทั่วไป และรู้จักกันในชื่อของ PUREX Solvent Extraction ตัวทำละลายประกอบด้วย TBP ละลายอยู่ใน Kerosine ผลผลิตจากขบวนการนี้จะได้ ยูเรเนียมที่บริสุทธิ์ พลูโทเนียมที่บริสุทธิ์ และผลิตภัณฑ์ขั้นที่มีระดับรังสีสูง ดังแสดงในของขบวนการแปรสภาพเชื้อเพลิงใช้แล้ว

REPROCESSING SPENT FUEL: PUREX Flow Sheet



รูปที่ 13 ขบวนการแปรสภาพเชื้อเพลิงใช้แล้ว

การวัดการแผ่รังสีจากแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้ว

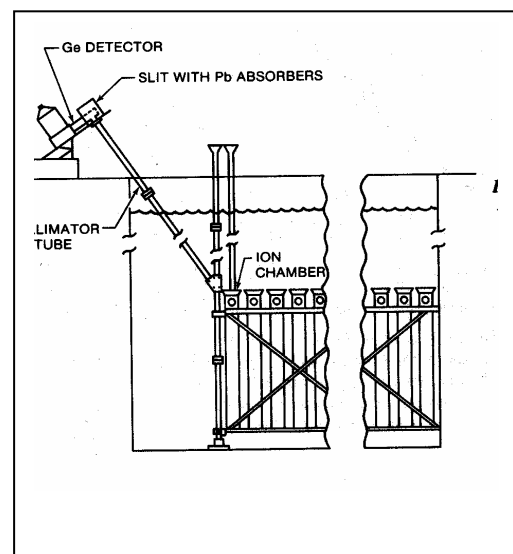
การวัดรังสีแกมมาหรือนิวตรอนที่แผ่ออกจากแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้วเพื่อใช้หาปริมาณของยูเรเนียมและพลูโทเนียมหรือปริมาณการเผาไหม้ (Fuel burnup) ไม่สามารถทำการวัดได้โดยตรงเนื่องจากมีระดับรังสีรอบข้างสูงมากมารบกวน จึงต้องใช้เทคนิคทางอ้อม ตัวอย่างเช่นต้องการหาค่า burnup ของแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้วจะใช้วิธีการหาสัดส่วนของรังสีแกมมาที่ปล่อยออกมาจากผลผลิตพลอยได้ของ ไอโซโทป Cs-134 ต่อ Cs-137

การวัดหาปริมาณของรังสีแกมมาทั้งหมดด้วยหัววัด Ion Chamber ที่บริเวณส่วนบนของแท่งเชื้อเพลิง อันเป็นผลมาจากการแผ่รังสีของ Co-60 Co-58 และ Mn-54 ซึ่งเป็นสารที่ใช้ทำโครงสร้างของแท่งเชื้อเพลิง

การวัดแกมมาพลังงานสูง 2186 keV ของ Cs-134 ด้วยหัววัด Be (γ, n) ซึ่งเป็น U-235 ฟิชชันแชมเบอร์ (Fission chamber) หุ้มด้วยโพลีเอทีลีน และล้อมรอบด้วยเบริลเลียมซึ่งเป็นการวัดอันหนึ่งของผลผลิตฟิชชัน

การวัดอย่างละเอียดเพื่อหาค่าเผาไหม้ของแท่งเชื้อเพลิงด้วยหัววัดรังสี เยอรมานเนียม (high resolution germanium) โดยการวัดหาความเข้มข้นของผลผลิตฟิชชันแต่ละตัวซึ่งมีความสัมพันธ์กับการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง

แท่งเชื้อเพลิงใช้แล้วจากเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ ยังมีเชื้อเพลิงยูเรเนียมที่เหลืออยู่และมีพลูโทเนียมที่เกิดขึ้นมา จากปฏิกิริยาแบ่งแยกนิวเคลียส ซึ่งเป็นเชื้อเพลิงที่อยู่ภายใต้การควบคุมและดูแล (Safeguards)ตามข้อตกลงกับทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ ประเทศที่ไม่มีโรงงานแปรรูปเชื้อเพลิงใช้แล้ว หรือห้องปฏิบัติการเกี่ยวกับการแปรรูปเชื้อเพลิงใช้แล้ว แท่งเชื้อเพลิงใช้แล้วที่เก็บอยู่ในบ่อน้ำจะต้องอยู่ในสภาพเดิมเหมือนกับแท่งเชื้อเพลิงใหม่ จะนำไปแปรรูปไม่ได้ ทบวงการฯ จะส่งเจ้าหน้าที่มาตรวจสภาพแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้วอย่างน้อยปีละ 1 ครั้ง หรือทุกๆ 3 เดือน ขึ้นอยู่กับปริมาณของแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้วที่เก็บรักษาไว้ การเปลี่ยนแปลงที่เก็บรักษาก็จะต้องแจ้งให้ทบวงการฯทราบเป็นการล่วงหน้า



รูปที่ 14 การวัดรังสีเชื้อเพลิงใช้แล้วในบ่อน้ำ

เอกสารอ้างอิง:

1. Robert G. Cochran and Nicholas Tsoulfanidis : The Nuclear Fuel Cycle Analysis and Management
 2. Doug Reilly, Norbert Ensslin, Haslings Smith.Jr and Sarah Kreiner: Passive Nondestructive Assay of Nuclear Material
 3. เอกสารเผยแพร่ British Nuclear Fuel PLC
 4. เอกสารเผยแพร่ ABB Atom Sweden
 5. www.uic.com
-



ปรีชา การสุทธิ

ประวัติย่อ

นายปรีชา การสุทธิ เรียนจบปริญญาตรี (เกียรตินิยม) ด้านฟิสิกส์ จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปี พ.ศ. 2506 และปริญญาโทภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปี พ.ศ. 2516 อดีตเคยรับราชการที่สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ (ปัจจุบันเปลี่ยนชื่อเป็น สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ) จากนั้นได้ดำรงตำแหน่งผู้ช่วยศาสตราจารย์ประจำภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี พ.ศ. 2525 ได้เดินทางไปทำงานที่ทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ (IAEA) ที่กรุงเวียนนา ประเทศออสเตรีย ในตำแหน่งผู้ตรวจด้านพิทักษ์ความปลอดภัยเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ (Nuclear Safeguards Inspector) จนเกษียณอายุเมื่อปี พ.ศ. 2543

ปัจจุบันได้ช่วยงานด้านนิวเคลียร์ของประเทศไทยโดยเป็นกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิของคณะกรรมการความปลอดภัยของโรงงานนิวเคลียร์ และเป็นอุปนายกคนที่ 2 ของสมาคมนิวเคลียร์แห่งประเทศไทย



วิทิต เกษคุปต์

ประวัติย่อ

นายวิทิต เกษคุปต์ เรียนจบปริญญาตรี (เกียรตินิยม) ด้านฟิสิกส์ จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และปริญญาโทด้าน Health Physics จาก University of Rochester ประเทศสหรัฐอเมริกา อดีตเคยรับราชการที่สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ (ปัจจุบันเปลี่ยนชื่อเป็นสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ) โดยดำรงตำแหน่งสุดท้ายคือ ผู้อำนวยการกองสุขภาพ จากนั้นได้เดินทางไปทำงานที่ทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ (IAEA) ที่กรุงเวียนนา ประเทศออสเตรีย ในตำแหน่งผู้ตรวจด้านพิทักษ์ความปลอดภัยเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ (Nuclear Safeguards Inspector) จนเกษียณอายุเมื่อปี พ.ศ. 2542

ปัจจุบันได้ช่วยงานด้านนิวเคลียร์ของประเทศไทยโดยเป็นกรรมการในคณะกรรมการกำหนดมาตรฐานการรับรองเจ้าหน้าที่ความปลอดภัยทางรังสี เป็นกรรมการสมาคมนิวเคลียร์แห่งประเทศไทย เป็นคณะทำงานจัดทำศัพทานุกรมนิวเคลียร์และอรรถาภิธานศัพท์นิวเคลียร์ฉบับภาษาไทย