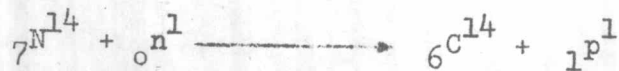


เทคนิคการหาอายุโดยนับรังสีคาร์บอน-14

2.1 การเกิดคาร์บอน-14 ในบรรยากาศโดยรังสีคอสมิก

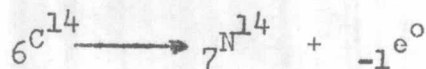
รังสีคอสมิก พรายมารี ที่มาจากนอกโลกส่วนมากเป็นโปรตอน และส่วนน้อย เป็นนิวเคลียสของแก๊สฮีเลียม เมื่ออนุภาคเหล่านี้ชนกับนิวเคลียสของปรมาณูต่าง ๆ ที่ประกอบเป็นบรรยากาศของโลกเบื้องบนจะได้เป็นรังสีคอสมิก เซกกันดารีที่สำคัญคือ นิวตรอน, โปรตอน และโพ-เมซอน นิวตรอนที่มีพลังงานต่ำจะทำปฏิกิริยานิวเคลียร์กับ ไนโตรเจน-14 ในบรรยากาศกลายเป็นคาร์บอน-14¹ คือ



คาร์บอน-14 ที่เกิดขึ้นเป็นสารกัมมันตรังสี แต่มีคุณสมบัติทางเคมีเหมือน คาร์บอน-12 ซึ่งมีอยู่ตามธรรมชาติ จะเข้าร่วมตัวกับออกซิเจนในบรรยากาศ โดย รังสีเหนือม่วง เป็นคาร์บอน-14 ไคออกไซด์อยู่ในบรรยากาศ ละลายอยู่ในน้ำบนพื้นโลก ในรูปของคาร์โบเนต, ไบคาร์โบเนต และกรดคาร์บอนิก

2.2 การเกิดภาวะสมดุลย์ของคาร์บอน-14 ในบรรยากาศ, ในพืช และสัตว์

ตามรายงานโดยละเอียดของ Libby W.F. (1961) พร้อม ๆ กับการเกิด คาร์บอน-14 โดยขบวนการดังกล่าว คาร์บอน-14 ที่เกิดขึ้นนี้จะสลายตัวไปตามกฎ- การสลายตัวของสารกัมมันตรังสีด้วย คือ



1. Samuel Glasstone. Sourcebook on Atomic Energy, 3rd Edition, Litton Educational Publishing, Inc. 1967

การเกิดขึ้นและการสลายตัวไปนี้ เกิดขึ้นพร้อมกับการเกิดบรรยากาศของโลก ซึ่งมีระยะเวลาานานมาก จนถึงว่า ปริมาณคาร์บอน-14 ในบรรยากาศในรูปของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ในน้ำ ในรูปของคาร์โบเนต, ไบคาร์โบเนต และกรดคาร์บอนิก อยู่ในภาวะสมดุล คือ อัตราการเกิดคาร์บอน-14 เท่ากับอัตราการสลายตัวของมัน

คาร์บอน-14 ไดออกไซด์ จะถูกนำไปใช้ในขบวนการสังเคราะห์แสงของพืช กลายเป็นสารอินทรีย์มากมาย ซึ่งมีคาร์บอน-14 เป็นองค์ประกอบ เมื่อสัตว์กินพืชก็จะได้สารอินทรีย์ที่มีคาร์บอน-14 เป็นองค์ประกอบในสัตว์อีก ซึ่งปริมาณคาร์บอน-14 ต่อกรัมคาร์บอน ในพืชและสัตว์ จะเป็นปริมาณเดียวกันกับปริมาณคาร์บอนต่อกรัมคาร์บอนในบรรยากาศ และในน้ำขณะเวลานั้น ซึ่งควรจะเป็นปริมาณเดียวกันกับปริมาณคาร์บอน-14 ต่อกรัมคาร์บอนในบรรยากาศและในน้ำเวลาปัจจุบันด้วย

2.3 การหาอายุโบราณวัตถุโดยเทคนิคการนับรังสีคาร์บอน-14

เมื่อต้นไม้หรือสัตว์ตายลง คาร์บอน-14 ซึ่งเป็นองค์ประกอบในต้นไม้และสัตว์นั้นจะหยุดการแลกเปลี่ยนกับคาร์บอน-14 ในสิ่งแวดล้อมอีกต่อไป และจะสลายตัวลงปริมาณลงเรื่อย ๆ ตามกฎการสลายตัวของสารกัมมันตรังสี

2.3.1 กฎการสลายตัวของสารกัมมันตรังสี

อัตราการสลายตัว ($-\frac{dN}{dt}$) ของสารกัมมันตรังสีจะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับจำนวนปริมาณกัมมันตรังสีที่มีอยู่ (N_t) ที่เวลาใด ๆ (t) คือ

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N_t \quad \text{-----}(1)$$

เมื่อ λ คือค่าคงที่แห่งการสลายตัว

โดยการอินทิเกรตสมการข้างบน เทียบกับเวลาจะได้

$$\ln N_t = -\lambda t + C \quad \text{-----}(2)$$

เมื่อ C คือค่าคงที่ตัวหนึ่ง

$$\begin{aligned} \text{หรือ } N_t &= e^{-\lambda t + C} \\ &= e^{-\lambda t} + e^C \end{aligned} \quad \text{-----}(3)$$

ถ้า $t = 0, N_t = N_0 =$ จำนวนปริมาณกัมมันตรังสีเริ่มต้น

แทนค่าลงใน (3)

ได้

$$N_0 = e^C$$

$$\text{หรือ } C = \ln N_0$$

แทนค่าลงใน (2)

ได้

$$\ln N_t = -\lambda t + \ln N_0$$

$$\text{หรือ } \ln \frac{N_t}{N_0} = -\lambda t$$

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \frac{N_0}{N_t} \quad \text{-----}(4)$$

ถ้า $N_t = \frac{N_0}{2}, t =$ วัฏจักรครึ่งของสารกัมมันตรังสีนั้นให้ $= t_{1/2}$

$$\text{ดังนั้น } \lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} \quad \text{-----}(5)$$

คาอายุเฉลี่ยของสารกัมมันตรังสี (T_m) คือเวลาที่นิวเคลียสกัมมันตรังสีที่มีอยู่ทั้งหมดทลาย จำนวนนิวเคลียสกัมมันตรังสีเริ่มแรก คือ

$$T_m = -\frac{1}{N_0} \int_{N=N_0}^{N=0} t dN$$

$$\begin{aligned} \text{จาก } \frac{-dN}{dt} &= \lambda N \\ dN &= N(-\lambda) dt \\ &= N_0 e^{-\lambda t} (-\lambda) dt \end{aligned}$$

$$N = N_0, \quad t = 0$$

$$N = 0, \quad t = \infty$$

$$\text{ดังนั้น } T_m = -\frac{1}{N_0} \int_{t=0}^{t=\infty} t N_0 e^{-\lambda t} (-\lambda) dt$$

$$= \lambda \int_{t=0}^{t=\infty} t e^{-\lambda t} dt$$

$$T_m = \left[-te^{-\lambda t} + \frac{e^{-\lambda t}}{\lambda} \right]_{t=0}^{t=\infty}$$

$$= - \left[e^{-\lambda t} \left(t - \frac{1}{\lambda} \right) \right]_{t=0}^{t=\infty}$$

$$= \frac{1}{\lambda}$$

$$\text{แทนค่า } T_m = \frac{1}{\lambda} \text{ ลงใน (4) ได้}$$

$$t = T_m \ln \frac{N_0}{N_t}$$

ค่าความแรงรังสี (A) จะแปรผันโดยตรงกับจำนวนปริมาณกัมมันตรังสี ดังนั้น

$$t = T_m \ln \frac{A_0}{A_t} \text{-----(6)}$$

เมื่อ A_0 คือความแรงรังสีที่เวลาเริ่มต้น และ A_t คือความแรงรังสีที่เวลาใด ๆ t



2.3.2 ชีวิตครึ่งและชีวิตเฉลี่ยของคาร์บอน-14

ตามการทดลองในที่ประชุมเรื่องการหาอายุโดยเรดิโอคาร์บอน ครั้งที่ 5 ในปี 1962 ณ เมืองเคมบริดจ์ ค่าอายุที่คำนวณได้จะตองใช้ค่าชีวิตครึ่งของคาร์บอน-14 ที่หาโดย Libby ซึ่งมีค่า 5568 ± 30 ปี ซึ่งจะให้ค่าชีวิตเฉลี่ยของคาร์บอน-14 เท่ากับ 8033 ± 43 ปี อย่างไรก็ตาม ถ้าต้องการค่าอายุที่แม่นยำมากขึ้น จะตองใช้ค่าชีวิตครึ่งของคาร์บอน-14 ที่ถูกต้องยิ่งกว่า คือ 5730 ± 40 ปี ซึ่งให้ค่าชีวิตเฉลี่ยเท่ากับ 8268 ± 58 ปี ทั้งนี้ตามรายงานของ Mann W.B. et al (1961) และ Godwin H. (1962)

2.3.3 สารมาตรฐานที่ใช่เป็นความแรงรังสีคาร์บอน-14 ตั้งต้นของโบราณวัตถุ

ตามหัวข้อ 2.2 น่าจะใช้ความแรงรังสีคาร์บอน-14 ในต้นไม้ หรือในสัตว์ที่มีชีวิตอยู่ในปัจจุบันเป็นความแรงรังสีตั้งต้นของคาร์บอน-14 ในการคำนวณหาอายุของพืชหรือสัตว์ที่ตายมานานแล้ว จากสูตร (6) ได้ อย่างไรก็ตาม บรรยากาศตั้งแต่ปี ค.ศ. 1890 เป็นต้นมา ถูกคาร์บอน-12 ซึ่งเกิดจากการเผาถ่านหินและน้ำมัน ซึ่งล้วนแต่ไม่มีคาร์บอน-14 อยู่เลย ออกมาปะปน และทำให้คาร์บอน-14 ในบรรยากาศ และน้ำเชื้อจางลงไป (Industrial Effect¹) นอกจากนี้ การทดลองอาวุธนิวเคลียร์ ตั้งแต่ ค.ศ. 1952 ยังทำให้ปริมาณคาร์บอน-14 ในบรรยากาศกลับสูงขึ้นอีก (Atom Bomb Effect) ด้วย เหตุสองประการนี้ ภาวะสมดุลย์ของคาร์บอน-14 จึงถูกทำลายไป และดังนั้น จึงไม่สามารถใช้ความแรงรังสีจากคาร์บอน-14 ในต้นไม้ หรือในสัตว์ที่มีชีวิตอยู่ในปัจจุบัน เป็นความแรงรังสีตั้งต้นของคาร์บอน-14 ในการคำนวณหาอายุได้ และจำเป็นต้องการหาสารมาตรฐานที่ให้ความแรงรังสีคาร์บอน-14 เท่ากันกับความแรงรังสีคาร์บอน-14 ในบรรยากาศ ก่อนเกิด Atom Bomb Effect และ Industrial Effect สารมาตรฐานดังกล่าวได้มาจากต้นไม้ที่มีชีวิตอยู่คริสต์ศักราชที่ 19 และถูกเปลี่ยนให้เป็นกรดออกซาลิก โดย U.S. National Bureau of Standard สารมาตรฐานนี้ ยอมรับกันว่า เป็น International Primary Standard อย่างไรก็ตาม ในการวัดความแรงรังสี

1. Suess E.E. Radiocarbon concentration in modern, Science, 122, 1955, 415-417

ความแรงรังสีกรตออกซาลิคาทรฐานนี้เมื่อ 1.1.1958 ปรากฏว่ามีความแรงรังสีสูง
กว่าค่าเฉลี่ยของความแรงรังสีที่ห้องปฏิบัติการทางหาอายุโดยคาร์บอน-14 ต่าง ๆ ใ้
กันอยู่ ทั่วค่า 1.0526 เทา เพื่อให้ใช้กรตออกซาลิคาทรฐานนี้ได้ จึงต้องใช้เวลา 0.95
คูณเข้ากับความแรงรังสีของกรตออกซาลิคาทรฐาน หลังจากเปลี่ยนความแรงรังสีที่วัด
ได้นั้น ไปที่ 1.1.1958 แล้ว

2.3.4 ขบวนการเปลี่ยนตัวอย่างโบราณวัตถุ และสารมาตรฐานให้เป็นสารประกอบ
ที่ใช้กับรังสี

2.3.4.1 การเตรียมตัวอย่างโบราณวัตถุก่อนเปลี่ยนเป็นสารประกอบที่ใช้
นับรังสี

ค่าอายุที่หาได้จากคาร์บอน-14 จะถูกต้องเท่าใดนั้นขึ้นอยู่กับ
มากกับความรู้อุณหภูมิ, ส่วนประกอบ และสถานที่มาของสารที่หาอายุด้วย ตาม
ธรรมชาติโบราณวัตถุย่อมถูกกักร่อน, ถูกทำลาย และถูกเจือปนจากสิ่งต่าง ๆ ที่แวก-
ลอมอยู่ โดยเฉพาะสารอินทรีย์ที่มีอายุน้อยกว่าที่ทับถมกันอยู่เบื้องบน และถูกน้ำชะแทรก
ซึมลงไปปนกับโบราณวัตถุเบื้องล่าง อายุที่หาได้ ในกรณีนี้จะอ่อนกว่าเป็นจริง ถ้าไม่คิด
ถึงข้อนี้, ในทางกลับกัน ตัวอย่างไม้อาจหาอายุได้หลายร้อยปี เก่าไปกว่าอายุจริง ถ้า
ถูกเจือปนด้วยน้ำมันหล่อลื่นจากเครื่องมือชุด, ด้ก, เจาะ, เลื่อย หรือตัวอย่างถ่านไม้
อาจหาอายุได้อ่อนกว่าจริงหลายร้อยปี เนื่องจากรากอ่อนของต้นไม้ที่มีอายุน้อยกว่ามาก
ชอบไชเข้าไปปะปน และถูกนำมาหาอายุโดยไม่ได้ตรวจดูก่อน การเก็บตัวอย่างโบราณ
วัตถุ จึงเป็นเรื่องสำคัญที่พึงระวัง ถ้าเป็นไปได้ จะต้องไม่ให้ตัวอย่างโบราณวัตถุ
นั้นถูกกับสิ่งอื่นใด นอกจากโลหะและแก้วเท่านั้น เครื่องมือในการเก็บและภาชนะที่
บรรจุจะต้องสะอาด ไม่มีสารอินทรีย์เจือปนอยู่, น้ำมันหล่อลื่น, น้ำมันกันสนิม จะต้อง
ไม่ให้เจือปนเข้าไปในตัวอย่างได้, เมื่อได้ตัวอย่างมา โดยใช้เกรียงที่สะอาด ควร
วางลงบนแผ่นอะลูมิเนียมใหม่ ๆ , ห่อและบรรจุลงในภาชนะแก้วหรือโลหะ

การเตรียมตัวอย่างโบราณวัตถุ เมื่อพิจารณาถึงชนิดของตัวอย่าง และสิ่งที่มัก
พบเป็นตัวเจือปน มีดังนี้คือ:-

ตัวอย่างไม้ เมื่อพิจารณาถึงกลไกการเจริญเติบโตของต้นไม้ จะพบว่าส่วนของเซลล์-
 ไลส และลิกนิน จะถูกองค์ประกอบคาร์บอนที่ละลายอยู่ในน้ำเลี้ยง (Sap) สัมผัส และแลกเปลี่ยน
 ขององค์ประกอบคาร์บอน ขณะที่น้ำเลี้ยงไหลขึ้นไปตามวงของต้นไม้เท่านั้น เมื่อบางไม้ถูก
 สร้างขึ้น วงเกาจะตาย เซลล์ไลส และลิกนินจะคงอยู่สภาพเดิม แต่องค์ประกอบคาร์บอนจะไม่
 ถูกถ่ายเทกับคาร์บอน-14 ในบรรยากาศอีกต่อไป คาร์บอน-14 ในเซลล์ไลส และลิกนินจะ
 เริ่มสลายตัวไปเรื่อย ๆ อย่างไรก็ตามองค์ประกอบคาร์บอนที่ละลายอยู่ในน้ำเลี้ยง ยังคงแลกเปลี่ยน
 กับคาร์บอน-14 ในบรรยากาศอยู่ ดังนั้น ถ้าตัวอย่างไม้ถูกนำมาหาอายุโดยไม่สกัดเอา
 เรซิน และแทนนิน ที่ละลายใต้ออกก่อน อายุที่หาได้จะไม่ใช่อายุที่แท้จริง การสกัดตัวอย่างไม้
 ด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ เพื่อขจัดเรซิน และแทนนินดังกล่าวออกไป จากไม้ต้องคำนึงควยว่า
 ตัวทำละลายอินทรีย์ที่ใช่ ซึ่งปราศจากคาร์บอน-14 เลยนั้นติดค้างอยู่จะทำให้ค่าอายุที่ได้ผิด
 ไปอีก ตามการทดลองของ Jansen H.S. (1972) ถ้าไซเมทริด แอลกอฮอล์ จะติดค้างอยู่
 ในไม้มาก ไซโซโทนจะดีกว่า เพราะไม่ติดค้างอยู่เลย เมื่ออบที่ 110 ° C. หลังการสกัดแล้ว
 เฉพาะเรซินในไม้อาจใช้สารละลายของโซดาไฟเจือจางออกได้ แต่ควรระวังว่าสารละลายที่
 ไซต้องไม่มีคาร์บอน-14 เหนือเจือปนอยู่ สำหรับตัวอย่างไม้ที่โตมาจากแถบที่มีน้ำกระค้าง ต้องคิดว่า
 อายุที่หาได้เป็นอายุที่ต่ำกว่าเป็นจริงที่จะเป็นไปได้ (upper limit) ทั้งนี้เนื่องจากในน้ำ
 กระค้างมีคาร์บอนที่ปราศจากคาร์บอน-14¹ (upper limit) ปนอยู่มาก

ตัวอย่างดิน โดยทั่วไปดินเป็นส่วนผสมของพืช, สัตว์ที่เน่าเปื่อย, ไมโครเบียล
 ชีวิต และส่วนใหญ่เป็นองค์ประกอบทางอินทรีย์ มีกรดฮิวมิกปนอยู่มากเล็กน้อย ซึ่งจะทำให้ค่า
 อายุที่หาได้เก่าไปกว่าเป็นจริง² และจำเป็นต้องสกัดเอาออกก่อนที่จะนำไปหาอายุ โดยใช้-

1. Olsson I.U. and Kilicci S. Uppsala natural radiocarbon measurements IV Radiocarbon 6, 1964, 291-307
2. Sharpenseel H.W. Natural Radiocarbon Measurement on Soil Organic Matter Fractions and on Soil Profiles of Difference Pedogenesis 8th Int. Conf. on Radiocarbon Dating, New Zealand 18-25 October, 1972, 382-388

สารละลายโซดาไฟเจือจาง และน้ำกลั่น อย่างไรก็ตามเนื่องจากดินมีองค์ประกอบที่เป็นคาร์บอนอยู่น้อย ดังนั้นปกติ จึงต้องใช้ตัวอย่างเป็นจำนวนมาก

ตัวอย่างเนื้อสัตว์, ขนสัตว์ และหนังสัตว์ ตัวอย่างเหล่านี้เป็นตัวอย่างที่ดีในการหาอายุ เพราะให้ค่าที่ถูกต้องโดยไม่ต้องใช้สารเคมี ซักสิ่งเปราะเปื้อนแต่อย่างใด เพียงแต่ล้างด้วยน้ำกลั่นเท่านั้น ปัญหาที่เกิดขึ้นก็คือจะหาตัวอย่างเหล่านี้ได้ยาก เพราะมักถูกทำลายเน่าเปื่อยไปหมด

ตัวอย่างเปลือกหอย ส่วนที่หาค่าอายุที่ถูกต้องได้แก่ส่วนที่ไม่ใช่คาร์โบเนต คือสารคองคิโอลิน (conchiolin) ซึ่งมีอยู่ประมาณร้อยละ 1-2 ในเปลือกหอยใหม่ ๆ และจะลดน้อยลงไปตามอายุของเปลือกหอยนั้น Berger R. et al (1964) ได้ให้รายละเอียดไว้แล้วเกี่ยวกับการสกัดคองคิโอลิน จากเปลือกหอยเพื่อใช้หาอายุ ส่วนที่เป็นคาร์โบเนตในเปลือกหอยมักจะให้ค่าอายุอ่อนกว่าเป็นจริง เนื่องจากมีการแลกเปลี่ยนกับคาร์บอน-14 ใส่ออกไซด์ ในบรรยากาศปัจจุบัน หรือแลกเปลี่ยนกับไบคาร์โบเนต, คาร์โบเนต, กรดคาร์บอนิกในน้ำทะเลปัจจุบัน ถ้าเป็นตัวอย่างที่เก็บจากทะเล ซึ่งมีปริมาณคาร์บอน-14 อยู่สูง เนื่องจาก Bomb Effect การละลายเอาคาร์โบเนตเฉพาะที่ผิว นอกของเปลือกหอย จึงเป็นวิธีที่สกัดคาร์โบเนตที่ถูกเจือปนโดยคาร์บอน-14 ในปัจจุบันได้บ้างแต่ถึงกระนั้น การรายงานผลก็ควรรายงานว่าเป็นค่าที่อ่อนที่สุดที่จะเป็นไปได้ (lower limit)

ตัวอย่างกระดูก ส่วนที่เป็นคอลลาเจน (collagen) ในกระดูกซึ่งมีอยู่ประมาณร้อยละ 25 ในกระดูกใหม่ๆ จะให้ค่าอายุที่ถูกต้องที่สุด แต่ปริมาณคอลลาเจน จะลดน้อยลงไปตามความเก่าของกระดูกนั้น Berger R. et al (1964), Krueger H.W.(1965) และ Longin R.(1971) ได้รายงานวิธีสกัดเอาคอลลาเจนออกจากกระดูก เพื่อใช้หาอายุไว้โดยละเอียดแล้ว

ตัวอย่างถ่านไม้ เนื่องจากถ่านไม้มีความพรุน จึงดูดซับเอาสารละลายต่าง ๆ ได้ดี ราก่อนต้นไม้สามารถซอซเข้าไปได้ง่าย จึงควรสกัดเอาสารเจือปนออกจากตัวอย่างถ่านไม้ก่อน โดยใช้วิธีเดียวกันกับการเตรียมตัวอย่างดิน ราก่อนต้นไม้ นอกจากจะสกัดออกโดยใช้เคมีแล้ว Vance C. et al(1966) ยังได้รายงานวิธีการแยกออกทางเคมีด้วย

ตัวอย่างเหล็ก เหล็กถูกทำให้เป็นเครื่องมือเครื่องใช้โดยวิธีถลุง ซึ่งมีการใช้
 การบอบเข้าช่วย ในการถลุง และช่วยให้เหล็กแข็ง เหล็กหลอมจะมีคาร์บอนอยู่ประมาณร้อยละ
 1.5-5.0 คาร์บอนที่อยู่ในเนื้อเหล็กนี้ จะถูกรักษาไว้อย่างดี โดยไม่ถูกเจือปนโดยกรด
 อิวมิก, กรากอนหรือสารเจือปนอย่างอื่น Van de Merwe (1968) ยังรายงานถึงข้อดีอีก
 ประการหนึ่งในการหาอายุด้วยตัวอย่างเหล็ก กล่าวคือ การถลุงแร่เหล็กทำเครื่องมือในสมัย
 โบราณ มักใช้ท่อนไม้สด กวนในการถลุง ด้วยเหตุนี้ จึงไม่มีปัญหาเรื่องอายุที่หาได้นั้นจะเป็น
 อายุที่อ่อนกว่าจริงเนื่องจากต้นไม้ โคนกอนนานมาแล้ว จึงมาใช้เป็นเครื่องมือเครื่องใช้
 ซึ่งเป็นปัญหาสำหรับตัวอย่างไม้และตัวอย่างถ่านไม้

2.3.4.2 การเปลี่ยนตัวอย่างโบราณวัตถุ และสารมาตรฐานให้เป็นสารประกอบ
 ที่ใช้นัมรังสี

โดยทั่วไปใช้วิธีเผาตัวอย่างโบราณวัตถุในหลอดโลหะทนไฟ และใช้ออกซิเจนที่
 มากเกินพอเผาเข้า Rafter T.A. (1955a) ใช้โลหะผสมชื่อ อินโคเนล (Inconel
 alloy) ซึ่งทนความร้อนได้ 900° ซ. และใช้เตาไฟฟ้าเผา, Polach H.A. (1966)
 ใช้หลอดไวคอร์ (Vycor) และใช้ตะเกียงเบนเซนธรรมดา การเผาคงมีคิวปริกออกไซด์
 ที่เผาที่ 650° ซ. ไว้ เพื่อเปลี่ยนคาร์บอนมอนอกไซด์ ที่เกิดขึ้นจากการสันดาปที่ไม่สมบูรณ์ให้
 เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ให้หมด การทำคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้บริสุทธิ์ตามวิธีของ Rafter
 T.A. (1955a) เพื่อนัมรังสีโดยเครื่องนัมรังสีแบบพรอพเพอร์ชันนัล (Proportional
 counter) ทำได้โดยแยกเอาซิลเฟอรไตรออกไซด์ออก โดยใช้สารละลายของไฮโอดีน
 และโปแตสเซียมไฮโอไดค์, กูดแกชฮาโลเจน (Halogen gas) ออกโดยใช้สารละลาย
 เงินไนเตรท และทำให้คาร์บอนไดออกไซด์แห้ง ด้วยกรดโครมิก แล้วจึงจับคาร์บอนไดออก-
 ไซด์ที่บริสุทธิ์นั้นไว้ด้วยเครื่องดักแกชที่แช่เย็นด้วยออกซิเจนเหลว

1. Joseph W. Michaels. Dating Methods in Archaeology, New York
 and London : Seminar Press, Inc. 1973

การทำให้บริสุทธิ์ขั้นสุดท้าย เพื่อให้ปราศจากสิ่งเจือปนที่เป็นธาตุที่จับอิเล็กตรอนได้ดี (electronegative impurities) ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพการนับรังสี โดยเครื่องนับรังสีแบบพรอพเพอร์ชันนั้นลดลง ทำได้โดยจับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยปูนขาวที่เผาไว้ที่ 800°C . ลดอุณหภูมิมาที่ 450°C . ทำให้เป็นสูญญากาศโดยเครื่องสุญญากาศ แล้วจึงเผาที่ 900°C . เพื่อให้คาร์บอนไดออกไซด์ที่บริสุทธิ์ปราศจากธาตุที่จับอิเล็กตรอนได้ดีออกมา

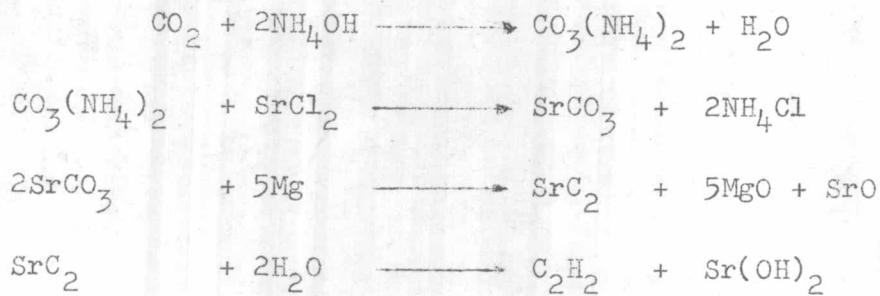
การเตรียมคาร์บอนไดออกไซด์ โดยวิธีสันดาปมีอีกวิธีหนึ่งคือใช้ Combustion Bomb ซึ่งเป็นถังเหล็กปิด บรรจุสารตัวอย่างกับออกซิเจนที่มีความดันสูงไว้ และจุดให้ระเบิด วิธีนี้จะใช้เวลาเตรียมสั้นกว่าวิธีที่กล่าวข้างต้นมาก แต่มีโอกาสที่เครื่องมือจะระเบิดได้ Richard Burleigh (1972) และ Switsur V.R. (1972) ได้รายงานวิธีเปลี่ยนโบราณวัตถุให้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ ด้วยวิธีนี้ไว้อย่างละเอียดแล้ว

การเตรียมคาร์บอนไดออกไซด์จากตัวอย่างสารที่เป็นคาร์โบเนต เช่น เปลือกหอย และกระดูก ทำได้โดยเติมกรดเจือจาง โดยมากใช้กรดที่ไม่ระเหยกลายเป็นไอได้ เช่น กรดกำมะถันเจือจางหรือกรดฟอสฟอริกเจือจาง

สารมาตรฐานในรูปของกรรออกซาลิคสามารถเปลี่ยนให้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ได้ โดยทำให้ปฏิกิริยากับค่างทับทิม ในสารละลายที่เป็นกรด วิธีที่ได้คาร์บอนไดออกไซด์จากสารละลายนี้ หลังจากปฏิกิริยาสมบูรณ์แล้วต้องไล่คาร์บอนไดออกไซด์ออกให้หมด โดยใช้ไนโตรเจนผ่านลงในสารละลายนั้น

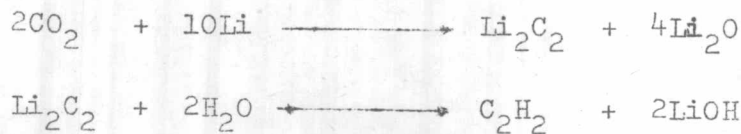
การเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์ให้เป็นมีเทนและนับรังสีเพื่อหาคาร์บอน-14 มีผู้นิยมใช้กันเนื่องจากไลค่าความแรงรังสีจากสภาพแวดล้อม (Background) ต่ำกว่าการนับรังสีคาร์บอนไดออกไซด์ เนื่องจากปริมาณของมีเทนต่อจำนวนปริมาณคาร์บอน เล็กกว่า ปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์ ต่อจำนวนปริมาณคาร์บอน Rurke et al (1955) และ Fairhall A.W. et al (1961) ได้รายงานถึงรายละเอียดวิธีการเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์ให้เป็นมีเทน โดยใช้รูทีเนียม แคตาลิสต์ไว้แล้ว

การเตรียมอะเซททีลีนเพื่อนำรังสีจากคาร์บอนไดออกไซด์ โดยวิธีของ Suess
H.E. (1954) มีระดับขั้นตอนคือ



จะเห็นว่าในขบวนการเตรียมสะดวกไม่ตองใช้เครื่องตั้งแก๊สโดยความเย็นหรือระบบ
สูญญากาศเลย จนถึงขั้นก่อนบรรจุเข้าเครื่องนำรังสีแบบพรอพเพอร์ชนิด ผลของอะเซททีลีนที่ทำ
โดยวิธีนี้ได้ประมาณร้อยละ 90-100

วิธีการเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์ ให้เป็นอะเซททีลีนตามวิธีของ Barker H.
(1953) ใช้วิธีเผากับโลหะลิเทียม ที่ปริมาณมากเกินไปร้อยละ 50 และได้ผลอะเซททีลีน
ประมาณร้อยละ 65



วิธีนี้ Polach H.A. (1966) ได้ดัดแปลงโดยเพิ่มอุณหภูมิที่เผากับโลหะลิเทียมขึ้น
เป็น 600 °ซ. และใช้โลหะลิเทียมที่ปริมาณมากเกินไปเพียงร้อยละ 10 จะได้ผลอะเซททีลีน
ประมาณร้อยละ 98 ถึงแม้วิธีนี้ต้องใช้ระบบสูญญากาศ และเครื่องตั้งแก๊สด้วยความเย็น แต่
ระดับขั้นตอนการเตรียมอะเซททีลีนไม่ยุ่งยากเหมือนวิธีของ Suess H.E. (1954) ตามที่
กล่าวมา จึงมีผู้นิยมใช้วิธีกันในปัจจุบัน

การนำรังสีคาร์บอน-14 จากอะเซททีลีนมีข้อได้เปรียบกว่าการนำรังสีคาร์บอน-14
จากมีเทน คือได้ค่าความแรงรังสีจากสภาพแวดล้อมต่ำกว่า เพราะจำนวน C/C₂H₂ สูงกว่า
C/CH₄ ในปริมาตรเดียวกัน

การเตรียมเบนซีนจากเซททีลีน

การเตรียมเบนซีนจากตัวอย่าง โบราณวัตถุใช้วิธีเตรียมผ่านชั้นต่าง ๆ คือผ่าน แกชคาร์บอนไดออกไซด์ และเซททีลีนตามที่กล่าวมา อาจรวมการเตรียมคาร์บอนไดออกไซด์ และเซททีลีน จนถึงขั้นการเปลี่ยนให้เป็นเบนซีนไว้ในระบบสูญญากาศอันเดียวกันเพื่อความสะดวก

เซททีลีนที่จะใช้เตรียมเบนซีน ต้องทำให้บริสุทธิ์ก่อน โดยเฉพาะแกชแอมโมเนีย ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างไฮโดรเจนกับไนโตรเจนที่เคลือบไว้ที่ผิวของโลหะลิเทียม เพื่อป้องกันปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ แกชแอมโมเนียจะถูกเปลี่ยนให้เป็นสารอินทรีย์ที่ไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบโดยแคตาลิส และจะเป็นตัวทำให้ประสิทธิภาพการนำรังสีลดลง (Quenching agent) ในการนำรังสีแบบซินทิลเลชันในของเหลว วิธีจัดเอาแกชแอมโมเนียจากเซททีลีนทำได้โดยผ่านแกชที่โคลงในหลอดแก้วที่บรรจุควยแท่งแก้วสั้น ๆ ที่เคลือบไว้ด้วยกรรพอสฟอริกเข้มข้น

แกชเซททีลีนที่บริสุทธิ์แล้ว จับไว้โดยเครื่องดักที่อุณหภูมิของไนโตรเจนเหลวและคอย ๆ ปล่อยให้ระเหิดเป็นแกชที่ละน้อย เข้าไปในหลอดแก้วที่บรรจุ แวนนาเดียมเพนทอกไซด์แคตาลิสที่อุณหภูมิต่ำกว่า 5 °C. จนหมด ทิ้งให้แคตาลิสกับเซททีลีนไว้ด้วยกันตลอดกลางคืน แคตาลิสจะทำให้แกชเซททีลีนเปลี่ยนไปเป็นเบนซีนคือ



เบนซีนที่เกิดขึ้นจะถูกดูดไว้ในแคตาลิส และจะเอาออกมาได้โดยวิธีเผา แคตาลิสที่อุณหภูมิกว่า 80 °C. ให้เบนซีนระเหยออกมา และดักไว้ด้วยเครื่องดักที่อุณหภูมิของไนโตรเจนเหลว และใช้เครื่องดูดอากาศช่วยที่ความดันประมาณ 0.2 ม.ม. ปรอท

วิธีเตรียมเบนซีนจากเซททีลีนให้โดยลดี โดยใช้แวนนาเดียมเพนทอกไซด์ แคตาลิสที่ยังขัดแย้งกันอยู่ระหว่างวิธีของ Polach H.A. et al (1972) และ Coleman D.D. et al (1972) ซึ่งจะกล่าวโดยละเอียดในการศึกษาและทดลองครั้งต่อไป

2.3.4.3 การนับรังสีสารประกอบที่ได้จากการเปลี่ยนจากตัวอย่างโบราณวัตถุ

2.3.4.3.1 การนับด้วยเครื่องนับรังสีแบบพรอพพอร์ชันนัล, สำหรับตัวอย่างโบราณวัตถุที่ได้เปลี่ยนให้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์, มีเทน อเซททีลีนแล้วสามารถนับรังสีได้ด้วยเครื่องนับรังสีแบบพรอพพอร์ชันนัล โดยใช้การนับแบบแอนติโคอินซิเดนซ์ (anticoincidental counting) เข้าช่วยเพื่อลดระดับรังสีจากสภาพแวดล้อมให้เหลือน้อยลง Fergusson G.J.(1955) และ Burke W.H. et al (1955) ได้รายงานถึงรายละเอียดของเครื่องนับรังสีชนิดนี้ไว้แล้ว

2.3.4.3.2 การนับด้วยเครื่องนับรังสีแบบซินทิลเลชันในของเหลว ตัวอย่างโบราณวัตถุที่ได้เปลี่ยนให้เป็นเบนซีนแล้วสามารถนับรังสีได้ด้วยเครื่องนับรังสีแบบซินทิลเลชันในของเหลว กล่าวคือ ใช้เบนซีนที่ได้นั้นเป็นตัวทำละลายสำหรับสารที่ทำให้เกิดซินทิลเลชันซึ่งเป็นของแข็ง เช่น PPO (2,5-Diphenyl oxazole), POPOP [p-Bis 2-(5-phenyl oxazole)benzene], Dimethyl POPOP [1, 4-bis-2(4-Methyl-5) Phenyl oxazole] สารพวกนี้เมื่อถูกรังสีเบตา จะเกิดประกายแสงสว่าง (Scintillation) ขึ้น เครื่องนับรังสีชนิดนี้จะมีเครื่องนับประกายแสงสว่างนี้ เพื่อเปลี่ยนให้เป็นค่าความแรงรังสี Leger C. et al (1963) ได้รายงานถึงเครื่องนับรังสีแบบซินทิลเลชันในของเหลว โดยใช้เครื่องนับประกายแสงสว่างชนิดที่มีการรบกวนน้อย (Low noise) เพียง 1 เครื่อง แคส่วนมาก เครื่องนับรังสีแบบซินทิลเลชันในของเหลวที่มีขายโดยทั่วไป จะเป็นชนิดที่นับแบบโคอินซิเดนซ์ (Coincidental counting) เพื่อลดระดับรังสีจากสภาพแวดล้อมให้น้อยลงไป

อนึ่ง ภาชนะใส่เบนซีน และสารที่ทำให้เกิดซินทิลเลชัน จะต้องเป็นแก้วใสชนิดที่มีโปแตสเซียมต่ำด้วย เนื่องจากในธรรมชาติ มีโปแตสเซียม-40 ซึ่งเป็นไอโซโทปกัมมันตรังสี และจะทำให้ค่าความแรงรังสีจากสภาพแวดล้อมเพิ่มขึ้น



000588

2.3.5 การคำนวณหาอายุโบราณวัตถุโดยใช้กฎการสลายตัวของสารกัมมันตรังสี

ขั้นแรกเปลี่ยนตัวอย่างโบราณวัตถุให้เป็นสารที่พร้อมจะนับรังสี และนับรังสีด้วยเครื่องมือที่เหมาะสมดังกล่าวให้นานพอ (T_S) จนได้จำนวนนับที่มีค่าสูงค่าหนึ่งทีกรณที่ที่สองของมีนน้อยกวารอยละ 1 ของจำนวนนับรังสีนั้นสมมติเท่ากับ M_{S+b} นับความแรงรังสีของสภาพแวดล้อมด้วยเวลา T_b สมมติเท่ากับ M_b

ดังนั้น จำนวนนับรังสีของตัวอย่างโบราณวัตถุต่อหนึ่งหน่วยเวลา

$$A_s = \frac{M_{S+b}}{T_S} - \frac{M_b}{T_b}$$

ขั้นที่สองเปลี่ยนกรตออกซาลิคมาตรฐานให้เป็นสารที่พร้อมจะนับรังสี แล้วนับรังสีด้วยเครื่องมือเครื่องเดียวกันนั้น ให้นานพอ (T_o) จนได้จำนวนนับที่มีค่าสูงค่าหนึ่งทีกรณที่ที่สองของมีนน้อยกวารอยละ 1 ของจำนวนนับรังสีนั้น สมมติเท่ากับ M_{o+b}

ดังนั้น จำนวนนับรังสีของกรตออกซาลิคมาตรฐานต่อหนึ่งหน่วยเวลา A_t เท่ากับ

$$\left(\frac{M_{o+b}}{T_{o+b}} - \frac{M_b}{T_b} \right) 0.95 \text{ แก่ } A_t \text{ ที่ได้ให้เป็นความแรงรังสีที่ } 1.1958 \text{ โดยใช้สูตร..(6)}$$

จะได้ค่า A_o

ขั้นที่สาม หาอายุโบราณวัตถุเป็นจำนวนปี (t) นับจาก 1.1.1958

$$t = T_m \ln \frac{A_o}{A_s} \dots\dots\dots(7)$$

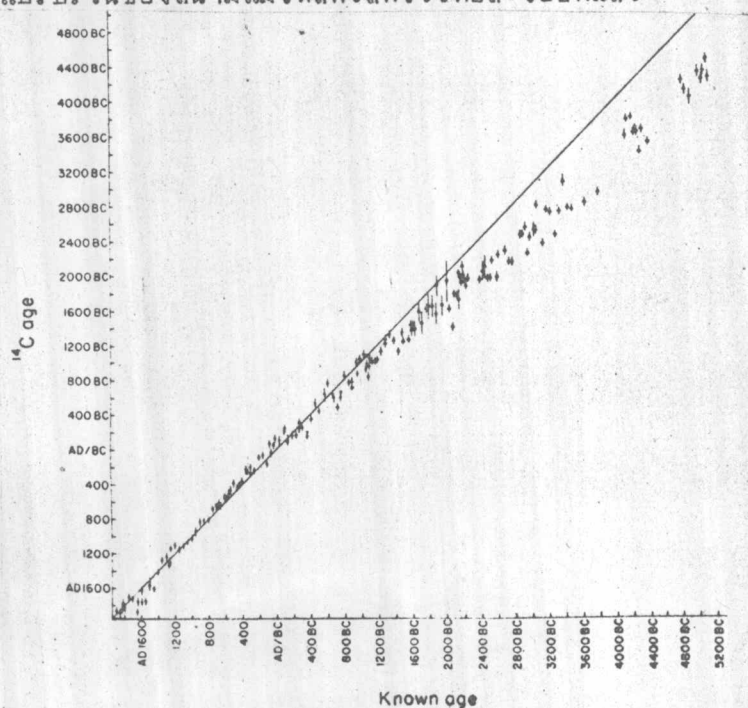
2.4 ความคลาดเคลื่อนและการแก้ไขความคลาดเคลื่อนในการหาอายุโดยเทคนิคการนับรังสีคาร์บอน-14

2.4.1 สาเหตุจากการแปรปรวนของสนามแม่เหล็กโลก

ตามที่กล่าวมาแล้ว ถือว่าระดับความแรงรังสีคอสมิกคงที่ ดังนั้นการเกิดคาร์บอน-14 จึงคงที่ด้วย อย่างไรก็ตาม การแปรปรวนของสนามแม่เหล็กโลก ในอดีตทำให้ระดับความแรงรังสีคอสมิกในเวลานั้นแปรผันไปเล็กน้อย Vries H.de(1958) เป็นผู้พบการผันแปรอันนี้เป็นคนแรก

และมีผู้นำความรู้เรื่องนี้ไปศึกษาโดยเฉพาะ Ralph E.K. et al (1971) ได้พยายามหาทางแก้ไข เพื่อให้ได้ค่าอายุที่แท้จริงจากการนับรังสีคาร์บอน-14 ซึ่งทำได้โดยใช้อายุจริงจากวงปีของต้นสนบางชนิด (Sequoia และ bristle cone pine) ซึ่งมีอายุเก่ามากถึง 5145 ปี ก่อนคริสตกาล เมื่อทำการหาอายุวงปีของต้นสนเหล่านี้ โดยวิธีนับรังสีคาร์บอน-14 จากแต่ละวงปีนั้น จะมีความแตกต่างกัน ในค่าอายุ และเห็นได้ชัดจนค่าอายุต่ำกว่า 1000 ปี ก่อนคริสตกาล ดังรูปที่ 1

Michael H.N. et al (1972) และ Damon P.E. et al (1972) ได้รายงานถึงตัวเลขที่แน่นอน และทำเป็นตารางไว้ สำหรับแก้ความคลาดเคลื่อนของค่าอายุ เนื่องจากการแปรปรวนของสนามแม่เหล็กโลกไว้โดยละเอียดแล้ว



รูปที่ 1 อายุที่หาได้โดยการนับรังสีคาร์บอน-14 กับอายุจริงของวงปีของต้นสนชนิด Sequoia และ Bristle cone¹

1. Ralph E.K., Michael H.N. Dating techniques for the archaeologist MIT Press, 1971

2.4.2 สาเหตุเนื่องจากไอโซโทป เอฟเฟค (Isotope Effect)

Craig H. (1953) ได้รายงานว่าในขบวนการเคมีใด ๆ โดยเฉพาะในขบวนการสังเคราะห์แสงของพืช, การสร้างลิกนิน เซลลูโลสและส่วนอื่น ๆ ของพืช จะมีไอโซโทปแฟรคชันเนชัน (Isotopic fractionation) ซึ่งหมายถึงว่า สัดส่วนของคาร์บอน-14 ต่อคาร์บอน-12 ในพืชจะมีค่าต่างไปจากสัดส่วนของคาร์บอน-14 ต่อคาร์บอน-14 ในบรรยากาศขณะที่พืชมีชีวิตอยู่นั้น

Craig H. ได้ใช้ Peedee Belemnite Chicago Lime Stone เป็นสารมาตรฐาน (PDB Ch. Lst. Std.) ในการเปรียบเทียบ $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ สำหรับตัวอย่างทางธรณีวิทยา และตัวอย่างโบราณวัตถุ โดยกำหนดค่า $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ ขึ้นซึ่ง

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}} = \frac{^{13}\text{C}/^{12}\text{C}_{\text{sample}} - ^{13}\text{C}/^{12}\text{C}_{\text{PDB Ch. Lst. Std.}}}{^{13}\text{C}/^{12}\text{C}_{\text{PDB Ch. Lst. Std.}}} \times 10^3 \%$$

ปรากฏว่า ค่าเฉลี่ยของ $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ ของตัวอย่างใด ๆ ที่มีคาร์บอนและพบบนพื้นดินจะเท่ากับ -25 % ในการหาอายุโดยเทคนิคการนับรังสีคาร์บอน-14 ส่วนมากแล้วโบราณวัตถุนั้นจะพบบนพื้นดิน หรือเป็นตัวอย่างที่มาจากพื้นดิน ดังนั้น ถึงแม้จะหาค่า $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ ของตัวอย่าง เทียบกับ PDB Ch. Lst. Std. แต่ควรจะใช้ค่าหนึ่งคูณเข้ากับค่า $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ ของตัวอย่างจากพื้นดิน เพื่อให้มีค่าเท่ากับศูนย์ นั่นคือ

$$\frac{^{13}\text{C}/^{12}\text{C}_{\text{land borne sample}} - 0.975 \ ^{13}\text{C}/^{12}\text{C}_{\text{PDB}}}{0.975 \ ^{13}\text{C}/^{12}\text{C}_{\text{PDB}}} = 0$$

หรือ $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}_{\text{wood}} = ^{13}\text{C}/^{12}\text{C}_{\text{PDB}} \times 0.975$

1. Ralph E.K., Michael H.N. Dating techniques for the archaeologist, MIT Press, 1971

อาจเขียนได้ว่า ค่า δ^{13C} ของตัวอย่างจากพื้นดินเทียบกับ 0.975 PDB
มีค่าเท่ากับศูนย์ หรือเขียนว่า ค่า δ^{13C} ของตัวอย่างจากพื้นดิน = 0

อย่างไรก็ตามค่า 0.975 PDB ของกรดออกซาลิกมาตรฐานไม่เท่ากับศูนย์
ทั้งนี้ เนื่องจากเกิดไอโซโทปแปรผันขึ้นขึ้นในขบวนการเตรียมกรดออกซาลิกนี้จากต้น
ไม้ที่มีชีวิตอยู่ในคริสต์ศตวรรษที่ 19

จากการหาค่าเฉลี่ย δ^{13C} ของกรดออกซาลิกมาตรฐานเท่ากับ -19.0‰
หรือค่าเฉลี่ย 0.975 PDB ของกรดออกซาลิกมาตรฐานเท่ากับ + 6.1 ‰

สำหรับค่า δ^{13C} ของตัวอย่างที่ได้จากทะเลไม่เท่ากับศูนย์

การใช้ค่า δ^{13C} ของตัวอย่าง เพื่อแก้ความแรงรังสีคาร์บอน-14

Hulston J.R. (1961) ไคทำไวคังนี้

ให้
$$R = \frac{A_{\text{sample}}}{A_{1890 \text{ wood}}} \times \left[\frac{^{13}\text{C}/^{12}\text{C}_{1890 \text{ wood}}}{^{13}\text{C}/^{12}\text{C}_{\text{Sample}}} \right]^2$$

จากที่กล่าวมา $A_{1890 \text{ wood}} = 0.95 A_{\text{NBS Oxalic acid Std.}}$

และ $(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{1890 \text{ wood}} = 0.975 (^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{PDB Ch.Lst.Std.}}$

ดังนั้น
$$R = \frac{A_{\text{sample}}}{0.95 A_{\text{ox Acid}}} \times \left[\frac{^{13}\text{C}/^{12}\text{C}_{\text{PDB}} \times 0.975}{^{13}\text{C}/^{12}\text{C}_{\text{sample}}} \right]^2$$

$$= \frac{A_{\text{sample}}}{A_{\text{ox Acid}}} \times \left[\frac{^{13}\text{C}/^{12}\text{C}_{\text{PDB}}}{^{13}\text{C}/^{12}\text{C}_{\text{sample}}} \right]^2 \times 1.0006$$

ตัดค่า 1.0006 ซึ่งน้อยมากทิ้งได้

โดยกำหนดค่า $\Delta^{14}\text{C}$ ซึ่ง

$$\Delta^{14}\text{C} = \frac{A_S - A_O}{A_O} \times 1000 \%$$

A_S คือ ความแรงรังสีคาร์บอน-14 ของตัวอย่างหลังจากแก้ไอโซโทปแฟรคชันเนชันแล้ว

A_O คือ ความแรงรังสีคาร์บอน-14 ของกรดออกซาลิกมาตรฐานหลังจากแก้ไอโซโทปแฟรคชันเนชันแล้ว และแก้การสลายตัวให้มีความแรงรังสีที่ 1.1.1958 แล้ว

$$\text{จะได้ } \frac{\Delta^{14}\text{C}}{1000} = \frac{A_{\text{sample}}}{A_{\text{ox Acid}}} \times \left(\frac{1}{1 + \frac{\delta^{13}\text{C}}{1000}} \right)^2 - 1$$

$$\text{ถ้ากำหนดให้ } \Delta^{14}\text{C} = \frac{A^* - A_O}{A_O} \times 1000 \%$$

A^* คือความแรงรังสีคาร์บอน-14 ของตัวอย่างเมื่อยังไม่ได้แก้ไอโซโทปแฟรคชันเนชัน

$$\text{จะได้ } \frac{\Delta^{14}\text{C}}{1000} = \left(1 + \frac{\delta^{14}\text{C}}{1000} \right) \times \left(\frac{1}{1 + \frac{\delta^{13}\text{C}}{1000}} \right)^2 - 1$$

$$= \left(1 + \frac{\delta^{14}\text{C}}{1000} \right) \left[1 - \frac{2\delta^{13}\text{C}}{1000} + \frac{3(\delta^{13}\text{C})^2}{(1000)^2} - \frac{4(\delta^{13}\text{C})^3}{(1000)^3} \right] - 1$$

$$\frac{\Delta^{14}\text{C}}{1000} = 1 - \frac{2\delta^{13}\text{C}}{1000} + \frac{3(\delta^{13}\text{C})^2}{(1000)^2} - \frac{4(\delta^{13}\text{C})^3}{(1000)^3} + \frac{\delta^{14}\text{C}}{1000} - \frac{2\delta^{13}\text{C}\delta^{14}\text{C}}{(1000)^2}$$

$$+ \frac{3(\delta^{13}\text{C})^2\delta^{14}\text{C}}{(1000)^3} - \frac{4(\delta^{13}\text{C})^3\delta^{14}\text{C}}{(1000)^4} - 1$$

$$\Delta^{14}\text{C} = \delta^{14}\text{C} - 2\delta^{13}\text{C} \left[1 + \frac{\delta^{14}\text{C} - 3/2\delta^{13}\text{C}}{1000} \right] + \text{เทอมที่น้อยมาก}$$

ตัดเทอมที่น้อยมาก ซึ่งได้แก่เทอมท้าย และค่า $3/2 \delta^{13}\text{C}/1000$

$$\Delta^{14}\text{C} = \delta^{14}\text{C} - 2 \delta^{13}\text{C} \left(1 + \frac{\delta^{14}\text{C}}{1000}\right) \%$$

$$= \left(\frac{A_m - A_o}{A_o}\right) 1000 - 2 \delta^{13}\text{C} \left(1 + \frac{A_m - A_o}{A_o}\right)$$

เมื่อ A_m คือความแรงรังสีคาร์บอน-14 ที่วัดได้

$$\Delta^{14}\text{C} = \left(\frac{A_m - A_o}{A_o}\right) 1000 - 2 \delta^{13}\text{C} \frac{A_m}{A_o}$$

ดังนั้น $A_s - A_o = A_m - A_o - 2 \frac{\delta^{13}\text{C}}{1000} A_m$

$$A_s = A_m \left(1 - \frac{2 \delta^{13}\text{C}}{1000}\right) \dots\dots\dots(8)$$

ดังนั้น ถ้าต้องการหาค่าอายุให้ถูกต้องยิ่งขึ้น จะต้องหาค่า $\delta^{13}\text{C}$ ของตัวอย่างโบราณวัตถุและของกรตอกออกซาลิคมাত্রฐาน โดยใช้เครื่องแมสสเปกโตรกราฟ แล้วจึงใช้สมการ (8) หาค่าความแรงรังสีที่ถูกต้อง (A_s) เพื่อไปแทนในสมการ(7) อย่างไรก็ตาม ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากไอโซโทปแฟรคชันมีค่าไม่มากนัก บางตัวอย่างอาจผิดพลาดไปมากกว่า 200 ปี แต่โดยเฉลี่ยแล้ว จะผิดพลาดไป 80 ปี¹

2.5 การรายงานค่าอายุ และค่าความคลาดเคลื่อนของโบราณวัตถุในการหาอายุแบบนี้รังสีคาร์บอน-14

ค่าอายุที่หาได้จากสมการ (7) อาจเปลี่ยนให้เป็นหน่วยของปีก่อนคริสตกักราช, หรือจำนวนปีนับจากเวลาปัจจุบัน แต่ที่นิยมรายงานกันคือ หน่วย B.P. (Before present) ซึ่งหมายถึงอายุเป็นปีก่อน ค.ศ. 1950

ค่าความคลาดเคลื่อนเป็นปี ที่รายงานจากผลการอายุแบบคาร์บอน-14 จะเป็นค่าความคลาดเคลื่อนรวม ของค่าความคลาดเคลื่อนจากอายุเฉลี่ยคาร์บอน-14 (T_m)

1. Barker, H. Critical assessment of radiocarbon dating. Phil. Trans. Roy. Soc. Lond. A 269, 37-45 (1970)

ค่าความคลาดเคลื่อนจาก A_0 และค่าความคลาดเคลื่อนของ A_S ในสมการที่(7) เท่านั้น มิได้รวมไปถึงความผิดพลาดอื่นใดที่อาจจะทำให้ความแม่นยำในการหาอายุโดยเทคนิคไปเลย เช่นความผิดพลาดเนื่องจากตัวอย่างโบราณวัตถุถูกปะปนโดยสารอื่นหรือความผิดพลาดเนื่องจากการแปรปรวนของระดับรังสีคอสมิก เป็นต้น

ค่าความคลาดเคลื่อนดังกล่าว Jansen H.S.(1972) ได้สร้างสูตรไว้ มีรายละเอียดดังนี้:-

จากที่กล่าวมา A_S คือจำนวนนับรังสีต่อหนึ่งหน่วยเวลาของตัวอย่างโบราณวัตถุ
 A_0 คือจำนวนนับรังสีต่อหนึ่งหน่วยเวลาของกรตออกซาลิก
 มาตรฐานที่คูณด้วย 0.95 และเปลี่ยนไปเป็นความแรงรังสี
 ที่ 1.1.1958 แล้ว

ให้ความคลาดเคลื่อนของ	$T_m = dT_m$
ความคลาดเคลื่อนของ	$A_0 = dA_0$
และความคลาดเคลื่อนของ	$A_S = dA_S$
ให้ความคลาดเคลื่อนรวมของค่าอายุ	$t = dt$

ดังนั้น

$$(dt)^2 = \left(\frac{\partial t}{\partial T_m} dT_m\right)^2 + \left(\frac{\partial t}{\partial A_0} dA_0\right)^2 + \left(\frac{\partial t}{\partial A_S} dA_S\right)^2 \dots\dots\dots(9)$$

เนื่องจาก $\frac{\partial t}{\partial T_m} = \frac{\partial}{\partial T_m} (T_m \ln \frac{A_0}{A_S}) = \ln \frac{A_0}{A_S} \dots\dots\dots(10)$

และ $\frac{\partial t}{\partial A_S} = \frac{\partial}{\partial A_S} (T_m \ln \frac{A_0}{A_S}) = T_m \frac{1}{A_0/A_S} \cdot \frac{A_0}{A_S^2} = \frac{T_m}{A_S} \dots\dots\dots(12)$

แทนค่า $\frac{\partial t}{\partial T_m}$, $\frac{\partial t}{\partial A_0}$, $\frac{\partial t}{\partial A_S}$ ใน (9)

$$(dt)^2 = \left(\ln \frac{A_0}{A_S} dT_m\right)^2 + \left(\frac{T_m}{A_0} dA_0\right)^2 + \left(\frac{T_m}{A_S} dA_S\right)^2 \dots\dots\dots(13)$$

2.4.2 สาเหตุเนื่องจากไอโซโทป เอฟเฟค (Isotope Effect)

Craig H. (1953) ได้รายงานว่าในขบวนการเคมีใด ๆ โดยเฉพาะในขบวนการสังเคราะห์แสงของพืช, การสร้างลิกนิน เซลลูโลสและส่วนอื่น ๆ ของพืช จะมีไอโซโทปแฟรคชันเนชัน (Isotopic fractionation) ซึ่งหมายถึงว่า สัดส่วนของคาร์บอน-14 ต่อคาร์บอน-12 ในพืชจะมีค่าต่างไปจากสัดส่วนของคาร์บอน-14 ต่อคาร์บอน-14 ในบรรยากาศขณะที่พืชมีชีวิตอยู่นั้น

Craig H. ได้ใช้ Peedee Belemnite Chicago Lime Stone เป็นสารมาตรฐาน (PDB Ch. Lst. Std.) ในการเปรียบเทียบ $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ สำหรับตัวอย่างทางธรณีวิทยา และตัวอย่างโบราณวัตถุ โดยกำหนดค่า $\delta^{13}\text{C}$ ขึ้นซึ่ง

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}} = \frac{^{13}\text{C}/^{12}\text{C}_{\text{sample}} - ^{13}\text{C}/^{12}\text{C}_{\text{PDB Ch. Lst. Std.}}}{^{13}\text{C}/^{12}\text{C}_{\text{PDB Ch. Lst. Std.}}} \times 10^3 \%$$

ปรากฏว่า ค่าเฉลี่ยของ $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ ของตัวอย่างใด ๆ ที่มีคาร์บอนและพบบนพื้นดินจะเท่ากับ -25% ในการหาอายุโดยเทคนิคการนับรังสีคาร์บอน-14 ส่วนมากแล้วโบราณวัตถุนั้นจะพบบนพื้นดิน หรือเป็นตัวอย่างที่มาจากพื้นดิน ดังนั้น ถึงแม้จะหาค่า $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ ของตัวอย่าง เทียบกับ PDB Ch. Lst. Std. แต่ควรจะใช้ค่าหนึ่งคูณเข้ากับค่า $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ ของตัวอย่างจากพื้นดิน เพื่อให้มีค่าเท่ากับศูนย์ นั่นคือ

$$\frac{^{13}\text{C}/^{12}\text{C}_{\text{land borne sample}} - 0.975 \ ^{13}\text{C}/^{12}\text{C}_{\text{PDB}}}{0.975 \ ^{13}\text{C}/^{12}\text{C}_{\text{PDB}}} = 0$$

$$\text{หรือ } ^{13}\text{C}/^{12}\text{C}_{\text{wood}} = ^{13}\text{C}/^{12}\text{C}_{\text{PDB}} \times 0.975$$

1. Ralph E.K., Michael H.N. Dating techniques for the archaeologist, MIT Press, 1971

อาจเขียนได้ว่า ค่า δ^{13C} ของตัวอย่างจากพื้นดินเทียบกับ 0.975 PDB
มีค่าเท่ากับศูนย์ หรือเขียนว่า ค่า δ^{13C} ของตัวอย่างจากพื้นดิน = 0

อย่างไรก็ตามค่า δ^{13C} ของกรตอกออกซาลิคมาตรฐานไม่เท่ากับศูนย์
ทั้งนี้ เนื่องจากเกิดไอโซโทปแปรผันเนชันขึ้นในขบวนการเตรียมกรตอกออกซาลิคนี้จากต้น
ไม้ที่มีชีวิตอยู่ในคริสต์ศตวรรษที่ 19

จากการหาค่าเฉลี่ย δ^{13C} ของกรตอกออกซาลิคมาตรฐานเท่ากับ -19.0%
หรือค่าเฉลี่ย δ^{13C} ของกรตอกออกซาลิคมาตรฐานเท่ากับ + 6.1 ‰

สำหรับค่า δ^{13C} ของตัวอย่างที่ได้จากทะเลไม่เท่ากับศูนย์

การใช้ค่า δ^{13C} ของตัวอย่าง เพื่อแก้ความแรงรังสีคาร์บอน-14

Hulston J.R. (1961) ได้ทำไว้ดังนี้

$$\text{ให้ } R = \frac{A_{\text{sample}}}{A_{1890 \text{ wood}}} \times \left[\frac{^{13}\text{C}/^{12}\text{C}_{1890 \text{ wood}}}{^{13}\text{C}/^{12}\text{C}_{\text{Sample}}} \right]^2$$

จากที่กล่าวมา $A_{1890 \text{ wood}} = 0.95 A_{\text{NBS Oxalic acid Std.}}$

$$\text{และ } (^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{1890 \text{ wood}} = 0.975 (^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{PDB Ch.Lst.Std.}}$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น } R &= \frac{A_{\text{sample}}}{0.95 A_{\text{Ox Acid}}} \times \left[\frac{^{13}\text{C}/^{12}\text{C}_{\text{PDB}} \times 0.975}{^{13}\text{C}/^{12}\text{C}_{\text{sample}}} \right]^2 \\ &= \frac{A_{\text{sample}}}{A_{\text{Ox Acid}}} \times \left[\frac{^{13}\text{C}/^{12}\text{C}_{\text{PDB}}}{^{13}\text{C}/^{12}\text{C}_{\text{sample}}} \right]^2 \times 1.0006 \end{aligned}$$

ตัดค่า 1.0006 ซึ่งน้อยมากทิ้งได้

$$\begin{aligned}\Delta^{14}\text{C} &= \delta^{14}\text{C} - 2 \delta^{13}\text{C} \left(1 + \frac{\delta^{14}\text{C}}{1000}\right) \% \\ &= \left(\frac{A_m - A_o}{A_o}\right) 1000 - 2 \delta^{13}\text{C} \left(1 + \frac{A_m - A_o}{A_o}\right)\end{aligned}$$

เมื่อ A_m คือความเข้มรังสีคาร์บอน-14 ที่วัดได้

$$\Delta^{14}\text{C} = \left(\frac{A_m - A_o}{A_o}\right) 1000 - 2 \delta^{13}\text{C} \frac{A_m}{A_o}$$

$$\text{ดังนั้น } A_s - A_o = A_m - A_o - 2 \frac{\delta^{13}\text{C}}{1000} A_m$$

$$A_s = A_m \left(1 - \frac{2 \delta^{13}\text{C}}{1000}\right) \dots\dots\dots(8)$$

ดังนั้น ถ้าต้องการหาค่าอายุให้ถูกต้องยิ่งขึ้น จะต้องหาค่า $\delta^{13}\text{C}$ ของตัวอย่างโบราณวัตถุและของกรตออกซาลิคมาตรฐาน โดยใช้เครื่องแมสสเปกโตรกราฟ แล้วจึงใช้สมการ (8) หาค่าความเข้มรังสีที่ถูกต้อง (A_s) เพื่อไปแทนในสมการ (7) อย่างไรก็ตาม ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากไอโซโทปแฟรคชันมีค่าไม่มากนัก บางตัวอย่างอาจผิดพลาดไปมากกว่า 200 ปี แต่โดยเฉลี่ยแล้ว จะผิดพลาดไป 80 ปี¹

2.5 การรายงานค่าอายุ และค่าความคลาดเคลื่อนของโบราณวัตถุในการหาอายุแบบนี้รังสีคาร์บอน-14

ค่าอายุที่หาได้จากสมการ (7) อาจเปลี่ยนให้เป็นหน่วยของปีก่อนคริสตกาล, หรือจำนวนปีนับจากเวลาปัจจุบัน แต่ที่นิยมรายงานกันคือ หน่วย B.P. (Before present) ซึ่งหมายถึงอายุเป็นปีก่อน ค.ศ. 1950

ค่าความคลาดเคลื่อนเป็นปี ที่รายงานจากผลการอายุแบบคาร์บอน-14 จะเป็นค่าความคลาดเคลื่อนรวม ของค่าความคลาดเคลื่อนจากอายุเฉลี่ยคาร์บอน-14 (T_m)

1. Barker, H. Critical assessment of radiocarbon dating. Phil. Trans. Roy. Soc. Lond. A 269, 37-45 (1970)

ค่าความคลาดเคลื่อนจาก A_0 และค่าความคลาดเคลื่อนของ A_S ในสมการที่(7) เท่านั้น มิได้รวมไปถึงความผิดพลาดอื่นใดที่อาจจะทำให้ความแม่นยำในการหาอายุโดยเทคนิคไปเลย เช่นความผิดพลาดเนื่องจากตัวอย่างโบราณวัตถุถูกปะปนโดยสารอื่นหรือความผิดพลาดเนื่องจากการแปรปรวนของระดับรังสีคอสมิก เป็นต้น

ค่าความคลาดเคลื่อนดังกล่าว Jansen H.S.(1972) ได้สร้างสูตรไว้ มีรายละเอียดดังนี้:-

จากที่กล่าวมา A_S คือจำนวนนับรังสีต่อหนึ่งหน่วยเวลาของตัวอย่างโบราณวัตถุ
 A_0 คือจำนวนนับรังสีต่อหนึ่งหน่วยเวลาของกรตออกซาลิก
 มาตรฐานที่คูณด้วย 0.95 และเปลี่ยนไปเป็นความแรงรังสี
 ที่ 1.1.1958 แล้ว

ให้ความคลาดเคลื่อนของ $T_m = dT_m$
 ความคลาดเคลื่อนของ $A_0 = dA_0$
 และความคลาดเคลื่อนของ $A_S = dA_S$
 ให้ความคลาดเคลื่อนรวมของค่าอายุ $t = dt$
 ดังนี้

$$(dt)^2 = \left(\frac{\partial t}{\partial T_m} dT_m \right)^2 + \left(\frac{\partial t}{\partial A_0} dA_0 \right)^2 + \left(\frac{\partial t}{\partial A_S} dA_S \right)^2 \dots \dots \dots (9)$$

$$\text{เนื่องจาก } \frac{\partial t}{\partial T_m} = \frac{\partial}{\partial T_m} \left(T_m \ln \frac{A_0}{A_S} \right) = \ln \frac{A_0}{A_S} \dots \dots \dots (10)$$

$$\text{และ } \frac{\partial t}{\partial A_S} = \frac{\partial}{\partial A_S} \left(T_m \ln \frac{A_0}{A_S} \right) = T_m \frac{1}{A_0/A_S} \cdot \frac{A_0}{A_S^2} = \frac{T_m}{A_S} \dots \dots \dots (12)$$

แทนค่า $\frac{\partial t}{\partial T_m}$, $\frac{\partial t}{\partial A_0}$, $\frac{\partial t}{\partial A_S}$ ใน (9)

$$(dt)^2 = \left(\ln \frac{A_0}{A_S} dT_m \right)^2 + \left(\frac{T_m}{A_0} dA_0 \right)^2 + \left(\frac{T_m}{A_S} dA_S \right)^2 \dots \dots \dots (13)$$

เนื่องจาก $\ln \frac{A_o}{A_s} d T_m = T_m \ln \frac{A_o}{A_s} \frac{1}{T_m} d T_m = \frac{d T_m}{T_m} \dots \dots \dots (14)$

แทนสมการ (14) ในสมการ (13)

$$(d t)^2 = \frac{t^2 (d T_m)^2}{T_m^2} + \frac{T_m^2 (d A_o)^2}{A_o^2} + \frac{T_m^2 (d A_s)^2}{A_s^2}$$

$$= T_m^2 \left[\frac{t^2 (d t_m)^2}{T_m^4} + \frac{(d A_o)^2}{A_o^2} + \frac{(d A_s)^2}{A_s^2} \right] \dots \dots \dots (15)$$

ให้ M_b คือจำนวนนับรังสีของสภาพแวดล้อมในเวลา T_b

จะได้ $A_b = \frac{M_b}{T_b}$

และได้ความคลาดเคลื่อนของ A_b เท่ากับความคลาดเคลื่อนของ $\frac{M_b}{T_b} = \frac{M_b}{T_b}$
ให้ $= dA_b$

ดังนั้น $dA_b = \frac{A_b T_b}{T_b}$

หรือ $(dA_b)^2 = \frac{A_b}{T_b} \dots \dots \dots (16)$

ถ้าให้ A_{s+b} คือจำนวนนับรังสีต่อหนึ่งหน่วยเวลาของสารตัวอย่างรวมกับของสภาพแวดล้อม

และ A_{o+b} คือจำนวนนับรังสีต่อหนึ่งหน่วยเวลาของกรรคออกซาลิคมาตรฐานรวมกับของสภาพแวดล้อม

ดังนั้น $A_s = A_{s+b} - A_b \dots \dots \dots (17)$

และ $A_o = A_{o+b} - A_b \dots \dots \dots (18)$

ทำนองเดียวกันกับสมการ (16) จะได้

$$(dA_{s+b})^2 = \frac{A_{s+b}}{T_s} \dots \dots \dots (19)$$

และ $(dA_{o+b})^2 = \frac{A_{o+b}}{T_o} \dots\dots\dots(20)$

จาก (17) ได้ $(dA_s)^2 = (dA_{s+b})^2 + (dA_b)^2 \dots\dots\dots(21)$

จาก (18) ได้ $(dA_o)^2 = (dA_{o+b})^2 + (dA_b)^2 \dots\dots\dots(22)$

แทนค่า $(dA_b)^2, (dA_{s+b})^2, (dA_{o+b})^2$ จาก(16), (19) และ (20) ตามลำดับ

ลงใน (21) และ (22) จะได้

$$(dA_s)^2 = \frac{A_{s+b}}{T_s} + \frac{A_b}{T_b} \dots\dots\dots(23)$$

$$\text{และ } (dA_o)^2 = \frac{A_{o+b}}{T_o} + \frac{A_b}{T_b} \dots\dots\dots(24)$$

ถ้า $T_s = T_o = T_b = T$

จะได้สมการ (23) เป็น $(dA_s)^2 = \frac{A_{s+b} + A_b}{T}$

จาก (17) ได้ $(dA_s)^2 = \frac{A_s + 2A_b}{T} \dots\dots\dots(25)$

และจะได้สมการ (24) เป็น $(dA_o)^2 = \frac{A_{o+b} + A_b}{T}$

จาก (18) ได้ $(dA_o)^2 = \frac{A_o + 2A_b}{T} \dots\dots\dots(26)$

แทนค่า $(dA_s)^2$ และ $(dA_o)^2$ จาก(25) และ (26) ตามลำดับลงใน (15) จะได้

$$(dt)^2 = T_m^2 \left[\frac{t^2 (dT_m)^2}{T_m^4} + \frac{A_o + 2A_b}{A_o^2 T} + \frac{A_s + 2A_b}{A_s^2 T} \right]$$

$$dt = T_m \left[t^2 \frac{(dT_m)^2}{T_m^4} + \frac{A_o + 2A_b}{A_o^2 T} + \frac{A_s + 2A_b}{A_s^2 T} \right]^{1/2} \dots\dots\dots(27)$$

ค่า $T_m = 8268$, $dT_m = \pm 58$ ปี

ค่า $\frac{dT_m}{T_m^4}$ ในสมการ (27) จึงเป็นค่าคงที่อันหนึ่งคือ $0.000,000,720 \times 10^{-6}$

ในกรณี $T_s \neq T_o \neq T_b$ แทนค่า $(dA_s)^2$ และ $(dA_o)^2$ จาก (23) และ (24)

ตามลำดับลงใน (15) ได้

$$\begin{aligned} (dt)^2 &= T_m^2 \left[\frac{t^2 (dT_m)^2}{T_m^4} + \frac{1}{A_o^2} \left(\frac{A_o + b}{T_o} + \frac{A_b}{T_b} \right) + \frac{1}{A_s^2} \left(\frac{A_s + b}{T_s} + \frac{A_b}{T_b} \right) \right] \\ &= T_m^2 \left[\frac{t^2 (dT_m)^2}{T_m^4} + \frac{1}{A_o^2} \left(\frac{A_o + A_b}{T_o} + \frac{A_b}{T_b} \right) + \frac{1}{A_s^2} \left(\frac{A_s + A_b}{T_s} + \frac{A_b}{T_b} \right) \right] \end{aligned}$$

ในการหาค่า dt จริง ๆ จะพบว่าค่าต่าง ๆ ในวงเล็บปีกกามีค่าน้อยมากจึงควรเขียน dt เป็น

$$\begin{aligned} dt &= \frac{T_m}{10^3} \left[\frac{t^2 (dT_m)^2 \times 10^6}{T_m^4} + \frac{10^3}{A_o^2} \left(\frac{A_o + A_b}{T_o/10^3} + \frac{A_b}{T_b/10^3} \right) \right. \\ &\quad \left. + \frac{10^3}{A_s^2} \left(\frac{A_s + A_b}{T_s/10^3} + \frac{A_b}{T_b/10^3} \right) \right]^{1/2} \dots\dots\dots(28) \end{aligned}$$

2.6 ปริมาณของตัวอย่างโบราณวัตถุชนิดต่าง ๆ ที่จะนำมาหาอายุได้¹

ชนิดของตัวอย่าง	ปริมาณที่ต้องการ กรัม	ปริมาณต่ำสุดที่จะหาอายุได้ กรัม
ถ่านไม้	8-12	1
ไม้	10-30	3
เปลือกหอย (ใช้คาร์บอน)	30-100	5
เปลือกหอย (ใช้คอกรีโอดีน)	500-2500	200
กระดูก (ใช้คาร์บอน)	100-500	50
กระดูก (อายุน้อยกว่า 5,000 ปี และใช้โคลลาเจน)	200-500	100
กระดูก (อายุมากกว่า 5,000 ปี และใช้โคลลาเจน)	400-1000	250
เหล็กหล่อ	100-150	30
เหล็กกล้า	300-500	150
พืช	10-25	3

1. Joseph W. Michels Dating Methods in Archaeology New York and London : Seminar Press, Inc. 1973.

