จะเห็นได้ว่า $^{24}_{11}Na$ มีครึ่งชีวิต 15 ชั่วโมง

ในปี 1934 โจลิออทและคูรี (Joliot - Curies) เป็นคนแรกซึ่งทำการแปรธาตุได้ดี เช่น

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

$^{30}_{15}P$ มีครึ่งชีวิตเท่ากับ 2.5 นาที สลายให้ positron

$$^{30}_{15}P \longrightarrow {}^{30}_{14}Si + {}^{0}_{1}e \text{ (positron)}$$

ขณะนี้มีไอโซโทปของธาตุต่าง ๆ เกิดขึ้นเป็นจำนวนมากสำหรับ 105 ธาตุที่มีอยู่ ส่วนไอโซโทปเทียมที่ทำขึ้นด้วยพบว่ามีมากมายหลายชนิด

สำหรับการเปลี่ยนแปลงทางปฏิกิริยานิวเคลียร์นั้นนอกจากจะมีการเสียมวลแล้ว มวลจะเปลี่ยนเป็นพลังงานนับว่ามากพอที่จะให้ตรวจหาได้ จึงอาจสรุปได้ว่าทั้งมวลและพลังงานไม่สามารถสร้างขึ้นได้และขณะเดียวก็ไม่สามารถทำลายได้ แต่ทว่าเปลี่ยนไปมาได้ระหว่างกัน

12-8 พลังงานอะตอม (Atomic Energy)

ค.ศ. 1905 อัลเบิต ไอน์สไตน์ (Albert Einstein) ได้เสนอสมการซึ่งเกี่ยวข้องระหว่างมวลของสาร และพลังงานดังนี้

$E = mc^2$

E = พลังงานมีหน่วยเป็นเออร์ก (ergs)

m = มวล หน่วยเป็นกรัม

c = อัตราเร็วของแสง ซึ่งมีค่าเท่ากับ 3.00×10^{10} ซม./วินาที

Albert Einstein เป็นนักฟิสิกส์ชาวอเมริกัน มีชีวิตอยู่ระหว่าง ค.ศ. 1878-1955 ได้รับรางวัลโนเบลในสาขาวิชาฟิสิกส์ เมื่อ ค.ศ. 1921 จากสมการของเขา จะเห็นได้ว่ามวลและพลังงานอาจเปลี่ยนกันได้ ถ้ามวลของสารหายไป 1 กรัม จะได้พลังงานความร้อนถึง 2.15×10^{13} คาลอรี่ จำนวนความร้อนอันนี้จะทำให้น้ำ 215,000,000 ก.ก. หรือประมาณ 215,000 ตัน ร้อนจาก 0°ซ - 100°ซ ได้

ในปฏิกิริยาเคมีธรรมดา พลังงานเกิดขึ้นไม่มากนัก (ถ้าเปรียบเทียบกันในเรื่องของพลังงานนิวเคลียร์) อาจอยู่ในระหว่าง 5×10^4 - 5×10^5 คาลอรี่ และอาจมีการเสียมวลหรือ

ได้รับเพิ่มก็เพียงระหว่าง 2×10^{-9} ถึง 2×10^{-8} ซึ่งนับว่าน้อยมากที่จะตรวจได้ เช่น ปฏิกิริยาของการเกิดน้ำ

hydrogen + oxygen ——→ water

4.0320 กรัม 31.9988 กรัม = 36.0308 กรัม

เขาพบว่ามวลที่ใช้และมวลที่เกิดขึ้น แตกต่างกันเพียง 5.35×10^{-9} หรือเท่ากับ 0.00539 μg ซึ่งนับว่าน้อยมาก

สมการ $E = mc^2$ ของไอน์สไตน์นี้ ได้พิสูจน์ว่าเป็นจริง จากการทิ้งระเบิดปรมาณูสองลูกในประเทศญี่ปุ่น ณ เมืองฮิโรชิมา และ เมืองนางาซากิ เพราะได้เกิดพลังงานและความร้อนมหาศาลทำความเสียหายให้กับญี่ปุ่นเป็นอย่างยิ่ง ผลจากการทิ้งระเบิดปรมาณูสองลูกนี้ช่วยหยุดยั้งสงครามโลกครั้งที่สองได้ในเวลาต่อมาไม่ช้านัก

12-9 กระบวนการนิวเคลียร์ฟิชชั่น (Nuclear Fission)

ตั้งแต่ไอน์สไตน์ได้เสนอทฤษฎีของเขาซึ่งอธิบายถึงความสัมพันธ์ระหว่างสสารและพลังงานมีความเกี่ยวพันกัน เมื่อ คศ. 1905 ซึ่งในตอนนั้นไม่มีใครสามารถทราบถึงเรื่องนี้และก็ไม่มีใครสามารถทำการพิสูจน์ได้ในห้องปฏิบัติการ จนกระทั่ง คศ. 1932 ได้มีการทดลองครั้งแรกชี้ว่าสสารเปลี่ยนเป็นพลังงานได้

คอคครอฟท์ (Cockcroft) และวอลตัน (Walton) นักวิทยาศาสตร์ชาติอังกฤษได้ทำงานที่ห้องปฏิบัติการของรัทเธอร์ฟอร์ด ได้ทำการยิงลิเธียมด้วยอนุภาคโปรตอนเร็วได้อนุภาคอัลฟ่าดังนี้

$$^{7}_{3}\mathrm{Li} + ^{1}_{1}\mathrm{H} \longrightarrow ^{4}_{2}\mathrm{He} + ^{4}_{2}\mathrm{He}$$

อนุภาคอัลฟ่าที่เกิดขึ้นนี้มีพลังงานสูงกว่าที่คิดไว้ถึง 100 เท่า ปัญหาอยู่ว่าพลังงานนี้มาจากไหน

คอคครอฟท์และวอลตันได้เปรียบเทียบมวลของลิเทียมรวมกับมวลของโปรตอนกับมวลของสองอนุภาคอัลฟ่า แล้วปรากฏมีมวลน้อยกว่าเดิมเล็กน้อย จึงเข้าใจว่ามวลของสารที่หายไปเล็กน้อยเปลี่ยนเป็นพลังงาน ดังสมการ

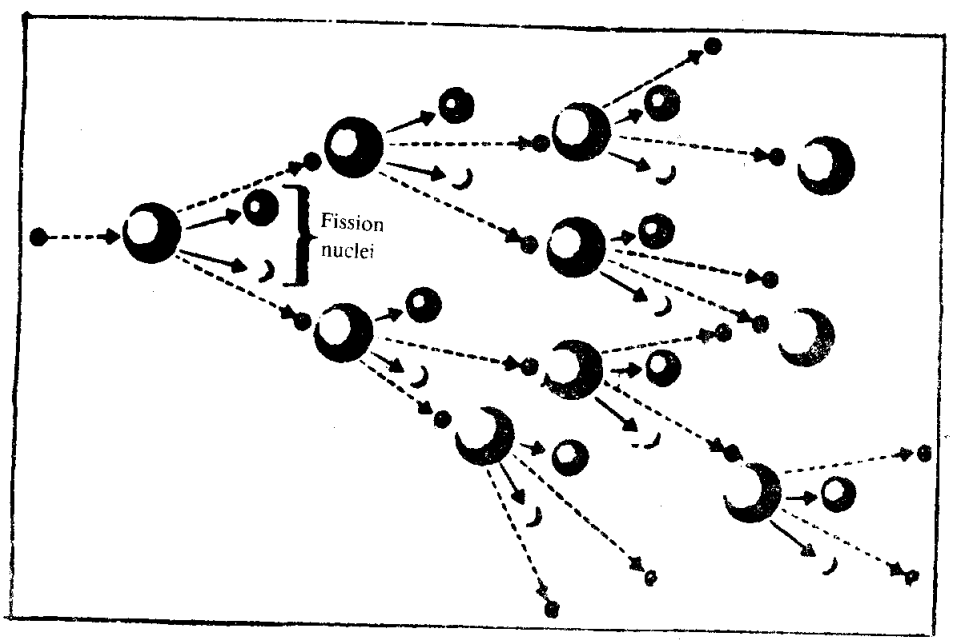
$$E = mc^2$$

คศ. 1939 ฮันและสแตรสแมน (Hahn and Strassmann) ได้ทำการยิงธาตุยูเรเนียม-235 ด้วยนิวตรอน ซึ่งการทดลองนี้เฟอร์มิ (Fermi) ชาวอิตาเลียนได้ลองทำก่อนหน้านี้สองสามปี ในครั้งกระนั้นเฟอร์มิได้ทราบว่านิวตรอนที่ใช้ควรเป็นนิวตรอนช้า (slow neutron) เพราะจะผ่านไปในนิวเคลียสของธาตุ 235 U ได้ดีกว่านิวตรอนเร็ว (fast neutron)

ในกรณีที่ฮันและสแตรสแมนได้ทำการทดลองแบบของเฟอร์มีซ้ำอีก คือใช้นิวตรอนยิงธาตุยูเรเนียม - 235 จะได้คริฟตอนและบาเรียมพร้อมทั้งพลังงานจำนวนมาก การทดลองนี้ได้มีไมท์เนอร์ (Meitner) นักวิทยาศาสตร์ที่มีชื่อเสียงและฟริสช์ (Frisch) ร่วมกันทำการทดลองและอธิบายว่า อะตอมของยูเรเนียมแตกแยกออกเป็นอะตอมที่เบากว่ายูเรเนียมเดิมของส่วนและเขาได้เรียกขบวนการนี้ว่า นิวเคลียร์ฟิชชั่น (Nuclear Fission) เพราะเขานึกถึงการแบ่งเซลของสิ่งมีชีวิต ต่อมาไม่นานนักคณะวิทยาศาสตร์ได้แนะว่าเมื่อนิวตรอนยิงถูกนิวเคลียสของอะตอม U-235 จะถูกแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ บาเรียมและคริฟตอนและนิวตรอนใหม่ประมาณ 2-3 ตัว และนิวตรอนใหม่นี้จะเป็นกระสุนนัดต่อไปยิงอะตอม U-235 อีกต่อไปเรื่อย ๆ ปฏิกริยานิวเคลียร์จะเกิดสืบเนื่องกันเรื่อย ๆ ไป เรียกปฏิกริยานี้ว่าปฏิกริยาลูกโซ่ (Chain reaction) ดูรูป 12-2 ปฏิกริยาจะเกิดดังนี้

$$^{235}_{92}U + ^{1}_{0}n \longrightarrow {}^{141}_{56}Ba + {}^{92}_{36}Kr + 3(^{1}_{0}n) + \text{พลังงาน}$$

รูป 12-2 ปฏิกิริยาลูกโซ่ (Chain Reaction)



สรุปได้ความว่านิวเคลียร์ฟิชชั่น เกิดจากอนุภาคบางชนิดโดยเฉพาะนิวตรอนชนกับนิวเคลียสของธาตุหนัก ๆ ทำให้ธาตุนั้นแตกแยกออกเป็นนิวเคลียสของธาตุที่เบากว่าสองส่วน และเกิดนิวตรอนใหม่อีก 2-3 อะตอม และมีพลังงานใหม่เกิดขึ้น จากความรู้เรื่องนิวเคลียร์ฟิชชั่นทำให้เกิดโครงการแมนฮัทตัน (Manhattan Distric Project) ในสหรัฐอเมริกา นำไปสู่การระเบิดปรมาณู (atomic bomb) และปฏิกรณ์ปรมาณู (Nuclear reactor)

12-10 ระเบิดปรมาณู (The Atomic Bomb)

การระเบิดของลูกระเบิดปรมาณูใช้หลักของนิวเคลียร์ฟิชชั่นก่อให้เกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ ธาตุยูเรเนียม - 235 หรือพลูโตเนียม - 239 เป็นธาตุที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงในลูกระเบิดนี้ เขาใส่ธาตุยูเรเนียม - 235 หรือพลูโตเนียมอย่างใดอย่างหนึ่ง ไว้ตอนปลายสองข้างลูกระเบิดปริมาณของเชื้อเพลิงนี้ต้องจัดให้มีปริมาณน้อยกว่าขนาดวิกฤติ ทั้งนี้เพื่อป้องกันมิให้ระเบิดก่อนเวลาที่ต้องการ เพราะมีนิวตรอนอยู่ในอากาศ เมื่อต้องการให้ระเบิดตามเวลาที่ต้องการให้ระเบิดก็ปล่อยให้ยูเรเนียม - 235 หรือพลูโตเนียม - 239 ซึ่งใส่ไว้ตอนปลายสองข้างของลูกระเบิด เข้ามากระทบกันซึ่งจะได้ขนาดโตกว่าขนาดวิกฤติปฏิกิริยาลูกโซ่จะเกิดขึ้น ซึ่งจะเกิดความร้อนสูงถึง 10 ล้านองศาเซนติเกรด ทำให้ก๊าซบริเวณนั้นร้อนมากเกิดการอัดตัวมีความดันสูงและยังเกิดอนุภาคอัลฟ่าบีต้าและพลังงานสูง พลังงานนี้ทำลายชีวิตและก่อให้เกิดความเสียหายเหลือคณานับ

เมื่อ คศ. 1945 ได้มีการแยกยูเรเนียม - 235 จากยูเรเนียม - 238 เพื่อทำลูกระเบิด และก็ได้มีการผลิตพลูโตเนียม - 239 นักวิทยาศาสตร์และวิศวกรได้ทำงานในห้องปฏิบัติการของรัฐที่ลอสลาโมสนิวเม็กซิโก ได้พิจารณาถึงเรื่องการสร้างระเบิดปรมาณู ลูกระเบิดปรมาณูลูกแรกได้ใช้พลูโตเนียม - 239 และได้ทดลองระเบิดปรมาณูเมื่อวันที่ 16 กรกฎาคม คศ. 1945 ณ ตอนใต้ของนิวเม็กซิโก ต่อมาเมื่อวันที่ 6 สิงหาคม 1945 ระเบิดปรมาณูซึ่งใช้ยูเรเนียม - 235 ได้ทิ้งลง ณ เมืองฮิโรชิมา ประเทศญี่ปุ่น และได้มีการทิ้งระเบิดลูกที่สองในเมืองนางาซากิ ประเทศญี่ปุ่น เมื่อวันที่ 9 สิงหาคม ลูกระเบิดลูกนี้ใช้พลูโตเนียม - 239 ลูกระเบิดปรมาณูที่ทิ้งลงในญี่ปุ่นนี้มีอำนาจการระเบิดขนาด ที เอ็นที 20,000 ตัน อุณหภูมิหลายล้านดีกรี ณ ตรงกลางจุดระเบิด อุณหภูมิสูงมากขนาดหินและโลหะละลาย ขณะเกิดการระเบิดได้เกิดธุลีกัมมันตภาพรังสีซึ่งเป็นธาตุอื่น ๆ อีกถึง 200 เรดิโอไอโซโทป มากมายฟุ้งกระจายและภายหลังก็จะตกลงสู่พื้นเรียก radioactive fall out สำหรับสตรอนเชี่ยม - 90 และซีเซียม - 137 จัดว่าเป็นเรดิโอไอโซโทปที่เป็นอันตราย ทำให้เกิดการผ่าเหล่า (mutation) ซึ่งไปในทางที่เลวมากกว่าทางที่ดี

ผลเสียที่ได้รับจากเรื่องราวของสารกัมมันตภาพรังสีมีมากมาย นอกจากมนุษย์ใช้อาวุธปรมาณู (Nuclear weapon) มาทำลายล้างกัน เช่น ระเบิดปรมาณูดังได้กล่าวมาแล้ว ผลเสียที่ติดตามมาอีกมาก เช่น

1. ทำให้เกิดคลื่นของการสั่นสะเทือน เกิดการทำลายล้างสิ่งต่าง ๆ ชั่วพริบตาเดียว ในระยะรัศมี 0.5 ไมล์ จากเป้าหมายที่ลูกระเบิดลง ส่วนระยะรัศมี 1 ไมล์จากเป้าหมายก็มีการเสียหายขั้นร้ายแรง ถึงแม้ระยะรัศมี 2 ไมล์ ก็เสียหายมากเช่นกัน

2. ณ ที่ ๆ ระเบิดตกลงโดยตรงจะเกิดอำนาจความร้อนที่ 1,000°ซ ส่วนตำแหน่งห่างจากที่ตกลงมาประมาณ 1-2 ไมล์ ทำให้ผิวหนังของสิ่งมีชีวิตไหม้เกรียม บางครั้งห่างจากที่ตกลงมาถึง 30-40 ไมล์ แสงที่เปล่งออกมาทำให้ตาบอดได้

3. ผลที่ได้รับจากการกระจายของรังสีแกมม่า และนิวตรอนจะทำลายล้างสิ่งมีชีวิตทันทีภายในรัศมี 0.5 ไมล์ และจะมีผลเสียหายอย่างหนักภายในรัศมี 1 ไมล์ จากตำแหน่งระเบิดตก

4. เกิดธุลีกัมมันตภาพรังสี (Radioactive fall-out) ซึ่งจะถูกลมพัดพาไปและอาจจะไปไกลถึงบรรยากาศชั้นสตราโตสเฟียส์ (Stratosphere) ซึ่งสูงถึง 30,000 ฟีต จากพื้นดิน และจะล่องลอยอยู่ได้เป็นสิบปีและขณะเดียวกันจะค่อย ๆ ตกสู่พื้นดิน ธุลีกัมมันตภาพรังสีนี้ถ้าถูกเจือปนในอาหาร น้ำ มากพอจะทำลายเนื้อเยื่อต่าง ๆ ภายในร่างกาย ทำให้ร่างกายอ่อนแอไม่มีการต้านทานเชื้อโรคทำให้ยีนส์เปลี่ยนแปลง สำหรับสตรอนเชียม - 90 (Strontium - 90) มีครึ่งชีวิตนานถึง 27 ปี ถ้าตกสู่พื้นดินพืชดูดเข้าสู่ลำต้น เมื่อมนุษย์ สัตว์กินพืชนี้ก็จะสะสมไว้ในร่างกายทีละน้อย ๆ อาจนำไปสู่โรคมะเร็ง

นอกจากนี้แล้วผู้ที่ได้รับรังสีจะก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในเม็ดโลหิต กล่าวคือ เซลของเม็ดเลือดขาวจะลดลงมาก และมีผลต่อเนื้อเยื่อซึ่งเกี่ยวข้องกับน้ำเหลืองและไขกระดูกทำให้มีผลกระทบต่ออวัยวะสืบพันธุ์ เยื่อในกระเพาะอาหาร ผิวหนัง ตับและอื่น ๆ อีกมาก

12-11 กรรมวิธีนิวเคลียร์ฟิวสชั่น (Nuclear Fusion)

เป็นการนำเอาธาตุเบา ๆ ตั้งแต่สองธาตุนี้ขึ้นไปรวมกันกลายเป็นธาตุหนัก ในการรวมกันนี้จะต้องมีพลังงานความร้อนอย่างสูงเข้าช่วย เช่น

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

$$^{2}_{1}H + ^{2}_{1}H \longrightarrow ^{4}_{2}He + \text{พลังงาน}$$

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

ในธรรมชาติก็มีการเกิดนิวเคลียร์ฟิวสชั่นอยู่ตลอดเวลา เช่น ภายในดวงอาทิตย์มีก๊าซไฮโดรเจนอยู่มากมายและมีความร้อนสูง จึงเกิดนิวเคลียร์ฟิวสชั่นให้ก๊าซฮีเลียมตลอดเวลา ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า ปฏิกิริยาเทอร์โมนิวเคลียร์ฟิวส์ชั่น (Thermonuclear fusion reaction) ในระหว่างการเกิดฟิวสชั่นนั้นมวลของธาตุจะหายไปเนื่องจากเปลี่ยนเป็นพลังงาน

สำหรับ $^{2}_{1}H$ และ $^{3}_{1}H$ เป็นไอโซโทปหนักของไฮโดรเจนเรียกว่าดิวทีเรียม (deuterium) และทริเทียม (tritium) ซึ่งเตรียมได้จากทำอิเลคโตรลิซิสของน้ำ ในธรรมชาติมีดิวทีเรียมอยู่เล็กน้อย ส่วนทริเทียมเป็นเรดิโอไอโซโทปของไฮโดรเจนและเป็นไอโซโทปที่ทำขึ้นโดยใช้นิวตรอนยิงธาตุลิเทียม

ปัจจุบันนี้สำหรับนิวเคลียร์ฟิวส์ชั่นยังมิสามารถควบคุมปฏิกิริยา เพื่อให้เกิดความปลอดภัยได้ แต่หวังว่าในวันหนึ่งข้างหน้าอาจจะเป็นประมาณศตวรรษที่ 21 มนุษย์อาจจะควบคุมปฏิกิริยาและนำพลังงานจากเรื่องนี้มาใช้ประโยชน์ได้

12-12 ระเบิดไฮโดรเจน (Hydrogen Bomb)

คศ. 1951 นักวิทยาศาสตร์สหรัฐได้ทดลองการรวมตัว (fusion) ของไฮโดรเจน ตั้งแต่นั้นมาก็ได้มีการทดลองระเบิดไฮโดรเจนขึ้นอีกหลาย ๆ ครั้ง คศ. 1954 ได้ทดลองระเบิดไฮโดรเจนในเกาะเล็ก ๆ แห่งหนึ่งในมหาสมุทรแปซิฟิค การระเบิดครั้งกระนั้นมีแรงระเบิดเท่ากับการระเบิดของ ทีเอ็น ที จำนวน 15,000,000 ตัน และถ้าเปรียบเทียบกับแรงระเบิดของระเบิดปรมาณูที่ทดลองลูกแรกจะเห็นได้ว่าระเบิดไฮโดรเจนที่กล่าวมานั้นแรงเป็น 750 เท่า ทั้งระเบิดไฮโดรเจนและระเบิดปรมาณูเมื่อเกิดการระเบิดจะได้อุณหภูมิและความดันสูงมาก

หลักของการสร้างระเบิดประเภทนี้ใช้หลักนิวเคลียร์ฟิวสชั่น ธาตุที่จะใช้ให้เกิดการรวมตัวกันนั้นอาจจะเป็นลิเธียม และดิวทีเรียม หรือดิวทีเรียมและทริเทียม ส่วนพลังงานที่จะทำให้ธาตุทั้งหลายดังกล่าวทำปฏิกิริยากันนั้นมาจากระเบิดปรมาณูซึ่งบรรจุไว้ตรงกลางของระเบิดไฮโดรเจน และล้อมรอบด้วยธาตุลิเธียมและดิวทีเรียม หรือดิวทีเรียมและทริเทียม เป็นต้น เมื่อจะให้ระเบิดไฮโดรเจนทำงาน ก็ต้องให้ระเบิดปรมาณูเกิดการระเบิดก่อนเพื่อนำพลังงานมาใช้ให้ธาตุที่ล้อมรอบระเบิดปรมาณูได้รวมตัวเกิดเป็นฮีเลียม

ผลจากการระเบิดของไฮโดรเจนนั้นคล้ายคลึงกับการระเบิดของระเบิดปรมาณูเว้นแต่ระเบิดไฮโดรเจนให้พลังงานมากกว่าและทำความเสียหายมากมาย สิ่งที่สำคัญที่สุดเนื่องจากการระเบิด จะเกิดสารกัมมันตภาพในระเบิดปรมาณูและได้สารที่แตกแยกออกมาเป็นชิ้นวัตถุต่าง ๆ ซึ่งมีอำนาจกัมมันตภาพรังสี แต่ระเบิดไฮโดรเจนจะไม่ให้สารกัมมันตภาพ นอกจากจะ

มีสารกัมมันตภาพซึ่งได้จากการระเบิดปรมาณูซึ่งใส่เป็นไส้ของระเบิดไฮโดรเจน สำหรับฮีเลียมที่ได้ก็ไม่เป็นก๊าซที่ทำอันตราย ส่วนไฮโดรเจนที่ใช้ก็มิได้มีราคามากมายเมื่อเทียบกับยูเรเนียมหรือเชื้อเพลิงอื่น ๆ

12-13 เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู (Nuclear Reactor)

เครื่องมือนี้ได้ประดิษฐ์ขึ้นเพื่อใช้อาบรังสีธาตุที่ไม่มีสมบัติกัมมันตภาพรังสี ประกอบไปด้วยส่วนต่าง ๆ คือ

เชื้อเพลิง โดยทั่วไปได้แก่ยูเรเนียม - 235 และพลูโตเนียม - 239

โมเดอร์เรเตอร์ (moderator) ได้แก่น้ำหนัก (heavy water) คาร์บอนและพาราฟิน ฯลฯ ซึ่งเป็นตัวลดความเร็วของนิวตรอน เพราะเมื่อนิวตรอนกระทบกับโมเดอร์เรเตอร์จะคายพลังงานความเร็วจะลดลง เพื่อมนุษย์จะสามารถควบคุมปฏิกริยาที่เกิดขึ้น

แท่งควบคุม (control rod) เป็นแท่งที่ใช้ดูดนิวตรอนเสียบ้างเพราะขณะที่เกิดปฏิกริยานิวเคลียร์ จะเกิดนิวตรอนใหม่มากมาย จำเป็นจะต้องดูดออกเสียบ้างเพื่อลดความรุนแรง สารที่ทำหน้าที่เป็นแท่งควบคุมได้แก่ แคดเมียม หรือโบรอน ถ้าต้องการดูดนิวตรอนก็ให้สอดแท่งควบคุมเข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูเล็ก ๆ

คูลแลนท์ (coolant) มีหน้าที่นำเอาความร้อนออกไปจากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู ได้แก่ น้ำหนัก (heavy water) โลหะโซเดียม คาร์บอนไดออกไซด์ ฮีเลียมและอื่น ๆ

กำบัง (shield) มีหน้าที่ป้องกันรังสีมิให้เล็ดลอดออกมา ใช้กำแพงคอนกรีต และน้ำ

นักวิทยาศาสตร์ชาวอิตาเลียนคือเฟอร์มิ (Fermi) เป็นคนแรกที่สร้างเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูสำเร็จในปี คศ. 1942 ณ เมืองชิคาโก เครื่องมือนี้จะเปลี่ยนยูเรเนียม - 238 ให้เป็นพลูโตเนียม - 239 เพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงต่อไปได้

$$^{238}_{92}U + {}^{1}_{0}n \longrightarrow {}^{239}_{94}Pu + 2\,{}^{0}_{-1}e$$

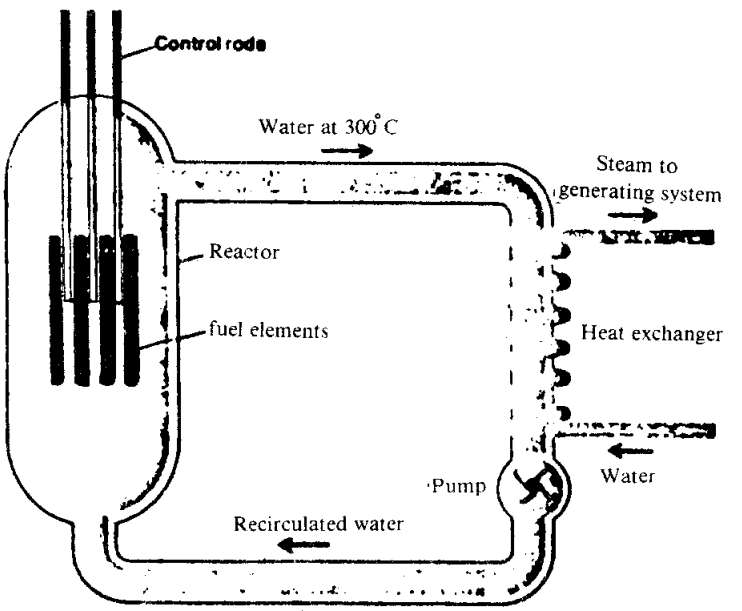
เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูนั้นใช้แท่งกราฟไฟต์เรียงซ้อนกัน ภายในแท่งกราฟไฟต์มีช่องหลายช่อง บางช่องสำหรับสอดเชื้อเพลิง บางช่องสำหรับสอดสารที่ทำหน้าที่เป็นแท่งควบคุม

ปกติอะตอมธาตุยูเรเนียมทุก ๆ ไอโซโทปมิได้มีความสามารถจะแยกตัวได้เสมอไป พบว่ายูเรเนียม - 235 และยูเรเนียม - 233 อะตอมสามารถแตกตัวได้ในธรรมชาติส่วนใหญ่จะ

เป็นยูเรเนียม - 238 ซึ่งโดยตัวของธาตุเองไม่เป็นเชื้อเพลิง แต่ถ้าเอาใส่เข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูเพื่อให้ถูกชนด้วยนิวตรอนแล้วจะแปรธาตุเป็นเชื้อเพลิงปรมาณูได้ เช่นยูเรเนียม - 238 และทอเรียม - 232 เป็นต้น สำหรับยูเรเนียม - 235 และพลูโตเนียม - 239 จัดว่าเป็นธาตุเชื้อเพลิงปรมาณู (atom fuel) ซึ่งคาดกันว่า ^{235}U จะมีใน ^{238}U ในอัตราส่วน 1 : 140

ถ้านำเอาธาตุธรรมดาใส่ในเครื่องปฏิกรณ์ที่กำลังทำงานจะกลายเป็นธาตุที่ให้รังสีได้ โคบอล์ต - 59 ถูกยิงด้วยนิวตรอนจะกลายเป็นโคบอล์ต - 60 ซึ่งให้รังสีได้ พลังงานนิวเคลียร์ให้ประโยชน์ต่อมนุษย์มาก เป็นต้นว่าให้พลังงานความร้อน และถ้าเราให้น้ำรับพลังงานความร้อนสูงจนกลายเป็นไอน้ำเมื่อต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าหรือก่อให้เกิดเครื่องยนต์ทำงานได้ พลังงานนิวเคลียร์นี้นับว่าน่าสนใจที่จะนำมาทำประโยชน์ได้

รูป 12-3 เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู



รูป 8-5 แสดงถึงภายในของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู

มนุษย์ได้นำเอาพลังงานนิวเคลียร์มาใช้ทำประโยชน์หลายทาง แต่ที่น่าสนใจ คือนำพลังงานนี้มาทำให้เรือเคลื่อนที่ได้ อาทิเช่น เรือดำน้ำชื่อ นอติลัส (The U.S.S. Nautilus) ทำพิธีปล่อยลงน้ำเมื่อ คศ. 1954 และเรือสินค้าชื่อซาวานา (The N.S. Savanah) ทำพิธีปล่อย

ลงน้ำเมื่อ คศ. 1959 เรือสองลำนี้จัดว่าเป็นเรือดำน้ำและเรือสินค้าลำแรกของโลกที่ขับเคลื่อนด้วยพลังงานนิวเคลียร์

12-14 ธาตุกัมมันตภาพรังสีตามธรรมชาติ (Natural Radioactivity)

ไอโซโทปบางธาตุที่เกิดในธรรมชาติเป็นกัมมันตภาพรังสี คือจะมีการแผ่อนุภาคอัลฟ่า บีต้าและแกมม่าแล้วแต่กรณี และมีการแผ่เองโดยอัตโนมัติอย่างช้า ๆ เรียกกัมมันตภาพรังสีธรรมชาติ (natural radioactivity) เหตุผลว่าทำไมจึงเป็นเช่นนี้ ยังไม่มีการทราบได้อย่างแท้จริง แต่เหตุผลหนึ่งคือนิวเคลียสของธาตุพวกนี้ไม่อยู่ตัว เนื่องจากเรโชของนิวตรอนต่อโปรตอน ทั้งนี้โปรตอนมีประจุบวก ซึ่งอยู่ในนิวเคลียสจะผลักกันเอง แต่ถ้ามีนิวตรอนอยู่ด้วยมากพอจะช่วยให้การผลักกันเองของโปรตอนน้อยลง แต่ถ้ามีนิวตรอนน้อยไปไม่เพียงพอก็จะก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในนิวเคลียสขึ้น หรือเกิดการเปล่งอัลฟ่า บีต้าและแกมม่า ไอโซโทปส่วนใหญ่ไม่มีกัมมันตภาพรังสี

การแตกสลายของไอโซโทปกัมมันตภาพรังสีธรรมชาติ ไม่ขึ้นกับสภาพภายนอก เช่น อุณหภูมิ ความดันหรือการเกิดออกซิเดชั่นของธาตุนั้น แต่ขึ้นกับลักษณะตามธรรมชาติของธาตุนั้น ๆ และการสลายของธาตุมิได้เป็นอัตราเดียวกัน อัตราการสลายวัดได้เป็นครึ่งชีวิต ธาตุกัมมันตภาพรังสีเมื่อเกิดการสลายที่นิวเคลียสจะได้ธาตุอีกธาตุและถ้าธาตุใหม่นี้มีอำนาจกัมมันตภาพรังสีก็จะสลายตัวต่อไป และเกิดเป็นธาตุใหม่ และจะสลายตัวเช่นนี้อีกเรื่อย ๆ ผลสุดท้ายจะได้ธาตุที่ไม่มีอำนาจกัมมันตภาพรังสีเกิดขึ้น ตั้งแต่ธาตุเริ่มต้นจนถึงธาตุสุดท้าย เรียกว่า เป็นอนุกรม (series)

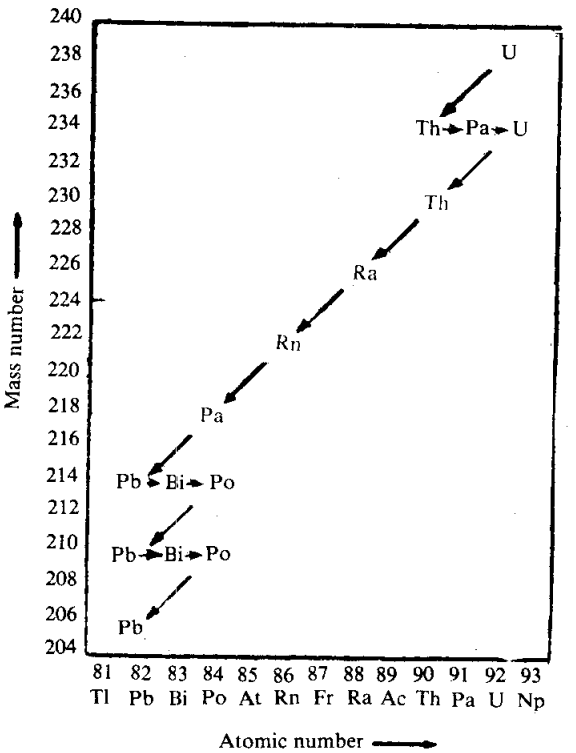
อนุกรมของธาตุกัมมันตภาพรังสีในธรรมชาติมี 3 อนุกรมคือ

1. อนุกรมยูเรเนียม - 238
2. อนุกรมยูเรเนียม - 235
3. อนุกรมทอเรียม - 232

ทั้งสามอนุกรมนั้นจะจบลงด้วยธาตุตะกั่วที่ไม่มีกัมมันตภาพรังสี สำหรับอนุกรมยูเรเนียม - 238 จะสิ้นสุดเมื่อได้ตะกั่ว - 206 อนุกรมยูเรเนียม - 235 จะสิ้นสุดด้วยตะกั่ว - 207 และอนุกรมของทอเรียม - 232 จะสิ้นสุดด้วยตะกั่ว - 209

ได้มีอนุกรมที่เริ่มจากพลูโตเนียม - 241 ซึ่งเป็นไอโซโทปที่สังเคราะห์ขึ้น อนุกรมพลูโตเนียม - 241 จะสิ้นสุดด้วยบิชมัตที่ไม่มีกัมมันตภาพรังสี - 209

รูป 12-4 การสลายของอนุกรมยูเรเนียม - 238 (The Uranium - 238 Disintegration Series)



ตัวอย่างอนุกรมยูเรเนียมซึ่งเขียนได้อีกแบบ

92 Uranium 238

↓ α

90 Thorium 234

↓ β

91 Proactinium 234

↓ β

92 Uranium 234

↓ α

90 Thorium 230

↓ α

88 Radium 226

↓ α

80 Radon 222

จากอนุกรมที่ได้แสดงจะเห็นว่าถ้ามีการสลายให้อนุภาคอัลฟ่าออกมา หมายถึงมวลของธาตุนั้น ๆ น้อยลง 4 และอำนาจไฟฟ้าลดลงไป 2^+ (นั้นคือโปรตอนหลุดไปสองตัวและนิวตรอนหลุดอีกสองตัว) หรือพูดได้ว่านิวเคลียสของธาตุฮีเลียมหลุดออกหรือกล่าวได้ว่าค่าของเลขอะตอมของธาตุเปลี่ยนไป คือไม่ใช่ธาตุเดิมแล้ว

ถ้ามีการสลายให้อนุภาคบีต้า ออกมาหมายถึงไม่มีการเปลี่ยนแปลง เพราะอนุภาคบีต้ามีมวลน้อยมากแทบจะไม่ต้องคำนึงถึงเป็นแต่เพียงว่าปริมาณของโปรตอนเพิ่มขึ้นอีกหนึ่งตัว โปรตอนที่เพิ่มขึ้นนี้ได้จากนิวตรอนในนิวเคลียสนั่นเอง ดังนี้

นิวตรอน ——→ โปรตอน + อิเลคตรอน (อนุภาคบีต้า)

12-15 หน่วยของการแผ่รังสี (Units of Radiation)

การแผ่รังสีวัดได้เป็นหน่วยต่าง ๆ ทั้งนี้ขึ้นกับว่าการวัดนั้นเกี่ยวข้องกับทางกายภาพหรือชีวภาพ

1. หน่วยการแผ่รังสีทางกายภาพที่จัดว่าเป็นมาตรฐานคือ คูรี (curie Ci) ซึ่งเดิมใช้เรเดียมเป็นมาตรฐานโดยคำนึงถึงการแตกสลาย (disintegrations) ของนิวเคลียสของธาตุเรเดียม-226 จำนวนหนึ่งกรัมต่อวินาที หนึ่งคูรีจึงมีค่าเท่ากับ 3.7×10^{10} กรัมต่อวินาที หน่วยคูรีนี้นับว่าไม่เกิดประโยชน์ต่องานทางชีวภาพ เพราะเป็นหน่วยที่ชี้ถึงการแตกสลายของนิวเคลียสต่อวินาทีเท่านั้น ไม่บ่งถึงประเภทการแผ่รังสี หรือผลของการแผ่รังสีต่อวินาทีเท่านั้น ในการรักษาทางการแพทย์มักใช้โคบอล์ท - 60 ทั้งนี้เพราะทราบว่าโคบอล์ท - 60 ปล่อยรังสีแกมม่าออกมา

2. ในกรณีที่จะศึกษาผลของการแผ่รังสีไปยังเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิต ได้วัดหาจำนวนพลังงานที่เนื้อเยื่อดูดซึมเข้าไป แต่การที่เนื้อเยื่อจะดูดซึมพลังงานได้ขนาดใดนั้น ต้องพิจารณาข้อมูลต่าง ๆ อาทิเช่น ชนิดสารกัมมันตภาพรังสี พลังงานที่แผ่ออกมา จำนวนเวลาที่นำไปรับการแผ่รังสีในการศึกษาเรื่องนี้ใช้วัดหน่วยเป็น แรด (rad) หน่วยแรดนี้วัดปริมาณพลังงานที่เนื้อเยื่อดูดไว้โดยมิคำนึงถึงประเภทการแผ่รังสี ฉะนั้นหนึ่งแรดหมายถึงเนื้อเยื่อหนักหนึ่งกรัมดูดพลังงานได้จำนวน 100 เออร์ก (ergs) 1 เออร์ก เป็นหน่วยพลังงานที่เล็กมาก ถ้าเปลี่ยนเออร์กเป็น 1 แคลอรี่ จะต้องใช้ 40 ล้านเออร์ก

3. หน่วยเรินเกน (roentgen unit, r) เป็นหน่วยที่ใช้วัดพวกรังสีเอ็กซและรังสีแกมม่าเท่านั้น รังสีเอ็กซและรังสีแกมม่าเมื่อผ่านอากาศหรือเนื้อเยื่อจะทำให้เกิดการอิออนไนซ์เซชั่น ฉะนั้นหนึ่งเรินเกนคือความเข้ม (intensity) ของรังสีเอ็กซ์และรังสีแกมม่าซึ่งให้ 2×10^9 อิออนบวกหรือลบในอากาศ 1 ลบ.ซม. แต่จำนวนนี้จะไม่เท่ากันถ้าเป็นเนื้อเยื่อสิ่งมีชีวิตแต่ละอย่าง

4. หน่วยเรม (rem units) เป็นหน่วยที่ใช้วัดจำนวนการแผ่รังสีที่มนุษย์ได้รับ หน่วยเรมนี้ต้องคำนึงประเภทการแผ่รังสีว่าเป็นอนุภาคอัลฟ่าหรือบีต้า เพราะมีผลต่อร่างกาย เพราะหนึ่งแรดของอัลฟ่าจะมีผลแตกต่างกันกับหนึ่งแรดของบีต้า ค่าของความแตกต่างนักวิทยาศาสตร์กำหนดเรียกว่า เรม (roentgen equivalent man) ดังนั้น

Rem = rad × weighting factor

weighting factor สำหรับการแผ่อัลฟ่าเท่ากับ 10

weighting factor สำหรับการแผ่รังสีบีต้าเท่ากับ 1

12-16 ประโยชน์ของพลังงานปรมาณูและไอโซโทปกัมมันตภาพรังสี (Uses of nuclear energy and radioactive isotope)

มนุษย์ได้นำเอาความรู้เรื่องของปฏิกริยานิวเคลียร์และไอโซโทปกัมมันตภาพรังสีไปใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ เช่น

ด้านการแพทย์ ใช้ไอโซโทปกัมมันตภาพรังสีเป็นตัววิเคราะห์และรักษาโรค แต่ใช้ในปริมาณเพียงเล็กน้อยเรียก เทรซเซอร์ (tracer) แต่ถ้าไอโซโทปกัมมันตภาพรังสีให้อนุภาคอัลฟ่ามักจะไม่นำมาใช้เพราะอำนาจในการทะลุทะลวงต่ำ มักจะใช้พวกที่ให้อนุภาคบีต้าหรือรังสีแกมม่าและไอโซโทปกัมมันตภาพรังสีที่ใช้ควรมีอายุสั้นอีกทั้งอยู่ในรูปสารประกอบที่จะขจัดออกจากร่างกายได้ในระยะเวลารวดเร็ว หลังจากการวินิจฉัยโรคเสร็จสิ้นแล้ว ไอโซโทปกัมมันตภาพรังสีที่ใช้มีหลายธาตุ เช่น

ไอโอดีน - 131 ใช้รักษาและวิเคราะห์การทำงานของต่อมไทรอยด์ โดยปกติต่อมไทรอยด์ต้องการไอโอดีนเพื่อช่วยทำหน้าที่ของมันอยู่แล้ว ถ้าสงสัยว่าจะเกิดการผิดปกติของต่อมเกิดขึ้นก็ให้คนไข้ดื่มน้ำซึ่งมีไอโอดีน - 131 อยู่ในรูปโซเดียมไอโอไดด์ ถ้าต่อมปกติมันจะดูด 12% ของไอโอดีนกัมมันตภาพรังสี ภายใน 2-3 ชั่วโมงไอโอดีนที่ถูกดูดวัดโดยใช้เครื่องไกเกอร์เคาน์เตอร์ ถ้าปริมาณไอโอดีน - 131 ถูกดูดเข้าไปน้อยกว่าปกติภายในต่อมไทรอยด์ ในทางตรงกันข้ามถ้าถูกดูดมากกว่าปกติเรียกว่าเกิดไฮเปอร์ไทโรดิซึม (Hyperthyrodism)

โคบอล์ต - 60 เป็นไอโซโทปที่ให้รังสีแกมม่า มีครึ่งชีวิต 5-3 ปี ใช้รักษาโรคแทนเรเดียม เพราะราคาถูกกว่าและง่ายในการนำไปในที่ต่าง ๆ ใช้รักษาโรคมะเร็งได้หลายชนิด

เซนอน Xe - 133 และคริฟตอน - 81 ใช้ดูการหมุนเวียนของปอด

เซเลเนียม - 75 ใช้ตรวจตับอ่อน แกลเลียม - 67 ตรวจดูเนื้องอกตลอดร่างกาย

คาร์บอน - 14 ใช้ศึกษาทางเดินของคาร์โบไฮเดรต ไขมันและโปรตีนในร่างกาย อีกทั้งดูการเปลี่ยนเป็นสารอื่น ๆ อีกด้วย

ทริเทียม - 3 ใช้ตรวจหาปริมาณของน้ำในร่างกาย

เหล็ก - 59 ใช้วัดการดูดซึมของเหล็กจากระบบการย่อยอาหาร

P - 32ใช้รักษาโรคเกี่ยวกับกระดูก

นอกจากนี้ยังมีไอโซโทปกัมมันตภาพรังสีอีกหลายชนิดที่ใช้รักษาโรคและวิเคราะห์โรค เหลือที่จะกล่าวในที่นี้

ทางการเกษตร รังสีทำให้เกิดการผ่าเหล่า (mutation) ในพืช โดยให้พืชรับรังสีในปริมาณน้อยแต่บ่อย ๆ เพราะรังสีจะทำให้ gene เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งดีและเลว แต่ส่วนใหญ่เป็นไปในทางเลวมากกว่า แต่อย่างไรก็ตามบางครั้งทำให้เกิดพันธุ์ดีขึ้นได้

กัมมันตภาพรังสียังใช้ทำเป็นปุ๋ย เพื่อการศึกษาเรื่องปุ๋ยว่ามีประโยชน์ต่อพืชอย่างใดและเพียงใด โดยใช้ P^{32} ซึ่งเป็นกัมมันตภาพรังสีทำเป็นปุ๋ย เพื่อศึกษาว่าพืชใดต้องการฟอสฟอรัสมากน้อยเพียงใด ส่วนไหนของพืชต้องการเท่าใด และนำไปสร้างอาหารชนิดใด ในลักษณะใดพืชดูดปุ๋ย ฟอสฟอรัสดีที่สุด เหล่านี้เป็นผลทำให้การเกษตรได้ผลดียิ่ง

สำหรับคาร์บอนกัมมันตภาพรังสี (C^{14}) ใช้วัดอายุของต้นไม้ โดยเขาพบว่ารังสีคอสมิคทำปฏิกริยากับไนโตรเจนในบรรยากาศได้ C^{14} ฉะนั้นในบรรยากาศจะมีทั้ง C^{14} และคาร์บอนธรรมดา ถ้าสิ่งมีชีวิต เช่น สัตว์หรือมนุษย์กินพืช C^{14} จะยังคงอยู่ในพืชหรือสัตว์จะเห็นได้ว่า C^{14} มี half-life ประมาณ 5,570 ปี ฉะนั้นจากการตรวจซากพืชหรือสัตว์โดยตรวจปริมาณ C^{14} ซึ่งใช้เครื่องมือวัดรังสี (Geiger Counter) ตรวจก็ทราบอายุพืชและสัตว์นั้น ๆ ได้

ทางอุตสาหกรรม เช่น สามารถควบคุมคุณภาพของสินค้าที่โรงงานผลิตขึ้นมา เป็นต้นว่าวัดความหนาบางของแผ่นโลหะซึ่งโรงงานผลิตขึ้นมาอาจเป็นผ้า แผ่นเหล็กกระดาษทรายและอื่น ๆ อีก โดยใช้สินค้าที่ต้องการตรวจ ผ่านมายังวัตถุกัมมันตภาพรังสี โดยมีไกเกอร์เคานเตอร์ (Geiger Counter) อยู่ตรงข้ามกับวัตถุกัมมันตภาพรังสีที่จะตรวจ เพื่อพิจารณาจากรังสีที่ผ่านทะลุสินค้ามายังเครื่องวัด (Geiger Counter) ถ้าสินค้าได้คุณภาพ เข็มชี้ของเครื่องวัดจะคงที่ แต่ถ้าหนาหรือบางไปเข็มชี้จะเปลี่ยนไปมาก็ทราบได้ทันที

กัมมันตภาพรังสียังช่วยถนอมและเก็บอาหาร ผลไม้ เพื่อช่วยให้การขนส่งไปไกล ๆ ไม่เน่าหรือเสียได้เร็วไป

นอกจากนี้ช่วยในการขนส่งน้ำมันชนิดต่าง ๆ ไปยังประเทศต่าง ๆ ได้โดยวางท่อจากเมืองหนึ่งสู่อีกเมืองหนึ่ง ในท่ออันเดียวกันนี้ส่งน้ำมันได้หลายชนิด โดยระหว่างน้ำมันต่างชนิดจะใส่สารกัมมันตภาพรังสีไว้เพื่อจะได้เป็นเครื่องชี้ในระยะนั้น ๆ เป็นน้ำมันคนละชนิด ทางปลายทางจะได้แยกเก็บได้ถูกต้อง นอกจากนี้ยังช่วยตรวจสอบตำแหน่งที่ท่อใส่น้ำมันรั่วได้เป็นอย่างดี โดยผสมธาตุกัมมันตภาพรังสีในน้ำมัน ถ้ารั่วตรงไหนใช้เครื่องวัดรังสีตรวจจับได้ทันที

ในการพิสูจน์ว่าน้ำมันเครื่องมีคุณภาพดีเลวเพียงใด เขาก็ใช้ Tracer ของธาตุกัมมันตภาพรังสีตรวจสอบได้ ปกติเขามักใช้ Tracer ของธาตุเหล็กและโคบอลต์ โดยให้ธาตุเหล่านี้เป็นส่วนประกอบในชิ้นส่วนของเครื่องยนต์ แล้วพิสูจน์โดยการเดินเครื่องยนต์ซึ่งมีน้ำมันเครื่องหรือน้ำมันหล่อลื่นอยู่แล้ว เมื่อเดินเครื่องไปเล็กน้อยนำน้ำมันไปตรวจสอบกัมมันตภาพรังสี ถ้าตรวจพบก็หมายความว่าน้ำมันเครื่องนั้น ๆ ทำให้มีการสึกหรอของเครื่องยนต์ง่าย ตามปกติแล้วน้ำมันเครื่องที่ดีจะต้องทำให้การสึกหรอเครื่องยนต์น้อยที่สุด

นอกจากนี้ใช้ผสมสีทาบ้าน เพื่อให้มีประสิทธิภาพดีที่สุด

ประโยชน์เพื่อการผลิตพลังงานนิวเคลียร์

พลังงานนี้ใช้ขับเครื่องเรือเดินสมุทร เรือดำน้ำ ยานอวกาศ จรวดแบบต่าง ๆ และยังช่วยผลิตไฟฟ้าได้อีกด้วย ในประเทศเราได้เริ่มคิดโครงการตั้งโรงงานผลิตไฟฟ้าโดยใช้พลังงานนิวเคลียร์แล้ว

เท่าที่กล่าวมาทั้งหลายนี้เป็นเพียงส่วนเล็กน้อย จากประโยชน์มหาศาลของสารกัมมันตภาพรังสีซึ่งให้ประโยชน์ต่อมวลมนุษย์เหลือที่จะนำมากล่าวให้หมด ณ ที่นี้ได้