บทที่ 5

อันตรายจากรังสี[18]

หอสมุดกลาง จุฬาลงกรณมหาวิทยาลัย

5.1 ประวัติของอันตรายจากรังสี

ความจริงแล้วมนุษย์เราได้รับรังสีที่มีตามธรรมชาติอยู่ตลอดเวลาแล้ว แต่ระดับของรังสีที่มีอยู่ตามธรรมชาติต่ำเกินกว่าที่จะปรากฏถึงอันตรายอย่างชัดแจ้ง จนกระทั่งถึงปรายศตวรรษที่ 18 ซึ่งได้มีการค้นพบรังสีเอ็กซ์ โดย Roentgen และ Becquerel ได้ค้นพบกัมมันตภาพรังสีจึงทำให้มีต้นกำเนิดรังสีสูงเกิดขึ้น และต่อมาไม่นานก็มีรายงานมากมายเกี่ยวกับอันตรายที่เห็นได้ชัดว่าเกิดจากรังสี และผลของรังสีในระยะยาวก็ได้พบกันในหลายปีต่อมา

ผลของรังสีตามปกติจะแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ขึ้นอยู่กับว่าความเสียหายนั้นเกิดจากรังสีจากภายนอก (External Exposure) คือหมายถึงการได้รับรังสีจากภายนอกร่างกาย หรือเกิดจาก การได้รับรังสีจากภายใน (Internal Exposure) ซึ่งเป็นการได้รับรังสี จากสารรังสีที่ถูกดูดซึมเข้าสู่ร่างกายได้มีรายงานในต้นปี 1896 ว่าการได้รับรังสีเอ็กซ์จากภายนอก จะทำให้เกิดอาการผื่นแดงบนผิวหนัง (Erythema) และการพองบวมของผิวหนัง (Edema) ผมหรือขนร่วง (Epilation) ในปี ค.ศ. 1897 ผู้สังเกตการณ์รายงานว่า มีกรณีที่เกิดอันตรายจากรังสีเอ็กซ์ 69 ราย โดยทั้ง Becquerel และ Mme. Curie ก็ได้รับอันตรายดังกล่าวจากหลอดเล็ก ๆ ที่บรรจุสารกัมมันตรังสี ผลที่ก่อให้เกิดโรคมะเร็ง(Casinogenic) จากรังสีได้สังเกตพบกันในช่วงระยะเวลาสั้น ๆ หลังจากนั้น ในปี ค.ศ. 1911 ได้พบว่ารังสีเอ็กซ์ก่อให้เกิดเนื้องอก 94 ราย และในจำนวนนี้ 54 ราย เป็นนักรังสีวิทยา และ ในปี ค.ศ. 1922 ประมาณกันว่านักรังสีวิทยา 100 คน ได้เสียชีวิตลงเนื่องจากโรคมะเร็งที่เป็นผลจากรังสีต่อจากนั้นก็พบว่า อัตราการเกิดโรคมะเร็งในเม็ดโลหิต(Leukemia) ในนักรังสีวิทยา มากกว่าที่เกิดในนักฟิสิกส์ทั่วไปอย่างมีนัยสำคัญ จากการรวบรวมสถิติพบว่า ช่วงชีวิตของนักรังสีวิทยามักจะสั้นกว่านักฟิสิกส์ทั่วไป แต่โชคดีที่ได้พบว่าในการศึกษาเมื่อเร็ว ๆ นี้เกี่ยวกับอันตราย และอัตราการตายของนักรังสีวิทยาแสดง

ว่า อัตราการเป็นมะเร็งในเม็ดโลหิตและช่วงอายุสั้นได้หายไปแล้ว ซึ่งนี่คือผลจากการเรียนรู้ในอันตรายของรังสีที่มีต่อมนุษย์ และได้มีการปรับปรุงในเรื่องการป้องกันอันตรายของรังสีมากขึ้น

เป็นที่ทราบกันดีมาเนานแล้วว่า คนงานเหมืองที่ทำงานในเหมืองโคบอลท์ใน Saxony ในภาคตะวันออกเฉียงใต้ของประเทศเยอรมันนี และในเหมืองไทซ์-เบลน ใน เชคโคสโลวาเกีย ซึ่งทั้งสองเหมืองมีแร่ ยูเรเนียมเข้มข้นปริมาณมาก มักจะเป็นมะเร็งในปอดกันมาก คือมากกว่าปกติประมาณ 30 เท่า ปัจจุบันเราทราบว่าคนเหล่านั้นเป็นอันตรายเนื่องจากการได้รับรังสีจากภายใน โดยการสูดเอาก๊าซเรดอนที่มีกัมมันตรังสี และธาตุกัมมันตรังสีที่เกิดจากการสลายตัวต่อ ๆ มา ของก๊าซเรดอนที่เกิดจากการสลายตัวของยูเรเนียมออกมาจากผนังของปล่องในเหมือง การเป็นโรคมะเร็งในปอดของคนงานเหมืองในอเมริกาก็สูงเช่นเดียวกัน ปัจจุบันได้มีการปรับปรุงเรื่องการหมุนเวียนของอากาศในเหมือง และใช้วัสดุปิดป้องกันเหมือง จึงคาดได้ว่า จะกำจัดต้นกำเนิดรังสีที่เป็นอันตราย ดังกล่าวแล้วได้

อันตรายอันเกิดจากการได้รับรังสีจากภายใน ยังมีขึ้นมาอีกหลายปีหลังจากสงครามโลกครั้งที่ 1 คือปี ค.ศ. 1930 คือมีความเข้าใจกันว่า เรเดียมและธอเรียมมีคุณค่าในทางรักษาโรค ซึ่งมีผู้เคราะห์ร้ายจำนวนมากได้รับการฉีดสารอันตรายนี้ จากประมาณปี ค.ศ. 1928 ถึงปี ค.ศ. 1945 คนจำนวนมากถูกฉีดด้วยละอองแขวนลอยของธอเรียมไดออกไซด์ ซึ่งเป็นตัวทำให้เกิดความแตกต่างอย่างมองเห็นได้ชัดในการวินิจฉัยโรคด้วยรังสีเอ็กซ์ ก็เป็นผลทำให้เกิดนัยสำคัญของการเกิดโรคมะเร็งในตับของคนกลุ่มนี้เพิ่มขึ้น และกรณีที่สำคัญอีกกรณีหนึ่งคือ กรณีของคนงานในโรงงาน U.S. Radiam Corperation ในนิวเจอร์ซี โดยคนงานหญิงเหล่านี้มีหน้าที่ระบายตัวเลขบนหน้าปัทม์นาฬิกา ด้วยสีที่มีส่วนประกอบของเรเดียม และเพื่อให้ตัวเลขคมชัด คนงานจึงใช้ปากดูดปลายภู่กันให้ตีบแหลมอยู่เสมอ การรับเรเดียมเข้าไปในลักษณะนี้ ก่อให้เกิดการตายด้วยโรคมะเร็งในลักษณะต่าง ๆ กันประมาณ 50 คน

ผลจากเหตุการณ์อันน่าเศร้าสลด ของการใช้รังสีเอ็กซ์ และสารกัมมันตรังสีทำให้เกิดความเข้าใจในผลร้ายของรังสีที่มีต่อมนุษย์ ความสำคัญของการใช้รังสีอย่าง

ปลอดภัย ซึ่งเป็นที่รู้กันโดยทั่วไป ยกเว้นจากการใช้รังสีในการรักษาโรคแล้ว มาตรฐานของการได้รับรังสีได้ถูกกำหนดขึ้นมาอย่างเข้มงวดที่สุด ซึ่งก็นับเป็นโชคดี เพราะเครื่องมือสมัยใหม่ เช่น เครื่องเร่งอนุภาค, เตาปฏิกรณ์บรมาณู, และเครื่องมือที่มีสารกัมมันตรังสี เครื่องรับโทรทัศน์, เครื่องบินความเร็วสูง และการท่องอวกาศ นับว่ามีส่วนทำให้มนุษย์เราได้รับรังสีด้วย แต่อย่างไรก็ดี อันตรายที่ได้รับรังสีจากสิ่งเหล่านี้ยังน้อยกว่า การใช้รังสีเอ็กซ์ในทางการแพทย์

5.2 ผลทางชีวภาพของรังสี

อันตรกริยาระหว่างรังสีที่ก่อให้เกิดการไอออนไนซ์ได้ต่อร่างกายของมนุษย์ ซึ่งไม่ว่าจะเป็นรังสีจากต้นกำเนิดภายนอกร่างกายหรือ จากการเปรอะเปื้อนรังสีภายในร่างกายก็ตาม จะก่อให้เกิดอาการป่วยด้วยรังสีติดตามมาภายหลัง ธรรมชาติของอาการป่วยและความรุนแรงนี้ ขึ้นอยู่กับปริมาณ และอัตราการได้รับรังสี ความเสียหายอันเกิดจากรังสีสามารถแบ่งออกได้เป็นสองแบบคือ

5.2.1 โซมาติก เอฟเฟค ซึ่งอาการความเสียหายจะเกิดขึ้นต่อผู้ที่ได้รับรังสีโดยตรง

5.2.2 เจนีติค เอฟเฟค ซึ่งอาการความเสียหายจะถูกถ่ายทอดต่อไปปรากฏในชั่วลูกหลานของผู้ถูกรังสี โดยจากการที่รังสีไปก่อให้เกิดผลความเสียหายต่อเซลสืบพันธุ์

5.3 สรีร ศาสตร์เบื้องต้นของร่างกายมนุษย์

สรีรวิทยา คือการศึกษาหน้าที่ของร่างกาย ทั้งในแบบส่วนรวม และแยกเป็นส่วนประกอบ เช่น อวัยวะ และระบบต่าง ๆ ความรู้พื้นฐานทางสรีร วิทยา มีความจำเป็นต่อการศึกษา เรื่องราวของการที่รังสีเข้าสู่ร่างกาย และกระจายไปสู่ส่วนต่าง ๆ ร่างกายมนุษย์เปรียบได้เหมือนเครื่องจักร ซึ่งประกอบด้วยระบบต่าง ๆ ที่มีความสัมพันธ์เกี่ยวข้องกันโดยแต่ละส่วนทำหน้าที่สำคัญ ระบบซึ่งนับว่ามีความสำคัญต่อความเข้าใจต่อพฤติกรรมของรังสี เมื่อเข้าสู่ร่างกายได้แก่ ระบบหมุนเวียนของโลหิต ระบบหายใจ และระบบทางเดินอาหาร

5.3.1 ระบบหมุนเวียนของโลหิต เป็นวงจรปิดของหลอดขนาดเล็กโดยทั่วร่างกายซึ่ง

เลือดจะถูกอัดดันผ่านไปด้วยการทำงานของหัวใจ โลหิตเป็นสิ่งสำคัญในการขนส่งของร่างกาย มันจะขนส่งเวียนไปเกือบทุกที่ในร่างกายโดยนำอาหารและออกซิเจนไปสู่เซล และขากลับได้นำของเสีย และการ์บอนไดออกไซด์ มาด้วย และส่งต่อไปให้อวัยวะขจัดของเสีย ความจริงแล้วหัวใจคือเครื่องสูบสองเครื่องโดยด้านซ้ายจะสูบฉีดโลหิตผ่านไปยังหลอดเลือดแดงสู่เนื้อเยื่อและอาหารจะส่งต่อจากเนื้อเยื่อไปยังเซลทางของเหลวในเนื้อเยื่อ โลหิตหลังจากผ่านไปยังเนื้อเยื่อแล้วจะกลับเข้าทางหัวใจด้านขวาทางเส้นโลหิตดำจากนั้นจะถูกสูบฉีดต่อไปยังปอด และได้รับออกซิเจน ณ ที่นั้น โลหิตจะได้รับออกซิเจนก่อนที่จะกลับไปสู่หัวใจด้านซ้ายอีกครั้งหนึ่ง

โลหิตในหลอดเลือดแดง จะมีออกซิเจนอยู่จำนวนมาก และมีสีแดงสด ขณะที่โลหิตที่กลับจากเนื้อเยื่อจะมีออกซิเจนอยู่จำนวนน้อย และมีสีแดงแก่ ร่างกายมนุษย์มีโลหิตอยู่ประมาณ 5 ลิตร ซึ่งหมุนเวียนในเวลาประมาณ 1 นาที และมีเซลเม็ดเลือดอยู่ 3 ชนิดได้แก่

1. เม็ดเลือดแดง (Erythrocytes)มีหน้าที่ขนส่ง ลำเลียงอาหาร และออกซิเจนที่ร่างกายต้องการ

2. เม็ดเลือดขาว (granulocytes+lymphocytes) ทำหน้าที่ป้องกันเชื้อโรค โดยกำจัด

3. แผ่นเลือด(platelets) มีหน้าที่ในการทำให้เลือดที่เกิดจากบาดแผลแข็งตัวหยุดไหล

5.3.2 ระบบหายใจ การหายใจเป็นวิธีการที่นำออกซิเจนเข้าสู่ปอดและกำจัดการ์บอนไดออกไซด์ออกมา ออกซิเจนจะถูกดูดซึมโดยโลหิตขณะที่ผ่านไปยังปอด และนำไปสู่เนื้อเยื่อ เนื้อเยื่อจะผลิตการ์บอนไดออกไซด์ซึ่งเป็นก๊าซที่เป็นของเสีย และจะถูกนำกลับมาโดยโลหิตสู่ปอดและหายใจออกไป ปริมาตรของอากาศที่คนเราหายใจต่อวันต่อคนประมาณ 20 ลูกบาศก์เมตร ซึ่งครึ่งหนึ่งเกิดขึ้นระหว่างเวลาทำงานในช่วงกลางวันประมาณ 8 ชั่วโมง

ในกระบวนการหายใจ คนเราจะสูดเอาสิ่งต่างๆเข้าไปมีทั้งก๊าซต่างๆ และฝุ่นฝงเล็กๆในอากาศ ส่วนที่เป็นก๊าซจะผ่านไปสู่ปอดโดยสะดวกและเข้าสู่กระแสโลหิต

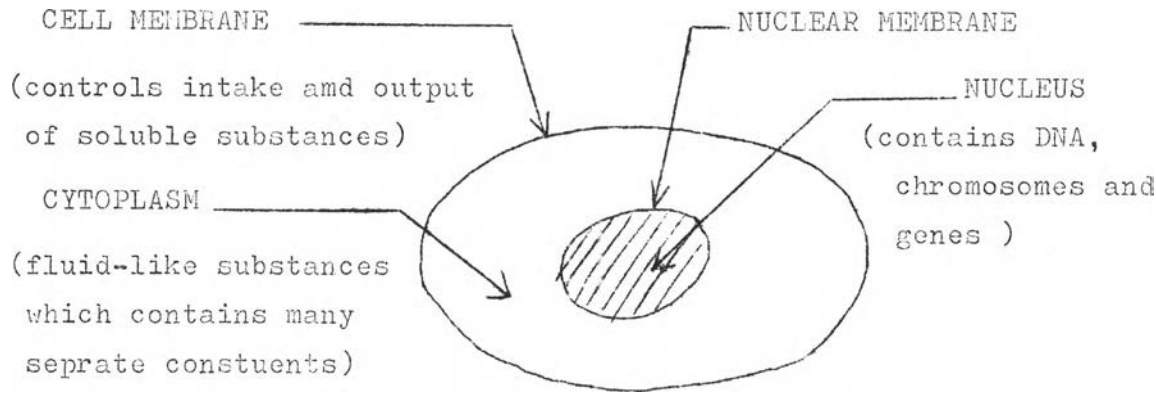
ซึ่งจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความสามารถในการละลาย ในกรณีที่เป็นฝุ่นผง จะมีเพียงบางส่วนเท่านั้นที่ไปสู่ปอด ส่วนมากมักจะถูกหายใจออก หรือติดอยู่ที่ทางเดินลมหายใจส่วนบน และจะถูกกลืนลงในเวลาต่อมา พฤติกรรมของสารที่อยู่ที่ปอดจะขึ้นตรงต่อการละลายของมัน สารที่ละลายได้ดีก็จะถูกดูดซึมเข้าสู่กระแสโลหิตโดยเร็วส่วนสารที่ละลายได้ยาก อาจจะติดอยู่ใช้เวลานับเดือน ซึ่งสิ่งที่ได้กล่าวแล้วจะเห็นว่า ระบบหายใจเป็นทางที่สารรังสีจะถูกส่งเข้ากระแสโลหิต และส่งต่อๆไปยังส่วนต่างๆของร่างกายได้

5.3.3 ระบบทางเดินอาหาร ระบบทางเดินอาหารประกอบด้วย หลอดอาหาร กระเพาะลำไส้ใหญ่และลำไส้เล็ก อาหารที่ถูกนำเข้าทางปาก จะถูกเปลี่ยนรูปไปอยู่ในรูป ที่เหมาะสมต่อการผลิต ความร้อนและพลังงานและโมเลกุลที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตและซ่อมแซมส่วนสึกหรอของเนื้อเยื่อ โมเลกุลขนาดใหญ่ในอาหาร จะถูกทำให้แตกตัวด้วยน้ำย่อย ในระบบย่อยอาหาร ก่อนที่จะถูกดูดซึมเข้ากระแสโลหิต และผ่านจาก ตับไปสู่เนื้อเยื่อ ส่วนที่ไม่ถูกดูดซึม รวมทั้ง แบคทีเรียและเซลล์ที่ลายจากผนังของลำไส้ จะถูกขับออกมาเป็นอุจจาระ และของเสียที่เป็นของเหลว (ผลิตภัณฑ์ของเสียจากเซลล์ที่ละลายลงในน้ำ) จะถูกสกัดออกด้วยไต และ ดี กลายเป็นปัสสาวะ

สารกัมมันตรังสีที่ละลายได้เมื่อถูกกลืนเข้าไป อาจจะผ่านระบบการย่อยอาหารและถูกดูดซึมเข้าสู่กระแสโลหิต ซึ่งจะถูกนำต่อไปทั่วร่างกาย ส่วนสารกัมมันตรังสีที่ไม่สามารถละลายได้ ก็จะผ่านระบบย่อยอาหารและโดยปกติจะถูกขับออกพร้อมกับอุจจาระ และระหว่างทางที่ผ่านไปในร่างกายก็จะให้รังสีต่อทางเดินอาหารและลำไส้ใหญ่

5.4 ชีววิทยาของเซล

สิ่งมีชีวิตทั้งหลายประกอบด้วยโครงสร้างเล็กๆที่เรียกว่า เซล ส่วนประกอบพื้นฐานของเซล ได้แก่ นิวเคลียส ซึ่งล้อมรอบด้วยของเหลวที่เรียกว่า ไซโตปลาสม และผนังเซล ซึ่งเป็นส่วนของผนังหุ้มภายนอกของเซล



รูปที่ 5.1 (18) แผนภาพแสดงโครงสร้างของเซลร่างกายมนุษย์

ไซโตปลาสมทำหน้าที่คล้ายโรงงานในขณะที่นิวเคลียสเก็บส่วนต่างๆ ที่จำเป็นสำหรับเซล ในการทำหน้าที่ และสร้างเซลใหม่ขึ้น ไซโตปลาสมจะย่อยให้อาหารแตกออก และเปลี่ยนเป็นพลังงาน และโมเลกุลเล็ก ๆ ซึ่งต่อมาจะถูกเปลี่ยนเป็นโมเลกุลซับซ้อน ซึ่งจำเป็นสำหรับเซลทั้งในการดำรงอยู่และสร้างเซลขึ้นมาใหม่

ในนิวเคลียสจะมีโครโมโซม ซึ่งมีลักษณะคล้ายเส้นด้ายเล็ก ๆ ซึ่งเกิดจาก ยีน (genes) เซลของร่างกายมนุษย์ทั่วไปจะมีจำนวน 64 โครโมโซม ยีน ประกอบด้วย di-oxyribonucleic acid(DNA) และโมเลกุลของโมรคีน และเก็บข้อมูลซึ่งกำหนดลักษณะของเซลลูก

เซลสามารถสร้างขึ้นมาใหม่เพื่อทดแทนเซลที่ตายไปแล้วได้ อายุของเซลชนิดต่าง ๆ กันของร่างกายมนุษย์ (หรือคืออัตราการผลิตเซล) เปลี่ยนแปลงจากไม่กี่ชั่วโมงจนถึงหลายปี การสร้างเซลขึ้นมาใหม่เกิดได้สองทางคือ

5.4.1 ไมโตซีส (Mitosis) เป็นการแบ่งเซลที่เป็นแบบปกติทั่ว ๆ ไปของเซลร่างกายมนุษย์ที่เรียกว่า เซลไมโตติก (Mitotic cell) การแบ่งแบบนี้เริ่มจาก

การเพิ่ม โครโมโซม เป็นสองเท่าโดยการยาวออกตามความยาว จากนั้นเซลเดิมก็จะแบ่งออกเป็นสองเซลซึ่งแต่ละเซลเหมือนกันทุกประการกับเซลเดิม

5.4.2 ไมโอซีส (Meiosis) เป็นการแบ่งเซลที่เกิดขึ้นกับเซลสืบพันธุ์ ที่เรียกว่า sperm ในเพศชาย และ ovum ในเพศหญิง ซึ่งจะเกิดขึ้นครั้งเดียวในวงจรชีวิตของเซล และเกิดในเฉพาะเซลสืบพันธุ์เท่านั้น ในการผสมพันธุ์ sperm และ ovum จะรวมกันเข้า และโครโมโซมจะรวมกันเกิดเป็นเซลใหม่ ที่มีสาร เจนีติค (genetic material) (หรือคือ ยีน นั่นเอง) จากพ่อ และ แม่ จากนั้นตัวอ่อนก็จะเจริญเติบโตและพัฒนาจากเซลๆเดียวนี้ หรือ ไข่ที่ได้ผสมพันธุ์นี้

5.5 อันตรกริยาระหว่างรังสีกับเซล

ข้อแตกต่างพื้นฐานระหว่างรังสินิวเคลียร์ หรือ กัมมันตภาพรังสี กับรังสีอื่น เช่นรังสีแสง หรือรังสีความร้อนคือ พลังงาน โดยกัมมันตภาพรังสีจะมีพลังงานมากกว่าจนก่อให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนได้ เซลนั้นส่วนประกอบส่วนใหญ่คือน้ำ ดังนั้นการแตกตัวเป็นไอออนของน้ำ จึงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในโมเลกุล และเกิด อนุมูลทางเคมี ทำให้เกิดความเสียหายต่อสารที่เป็น โครโมโซม ความเสียหายอยู่ในรูปของการเปลี่ยนโครงสร้างและหน้าที่ของเซล ในร่างกายมนุษย์ การเปลี่ยนแปลงเหล่านี้อาจแสดงออกมาให้ปรากฏในรูปอาการป่วยต่างๆ เช่น การป่วยเนื่องจากรังสี ทันตา หรือในระยะยาว เช่น มะเร็ง

กระบวนการในการก่อให้เกิดความเสียหายเนื่องจากรังสี อาจแบ่งออกได้เป็น 4 ระยะ ง่ายๆดังนี้คือ

5.5.1 The initial Physical Stage ใช้ช่วงเวลาการเกิดเป็นเพียงเศษส่วนของวินาที ($\sim 10^{-6}$) โดยพลังงานเข้าสะสมหรือถูกถ่ายทอดให้เซล และก่อให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออน สำหรับในน้ำกระบวนการอาจเขียนเป็นสมการได้คือ

$$H_2O \xrightarrow{\text{Radiation}} H_2O^+ + e^-$$

โดย H_2O^+ เป็นไอออนบวก และ e^- เป็นไอออนลบ

5.5.2 The Physico-chemical stage ใช้ช่วงเวลาประมาณ 10^{-6} วินาที โดย ไอออนจะเกิดอันตรกริยากับโมเลกุลอื่นๆของน้ำ ทำให้เกิดผลผลิตใหม่ๆ เพิ่มขึ้นอีก เช่น ไอออนบวก แตกตัวออก

$$H_2O^+ \longrightarrow H^+ + OH$$

ไอออนลบ หรือ อิเลคตรอนจะจับกับโมเลกุลของน้ำที่เป็นกลาง จากนั้นก็จะแตกตัวออกอีก

$$H_2O + e^- \longrightarrow H_2O^-$$

$$H_2O^- \longrightarrow H + OH^-$$

ดังนั้นผลิตผลจากรังสีคือ H^+, OH^-, H และ OH สองตัวแรกคือ H^+ และ OH^- ไม่มีส่วนสำคัญในการเกิดอันตรกริยาต่อมา แต่ H และ OH ซึ่งเรียกกันว่า Free Radical คือมี unpair electron จะไวต่อปฏิกริยาเคมีมาก ผลิตผลอีกอย่างหนึ่งคือ H_2O_2 ซึ่งเป็นตัว Oxidizing agent อย่างแรง

$$OH + OH \longrightarrow H_2O_2$$

5.5.3 The chemical stage ใช้ช่วงเวลาเพียง 2-3 นาที เป็นช่วงที่เกิดผลจากอันตรกริยา ทำปฏิกริยาหรือชนกันกับอินทรีย์โมเลกุลที่สำคัญ อนุมูลอิสระ (free radical) และoxidizing agent อาจจะเข้าติดกับโมเลกุลขับข้อนที่เป็นโครโมโซม ซึ่งอาจจะทำให้ลูกโซ่ของโมเลกุลยาวขึ้น หรือ ขาดออกได้

5.5.4 The biological stage ใช้ช่วงเวลาไม่แน่นอน คืออาจจะอยู่ในช่วง สิบสิบวินาที ถึง สิบสิบปี ขึ้นอยู่กับแต่ละอาการ การเปลี่ยนแปลงทางเคมีในหัวข้อ 5.4.3 สามารถก่อให้เกิดผลในแต่ละเซลได้มากมายหลายทาง เช่น

1. การตายลงอย่างรวดเร็วของเซล

2. การไม่แบ่งตัวหรือแบ่งตัวช้าลงของเซล

3. การเปลี่ยนแปลงอย่างถาวรที่ถ่ายทอดไปถึงเซลลูกหลานได้

ผลของรังสีที่เกิดแก่ร่างกายมนุษย์นั้น เป็นผลที่เกิดจากความเสียหายอันเกิดขึ้นในแต่ละเซล ผลเหล่านี้อาจแบ่งออกได้เป็นสองประการคือ

5.5.4.1 Somatic effect โดยเกิดจากการเสียหายในเซลทั่วไปของร่างกาย และมีผลต่อผู้ที่ถูกรังสีเท่านั้น

5.5.4.2 Genetic effect โดยเกิดจากการเสียหายในเซลสืบพันธุ์ที่เรียกว่า gonads ความแตกต่างที่สำคัญคือ ในกรณีนี้ ความเสียหายอาจจะถูกถ่ายทอดต่อไปยังลูกหลาน และชั่วต่อๆไปได้

5.6 โซมาติค เอฟเฟคของรังสี (Somatic effect of Radiation)

5.6.1 การรับรังสีจำนวนมากแบบเฉียบพลัน (Acute Radiation Exposure) โซมาติคเอฟเฟค เริ่มจากการตายของ mitotic cell หรือจากการรบกวนยับยั้งการแบ่งตัวแบบ mitotic ซึ่งว่าความเสียหายส่วนมากมักจะเกิดขึ้นกับเซลที่มีอัตราการเจริญเติบโตและแบ่งตัวสูง มีระยะเวลาของการแบ่งตัวยาว และมีอายุอ่อนมากที่สุด ได้มีการเรียงลำดับ เซลที่มีความไวต่อรังสี จากมากไปหาน้อยไว้ดังนี้

เซลเม็ดโลหิต (เม็ดโลหิตขาวไวต่อรังสีที่สุด)

เซลเยื่อบุผนัง

เซลเนื้อเยื่อเกี่ยวโยง

เซลกระดูก

เซลประสาท

เซลสมอง

เซลกล้ามเนื้อ

เมื่อได้รับปริมาณรังสีสูงในช่วงเวลาสั้นๆ อาการอย่างแรกที่ปรากฏขึ้นอยู่กับการเสียหายของเซลที่มีอายุสั้น ซึ่งตัวที่สำคัญที่สุดคือ เม็ดโลหิตขาว และเซลบุผิวผนังในลำไส้

หลังการได้รับปริมาณรังสีจำนวนมากแบบเฉียบพลัน จำนวนของเม็ดเลือด

จาวจะลดลง ถ้า คน(หรือสัตว์) จะมีชีวิตรอดอยู่ได้ จำนวนเม็ดเลือดขาวจะต้องสูงเพิ่มขึ้นในช่วงเวลา สอง-สาม วัน ถึงแม้ว่ากว่าจะกลับเป็นปกติต้องใช้เวลาหลายเดือนก็ตาม การนับจำนวน Lymphocytes จะเป็นเครื่องบอกปริมาณรังสีที่ได้รับเป็นอย่างดี ต่อการได้รับรังสีในช่วง 25 - 400 เรม ถ้าเกิน 400 เรมแล้ว จำนวนเม็ดเลือดขาว จะเหลือน้อยจนทำให้การนับไม่เที่ยงตรงพอ

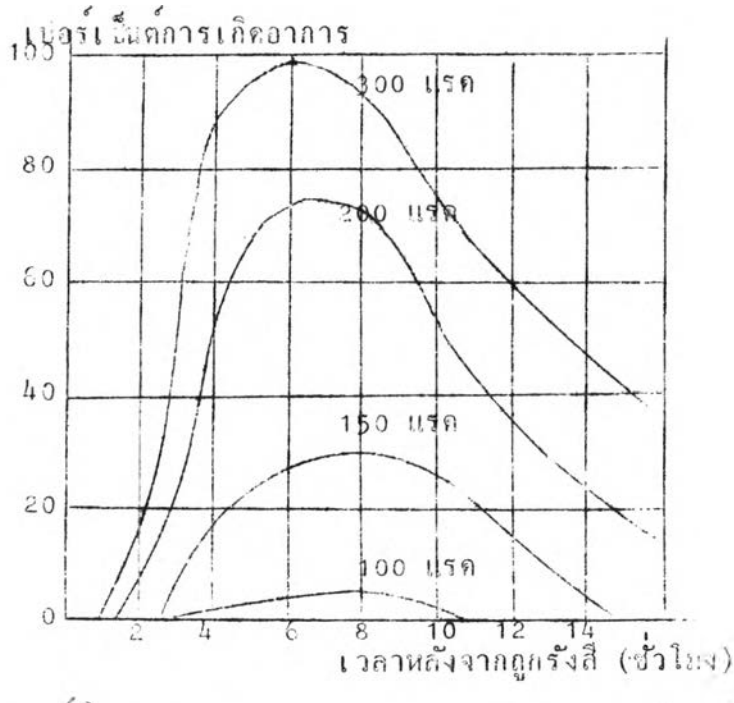
อาการที่สังเกตพบในคนที่ได้รับรังสีจะขึ้นโดยตรงกับปริมาณรังสี และอัตราการได้รับรังสี ดังตารางต่อไปนี้

เวลาหลังจากถูกรังสี	อาการที่พบ
0 - 48 ชั่วโมง	เบื่ออาหาร คลื่นเหียร อาเจียร ท้องร่วง อ่อนเปลี้ย ขาดความรู้สึกสนใจต่อสิ่งแวดล้อม หมดเรี่ยวแรงที่จะทรงกาย เหงื่อออก ผิวหนังเป็นสีแดง มีไข้ ตาแดง อักเสบ หายใจไม่สะดวก เยื่อกล้ามไม่ทำหน้าที่ร่วมกัน
2 วัน - 2-3 สัปดาห์	เป็นระยะสงบ อาการดังกล่าวจะหายไป ผู้ป่วยรู้สึกดี
2- 3 สัปดาห์ ถึง	มีไข้ เบื่ออาหาร อิดโรย อ่อนเปลี้ย อ่อนกำลังลง
6- 8 สัปดาห์	น้ำหนักลด ท้องร่วงติดเชื้อ โลหิตออก ผิวหนังเป็นสีแดง ผมร่วง ปวดท้องอย่างรุนแรง ชอก ซึม ง่าน จดจำอะไรไม่ได้ ชัก ระตุก หมดความรู้สึก
6- 8 สัปดาห์ ถึง หลายเดือน	เป็นช่วงหรือระยะขั้นตอนที่มีอาการดีขึ้นในผู้ป่วยที่รอดชีวิต จะมีอาการดีขึ้นเรื่อยๆ อาการต่างๆที่ร้ายแรงจะค่อยๆหายไป

ตารางที่ 5.1 (1) แสดงอาการที่สังเกตพบในช่วงเวลาต่างๆกันหลังการได้รับรังสีขนาด 400 - 600 เรม

ปริมาณรังสี	ผลที่เกิดขึ้น
0 - 25 เรม	ไม่ปรากฏมีอาการเปลี่ยนแปลงในร่างกายที่น่าวิตก
25 - 50 เรม	เกิดการเปลี่ยนแปลงกายในโลหิต แต่ไม่ร้ายแรง
50 -200 เรม	มีอาการป่วยเนื่องจากรังสี
200-400 เรม	การป่วยเนื่องจากรังสีทำให้ถึงตายได้
400 เรม	ตาย 50 %
สูงกว่า 600 เรม	ตาย

ตารางที่ 5.2 แสดงผลที่เกิดขึ้นกับร่างกายของผู้ที่ได้รับรังสีปริมาณต่างๆตลอดร่างกาย (1)



รูปที่ 5.2 แสดงเวลาโดยประมาณในอาการที่ระยะเตือนล่วงหน้าเกิดขึ้นกับผู้ได้รับรังสีปริมาณต่างๆกัน (1)

สำหรับการได้รับรังสีปริมาณน้อยขนาด 100 เรม ประมาณ 15 % ของผู้ที่ได้รับรังสีจะแสดงอาการออกมาตามตารางที่ 5.1 และเบอร์เซ็นต์นี้เพิ่มขึ้น อย่างรวดเร็วจนถึง 200 เรม ซึ่งเป็นปริมาณที่เกือบทุกคนที่ได้รับรังสีแสดงอาการป่วยออกมา โดยทั่วไปแล้วถือว่าระดับการได้รับรังสี 200 เรมนี้เป็นระดับที่เริ่มจะเป็นอันตรายถึงชีวิต จำนวนผู้เสียชีวิตจะเริ่มเพิ่มขึ้นตามโดส จนถึง 50 % ที่ระดับ 450 - 500 เรม ซึ่งเรียกว่า LD_{50}^{30} นั่นคือเป็นโดสของรังสีที่ทำให้เสียชีวิต 50 % ในผู้ที่ถูกรังสีภายใน 30 วันหลังการถูกรังสี และค่า LD_{100}^{30} ซึ่งหมายความถึงจำนวนผู้ถูกรังสีจะเสียชีวิตทั้งหมดใน 30 วัน จะอยู่ประมาณ 800 - 1000 เรม น่าสังเกตว่า การรักษาด้วยวิธีที่ถูกต้องเหมาะสมอาจจะช่วยลดอัตราการตายได้ สำหรับการรับรังสีต่ำกว่า 500 เรม แต่สำหรับโดสมากๆขนาด 1000 เรม จากการทดลองกับสัตว์ พบว่าจำนวนการเสียชีวิตมากที่สุดจะเป็นประมาณ 13 - 15 วันนับจากถูกรังสี ซึ่งช่วงเวลานี้อาจมากขึ้นสำหรับมนุษย์ สำหรับโดสขนาดนี้การเสียชีวิตส่วนมากเกิดจากการติดเชื้ออันเนื่องจากเม็ดเลือดขาวถูกทำลายไปจำนวนมาก เรียกระยะนี้ว่า infection death

สำหรับโดสขนาด 1000 เรม เวลาที่ยังจะมีชีวิตอยู่จะลดลงเหลือประมาณ 3 - 5 วัน และคงอยู่ในระดับนี้จนถึงโดสสูงกว่านี้มาก ซึ่งในช่วงนี้รังสีทำให้เกิดการตายในเซลล์ที่บุผนังลำไส้ มีการทำลายของผนังเยื่อบุลำไส้ ติดตามมาด้วยอันตรายจากแบคทีเรีย เรียกระยะนี้ว่า gastro intestinal death

สำหรับโดสที่สูงกว่านี้มากๆ ช่วงเวลาที่มีชีวิตอยู่จะสั้นลงเรื่อยๆ แต่มีข้อมูลน้อยมากสำหรับการเกิดแก่มนุษย์ แต่จากการทดลองกับสัตว์อาการแสดงออกมาว่าเกิดจากการถูกทำลายของระบบควบคุมประสาทส่วนกลาง central nervous system ดังนั้นช่วงนี้จะเรียกว่าช่วงของ CNS death อย่างไรก็ดีพบว่าจะไม่มีการตายในทันทีทันใดแม้ว่าจะได้รับรังสีขนาด 50,000 เรม ในการทดลองกับสัตว์

ผลอีกประการหนึ่งที่มักแสดงออกมาอย่างรวดเร็วหลังจากการได้รับรังสีปริมาณมากอย่างเฉียบพลัน คือ การเป็นผื่นแดงของผิวหนัง (erythema) โดยที่ผิวหนังเป็นส่วนนอกสุดของร่างกายจึงได้รับหรือถูกกับรังสีมากกว่าเนื้อเยื่ออื่นๆ

. . . 5.6.2 ผลของการได้รับรังสีแบบยืดเยื้อยาวนาน (Longterm effect of Radiation) การที่บุคคลได้รับรังสีปริมาณน้อยเป็นเวลานานๆ หรือที่เรียกว่า chronic exposure มักจะมีผลที่แสดงออกมาในรูปต่างๆกัน และผลนี้จะเพิ่มขึ้นตามระดับการได้รับรังสีเพิ่มขึ้นด้วย แต่สำหรับระดับรังสีปกติแล้ว โอกาสที่จะเกิดอาการเหล่านี้จะน้อยมาก

การได้รับปริมาณรังสีขนาด 200 เรม ในทันทีทันใด จะมีผลต่อเซ็ลโลหิตขาว ทำให้จำนวนลดลง และเกิดการตายในเยื่อบุผนังลำไส้ แต่ถ้าปริมาณรังสีขนาดเดิมนั้น บุคคลได้รับในเวลานาน เช่นหลายๆปี อาการหรือผลดังกล่าวก็จะไม่แสดงออกมา เหตุผลก็คือร่างกายมนุษย์เรามีความสามารถในการซ่อมแซมส่วนที่ชำรุดเสียหายที่เกิดขึ้นจากรังสีได้

มีผลบางประการที่เกิดจากการได้รับรังสีแบบยืดเยื้อยาวนาน เท่าที่ได้สังเกตพบ เช่น การเป็นต้อกระจก มะเร็งในลักษณะต่างๆกัน และการมีช่วงชีวิตสั้นลง ดังแสดงในตารางต่อไปนี้

ผลที่ปรากฏ	ระยะแฝงเฉลี่ย	พยานหลักฐาน
ลูคีเมีย	8-10 ปี	ผู้ที่ได้รับบาดเจ็บจากระเบิดปรมาณู การได้รับการรักษาจากรังสีเอกซ์
มะเร็งในกระดูก	15+ ปี	ผู้เขียนหน้าปัทม์เรืองแสงด้วยเรเดียม
มะเร็งในต่อมไทรอยด์	15-30 ปี	ผู้ได้รับบาดเจ็บจากระเบิดปรมาณู การได้รับการรักษาทางการแพทย์
มะเร็งในปอด	10-20 ปี	คนงานเหมืองมีแร่กัมมันตรังสี
อายุสั้นลง		ทำการทดลองกับหนู
ต้อกระจก	5-10 ปี	ผู้ได้รับบาดเจ็บจากระเบิดปรมาณู

ตารางที่ 5.3 (18) แสดงผลที่เกิดจากการได้รับรังสีแบบยืดเยื้อยาวนาน

ลักษณะการเกิดมะเร็งที่นับว่าสำคัญอันอาจเกิดได้จากการได้รับรังสีคือ ลูคิเมีย หรือมะเร็งในเม็ดโลหิตขาว เป็นที่เชื่อกันว่ามะเร็งต่างๆนั้น สามารถเกิดขึ้นได้จากการได้รับรังสี รวมทั้งมะเร็งในกระดูก มะเร็งในต่อมไทรอยด์ และในปอด มะเร็งที่เกิดจากรังสีนั้นปรากฏว่าไม่แตกต่างออกไปจากที่เกิดขึ้นเอง ซึ่งในเรื่องนี้นับว่ามีความสำคัญมาก ในการพิจารณาของศาลเพื่อตัดสินว่า มะเร็งนั้นได้เกิดจากการได้รับรังสีใช่หรือไม่ ปัญหาที่ยุ่งยากอีกประการหนึ่งคือระยะแฝงของมะเร็งซึ่งทำให้การยืนยันปริมาณรังสีที่ได้รับยุ่งยากมาก

ได้มีการพยายามทำการทดลองเพื่อหาว่ามีขีดจำกัดเริ่มต้นสำหรับการได้รับรังสีในการเป็นมะเร็งหรือไม่ ผลของการทดลองเหล่านี้ยังไม่มีการสรุป ดังนั้นโดยปกติแล้วจึงมองในแง่ร้ายไว้ก่อนว่า ไม่มีขีดจำกัดขั้นต่ำสำหรับการได้รับรังสีที่ก่อให้เกิดโรคมะเร็ง ดังนั้นการได้รับปริมาณรังสีขนาดใดๆก็ตามจะมีโอกาสเป็นมะเร็งได้สูงกว่าที่จะเกิดขึ้นเอง

สำหรับการเป็นต้อกระจกดูเหมือนว่าจะมีขีดจำกัดขั้นต่ำของการได้รับรังสี 400 เรม หลักฐานต่างๆที่มีรวมทั้งการมีช่วงชีวิตสั้นลง เราได้มาจากผลการทดลองกับสัตว์ และที่ได้จากประชากรของเมือง Hiroshima และ Nagasaki เมื่อเร็วๆนี้แสดงออกมาว่า ถ้าการมีช่วงชีวิตสั้นลงปรากฏขึ้นในมนุษย์ด้วยแล้วจะมีค่าน้อยมาก (น้อยกว่า 1 ปี ต่อ 100 เรม)

5.7 เจนีติค เอฟเฟค ของรังสี

เจนีติค เอฟเฟค ของรังสีเป็นผลมาจากความเสียหายของเซลสืบพันธุ์ ผลเสียหายนี้เกิดจากการ ดัดแปลง เปลี่ยนแปลง ซึ่งเรียกกันว่า genetic mutation ในส่วนที่ถ่ายทอดทางพันธุกรรมของเซล

การสืบพันธุ์นั้นเกิดขึ้นเมื่อไข่ถูกผสมโดย sperm และผลจากนั้นชีวิตใหม่จะได้รับชุดของการถ่ายทอดทางพันธุกรรมจากทั้งฝ่าย บิดา และ มารดา นั่นคือเด็กจะได้รับชุดของยีน ที่ประกอบกันสองชุด แต่ละชุดจาก พ่อ และ แม่ โดยทั่วไปแล้วพบว่า จะมียีนหนึ่งเป็นลักษณะเด่น (Dominant)และยีนจะเป็นลักษณะด้อย (Recessive)ยีนตัวเด่นจะเป็นตัวกำหนดลักษณะที่เกี่ยวข้อง เช่นสีของตา เป็นต้น

ยีน ลักษณะด้อยจะแสดงออกได้เมื่อโอกาสที่ยีนลักษณะด้อยสองชนิดมารวมกัน มีโรคหลายอย่างที่มีความเกี่ยวข้อง กับยีนลักษณะด้อย ดังนั้นมันจะปรากฏออกมาเมื่อทั้งพ่อและแม่มียีนลักษณะด้อย

การเกิด mutation เป็นเหตุให้ส่วนหนึ่งของพลโลกจำนวนไม่มากนักต้องทนทุกข์จากโรคร้าย หนึ่งในห้าร้อยหรือกว่านิด โรคร้ายเหล่านี้เป็นลักษณะของผลทางพันธุกรรม

รังสีก่อให้เกิด mutation ในยีนได้ในลักษณะที่ไม่แตกต่างไปจากการเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ น่าสังเกตว่า ความร้อน และ สารเคมี ก็ก่อให้เกิด mutation ได้ ยีนที่เกิด mutate โดยปกติจะเป็นลักษณะด้อย ดังนั้นโดยทั่วไปจึงสรุปว่า mutation ทุกแบบเป็นอันตราย ซึ่งก็ไม่จริงนักเพราะมนุษย์เราที่มีความก้าวหน้าในปัจจุบันนี้โดยการ mutation ที่ต่อเนื่องกันมา

โดยที่รังสีทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออน เป็นการเพิ่มอัตราการเกิด mutation ดังนั้นการใช้รังสีจึงเป็นการเพิ่มพลเมืองที่มี ยีน ผิดปกติในอนาคต ซึ่งแน่นอนว่าผลที่จะติดตามมาจะเป็นปัญหาที่รุนแรงจริงๆ จึงต้องมีการควบคุมการได้รับรังสีในระดับทั่วไปอย่างเข้มงวดกวดขัน

5.7 หน่วยวัดทางรังสี

องค์การระหว่างประเทศชื่อ The International Commission on Radiation Units and Measurement (ICRU) ได้กำหนดหน่วยวัดทางรังสีและประกาศใช้เป็นกฎหมายระหว่างประเทศ ทั้งยังได้ให้การรับรองและมีการปรับปรุงหน่วยที่ใช้จนเป็นที่ยอมรับกันในหมู่ผู้ปฏิบัติทั่วโลก โดยหน่วยที่ใช้วัดความแรงของรังสีแบ่งออกเป็นดังนี้

5.7.1 หน่วยที่เกี่ยวกับการอาบรังสี (Exposure)

การอาบรังสีหมายถึงลักษณะการที่ศนามรังสีแกมมาตกกระทบร่างกาย ณ จุดหนึ่งจุดใด โดยที่รังสีแกมมาทำให้อากาศแตกตัวเป็นไอออน การเกิดอิเล็กตรอนอิสระจากการแตกตัวนั้น เราจึงสามารถใช้จำนวนไอออนและอิเล็กตรอนที่เกิดในอากาศที่

ติดกับผิวหนังเป็นหน่วยวัดได้ โดยกำหนดหน่วยดังนี้

หน่วย Roentgen ใช้เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ R โดยกำหนดว่า เมื่อรังสีแกมมาตกลงบนผิวของร่างกาย ทำให้อากาศบริเวณนั้น แตกตัวเกิดประจุชนิดเดียวกันจำนวน 1 e.s.u. ในอากาศ 0.001293 กรัม (1 ซม.ลบ.ซม.ที่ความดัน 1 บรรยากาศ อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส) หรือทำให้อากาศแตกตัวเกิดประจุชนิดเดียวกัน 2.58×10^{-4} Coulomb/kg จะเรียกว่ารังสีนั้นมีความแรง 1 R

อัตราการอาบรังสีมีหน่วยเป็น Roentgen/เวลา เช่น R/hr , mR/hr

5.7.2 หน่วยที่เกี่ยวกับพลังงานที่ถ่ายเทให้ (Imparted Energy)

ผลทางชีวภาพ ที่เกิดขึ้นเนื่องจากรังสี จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับพลังงานที่รังสีถ่ายทอดให้แก่เนื้อเยื่อนั้นโดยกำหนดหน่วย ของพลังงานที่ถูกถ่ายทอดให้ต่อ 1 หน่วยมวลว่า Absorbed Dose และ หน่วยของ Absorbed Dose จะเป็น Rad โดยที่ 1 Rad จะเท่ากับการได้รับพลังงานขนาด 0.01 joule/kg หรือเท่ากับ 100 ergs/g อัตรา Absorbed Dose วัดเป็น Rad/sec , mRad/hr

5.8 ผลสัมพัทธ์ทางชีวภาพ (Relative Biological Effectiveness)

ผลทางชีวภาพที่เกิดขึ้นเนื่องจากการได้รับรังสี ไม่ได้ขึ้นอยู่กับปริมาณของพลังงานที่ได้รับเท่านั้น แต่ยังขึ้นอยู่กับ วิธีการที่พลังงานถูกถ่ายเทให้ตลอดแนวทางที่รังสีวิ่งผ่านไป และโดยเฉพาะอย่างยิ่ง ผลทางชีวภาพจะเพิ่มขึ้นตาม linear energy transfer (L_∞) ของรังสี เช่นสำหรับ Absorb Dose เดียวกัน ความเสียหายที่เกิดจากรังสีแอลฟาซึ่งมีค่า L_∞ สูงกว่า จะมากกว่าความเสียหายที่เกิดจากรังสีแกมมาที่มีค่า L_∞ ต่ำกว่าเป็นต้น และจากข้อนี้เองเราจึงต้องพิจารณาผลสัมพัทธ์ทางชีวภาพของรังสีต่างชนิดและต่างพลังงานกันด้วยในการคิดความเสียหายที่เกิดจากรังสี

5.9 Quality factor

เพื่อเป็นการจัดเรียงลำดับผลทางชีวภาพของรังสีต่างชนิดกันเพื่อให้การ

คำนวณในเรื่องการป้องกันรังสีสะดวกขึ้น ICRU ได้เสนอให้ใช้ Quality factor ซึ่งใช้ตัวย่อว่า Q เป็นค่าที่ได้เลือกขึ้นมาจากการทดลอง และเป็น ฟังชั่น ของ L_{∞} โดยกำหนดดังตารางต่อไปนี้

L_{∞} , keV/micron	Q
3.5 or less	1
7	2
23	5
53	10
175 and above	20

ตารางที่ 5.4 (ก) แสดงค่า Quality factor เป็นฟังชั่นของ L_{∞}

Quality factor for various Type of Radiation*

Type of Radiation	Q
X - rays and γ- ray	1
β - ray, $E_{max} > 0.03$ MeV	1 +
β - ray, $E_{max} < 0.03$ MeV	1.7+
Naturally occuring particles	10
Heavy recoil nuclei	20
Neutrons	
thermal to 1 KeV	2
10 KeV	2.5
100 KeV	7.5
500 KeV	11
1 MeV	11
2.5 MeV	9
5 MeV	8
7 MeV	7
10 MeV	6.5
14 MeV	7.5
20 MeV	8
energy not specified	10

* Based on N C R P Report Number 39

+ Recommended in I C R P Publication Number 9

ตารางที่ 5.5 (ก) แสดงค่า Quality factor ของรังสีชนิดต่างๆ

5.10 Dose equivalent

ดังได้กล่าวแล้วว่าผลทางชีวภาพของความเสียหายที่เกิดจากรังสีนั้นแตกต่างกันออกไปตามลักษณะของการถ่ายทอดพลังงานและปริมาณของพลังงานที่ถูกถ่ายทอดให้ เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบความเสียหาย ที่เกิดขึ้นได้ ICRU จึงได้กำหนดหน่วยที่ใช้วัดโดยดูจากความเสียหายที่เกิดขึ้น เรียกว่า Dose equivalent โดยกำหนดให้เป็นผลคูณระหว่าง Absorb Dose กับ Quality factor

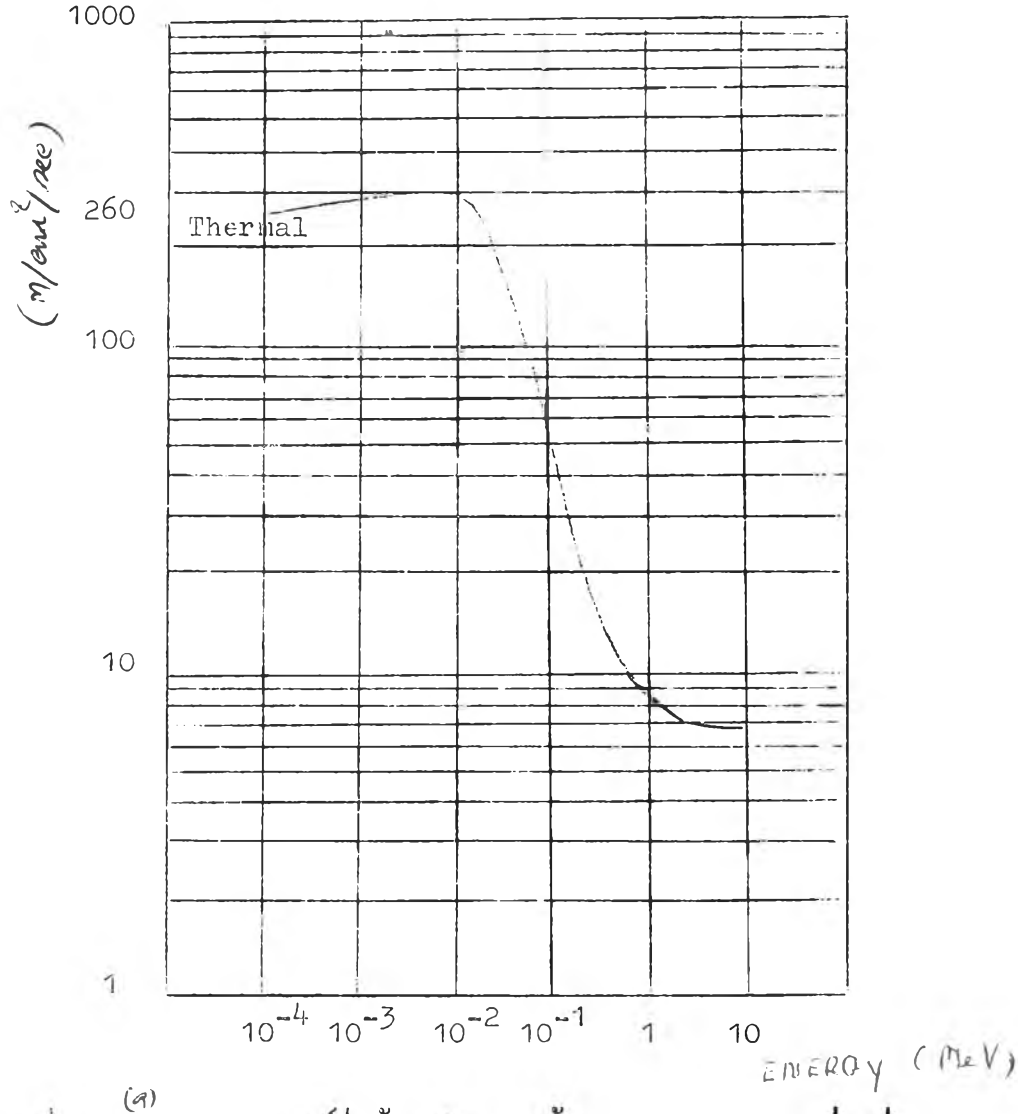
Dose equivalent = Absorbed Dose X Quality factor

หน่วยสำหรับการวัด Dose equivalent คือ Rem และอัตราของ Dose equivalent จะเป็น Rem/sec , Rem/hr

5.11 โดสจากนิวตรอน

โดยที่อันตรกริยาระหว่างนิวตรอนกับสสารหรือเนื้อเยื่อของร่างกายมนุษย์เป็นไปโดยสลับซับซ้อนมาก การคำนวณโดสจากนิวตรอนจึงต้องอาศัยเครื่องมือสมองกล วิธีการคำนวณนั้นเรียกกันว่า วิธี มอนติ-คาโล และผลจากการคำนวณโดยสมองกล จะได้กราฟที่แสดง นิวตรอนฟลักซ์ ที่สัมพันธ์กับ Dose equivalent rate 1 mRem/hr

จากกราฟตามรูปที่ 5.3 จะเห็นว่า นิวตรอนฟลักซ์ชนิดเทอร์มาล และเอพิเทอร์มาล จะให้ Dose equivalent ได้ใกล้เคียงเกือบจะไม่แตกต่างกันเลย คือค่าฟลักซ์ขนาด 260 $n/cm^2/sec$ จะให้ได้ 1 mRem/hr หรือ Dose equivalent 1 mRem จะได้จากปริมาณนิวตรอนจำนวน $260 \times 60 \times 60$ หรือ 9.36×10^5 n/cm^2 ทั้งเทอร์มาล และ เอพิเทอร์มาลนิวตรอน



(ก)

รูปที่ 5.3 นิวตรอนฟลักซ์ที่ให้โคสอิคกิวาเส้นเรท 1 มิลลิเรม ต่อ ชั่วโมง เป็นฟังชั่นของพลังงานของนิวตรอน