บทที่ ๒

ทฤษฎี

หอสมุดกลาง จุฬาลงกรณมหาวิทยาลัย

การเกิดซีเซียม-๑๓๗ และ สทรอนเซียม-๙๐

เนื่องจากซีเซียม-๑๓๗ และสทรอนเซียม-๙๐ เป็นผลผลิตจากฟิสชันดังนั้นการเกิดเรดิโอไอโซโทปทั้งสองจึงต้องมีกระบวนการที่เรียกว่า "นิวเคลียร์ฟิสชัน" (nuclear fission)(๑) นิวเคลียร์ฟิสชันหรือเรียกสั้นๆ ว่า ฟิสชัน เป็นชื่อเรียกกระบวนการที่นิวเคลียสหนักแยกออกเป็นสองเสี่ยงหรือมากกว่า

๒.๑ ประเภทของฟิสชัน

การที่นิวเคลียสหนักจะแยกออกเป็นสองเสี่ยงหรือมากกว่าได้นั้นมีหนทางเป็นไปได้หลายกรณี ซึ่งแยกเป็นประเภทได้ดังนี้

๒.๑.๑ เทอร์มัลฟิสชัน (thermal fission)

เทอร์มัลฟิสชันเป็นฟิสชันที่เกิดจากนิวเคลียสหนักถูกชนด้วยเทอร์มัลนิวตรอน (thermal neutron)ในสภาพที่พอเหมาะ สำหรับนิวเคลียสที่เกิดเทอร์มัลฟิสชันได้ดี คือ ยูเรเนียม-๒๓๓ ยูเรเนียม-๒๓๕ และพลูโทเนียม-๒๓๙

ยูเรเนียม-๒๓๓ และ พลูโทเนียม-๒๓๙ เป็นไอโซโทปที่ไม่มีอยู่ในธรรมชาติต้องผลิตขึ้นมา ส่วนยูเรเนียม-๒๓๕ มีอยู่แล้วในธรรมชาติ

๒.๑.๑ ก. ยูเรเนียม-๒๓๓

ยูเรเนียม-๒๓๓ ไม่มีในธรรมชาติจำต้องผลิตขึ้นมาจากทอเรียม-๒๓๒(๒)

ซึ่งเป็นไอโซโทปหนึ่งของธาตุทอเรียมที่มีอยู่ในธรรมชาตินั่นคือโดยการยิง (bombard) อนุภาคนิวตรอนให้เข้าไปรวมอยู่ในนิวเคลียสของทอเรียม-๒๓๒ ซึ่งจะทำให้เกิดนิวเคลียสใหม่ขึ้นมาคือ ทอเรียม-๒๓๓ ทอเรียม-๒๓๓ ไม่อยู่ตัวจะแผ่รังสีเบตาออกมาแล้วตัวเองกลายเป็นโพรแทกทิเนียม-๒๓๓ ซึ่งไม่อยู่ตัวเช่นกัน โพรแทกทิเนียม-๒๓๓ สลายตัวโดยแผ่รังสีเบตาแล้วกลายเป็นยูเรเนียม-๒๓๓ ซึ่งมีครึ่งชีวิต ๑.๕๙ x ๑๐^{๕} ปี ดังสมการ

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

$$_{90}Th^{233} \xrightarrow{22.2\ m} {}_{91}Pa^{233} + \beta$$

$$_{91}Pa^{233} \xrightarrow{27.0\ d} {}_{92}U^{233} + \beta$$

๒.๑.๑ ข. ยูเรเนียม-๒๓๕

ธาตุยูเรเนียมมีหลายไอโซโทปแต่มีไอโซโทปที่มีอยู่แล้วในธรรมชาติเพียง ๓ ไอโซโทป คือ ยูเรเนียม-๒๓๘ ประมาณ ๙๙.๓% ยูเรเนียม-๒๓๕ ประมาณ ๐.๗% และยูเรเนียม-๒๓๔ จำนวนน้อยมาก

มนุษย์สามารถทำให้ยูเรเนียม-๒๓๕ ที่ได้จากธรรมชาติซึ่งมีความเข้มข้น ๐.๗% กลายเป็นยูเรเนียม-๒๓๕ ที่มีความเข้มข้น (enrichment) สูงกว่า ๐.๗% ตามที่ต้องการได้ ซึ่งยูเรเนียม-๒๓๕ ที่เข้มข้นขึ้นนี้นำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูหรืออาวุธปรมาณู

๒.๑.๑ ค. พลูโทเนียม-๒๓๙

พลูโทเนียม-๒๓๙ ไม่มีในธรรมชาติเช่นเดียวกับยูเรเนียม-๒๓๓ แต่ก็

สามารถผลิตได้จากยูเรเนียม-๒๓๘ ซึ่งมีอยู่มาก ในธรรมชาตินั่นคือ โดยการยิงอนุภาคนิวตรอนให้เข้าไปรวมอยู่ในนิวเคลียสของยูเรเนียม-๒๓๘ ซึ่งจะทำให้ได้นิวเคลียสใหม่ขึ้นมา คือ ยูเรเนียม-๒๓๙ ยูเรเนียม-๒๓๙ นี้ไม่อยู่ตัวจะแผ่รังสีเบตาออกมาแล้วตัวเองกลายเป็นเนปทูเนียม-๒๓๙ ที่ไม่อยู่ตัวเช่นกัน เนปทูเนียม-๒๓๙ สลายตัวโดยแผ่รังสีเบตาแล้วกลายเป็นพลูโทเนียม-๒๓๙ มีครึ่งชีวิต ๒๔,๓๔๐ ปี ดังสมการ

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

$$_{92}U^{239} \xrightarrow{23.5\ m} {}_{93}Np^{239} + \beta$$

$$_{93}Np^{239} \xrightarrow{2.35\ d} {}_{94}Pu^{239} + \beta$$

๒.๑.๒ ฟาสฟิสชัน (fast fission)

ฟาสฟิสชันเป็นฟิสชันที่เกิดจากนิวเคลียสหนักถูกชนด้วยฟาสนิวตรอน (fast neutron) ในสภาพที่พอเหมาะสำหรับนิวเคลียสที่เกิดฟาสฟิสชันที่รู้จักกันดีและถูกกล่าวถึงเสมอคือ ยูเรเนียม-๒๓๘ พลังงานของนิวตรอนที่จะก่อให้เกิดฟาสฟิสชันในยูเรเนียม-๒๓๘ อยู่ประมาณ ๑-๕ MeV

นอกจากยูเรเนียม-๒๓๘ ยูเรเนียม-๒๓๕ ทอเรียม-๒๓๒ โพรแทกทิเนียม-๒๓๑ และธาตุอื่นที่สูงกว่ายูเรเนียมอาจเกิดฟาสฟิสชันได้เช่นกันแต่เกิดได้ยากเพราะมีค่าครอสเซคชัน (cross section) ต่ำ

๒.๑.๓ พาร์ทิเคิล-อินดิวซ์ ฟิสชัน (particle-induced fission)

ธาตุที่มีเลขอะตอม (atomic number)มากกว่า ๙๐ สามารถก่อให้

เกิดฟิสชันได้โดยการยิงด้วยอนุภาคโปรตอน อนุภาคดิวทีรอนและอนุภาคแอลฟาเข้าไป เช่น อนุภาคโปรตอนที่มีพลังงาน ๗ MeV สามารถก่อให้เกิดปฏิกิริยา (p, f) ในยูเรเนียมได้

นอกจากอนุภาคดังกล่าว โฟตอนที่มีพลังงานสูงก็สามารถทำให้เกิดฟิสชันที่เรียกว่า โฟโตฟิสชัน (photofission) ได้เช่นกันในกรณีของยูเรเนียม-๒๓๘ ปฏิกิริยา (γ, f) จะเกิดขึ้นที่พลังงาน ๕.๑ MeV

อนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าที่มีพลังงานสูงมากจะก่อให้เกิดฟิสชันในนิวเคลียสที่ไม่หนักนักได้เช่นกัน ตัวอย่าง ทองแดง-๖๓ จะแยกออกเป็น คลอรีน-๓๘ และอะลูมิเนียม-๒๕ โดยอนุภาคที่มีพลังงาน ๕๐ MeV

๒.๑.๔ สพอนเทเนียส ฟิสชัน (spontaneous fission)

ในปี พ.ศ. ๒๔๘๓ Flerov และ Petrazhak[๑] ค้นพบว่า ยูเรเนียมธรรมชาติเกิดฟิสชันด้วยตนเอง (spontaneous fission) ได้ ซึ่งปรากฏการณ์นี้ได้มีการตรวจวัดในเวลาต่อมาพบว่า อัตราการเกิดสพอนเทเนียส ฟิสชันในยูเรเนียมธรรมชาติหนัก ๑ กรัม คือ ๒๕ สพอนเทเนียสฟิสชันต่อชั่วโมง นอกจากยูเรเนียมธรรมชาติแล้ว ไอโซโทปอื่นๆ ก็มีการเกิดสพอนเทเนียสฟิสชันได้ ตัวอย่างเช่นทอเรียม-๒๓๒ มีอัตราการเกิดสพอนเทเนียสฟิสชันช้าที่สุดคือน้อยกว่า $๑๐^{-๔}$ ฟิสชันต่อกรัมต่อวินาที ขณะที่คูเรียม-๒๔๒ มีอัตราการเกิดสพอนเทเนียสฟิสชันเร็วที่สุดคือประมาณ $๑๐^{๗}$ ฟิสชันต่อกรัมต่อวินาที

๒.๒ สมการฟิสชัน[๓]

เมื่อมีฟิสชันเกิดขึ้นก็ย่อมมีผลผลิตจากฟิสชันและพลังงานเกิดขึ้น สำหรับฟิสชันที่สามารถนำเอาพลังงานมาใช้ให้เกิดประโยชน์อย่างมหาศาลในปัจจุบันอาจเขียนออกมาในรูปสมการทั่วไปได้ดังนี้

$$ {}_{Z}X^{A} + {}_{0}n^{1} \rightarrow [{}_{Z}X^{A+1}] \rightarrow {}_{C}Y^{B} + {}_{Z-C}Z^{A-B-D+1} + D\,{}_{0}n^{1} + E $$

โดยที่ ${}_{Z}X^{A}$ = นิวเคลียสที่เกิดฟิสชัน

${}_{0}n^{1}$ = อนุภาคนิวตรอน

${}_{C}Y^{B}$, ${}_{Z-C}Z^{A-B-D+1}$ = นิวเคลียสของผลผลิตจากฟิสชันที่เกิดขึ้น

D = จำนวนอนุภาคนิวตรอนที่เกิดขึ้น

E = พลังงาน

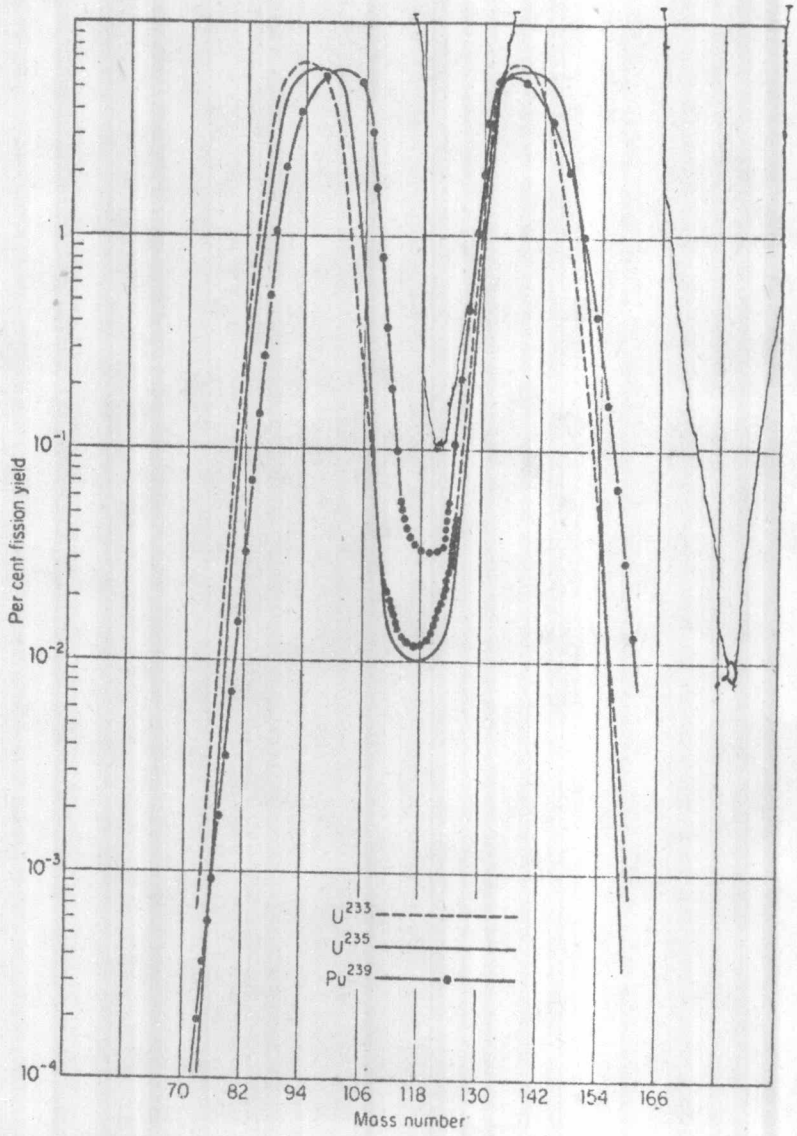
ตัวอย่าง

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

$$ {}_{92}U^{235} + {}_{0}n^{1} \rightarrow [{}_{92}U^{236}] \rightarrow {}_{55}Cs^{137} + {}_{37}Rb^{97} + 2\,{}_{0}n^{1} + E $$

๒.๓ การเกิดผลผลิตจากฟิสชัน (fission-product yield)(๑)

ส่วนใหญ่ของกระบวนการฟิสชันจะให้ผลผลิตจากฟิสชันที่มีมวลไม่เท่ากันโดยเฉลี่ยแล้ว อัตราส่วนระหว่างมวลเท่ากับ ๑.๖ ความน่าจะเป็นในการเกิดฟิสชัน (fission probabilities) มักจะกล่าวในเทอมของ "ฟิสชันยิลด์" (fission yield) ซึ่งก็คือเปอร์เซนต์ของการเกิดฟิสชันที่ทำให้ได้ผลผลิตจากฟิสชันที่กล่าวถึง รูปที่ ๒.๓-a แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างฟิสชันยิลด์กับเลขมวล



รูปที่ ๒.๓-a การเกิดผลผลิตจากฟิสชัน(๑)

ผลผลิตจากฟิสชันที่เกิดขึ้นจะอยู่ในช่วงเลขมวลจาก ๗๒-๑๕๘ ซึ่งก็มีเรดิโอไอโซโทปประมาณ ๒๐๐ กว่าชนิดใน ๓๔ ธาตุโดยที่ประมาณ ๖๐ ไอโซโทปเป็นพวกผลผลิตปฐมภูมิ (primary product) ส่วนที่เหลือเป็นพวกที่เกิดจากการสลายตัวของผลผลิตปฐมภูมิดังกล่าว

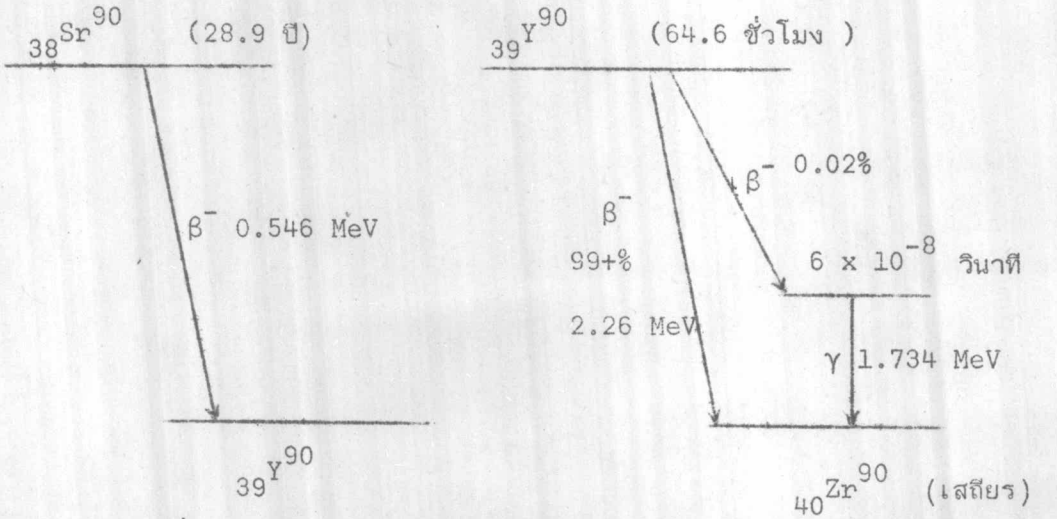
สำหรับผลผลิตจากฟิสชันที่เป็นที่สนใจและกล่าวถึงเสมอในแง่การที่สามารถก่อให้เกิดอันตรายขึ้นกับมนุษย์ในระยะยาวได้ก็คือ สทรอนเซียม-๙๐ และซีเซียม-๑๓๗ ซึ่งทั้งคู่เป็นเรดิโอไอโซโทปที่มีค่าครึ่งชีวิตค่อนข้างยาว

๒.๓.๑ สทรอนเซียม-๙๐

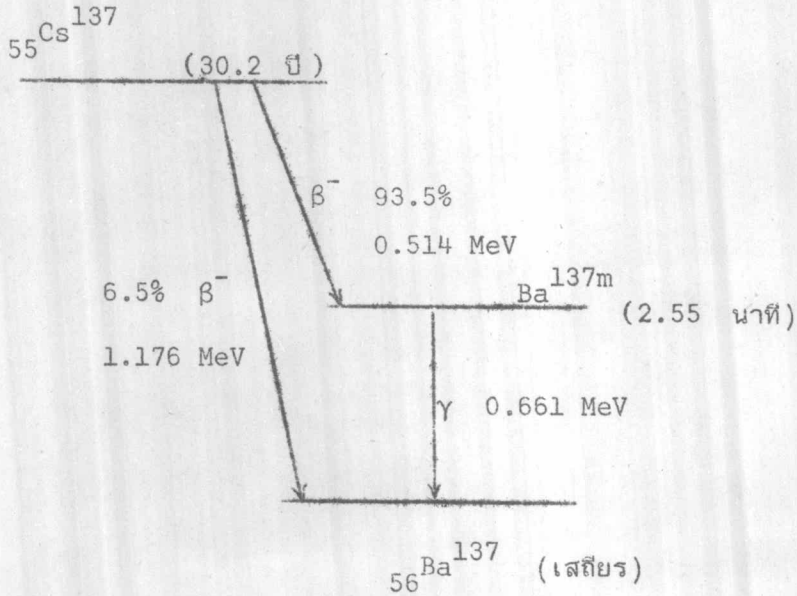
ค่าฟิสชันยิลด์ของสทรอนเซียม-๙๐ คือ ๕.๘% จากยูเรเนียม-๒๓๕ หรือ ๒.๒๐% จากพลูโทเนียม-๒๓๙[๔] สทรอนเซียม-๙๐ มีค่าครึ่งชีวิต ๒๘.๙ ปี สทรอนเซียม-๙๐ สลายตัวกลายเป็นอิตเทรียม-๙๐ โดยการแผ่รังสีเบตาพลังงาน ๐.๕๔๖ MeV ออกมารูปที่ ๒.๓-b แสดงรูปแบบการสลายตัว (decay scheme) ของสทรอนเซียม-๙๐ และอิตเทรียม-๙๐[๕]

๒.๓.๒ ซีเซียม-๑๓๗

ค่าฟิสชันยิลด์ของซีเซียม-๑๓๗ คือ ๖.๐% จากยูเรเนียม-๒๓๕ และ ๖.๕% จากพลูโทเนียม-๒๓๙[๔] ซีเซียม-๑๓๗ มีครึ่งชีวิต ๓๐.๒ ปี ในการสลายตัวจะแผ่รังสีเบตาพลังงาน ๐.๕๑๔ MeV และ ๑.๑๗๖ MeVกับรังสีแกมมาพลังงาน ๐.๖๖๑ MeV แล้วกลายเป็น แบเรียม-๑๓๗ ดังแสดงในรูปที่ ๒.๓-c [๕]



รูปที่ ๒.๓-b แสดงรูปแบบการสลายตัวของสทรอนเชียม-๙๐ และอิตเทรียม-๙๐



รูปที่ ๒.๓-c แสดงรูปแบบการสลายตัวของซีเซียม-๑๓๗

๒.๔ แหล่งที่มาของสทรอนเชียม-๙๐ และซีเซียม-๑๓๗ ในธรรมชาติ

การเกิดสพอนเทเนียสฟิสชันของยูเรเนียมธรรมชาติ สามารถก่อให้เกิดสทรอนเชียม-๙๐ และซีเซียม-๑๓๗ ในธรรมชาติได้แต่ก็ถือว่ามีปริมาณน้อย สทรอนเชียม-๙๐ และซีเซียม-๑๓๗ ที่มีอยู่ในธรรมชาติขณะนี้ส่วนใหญ่เกิดจากฟิสชันที่มนุษย์ประสงค์ที่จะทำให้เกิดขึ้นมาเพื่อนำเอาพลังงานที่ออกมาไปใช้

๒.๔.๑ การใช้กระบวนการเกิดฟิสชันเพื่อสันติ

ได้แก่การสร้างเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูเพื่อใช้ในงานวิจัย ในด้านโรงไฟฟ้าปรมาณูและการสร้างระเบิดนิวเคลียร์เพื่อสันติ เช่น การขุดคลอง อ่างเก็บน้ำ

๒.๔.๒ การใช้กระบวนการฟิสชันเพื่อสงคราม

ได้แก่การสร้างระเบิดปรมาณูเพื่อการทำลาย หรือ การทำสงคราม เช่น ระเบิดปรมาณูที่ทิ้งลงที่เมืองฮิโรชิมาและเมืองนางาซากิ เมื่อปี พ.ศ. ๒๔๘๘ ซึ่งหลังจากระเบิดแล้วจะมีฝุ่นกัมมันตรังสี[๖] แผ่กระจายเข้าไปในชั้นบรรยากาศและตกลงบนพื้นโลก สะสมในดิน เป็นต้น

๒.๕ อันตรายจากสทรอนเชียม-๙๐ และ ซีเซียม-๑๓๗

เนื่องจากเรดิโอไอโซโทปสทรอนเชียม-๙๐ และซีเซียม-๑๓๗ เป็นผลผลิตจากฟิสชันพวกมีครึ่งชีวิตยาวที่มีฟิสชันยิลด์ค่อนข้างสูง เมื่อมีการทดลองอาวุธนิวเคลียร์อยู่บ่อยๆ สารกัมมันตรังสีจะเข้าไปสะสมในชั้นของบรรยากาศและเข้าไปสะสมอยู่ในสิ่งแวดล้อมมีส่วนเกี่ยวข้องกับวงจรทางชีววิทยา (biological cycle) กล่าวคือเมื่อมีอยู่ในทะเลจะไปสะสมในผลผลิตทางทะเล เช่น สัตว์ทะเลทุกชนิดที่เป็นอาหารสำหรับมนุษย์ ถ้าสะสมในพื้นดินที่ใช้ทำเกษตรจะเข้าสู่ธัญญาหารโดยพืชดูดมาจากดินและเข้าสู่ร่างกายมนุษย์ในทางตรงบ้างเมื่อดื่มน้ำหรือบริโภคพืชนั้นๆ หรือในทางอ้อม คือมนุษย์บริโภคสัตว์ที่กินพืชผลนั้นอีกต่อหนึ่ง

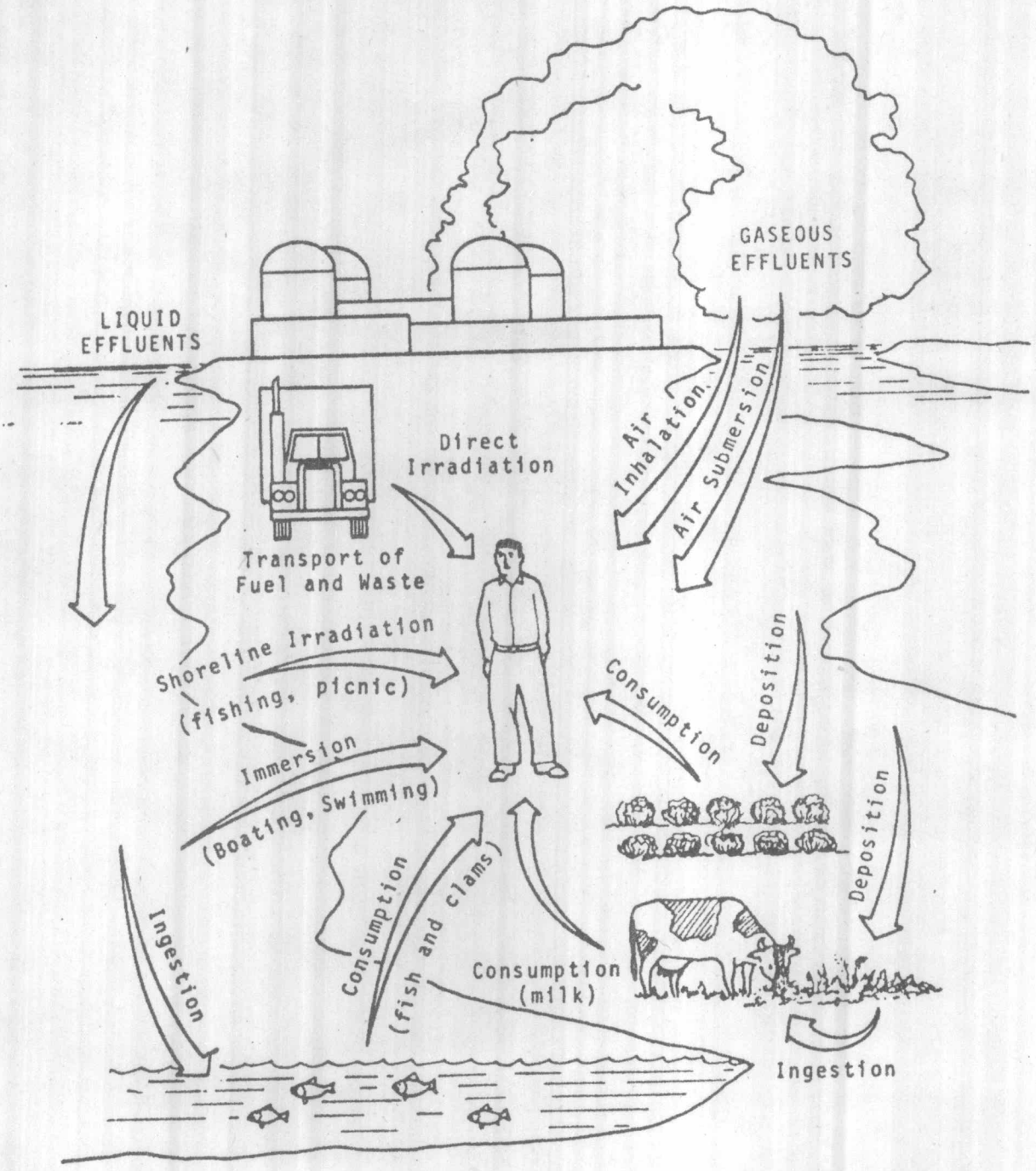
หรืออันตรายจากฝุ่นกัมมันตรังสีอาจจะเข้าสู่ร่างกายโดยการหายใจเข้าไป สำหรับวงจรการได้รับรังสีของมนุษย์ สัตว์และพืชต่างๆ[๗] ได้แสดงในรูปที่ ๒.๕-a และ ๒.๕-b

๒.๕.๑ ความเป็นพิษของสทรอนเซียม-๙๐ และซีเซียม-๑๓๗ ต่อสิ่งมีชีวิต

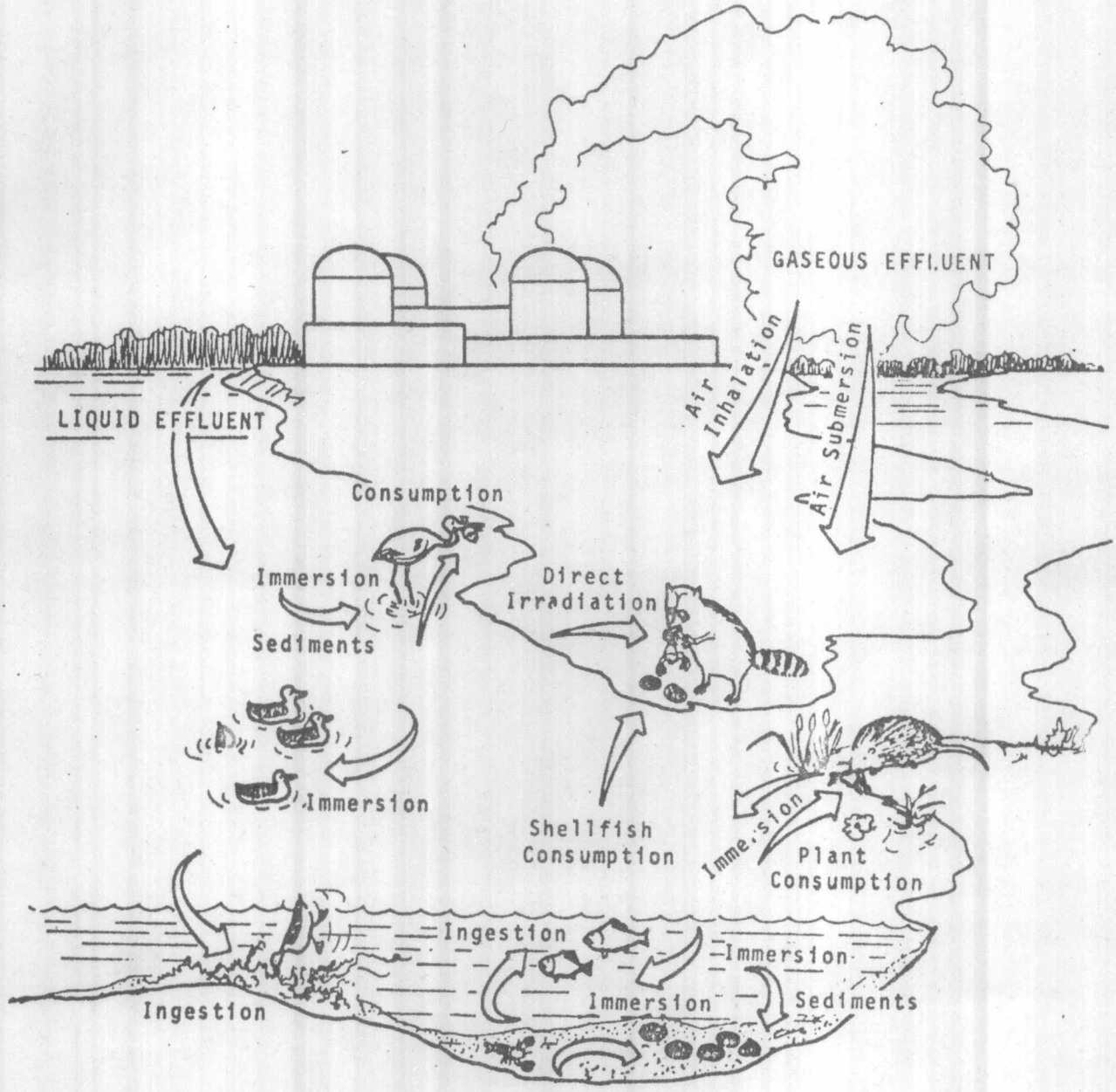
สทรอนเซียม-๙๐ และซีเซียม-๑๓๗ ต่างก็เป็นสารกัมมันตรังสีที่มีครึ่งชีวิตยาว เมื่อเข้าสู่ร่างกายแล้วจะไปสะสมอยู่เป็นเวลานานทำให้มีอันตรายจากรังสีที่แผ่ออกมาได้ รังสีที่แผ่ออกมาจะไปทำลายเนื้อเยื่อจะมีผลทั้งทางร่างกาย (somatic effect) เช่นทำให้โมเลกุลของโปรตีนในร่างกายแตกตัวและผลทางกรรมพันธุ์ (genetic effect) มีผลต่อการแบ่งตัวของเซลล์สืบพันธุ์ทำให้โครโมโซมถูกทำลายเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกรรมพันธุ์ขึ้น

ในกรณีของซีเซียม-๑๓๗ เมื่อเข้าสู่ร่างกายแล้วจะไปสะสมที่กล้ามเนื้อเป็นส่วนใหญ่[๘,๙] ค่าครึ่งชีวิตทางชีววิทยา (biological half life) ของซีเซียม-๑๓๗ ขึ้นอยู่กับเพศ อายุและน้ำหนัก เมื่อซีเซียม-๑๓๗ เข้าไปในร่างกายก็เท่ากับมีแหล่งกำเนิดของรังสีแกมมาและเบตาอยู่ในร่างกาย ร่างกายจะได้รับรังสีตลอดเวลาจะมีอันตรายต่อเนื้อเยื่อ

ในกรณีของสทรอนเซียม-๙๐ เมื่อเข้าสู่ร่างกายจะไปสะสมที่กระดูก สทรอนเซียมมีคุณสมบัติเหมือนแคลเซียม เมื่อสะสมที่กระดูกนานๆ จะเข้าไปแทนที่แคลเซียมในกระดูกในเวลาต่อไป อาจจะทำให้เกิดเป็นโรคมะเร็งในเม็ดเลือด (leukemia) เนื้องอกในกระดูก (bone tumour) และยังทำให้เซลล์สืบพันธุ์ตายได้[๑๐]



รูปที่ ๒.๕- a แสดงถึงวิถีทางที่มนุษย์ได้รับรังสีโดยทั่วๆ ไป (๓)



รูปที่ ๒.๕- b แสดงถึงวิถีทางที่สิ่งมีชีวิตทั้งหลายได้รับรังสี (๙)

๒.๕.๒ คณะกรรมาธิการด้านการป้องกันรังสีระหว่างประเทศ (International Commission on Radiation Protection, ICRP) ได้กำหนดค่าความแรงรังสีสูงสุดที่ยอมให้อยู่ในร่างกายได้ (Maximum Permissible Body Burdens, MPBB) และแสดงค่าความเข้มข้นของสารกัมมันตรังสีสูงสุดที่ยอมให้รับได้ (Maximum Permissible Concentration of Radionuclide, MPC) ตามตารางที่ ๒.๕

ตารางที่ ๒.๕ ค่า MPBB และ MPC ของซีเซียม-๑๓๗ และสทรอนเซียม-๙๐

สารกัมมันตรังสีและชนิดของรังสีที่แผ่ออกมา	อวัยวะของร่างกาย	ค่าความแรงรังสีสูงสุดที่ยอมให้อยู่ในร่างกายได้ (μCi)	ค่าความเข้มข้นของสารกัมมันตรังสีสูงสุดที่ยอมให้รับได้			
			การทำงาน ๔๐ ชม/สัปดาห์		การทำงาน ๑๖๘ ชม/สัปดาห์	
			ในน้ำ $(MPC)_w$ μCi/cc	ในอากาศ $(MPC)_a$ μCi/cc	ในน้ำ $(MPC)_w$ μCi/cc	ในอากาศ $(MPC)_a$ μCi/cc
$_{38}Sr^{90}$ (β^-)	กระดูก	๒	๔×๑๐^{-๖}	๓×๑๐^{-๑๐}	$๑๐^{-๖}$	$๑๐^{-๑๐}$
	ทั่วร่างกาย	๒๐	$๑๐^{-๕}$	๙×๑๐^{-๑๐}	๔×๑๐^{-๖}	๓×๑๐^{-๑๐}
	ระบบทางเดินอาหาร		$๑๐^{-๓}$	๓×๑๐^{-๗}	๕×๑๐^{-๔}	$๑๐^{-๗}$
$_{55}Cs^{137}$ (β^-, γ, e^-)	ทั่วร่างกาย	๓๐	๔×๑๐^{-๔}	๖×๑๐^{-๘}	๒×๑๐^{-๔}	๒×๑๐^{-๘}
	ตับ	๔๐	๕×๑๐^{-๔}	๘×๑๐^{-๘}	๒×๑๐^{-๔}	๓×๑๐^{-๘}
	ม้าม	๕๐	๖×๑๐^{-๔}	๙×๑๐^{-๘}	๒×๑๐^{-๔}	๓×๑๐^{-๘}
	กล้ามเนื้อ	๕๐	๗×๑๐^{-๔}	$๑๐^{-๗}$	๒×๑๐^{-๔}	๕×๑๐^{-๘}
	กระดูก	๑๐๐	$๑๐^{-๓}$	๒×๑๐^{-๗}	๕×๑๐^{-๔}	๗×๑๐^{-๘}
	ไต	๑๐๐	$๑๐^{-๓}$	๒×๑๐^{-๗}	๕×๑๐^{-๔}	๘×๑๐^{-๘}
	ปอด	๓๐๐	๕×๑๐^{-๓}	๖×๑๐^{-๗}	๒×๑๐^{-๘}	๒×๑๐^{-๗}
	ระบบทางเดินอาหาร		๐.๐๒	๕×๑๐^{-๖}	๘×๑๐^{-๓}	๒×๑๐^{-๖}

๒.๖ การตรวจวัดหาสทรอนเซียม-๙๐ และซีเซียม-๑๓๗

ในกรณีของซีเซียม-๑๓๗ สามารถวัดรังสีเบตาที่ได้ออกมาโดยตรงได้ด้วยเครื่องนับรังสี Low Background Anticoincidence G.M. Counter

แต่กรณีของสทรอนเซียม-๙๐ ใช้วัดรังสีของอิตเทรียม-๙๐ แทนทั้งนี้เนื่องจากว่าสทรอนเซียม-๙๐ สลายตัวให้อิตเทรียม-๙๐ ซึ่งเป็นสารกัมมันตรังสี ดังนั้นจึงเป็นไปตามกฎของการสลายตัวของสารกัมมันตรังสีที่มีมากกว่าหนึ่งตัวขึ้นไปซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้[๑๑]

$$P \xrightarrow{\lambda_1} Q \xrightarrow{\lambda_2} R \xrightarrow{\lambda_3} \text{etc} \qquad \ldots 2.6.1$$

ได้สูตรการคำนวณดังนี้

$$Q = \frac{\lambda_1 P_1}{\lambda_1 \lambda_2}\left(e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}\right) \qquad \ldots 2.6.2$$

เมื่อ P_1 = จำนวนอะตอมของตัวเริ่มต้นเมื่อเวลาเริ่มต้น

Q = จำนวนอะตอมของตัวลูกที่เกิดขึ้น

λ_1 = radioactive decay constant ของตัวเริ่มต้น

λ_2 = radioactive decay constant ของตัวลูก

t = ช่วงเวลาจากเริ่มต้นจนถึงเวลา t ใดๆ

$\lambda = \frac{0.693}{T_{\frac{1}{2}}}$

$T_{\frac{1}{2}}$ = ครึ่งชีวิต

ในกรณีของสภาวะสมดุลแบบ transient จะเกิดขึ้นเมื่อครึ่งชีวิตของสารกัมมันตรังสีตัวเริ่มต้น (parents) ยาวกว่าครึ่งชีวิตของตัวลูก (daughter) ($\lambda_2 > \lambda_1$) แต่ค่าครึ่งชีวิตของตัวเริ่มต้นยาวไม่มากนักสูตรคำนวณจะเปลี่ยนเป็น

$$Q = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} P_1 e^{-\lambda_1 t} \qquad ...2.6.3$$

จาก $$P = P_1 e^{-\lambda_1 t} \qquad ...2.6.4$$

เมื่อ P = จำนวนอะตอมของตัวเริ่มต้น ณ เวลา t

หรือได้ $$\frac{Q}{P} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \qquad ...2.6.5$$

ในกรณีของสภาวะสมดุลแบบ secular จะเกิดขึ้นเมื่อครึ่งชีวิตของสารกัมมันตรังสีตัวเริ่มต้นยาวกว่าครึ่งชีวิตของสารกัมมันตรังสีตัวลูกมากๆ ($\lambda_2 >> \lambda_1$) ซึ่งค่า λ_1 จะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับ λ_2 ดังนั้นจะได้ว่า

$$\frac{Q}{P} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$$

หรือ $$P\lambda_1 = Q\lambda_2 \qquad ...2.6.6$$

สำหรับกรณีของการสลายตัวของสทรอนเชียม-๙๐ เป็นอิตเทรียม-๙๐ เป็นสภาวะสมดุลแบบ secular นั่นคือจะได้ว่า

อัตราการสลายตัวของสทรอนเซียม-๙๐ = อัตราการสลายตัวของอิตเทรียม-๙๐

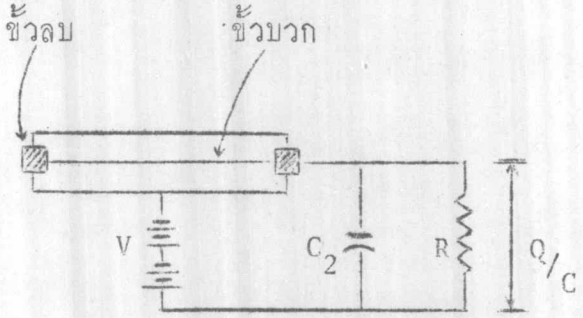
หรือ ความแรงรังสีของสทรอนเซียม-๙๐ = ความแรงรังสีของอิตเทรียม-๙๐

๒.๗ เครื่องนับรังสี

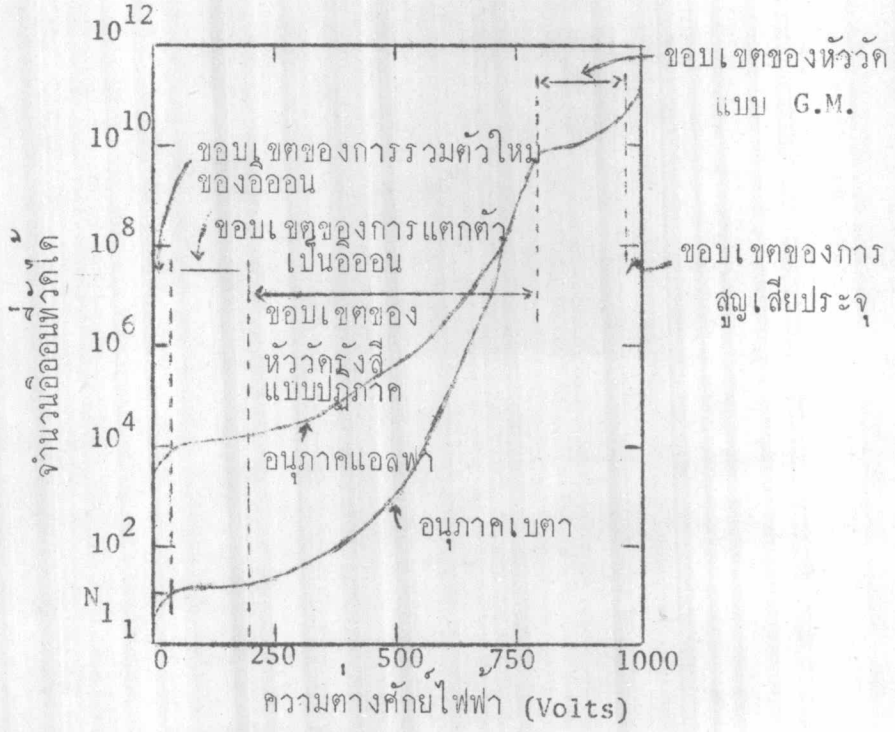
เครื่องนับรังสีมีหลายแบบ ปกติจะเรียกชื่อเครื่องนับรังสีตามชนิดของหัววัดรังสีที่ใช้ เช่น เครื่องนับรังสีแบบไกเกอร์-มูลเลอร์ เคาน์เตอร์ (Geiger-Müller counter; G.M. counter) พรอพพอร์ชันนัล เคาน์เตอร์ (proportional counter) ไอออนไนเซชัน เคาน์เตอร์ (ionization counter) ซิลทิลเลชันเคาน์เตอร์ (scintillation counter) เป็นต้น สำหรับในการทดลองครั้งนี้ใช้เครื่องนับรังสีแบบไกเกอร์-มูลเลอร์เคาน์เตอร์ชนิดที่มีชื่อเรียกว่า "Low Background Anticoincidence G.M. Counter" ดังแสดงในรูปที่ ๒.๗-c

๒.๗.๑ ไกเกอร์-มูลเลอร์ เคาน์เตอร์[๑๒]

เครื่องนับรังสีแบบไกเกอร์-มูลเลอร์ใช้หัววัดรังสีไกเกอร์-มูลเลอร์ หรือเรียกสั้นๆ ว่า จี.เอ็ม. หัววัดรังสีแบบนี้เป็นหลอดโลหะตัวนำทำหน้าที่เป็นขั้วลบ ตรงแกนกลางมีลวดเส้นเล็กๆ ขึงอยู่ทำหน้าที่เป็นขั้วบวก มีฉนวนกั้นไว้ดังแสดงในรูปที่ ๒.๗-a เมื่อมีรังสีเข้าไปชนกับกาซภายในหลอดทำให้กาซเกิดการแตกตัวเป็นอิออนบวกและลบ อิออนลบจะวิ่งไปยังขั้วบวก เนื่องจากความต่างศักย์ระหว่างขั้วบวกและลบที่ใช้กับหัววัดรังสีแบบนี้มีค่าสูงขนาดที่ทำให้อิออนลบที่เกิดขึ้นมีพลังงานมากพอจะวิ่งไปชนอะตอมของกาซตัวอื่นเกิดการแตกตัวเพิ่มขึ้นจนถึงขั้นอิ่มตัว ช่วงของค่าความต่างศักย์ที่ใช้กับหัววัดรังสีแบบ จี.เอ็ม. นี้มีชื่อเรียกว่า ขอบเขตหัววัดรังสีแบบ จี.เอ็ม. ดังแสดงรูปที่ ๒.๗-b



รูปที่ ๒.๗-a แสดงหัววัดรังสีแบบจี. เอ็ม.



รูปที่ ๒.๗-b แสดงขอบเขตของหัววัดแบบจี. เอ็ม.

หัววัดรังสีแบบจี.เอ็ม. มีการสร้างในรูปแบบต่างๆ กัน เช่น แบบหลอดโลหะปิดทึบ แบบมีหน้าต่างทางด้านข้าง แบบมีหน้าต่างทางด้านปลาย เป็นต้น และมีการนำไปใช้ในงานการตรวจวัดรังสีทั้งในห้องปฏิบัติการและในสนามโดยการออกแบบให้เหมาะกับงานนั้นๆ เครื่องวัดรังสีที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้คือ Low Background Anticoincidence G.M. Counter ซึ่งเป็นการใช้ประโยชน์จากหัววัดรังสีจี.เอ็ม. อย่างหนึ่ง

๒.๗.๒ Low Background Anticoincidence G.M. Counter[๓]

Low Background Anticoincidence G.M. Counter ประกอบด้วยหัววัดรังสีจี.เอ็ม. ๒ หัว คือหัววัดรังสีด้านนอกซึ่งเรียกว่า การ์ดทิวบ์ (guard tube) และหัววัดรังสีด้านในซึ่งเรียกว่า เซ็นทรัลทิวบ์ (central tube) ซึ่งหัววัดรังสีด้านในวางอยู่ภายในหัววัดรังสีด้านนอก ดังแสดงในรูปที่ ๒.๗-c การที่ต้องมีหัววัดรังสีด้านนอกก็เพื่อกำจัดรังสีที่รบกวนจากภายนอกซึ่งเกิดขึ้นได้ ๒ กรณี

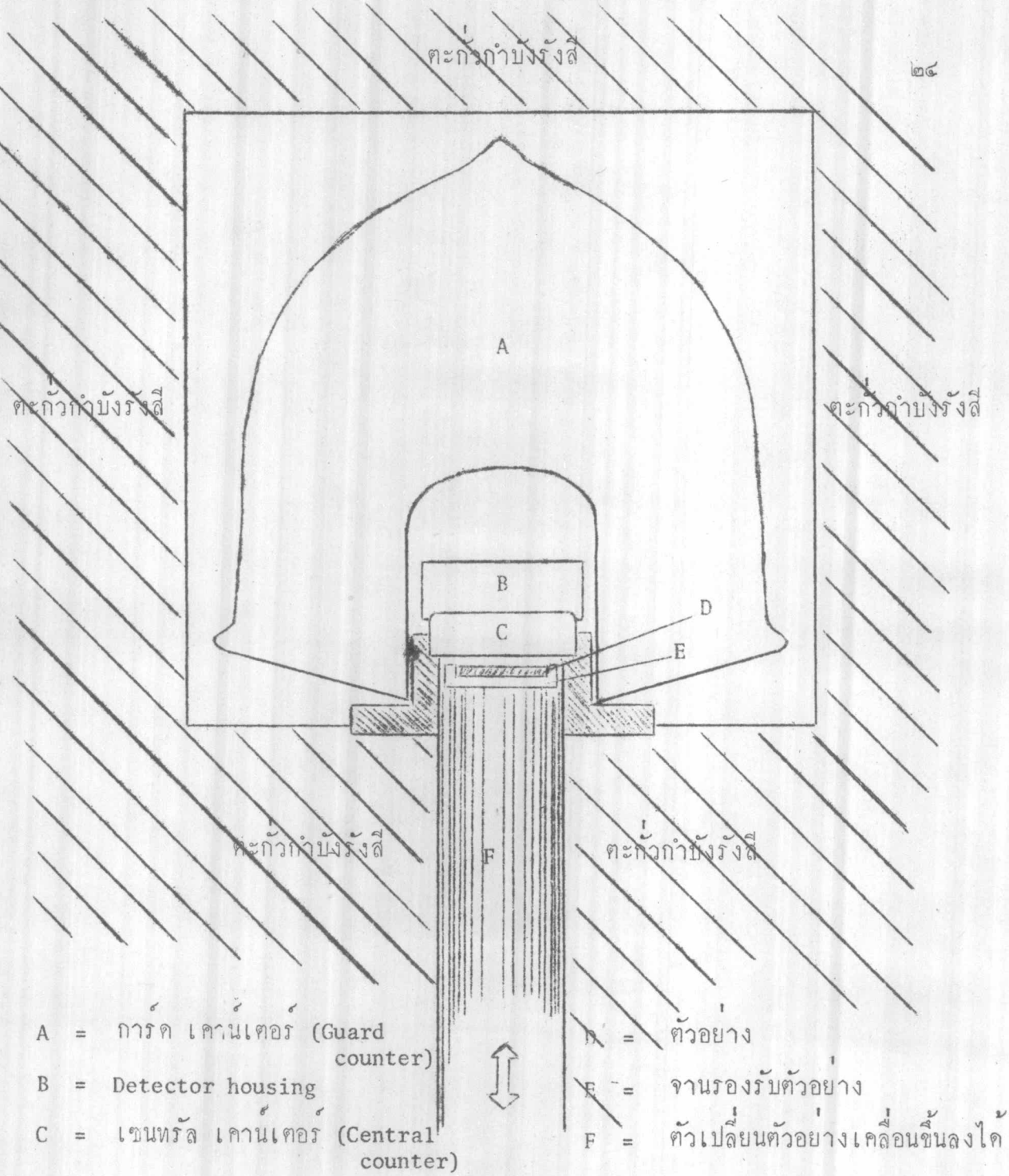
๒.๗.๒. ก. เมื่ออนุภาคที่มีพลังงานต่ำและมีอำนาจในการทะลุทลวงได้น้อยวิ่งชนหัววัดรังสีด้านนอกจะหมดกำลังไม่สามารถทะลุทลวงไปยังหัววัดรังสีด้านในซึ่งก็จะเกิดสัญญาณส่งออกเฉพาะจากการ์ดทิวบ์เท่านั้น

๒.๗.๒. ข. ถ้าอนุภาคที่มีพลังงานและมีอำนาจในการทะลุทลวงได้สูงผ่านทะลุทั้งหัววัดรังสีด้านนอกและหัววัดรังสีด้านในจะให้สัญญาณออกมาในเวลาเดียวกันทั้งจากหัววัดรังสีด้านนอกและหัววัดรังสีด้านใน

สัญญาณที่เกิดขึ้นทั้งหมดจะผ่านระบบกรองสัญญาณ (signal conditioning) ของแต่ละหัววัดเพื่อปรับรูปร่างและขนาดให้เหมาะสม จากนั้นสัญญาณจะผ่านเข้าระบบแอนตี้โคอินซิเดนซ์ เกท (anticoincidence gate) อันเป็นตัวคัดเลือกและเปรียบเทียบสัญญาณที่มาจากระบบกรองสัญญาณทั้งสองแอนตี้โคอินซิเดนซ์ เกท จะยอมให้

สัญญาณที่มาจากหัววัดรังสีภายในซึ่งเป็นสัญญาณที่ได้จากรังสีที่แผ่ออกมาจากตัวอย่างที่ต้องการวัดเท่านั้นผ่านไปเข้าเครื่องนับสัญญาณได้ส่วนสัญญาณที่เกิดจากข้อ ๒.๗.๒ ก. และข้อ ๒.๗.๒ ข. จะไม่ยอมให้ผ่านดังแสดงในรูปที่ ๒.๗-d

เครื่อง Low Background Anticoincidence G.M. Counter ที่ใช้ในการทดลองนี้ผลิตโดยบริษัท PANAX ใช้หัววัดรังสีด้านในเบอร์ MX 152 หัววัดรังสีด้านนอกเบอร์ MX 155 ของบริษัทมูลลาร์ด (Mullard)ดังแสดงในรูปที่ ๒.๗-e



A = การ์ด เคาน์เตอร์ (Guard counter)

B = Detector housing

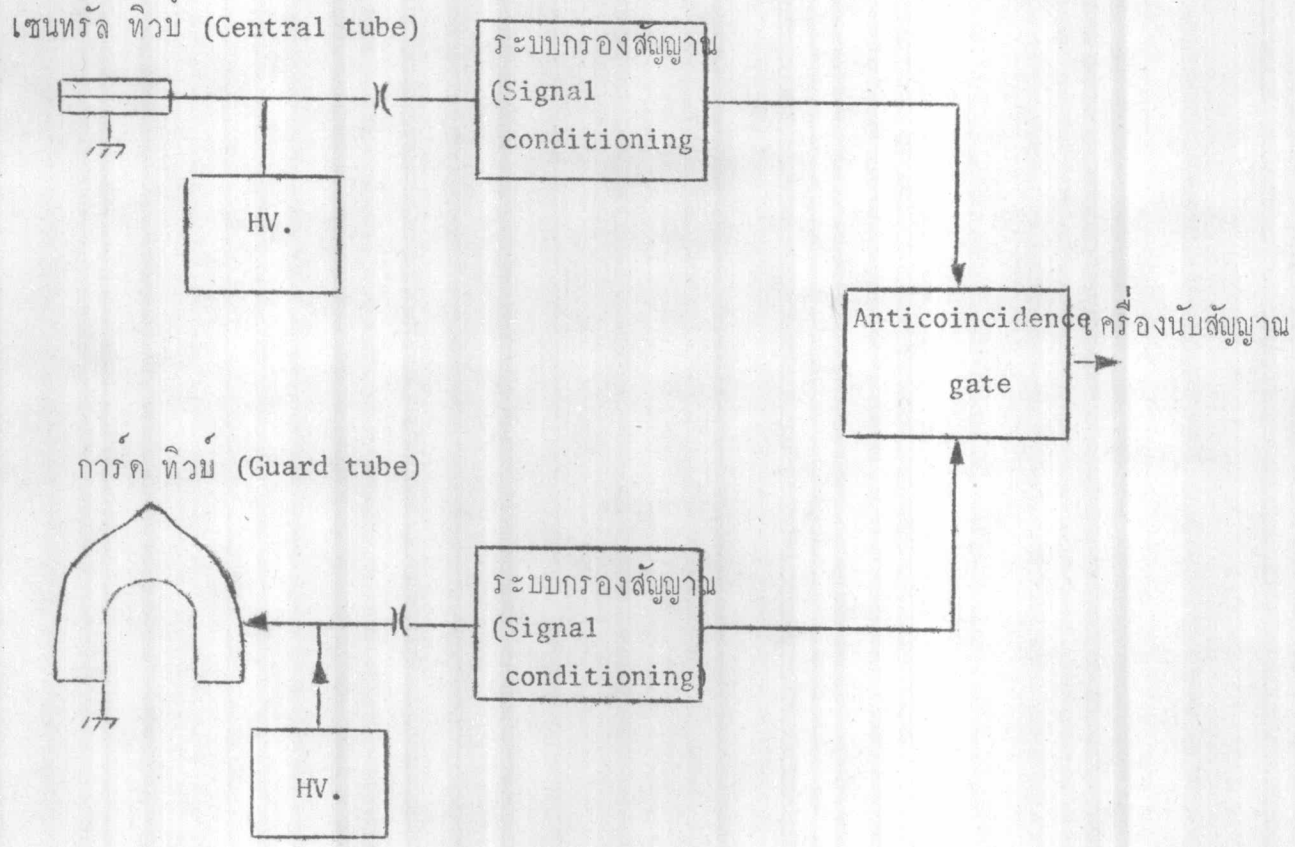
C = เซนทรัล เคาน์เตอร์ (Central counter)

D = ตัวอย่าง

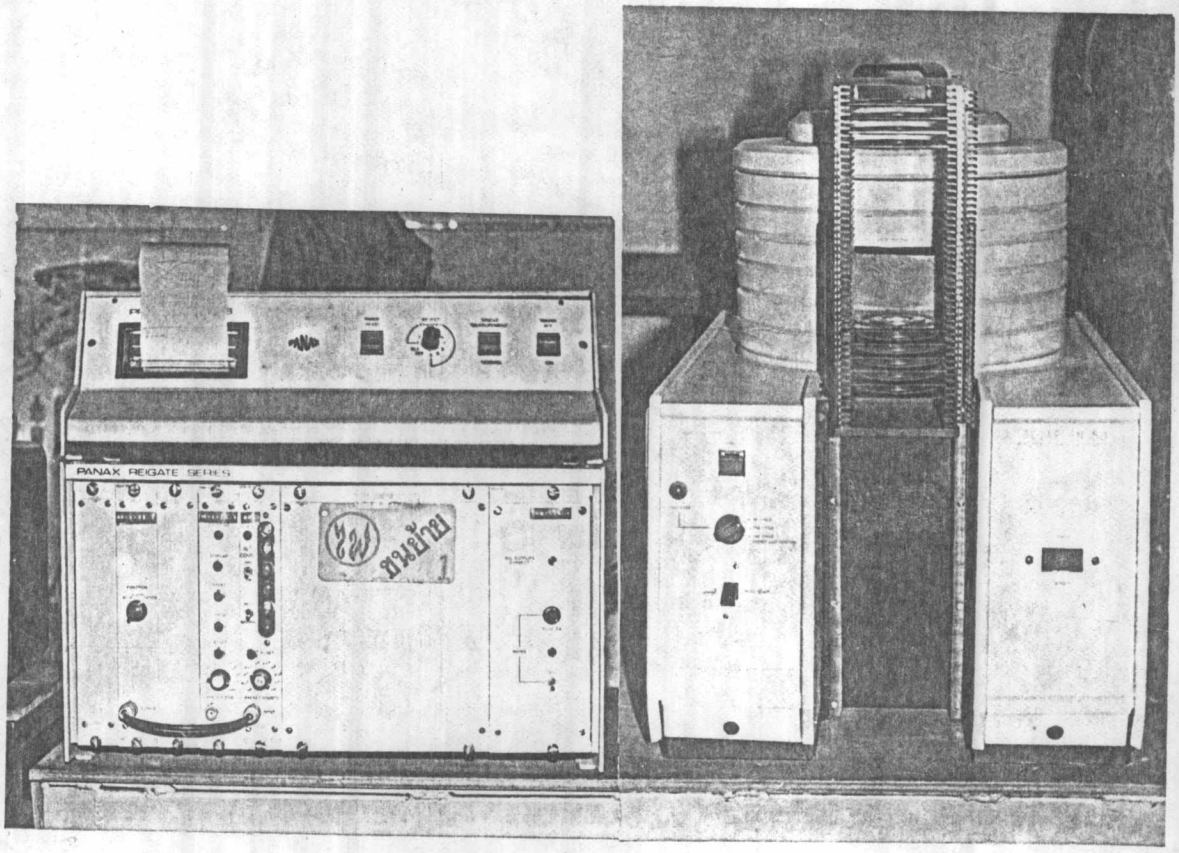
E = จานรองรับตัวอย่าง

F = ตัวเปลี่ยนตัวอย่างเคลื่อนขึ้นลงได้

รูปที่ ๒.๗-c แสดงภาพหน้าตัดให้เห็นหัววัดของ Low Background Anticoincidence G.M. Counter



รูปที่ ๒.๓-d แสดงการวัดรังสีของหัววัดแบบ Low Background Anticoincidence G.M. Counter



รูปที่ ๒.๓-e เครื่องวัดรังสี Low Background Anticoincidence G.M. Counter