

## บทที่ 2

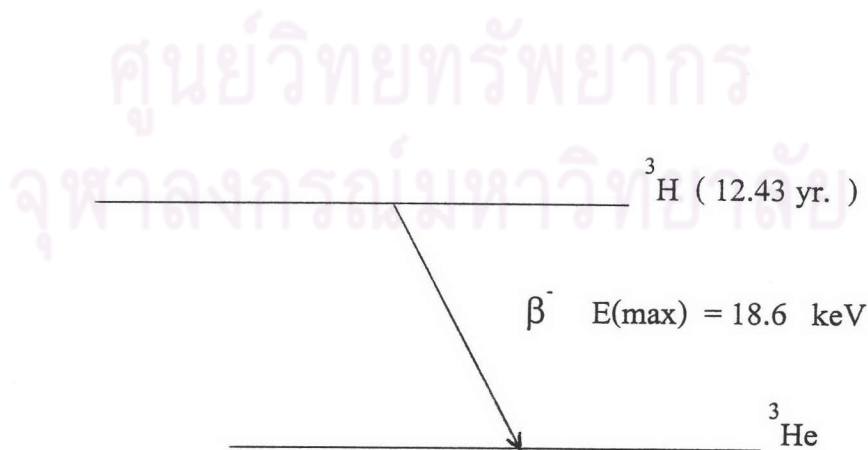
### ทฤษฎี

#### ทริเทียม

ทริเทียม เป็นไอโซโทปหนึ่งของธาตุไฮโดรเจน ทริเทียมมีมวล 3 หน่วย สัญลักษณ์นิวเคลียร์  $^3\text{H}$  หรือ T มีครึ่งชีวิต 12.43 ปี สลายตัวให้รังสีเบตา พลังงานสูงสุด 18.6 keV. พลังงานเฉลี่ย 5.7 keV.

#### ตารางที่ 2.1 ไอโซโทปของไฮโดรเจน

Symbol	Mass (amu)	Abundance (%)	
$^1\text{H}$ , H	1.00782503	99.985	Stable
$^2\text{H}$ , D	2.01410178	0.015	Stable
$^3\text{H}$ , T	~ 3	rare	Radioactive

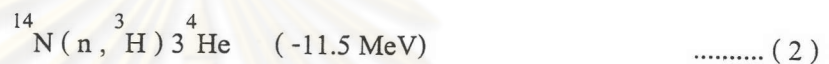
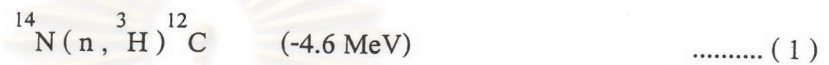


รูปที่ 2.1 Decay scheme of Tritium Isotope

## 1. แหล่งกำเนิดตรีเทียม

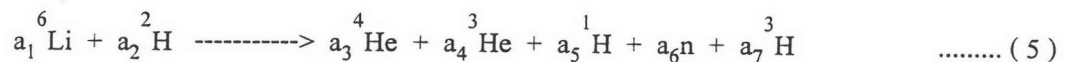
ตรีเทียมมีแหล่งกำเนิดสำคัญมาจากสองแหล่งคือ

1.1 เกิดขึ้นเองในธรรมชาติ ( Natural Tritium ) ตรีเทียมในธรรมชาติเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาจากรังสีคอสมิกนิวตรอน (Cosmic neutron) ในชั้นบรรยากาศเบื้องบน เป็นปฏิกิริยา fast neutron reaction และปฏิกิริยาของรังสีคอสมิกกับโมเลกุลออกซิเจน



ในอัตราประมาณ 4 MCi/y ในธรรมชาติจะมีอยู่ 70 MCi ความแรงรังสีของตรีเทียมในน้ำฝนและหิมะมีค่าอยู่ระหว่าง 25 TU ที่ High latitude และ 4 TU ที่เส้นศูนย์สูตร (Equator) ในสภาวะสมดุล (Equilibrium) ประมาณว่า ตรีเทียมที่เกิดจากรังสีคอสมิก มีค่า Isotope ratio  ${}^3\text{H}/{}^1\text{H}$  ใน Precipitation เท่ากับ  $2 - 5 \times 10^{-18}$  และในน้ำทะเลมีค่าเท่ากับ  $1 - 2 \times 10^{-20}$

1.2 เกิดจากมนุษย์สร้างขึ้น ตรีเทียมที่มนุษย์สร้างขึ้นมาจากสามแหล่งสำคัญคือ การทดลองระเบิดเทอร์โมนิวเคลียร์ (Thermonuclear) ดังสมการ (5)

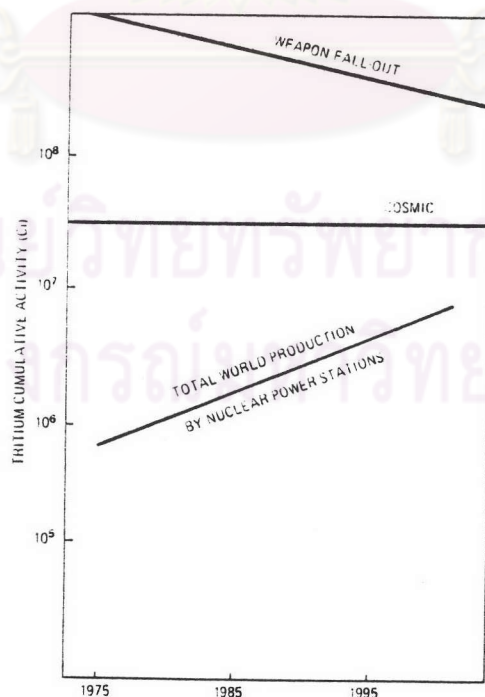


parameter  $a_1 \dots\dots a_7$  มีค่าขึ้นอยู่กับ การออกแบบอาวุธนิวเคลียร์ [ Calf, 1976 ]

นอกจากนี้ยังปลดปล่อยมาจาก โรงงานนิวเคลียร์ ( โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ และ วัฏจักรเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ ) และการวิจัยทางธรณีฟิสิกส์ แต่ในส่วนใหญ่เกิดจากการทดลองระเบิดนิวเคลียร์ ซึ่งเริ่มต้นในปี ค.ศ. 1953 และมีปริมาณสูงสุดถึง 3100 Ci ในปี 1963 ซึ่งคาดว่าจะสลายตัวลงสู่ระดับธรรมชาติ (70 MCi) ในปี 2030 ตรีเทียมที่เกิดขึ้นกระจายสู่บรรยากาศและตกลงสู่พื้นพร้อมกับฝน หิมะ ลงสู่แหล่งน้ำผิวดินและชั้นใต้ดิน โดยมีอัตรา Deposition velocity ในช่วง 0.4 - 0.8 cm/s

ตารางที่ 2.2 Tritium Emissions and Transfers from Various Power Reactors [ Technical , 1981]

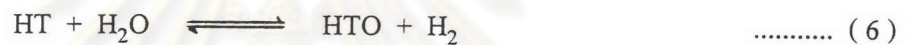
Reactor type	Emitted to the environment			Transferred to reprocessing plant kCi/GW(e)y
	kCi/GW(e)y	Gaseous (%)	Liquid (%)	
PWR	0.55 - 1	1	99	15 - 20
BWR	0.1 - 0.4	10 - 50	90 - 50	15 - 20
HWR	24	90	10	20 - 24
AGR	4.5	10	90	12 - 13
FBR	< 1	-	-	low
HTGR	< 8.5	~ 100	~ 0	10 - 17



รูปที่ 2.2 Tritium Inventory [ Technical 1981]

## 2. การแลกเปลี่ยนไอโซโทป (Isotopic Exchange)

ไอโซโทปตรีเทียมมีคุณสมบัติทางเคมีที่เหมือนกันกับไฮโดรเจน แตกต่างกันเล็กน้อยทางคุณสมบัติในฟิสิกส์ เนื่องจากความแตกต่างอย่างมากของมวลสาร ไอโซโทปของไฮโดรเจนทั้งหลายที่เป็นองค์ประกอบของสสารจะมีการแลกเปลี่ยนไอโซโทประหว่างกันอยู่ตลอดเวลา ก๊าซตรีเทียมจะถูกเปลี่ยนไปเป็นรูปของน้ำได้ในบรรยากาศที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสม รังสีประเภทก่อให้เกิดไอออน (Ionizing Radiation) เช่นพลังงานจากการสลายตัวของตรีเทียมสามารถทำให้มีการแลกเปลี่ยนไอโซโทปของไฮโดรเจนระหว่างน้ำกับก๊าซได้ ตรีเทียมที่เกิดขึ้นจากการทดลองระเบิดนิวเคลียร์จะถูกเปลี่ยนเป็นรูปของน้ำทั้งหมดและสามารถถูกเปลี่ยนกับคืนมาอยู่ในรูปเดิมได้อีก (reversible)



ตารางที่ 2.3 Equilibrium Constants for the Reaction  $\text{HT} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{HTO} + \text{H}_2$   
[ Jacobs ,1968 ]

Temperature (°c)	Experimental equilibrium constant	Theoretical equilibrium constant
16.0	6.75	6.47
20.2	6.47	6.24
25.0	6.25	6.01
56.2	5.05	4.84
79.6	4.37	4.23
111.2	3.76	3.64
158.4	3.10	3.03
217.1	2.64	2.54
302.9	2.17	2.08



ตรีเทียมที่เกิดขึ้นจากรังสี Cosmic neutron ซึ่งมีพลังงานจลน์สูงมาก ในสภาพที่มีความดันอากาศต่ำกว่าความดันของบรรยากาศจะเกิดการชนกับออกซิเจน เพื่อรวมตัวเป็น  $\text{TO}_2$  แรดิคัล ที่มีเสถียรภาพสูงขึ้น ต่อจากนั้นจะเปลี่ยนไปเป็นรูปของ  $\text{HTO}$  โดยปฏิกิริยา Photochemical decomposition และปฏิกิริยากับ โอโซน (Ozone)

ระดับความสูง (Altitude) ยังมีผลต่อปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในบรรยากาศ พบว่า ในระดับความสูงต่ำกว่า 5 กิโลเมตร  $\text{T}_2\text{O}$  จะถูกเปลี่ยนสภาพให้อยู่ในรูป  $\text{HTO}$  ในระดับความสูงระหว่าง 10 - 40 กิโลเมตร จะพบว่าส่วนใหญ่อยู่ในรูปของก๊าซ  $\text{HT}$  ส่วนในระดับความสูงมากกว่า 40 กิโลเมตรขึ้นไปพบว่าปริมาณ  $\text{HT}$  อยู่ น้อยมากจนไม่มีความสำคัญ ความเข้มข้นของตรีเทียมในไฮโดรเจนบรรยากาศค่อนข้างคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง ส่วนในน้ำฝนคาดว่ามีความผันแปรไปตามสถานที่ ความแรงรังสีจำเพาะของตรีเทียม (Specific tritium activity) ของมีเทนในบรรยากาศ (Atmospheric Methane) มีค่ามากกว่าในน้ำฝนหลายเท่า และค่อนข้างจะต่ำกว่าในไฮโดรเจนในบรรยากาศ และไอน้ำในชั้น Stratosphere นอกจากนี้ยังพบว่าความเข้มข้นตรีเทียมในไอน้ำมีความสัมพันธ์อย่างแนบแน่นกับความชื้นในบรรยากาศ (Atmospheric Humidity) ข้อมูลบ่งชี้ว่าความเข้มข้นสูงในฤดูร้อนและต่ำในฤดูหนาว ส่วนความเข้มข้นก๊าซตรีเทียม ก๊าซไฮโดรเจน และไฮโดรคาร์บอน ไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล

### 3. คุณสมบัติของน้ำตรีเทียม (Properties of Tritiated Water)

ในช่วงระหว่างอุณหภูมิ 25 - 80 องศาเซลเซียส ความดันไอของ  $\text{HTO}$  จะต่ำกว่า  $\text{H}_2\text{O}$  แต่ในขณะที่จุดเดือดจะสูงกว่า ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 5 - 54 องศาเซลเซียส พบว่าความหนาแน่นสูงสุดเรียงตามลำดับเป็นดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ความหนาแน่นสูงสุดของน้ำ [ Jacobs , 1986 ]

$\text{H}_2\text{O}$	$\text{D}_2\text{O}$	$\text{T}_2\text{O}$
0.999973 $\text{g/cm}^3$ ที่ 3.98 °C	1.10589 $\text{g/cm}^3$ ที่ 11.2 °C	1.2150 $\text{g/cm}^3$ ที่ 13.4 °C

ตารางที่ 2.5 Thermodynamic Properties of the Oxides of Hydrogen Isotopes [ Jacobs , 1968 ]

	H <sub>2</sub> O	D <sub>2</sub> O	T <sub>2</sub> O
Boiling point	100.00	101.42	101.51
Triple-point temperature	0.010	3.82	4.49
Triple point pressure	4.58	5.02	4.87
Heat of vaporation at the boiling point , kcal/mol	9.72	9.9	10.1
Entropy at 298.16 K , eu	16.75	18.9	19.0

#### 4. การกำหนดช่วงเวลาของไอโซโทปตรีเทียมใน Precipitation

ตรีเทียมใน Precipitation ถูกแบ่งได้เป็นยุคสมัยได้ 2 ช่วง คือ

4.1 Natural Tritium หรือ Pre-thermonuclear test period เป็นน้ำที่มีความเข้มข้นตรีเทียมอยู่ในระดับธรรมชาติ และเกิดก่อนปี คศ. 1950 ซึ่งไม่มีการทดลองอาวุธนิวเคลียร์ ปัจจุบันได้สลายตัวลงต่ำกว่าขีดจำกัดของการตรวจวัด ตัวอย่างน้ำที่ไม่มีตรีเทียมอยู่จะแสดงให้เห็นว่าน้ำนั้นมีอายุยาวนานมากกว่า 50 ปี โดยอาจเป็นน้ำที่มาจากฝนในช่วงก่อนปี 1950

4.2 Atomic bomb test period เป็นน้ำที่อยู่ในช่วงระหว่างมีการทดลองระเบิดนิวเคลียร์ ซึ่งมีความเข้มข้นสูงมากกว่าระดับปกติตามธรรมชาติเป็นหลายพันเท่า Precipitation ที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาดังกล่าวจะถูกชะล้าง ( Wash out ) ลงในแหล่งน้ำใต้ดินและแหล่งน้ำผิวดิน ในที่สุดตรีเทียมจะไหลรวมลงสู่มหาสมุทร เมื่อเปรียบเทียบ Residence time ของน้ำในมหาสมุทร ( มากกว่า 2000 ปี ) กับ Half-life ของตรีเทียม ( 12.43 ปี ) มหาสมุทรจึงจัดเป็นอ่างเก็บตรีเทียม ( Sink of Tritium ) และถูกเจือจางโดยน้ำในมหาสมุทร ส่วนในน้ำใต้ดินที่มีการแลกเปลี่ยนกับสิ่งแวดล้อมน้อยจะยังคงมีความเข้มข้นตรีเทียมอยู่ในระดับสูง ซึ่งจะสะท้อนถึงประวัติข้อมูลที่เป็นมาในอดีต

ในอดีตก่อนการทดลองระเบิดนิวเคลียร์ ปริมาณตรีเทียมทั้งหมดใน Biosphere อยู่ในสมดุล อัตราการสลายตัวและอัตราการเกิดมีค่าเท่ากัน จากการวิเคราะห์ตัวอย่างในช่วงเวลาดังกล่าวประกอบกับการประเมินค่าจากฟลักซ์ของ Cosmic-ray และปฏิกิริยา ประมาณว่าอัตราการเกิดในธรรมชาติมีค่า  $0.5 \pm 0.3$  nuclei per  $\text{cm}^2$  of earth surface per second หรือเท่ากับ  $1.5 \times 10^{17}$  Bq/y และปริมาณสมดุลมีค่าเท่ากับ  $2.6 \times 10^{18}$  Bq. หรือ 7.3 kg. of Tritium

### 5. การประยุกต์ใช้ไอโซโทปตรีเทียมในการศึกษาเกี่ยวกับน้ำ

ตรีเทียมเป็นไอโซโทปรังสีซึ่งเป็นองค์ประกอบหนึ่งที่หายากในน้ำ พฤติกรรมของน้ำตรีเทียม (tritiated water) จึงเหมือนกับน้ำทั่วไปซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องตามสภาวะแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงไป จากคุณสมบัติที่มีรังสีและระยะเวลาการสลายตัวที่แน่นอน จึงสามารถนำข้อมูลที่มีอยู่ประจำตัวมาวิเคราะห์และสืบสาวแสดงเรื่องราวในอดีตของน้ำได้ จึงจัดเป็นสารติดตามในธรรมชาติ ( Natural tracer ) ที่มีประโยชน์อย่างยิ่ง การนำไอโซโทปรังสีมาประยุกต์กับงานด้านอุทกวิทยา โดยทั่วไปจะวิเคราะห์หาปริมาณไอโซโทป  $^2\text{H}$   $^3\text{H}$   $^{18}\text{O}$  และ  $^{13}\text{C}$   $^{14}\text{C}$  ในสภาพ Dissolved carbon ที่ได้จากน้ำธรรมชาติ การวัดปริมาณไอโซโทปดังกล่าวจะสามารถนำข้อมูลไปประยุกต์ใช้ในงานที่เกี่ยวข้องกับน้ำหลายด้าน เช่น Residence time of ground water Estimate possible pollutant transfer Age structure of ground water และ Water reserved management

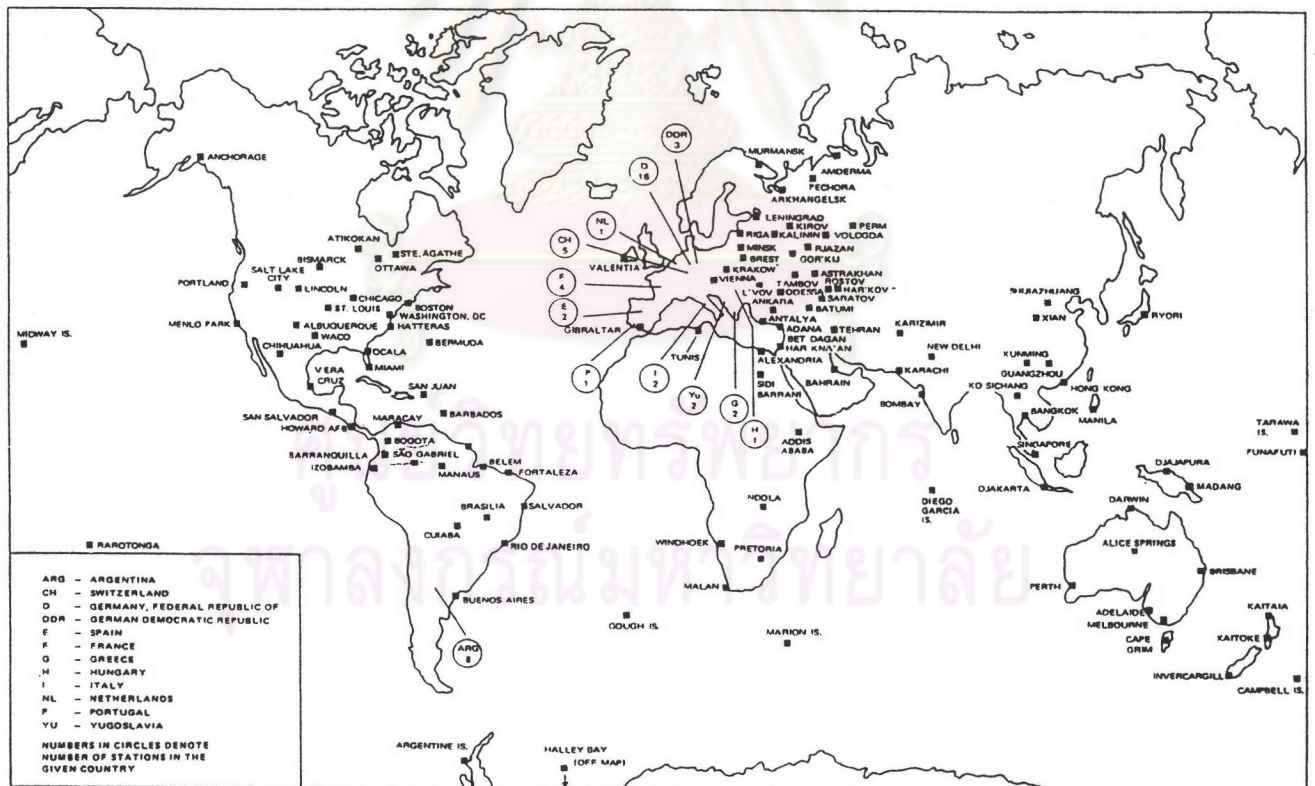
### 6. เครือข่ายการตรวจวัดไอโซโทปในน้ำ ( Isotopes-in-Precipitation Network)

ทบวงการปรมาณูระหว่างประเทศ ( International Atomic Energy Agency , IAEA ) ร่วมกับ องค์การอุตุนิยมวิทยาโลก ( World Meteorological Organization ) ได้เล็งเห็นถึงความสำคัญในการติดตามความเปลี่ยนแปลงไอโซโทปของไฮโดรเจน และ ออกซิเจน ใน Precipitation ทั่วโลก โดยริเริ่มขึ้นปี 1958 และเริ่มปฏิบัติการจริงในปี 1961 เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับ Isotope Content ของ Precipitation ในโลกและขยายไปถึงการหาและประเมินถึงการแปรปรวนของไอโซโทปธรรมชาติในน้ำฝนในโลก นอกจากนี้ยังนำข้อมูลพื้นฐานนี้ไปศึกษาเกี่ยวกับอุทกวิทยาใน



แง่มุมของทรัพยากรน้ำ การวางแผนและพัฒนา ในปัจจุบันข้อมูลไอโซโทปนี้มีความสำคัญมากในการสืบหาและพิสูจน์เพื่อพัฒนารูปแบบการหมุนเวียนของบรรยากาศ ( Circulation Model ) และการสืบสาวเกี่ยวกับสภาพทางอากาศ ( Climatological Investigations )

ปัจจุบันมีสถานีเก็บตัวอย่าง Precipitation เพื่อวิเคราะห์ไอโซโทป  $^2\text{H}$   $^3\text{H}$  และ  $^{18}\text{O}$  อยู่ทั่วโลก 420 แห่ง ใน 89 ประเทศ (ปี 1994) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ประมาณจำนวน 40 % ของ stable isotope และ 30 % ของ tritium samples ถูกส่งไปวิเคราะห์ที่ IAEA ใน Vienna ส่วนที่เหลือถูกวิเคราะห์โดยห้องปฏิบัติการในความร่วมมือในประเทศต่างๆ ผลการวิเคราะห์ปริมาณตรีเทียมใน Precipitation เปรียบเทียบตามเส้นรุ้ง ( latitude ) พบว่าซีกโลกเหนือมีแนวโน้มความเข้มข้นตรีเทียมสูงกว่าในส่วนซีกโลกใต้ ดังแสดงในตารางที่ 2.6



รูปที่ 2.3 Stations co-operating in the IAEA/WMO Isotopes in Precipitation Network



ตารางที่ 2.6 เปรียบเทียบปริมาณน้ำฝนใน Precipitation ที่บริเวณต่างๆของโลก (หน่วย : TU)

Year	Antarctic , UK Argentine Isl. Lat. 65.25S Long. 64.27W Alt. 0m asl.	New Zealand Kaitoke Lat. 41.10S Long. 175.17E Alt. 0m asl.	Pacific , Kiribati Tarawa Isl. Lat. 1.35N Long. 172.92E Alt. 4 m asl.	Thailand Bangkok Lat. 13.73N Long. 100.50E Alt. 2m asl.
1960	-	11.9	-	-
1961	-	8.6	-	-
1962	-	12.7	-	-
1963	-	22.2	-	-
1964	93.2	37.7	-	-
1965	64.1	33.8	-	-
1966	84.8	33.8	8.9	-
1967	64.9	28.2	6.5	-
1968	68.6	25.6	5.3	46.1
1969	74.3	30.4	5.6	29.7
1970	45.9	29.5	4.5	25.0
1971	90.8	24.9	4.3	25.7
1972	58.8	15.3	4.5	17.5
1973	105.2	12.1	5.0	12.6
1974	50.6	9.4	-	13.7
1975	40.1	10.1	5.7	11.3
1976	24.2	6.8	-	8.8
1977	16.9	6.9	-	10.8
1978	17.6	6.1	3.4	11.5
1979	29.1	5.4	3.4	8.3
1980	24.7	5.0	3.0	7.9
1981	17.9	3.9	3.5	8.9
1982	11.1	3.9	2.8	6.7
1983	6.2	3.6	2.6	-
1984	7.0	3.4	2.2	8.3
1985	8.6	3.3	2.1	4.9
1986	6.7	2.9	1.8	3.8
1987	15.4	2.8	1.9	3.8

ตารางที่ 2.6 (ต่อ) เปรียบเทียบปริมาณน้ำฝนใน Precipitation ที่บริเวณต่างๆของโลก (หน่วย : TU)

Year	Thailand Bangkok Lat. 13.73N Long. 100.50E Alt. 2m asl.	Japan Tokyo Lat. 35.68N Long. 139.77E Alt. 4m asl.	USA. Washington Lat. 38.85N Long. 77.03W Alt. 4 m asl.	Denmark Greenland Lat. 81.60N Long. 16.67W Alt. 35m asl.
1960	-	-	-	-
1961	-	51.3	-	-
1962	-	249.0	-	1740.9
1963	-	822.3	1199.0	5847.0
1964	-	747.6	1102.1	2671.2
1965	-	232.1	494.8	1202.9
1966	-	156.6	289.4	761.9
1967	-	95.0	190.4	437.4
1968	46.1	71.8	156.1	361.6
1969	29.7	68.7	149.9	159.0
1970	25.0	88.4	135.9	334.7
1971	25.7	65.2	114.2	254.7
1972	17.5	32.6	64.4	150.8
1973	12.6	30.2	62.5	-
1974	13.7	27.0	65.7	-
1975	11.3	23.1	52.1	-
1976	8.8	15.0	31.5	-
1977	10.8	23.7	48.7	-
1978	11.5	25.5	46.4	-
1979	8.3	13.6	35.2	-
1980	7.9	-	28.9	-
1981	8.9	-	48.4	-
1982	6.7	-	33.8	-
1983	-	-	26.7	-
1984	8.3	-	39.5	-
1985	4.9	-	24.3	-
1986	3.8	-	18.7	-
1987	3.8	-	21.6	-

## การเพิ่มความเข้มข้นตรีเทียม

ปัจจุบันระดับความเข้มข้นตรีเทียมใน Precipitation ได้ลดลงมาอยู่ในระดับที่ใกล้เคียงกับธรรมชาติในยุคก่อนที่จะมีการทดลองอาวุธนิวเคลียร์ ความเข้มข้นในระดับธรรมชาตินี้จัดว่ามีค่าต่ำจนกระทั่งการวัดปริมาณตรีเทียมโดยตรงกระทำให้อายุการใช้งานได้ยาก เนื่องจากมีระดับใกล้เคียงกับขีดจำกัดของการตรวจวัด (Detection Limit) แม้จะใช้เครื่องมือวัดที่มีประสิทธิภาพสูง การวัดปริมาณตรีเทียมระดับต่ำในปัจจุบันโดยเฉพาะอย่างยิ่งตัวอย่างน้ำในยุคก่อนการทดลองระเบิดนิวเคลียร์ย่อมไม่อาจกระทำได้อีกเนื่องจากอยู่ในระดับต่ำกว่าขีดจำกัดการตรวจวัด จำเป็นจะต้องทำการเพิ่มความเข้มข้นของตรีเทียมในตัวอย่างให้สูงขึ้นกว่าปกติก่อนทำการวัดรังสี

1. เทคนิควิธีในการเพิ่มความเข้มข้นตรีเทียมในตัวอย่างน้ำ  
สามารถทำได้หลายวิธี เช่น

1.1 Thermal Diffusion อาศัยหลักการเคลื่อนที่ของไอโซโทปภายใต้สภาวะอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ถูกเสนอเป็นครั้งแรกโดย W. Feddersen ในปี 1873 ต่อมาในปี 1917 Chapman & F.W. Dootson พิสูจน์โดยการทดลองพบว่าขีดความสามารถในการแยกไอโซโทปมีค่าไม่สูงนัก ต่อมา K. Clusius & G. Dickel ค้นพบว่าการใช้กระบวนการพาความร้อนร่วมด้วยทำให้ degree of separation สูงขึ้น เทคนิคนี้ถูกมองว่าซับซ้อน แต่มีข้อได้เปรียบคือ ให้ yield สูง และมี reproducibility ดี

1.2 Distillation เทคนิคนี้ F.A. Lindeman เสนอว่าสามารถเพิ่มความเข้มข้นของไอโซโทปได้โดยการกลั่น เนื่องจากอัตราการหนี (escape) ของอะตอม หรือ โมเลกุล จากพื้นผิวหน้าของเหลวมีค่าเป็นสัดส่วนผกผันกับรากที่สองของมวล ค่า degree of separation มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น การเพิ่มความเข้มข้นอย่างมีประสิทธิภาพต้องทำการกลั่นซ้ำหลายครั้ง ( multistage distillation ) ในระบบที่เป็นสุญญากาศ

1.3 Gas Chromatography ได้มีการศึกษาทดลองโดย Evans & Wilson โดยใช้ความแตกต่างระหว่างความดันไอ ( vapour pressure ) เนื่องจากพบว่า ความดันไอของ tritide ต่ำกว่า hydride ดังนั้น tritium จะเพิ่มความเข้มข้นขึ้นใน initial fraction



1.4 Electrolysis เสนอเป็นครั้งแรกโดย J. Kendall & E.D. Crittenden แต่ไม่เป็นที่ยอมรับกัน ปี 1932 E.W. Washburn & H.C. Urey สังเกตพบว่าการเข้มข้น Deuterium สูงขึ้นกว่าปกติในน้ำส่วนที่เหลืออยู่ใน electrolytic hydrogen cells ต่อมา Oestlund & Weiner ทดลองโดยใช้อุปกรณ์ single-cell electrolytic enrichment ซึ่งมี Electrode ทำจาก Iron (Cathode) และ Nickel (Anode) โดยใช้ตัวอย่างน้ำ 250 g. มี NaOH 0.6 g. เป็นอิเล็กโทรไลต์ เพิ่มความเข้มข้นตรีเทียมได้ 6 - 20 เท่า ทำ electrolysis ซ้ำ 5 ครั้ง ความเข้มข้นตรีเทียมเพิ่มขึ้น 2000-20000 เท่า C.B. Taylor เพิ่มความเข้มข้นตัวอย่างน้ำจากปริมาตร 1000 g. ใช้อิเล็กโทรไลต์  $\text{Na}_2\text{O}_2$  1.2 g. ตัว Electrode ทำจาก Iron (Cathode) และ Stainless steel (Anode) ทำ Electrolysis ต่อเนื่องนาน 10 วัน ปริมาตรสุดท้ายเหลือ 10-12 g.

## 2. การเพิ่มความเข้มข้นตรีเทียมในตัวอย่างน้ำด้วยเทคนิคอิเล็กโทรลิซิส [ Calf, 1976 ]

2.1 ตัวอย่างน้ำ ใช้ตัวอย่างคิบปริมาตร 2 ลิตร ต้องเก็บตัวอย่างให้ถูกต้องและมีการควบคุมคุณภาพที่ดี ป้องกันไม่ให้ตัวอย่างสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมซึ่งจะทำให้ความเข้มข้นเปลี่ยนแปลง

2.1.1 การเก็บตัวอย่าง ใช้ขวดแก้วขนาด 2 ลิตรพร้อมฝาเกลียวปิดชนิด Leak proof ที่แห้งและสะอาด อัดก๊าซไนโตรเจนลงไปแทนที่อากาศเพื่อไล่ความชื้น

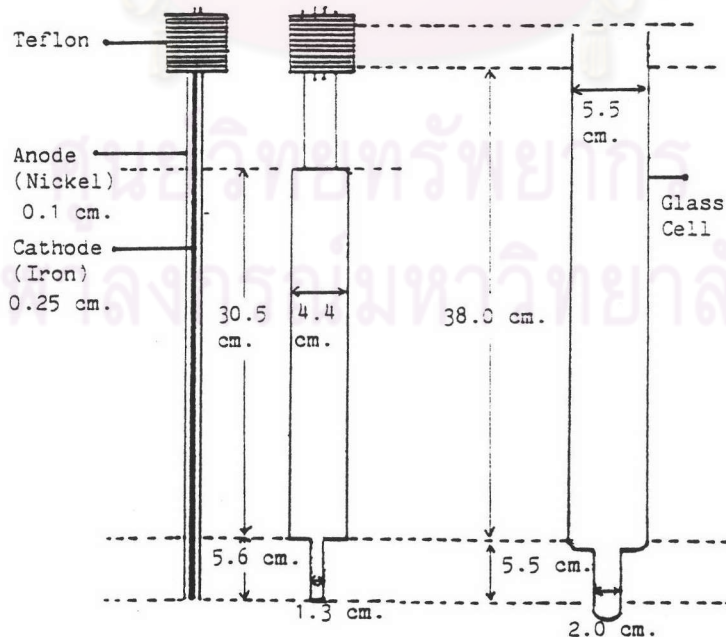
ตัวอย่างน้ำบาดาล ทำการเก็บตัวอย่างจากบ่อบาดาลชนิดสูบด้วยไฟฟ้า (submerge) และแบบมือโยก (hand pump) โดยปั้มน้ำที่อยู่ในบ่อออกก่อนอย่างน้อย 2 เท่าของปริมาตรที่มีอยู่เพื่อหลีกเลี่ยงการแลกเปลี่ยนไอโซโทประหว่างตัวอย่างกับสิ่งแวดล้อมภายนอก แล้วปั้มน้ำลงในขวดเก็บตัวอย่างให้เต็ม โดยให้มีที่ว่างของอากาศน้อยที่สุด บันทึกข้อมูลของบ่อ วันที่เก็บตัวอย่าง

ตัวอย่างน้ำฝน เก็บตัวอย่างจากภาชนะเก็บน้ำฝนโดยตรง เช่น แท็งก์น้ำ และ เก็บตัวอย่างกลางแจ้ง โดยใช้ถาด Stainless steel ที่แห้งและสะอาด รองรับน้ำฝนกลางแจ้ง ให้ได้ปริมาตรอย่างน้อย 2 ลิตร แล้วถ่ายลงในขวดเก็บตัวอย่าง บันทึกข้อมูลที่เก็บตัวอย่าง

2.1.2 การกลั่นตัวอย่างคิบ ตัวอย่างน้ำจะต้องนำไปกลั่นให้บริสุทธิ์เพื่อกำจัดไอออนและสารอินทรีย์ที่อยู่ในตัวอย่าง ให้ conductivity ไม่เกิน  $200 \mu\text{S}/\text{cm}$ . ตัวอย่างที่ไม่ผ่านเกณฑ์จะต้องทำการกลั่นซ้ำและเติมสารออกซิไดซ์ (Oxidizing Agent) เช่น  $\text{Na}_2\text{O}_2$  และ  $\text{KMnO}_4$

2.2 อิเล็กโทรไลติกเซลล์ (Electrolytic Cell) ทำจากแก้ว Pyrex ออกแบบให้สามารถทำอิเล็กโทรลิซิสตัวอย่างน้ำจาก 600 g. ให้เหลือ 20 g. ในขั้นตอนเดียว (single step) มีลักษณะเป็นแก้วทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางส่วนบน 5.5 cm. ยาว 38.0 cm. เพื่อทำอิเล็กโทรลิซิสในช่วงตัวอย่างจาก 600 g. ให้ลดลงเหลือ 56 g. ส่วนปลายด้านล่างมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.0 cm. ยาว 5.5 cm. เพื่อทำอิเล็กโทรลิซิสตัวอย่างจาก 56 g. ให้เหลือ 16 g. อิเล็กโทรไลติกเซลล์ถูกปิดด้วยจุกเทฟลอน (Teflon) ซึ่งมีการอุดซึมความชื้นต่ำ และปิดกันกักอากาศ (Gas Tight) ด้วย Neoprene O-ring ส่วนปลายของจุกเทฟลอนมีท่อทองเหลืองขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.7 cm. เป็นทางออกของก๊าซออกซิเจนและไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาอิเล็กโทรลิซิส ก๊าซถูกปล่อยผ่านไปยังเซลล์แก้วบรรจุ silicone oil เพื่อสังเกตปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากฟองก๊าซและควบคุมความดันภายในอิเล็กโทรไลติกเซลล์ให้เป็นบวก ( positive pressure ) ในที่สุดก๊าซที่เกิดขึ้นในแต่ละเซลล์จะถูกปล่อยออกสู่บรรยากาศ

2.3 อิเล็กโทรด (Electrode) ประกอบขึ้นจากแผ่นนิเกิล (Nickel) 2 แผ่น ทำหน้าที่เป็นขั้วบวกหรือแอโนด (Anode) หน้า 0.10 cm. กว้าง 4.4 cm. ยาว 30.5 cm. ส่วนปลายออกแบบให้มีขนาดเล็กตามลักษณะของอิเล็กโทรไลติกเซลล์ กว้าง 1.3 cm. ยาว 5.6 cm. เพื่อทำอิเล็กโทรลิซิสตัวอย่างในขั้นตอนสุดท้ายจาก 56 g. ให้เหลือ 16 g. ส่วนตรงกลางเป็นแผ่นเหล็กบริสุทธิ์ 1 แผ่น ทำหน้าที่เป็นขั้วลบหรือคาโทด (Cathode) หน้า 0.25 cm. กว้าง-ยาว เท่ากับแอโนด แผ่นอิเล็กโทรดถูกเชื่อมต่อกับแท่งทองแดงสองแท่ง ใช้โลหะเงินเป็นตัวประสาน ส่วนปลายแท่งทองแดงยึดไว้กับจุกเทฟลอน ช่องว่างระหว่างแผ่นอิเล็กโทรดมีขนาดคงที่ 3 mm. โดยใช้เทฟลอนเป็นตัวกั้นดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 Electrode & Electrolytic Cell



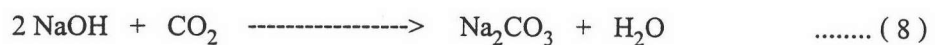
2.4 อิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) ตัวอย่างที่นำเข้าสู่ระบบอิเล็กโทรลิซิส จะต้องทำการกลั่นให้บริสุทธิ์ แล้วทำให้เป็นด่าง (Alkaline) โดยการเติม Sodium peroxide ( $\text{Na}_2\text{O}_2$ ) ปริมาณ 3.0 g. เพื่อเป็นตัวนำไฟฟ้าและป้องกันการผุกร่อน (corrosion) ของแผ่นอิเล็กโทรด ในระหว่างการทำอิเล็กโทรลิซิส



ความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์จะเปลี่ยนไปตามปริมาณการทำอิเล็กโทรลิซิส โดยความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 1 % ความเข้มข้นสุดท้ายเท่ากับ 20 %

2.5 อิเล็กโทรลิซิส (Electrolysis) การทำอิเล็กโทรลิซิสกระทำภายใต้อุณหภูมิต่ำที่ประมาณ -1 ถึง 0 องศาเซลเซียส เพื่อลดการสูญเสียตัวอย่างจากการระเหยเนื่องจากอุณหภูมิ ซึ่งเป็นผลต่อค่า Isotope Separation factor การทำอิเล็กโทรลิซิสทำได้ครั้งละ 16 ตัวอย่าง โดยต่อเรียงกันแบบอนุกรม (series) เข้ากับ Switched Mode DC Power Supply และ Electronic Ampere-hour Counter เริ่มต้นใช้ปริมาณตัวอย่าง 600.00 g. จ่ายกระแส 10.0 A ซึ่งความหนาแน่นกระแส (current density) มีค่าเท่ากับ  $120 \text{ mA/cm}^2$  ระหว่างกระบวนการอิเล็กโทรลิซิส ปริมาณตัวอย่างจะลดลง ซึ่งต้องปรับกระแสที่ป้อนให้ระบบให้เหมาะสมเพื่อป้องกันความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาอิเล็กโทรลิซิส ซึ่งจะเป็นเหตุให้เกิด Evaporation loss และไม่ให้อิเล็กโทรไลต์เย็นลงจนกลายเป็นน้ำแข็ง (Frozen) โดยควบคุมให้ความหนาแน่นกระแสไม่เกิน  $200 \text{ mA/cm}^2$  จำนวนปริมาณตัวอย่างที่ถูกอิเล็กโทรไลต์ได้จากกฎฟาราเดย์ (faraday Law) กำหนดว่า กระแส 2.978 Ampere-hour จะ Electrolyte น้ำได้ 1.0 g.

หลังจากเสร็จสิ้นการทำอิเล็กโทรลิซิส โดยตัวอย่างลดลงเหลือ 16 g. ความเข้มข้นของ Sodium Hydroxide มีค่าสูงถึง 16-20 % และมีไอโซโทปตรีเทียมบางส่วนอยู่ใน NaOH เพื่อป้องกัน Isotope Effect ต้องทำการเปลี่ยนไอโซโทปตรีเทียมใน NaOH มาอยู่ในรูปของน้ำให้หมด โดยใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทำปฏิกิริยากับ Electrolyte เกิดเป็นโซเดียมคาร์บอเนต และ น้ำ



ตัวอย่างที่ได้นำไปกลั่นให้แห้งและบริสุทธิ์ เก็บตัวอย่างที่กลั่นได้ไว้นับรังสีต่อไป

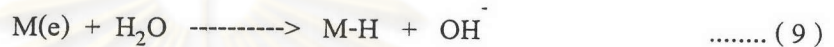


## 2.6 กลไกของปฏิกิริยาอิเล็กโทรลิซิส (Mechanism of Electrolysis of Water) [Taylor]

การทำอิเล็กโทรลิซิสในสารละลายที่เป็นด่าง (alkaline electrolyte) จะมีกลไกของปฏิกิริยาเป็น 2 ทาง คือ

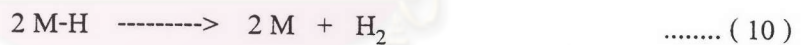
### Step 1 : Electronation of water molecule ( Volmer Reaction )

ไฮโดรเจน จะถูกดูดซับโดยกระบวนการ Adsorb และ Chemisorb ที่ผิวของคาโทด (Cathode)

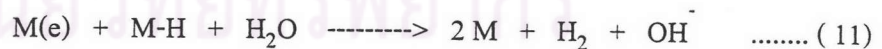


Step 2 : Deadsorb ไฮโดรเจน-เมทัล จะถูก Deadsorb เป็นก๊าซไฮโดรเจน ซึ่งเกิดกับไอโซโทป Protium (H) มากกว่า Tritium (T) ทำให้ Tritium ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์เข้มข้นขึ้น ในขณะที่เดียวกัน Protium ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะกลายเป็นก๊าซ แล้วถูกปล่อยออกไปสู่บรรยากาศ โดยมีกลไกปฏิกิริยาได้ 2 ลักษณะ

### Tafel reaction



### Heyrosky Reaction



2.7 อ่างควบคุมอุณหภูมิ (Cooling Bath) มีขนาดกว้าง 34 cm. ยาว 76 cm. สูง 50 cm. ความจุ 100 ลิตร โดยใช้ Compressor Summit ขนาด 15 แรงม้า 6 A. , 240 V. ทำความเย็น ทำหน้าที่ควบคุมอุณหภูมิของระบบอิเล็กโทรลิซิสให้คงที่ที่ 0 ถึง -1 องศาเซลเซียส และป้องกันการเป็นน้ำแข็งโดยใช้สาร Anti-freeze คือ Ethylene Glycol ผสมลงในกับน้ำในอ่าง ให้ได้ความเข้มข้น 10 % โดยปริมาตร

## 2.8 Enrichment Factor

การเพิ่มความเข้มข้นตรีเทียมเนื่องจากอิเล็กโทรลิซิส มีความสัมพันธ์ตามสมการที่ 12 [ Calf , 1976 ]

$$\alpha / \beta = \alpha^{-0.35} \dots\dots ( 12 )$$

เมื่อ  $\alpha$  = Electrolysis fractionation factor deuterium to protium ( D/H )

$\beta$  = Electrolysis fractionation factor tritium to protium ( T/H )

หรืออีกนัยหนึ่ง คือ

$$\beta = ( \text{rate of loss of protium} / \text{total protium} ) ( \text{total tritium} / \text{rate of loss of tritium} ) \dots\dots ( 13 )$$

ในอิเล็กโทรลิติกเซลล์ ความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นเป็นไปตามสมการ

$$\text{Enrichment} = T_f / T_i = ( R ) ( W_i ) / ( W_f ) \dots\dots ( 14 )$$

เมื่อ  $T_i$  = net initial tritium activity ( cpm. )

$T_f$  = net final tritium activity ( cpm. )

$W_i$  = initial weight of sample ( g. )

$W_f$  = final weight of sample ( g. )

R = Enrichment factor

Enrichment Factor ( R ) สามารถหาได้ 2 วิธี คือ Deuterium calibration ซึ่งต้องใช้เครื่อง Mass Spectrometer วัดสัดส่วนไอโซโทปที่เปลี่ยนแปลงไปในการทำอิเล็กโทรลิซิส วิธีที่สองคือ Spike method ใช้สารรังสีมาตรฐาน (Standard Tritiated Water) ผ่านกระบวนการเพิ่มความเข้มข้นพร้อมกันกับตัวอย่าง (Unknown Sample) ทำการวัดรังสีและชั่งน้ำหนักก่อนและหลังเพิ่มความเข้มข้น นำมาคำนวณค่า Enrichment Factor ( R ) ซึ่งนำมาใช้เป็นค่ามาตรฐานในการวัดวิเคราะห์ ปริมาณตรีเทียมในตัวอย่างต่อไป

## 2.8.1 Deuterium calibration

ในการทำอิเล็กโทรลิซิสแบบขั้นตอนเดียว (Single step Electrolysis) ค่า Enrichment Factor มีค่าเท่ากับ

$$\text{Enrichment Factor} = (W_f / W_i)^{1/\beta} \quad \text{..... (15)}$$

## 2.8.2 Spike method

$$\text{Enrichment Factor, R} = \{ (SAE) / (SBE) \} \{ W_i / W_f \} \quad \text{..... (16)}$$

เมื่อ SBE = ความแรงรังสีสุทธิของน้ำไตรเทียมมาตรฐานก่อนเพิ่มความเข้มข้น (cpm.)

SAE = ความแรงรังสีสุทธิของน้ำไตรเทียมมาตรฐานหลังเพิ่มความเข้มข้น (cpm.)

$W_i$  = น้ำหนักของน้ำไตรเทียมมาตรฐานก่อนเพิ่มความเข้มข้น (g.)

$W_f$  = น้ำหนักของน้ำไตรเทียมมาตรฐานหลังเพิ่มความเข้มข้น (g.)

## 2.9 การคำนวณปริมาณไตรเทียมในตัวอย่าง (Tritium content) : หน่วย Tritium Unit (TU)

$$\text{Tritium content} = \{ (C-B) / (WR) \} \{ (kD) / (E) \} \{ V_i / V_f \} \quad \text{TU ..... (17)}$$

เมื่อ C = อัตรานับรังสีของตัวอย่างหลังจากการเพิ่มความเข้มข้น (cpm)

B = อัตรานับรังสีของแบคกราวด์ หรือ น้ำปราศจากไตรเทียม (cpm)

W = น้ำหนักตัวอย่างที่นับวัดรังสี (g.)

R = Enrichment Factor

k = 141.0127 TU/dpm/g

D = ค่าการสลายตัว

E = ประสิทธิภาพการนับวัด

$V_i$  = น้ำหนักของน้ำตัวอย่างก่อนเพิ่มความเข้มข้น (g.)

$V_f$  = น้ำหนักของน้ำตัวอย่างหลังเพิ่มความเข้มข้น (g.)



$$\begin{aligned} \text{TU} &= \text{หน่วยวัดความเข้มข้นตรีเทียม ( ในรูปสัดส่วนโดยอะตอม )} \\ &= \text{atomic ratio of one atom tritium (T) for } 10^{18} \text{ atoms of protium (H)} \end{aligned}$$

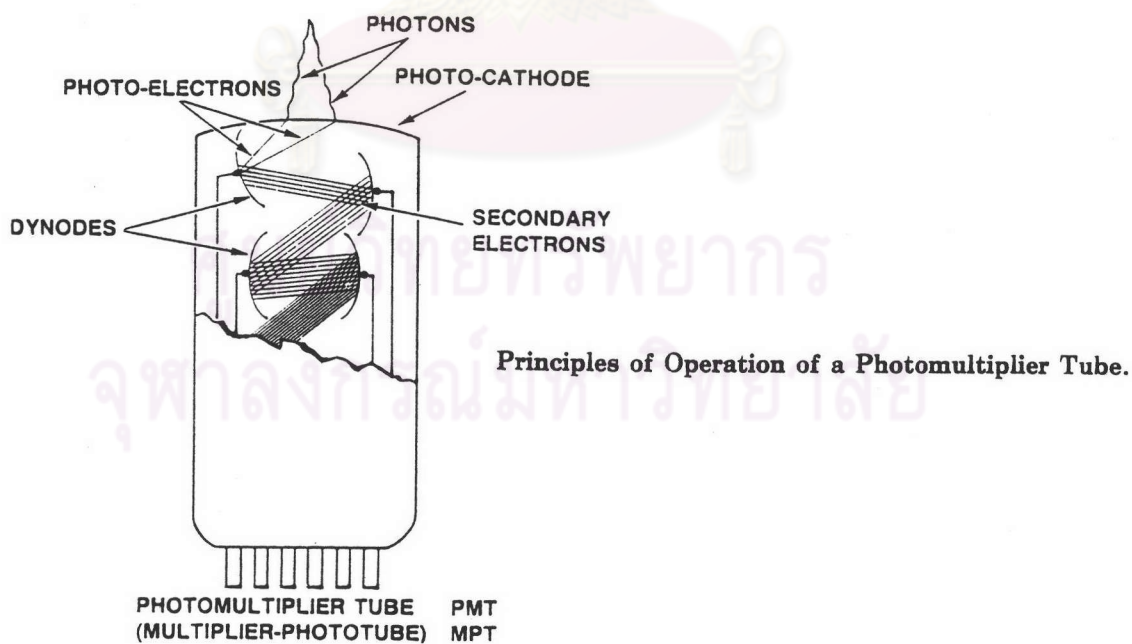
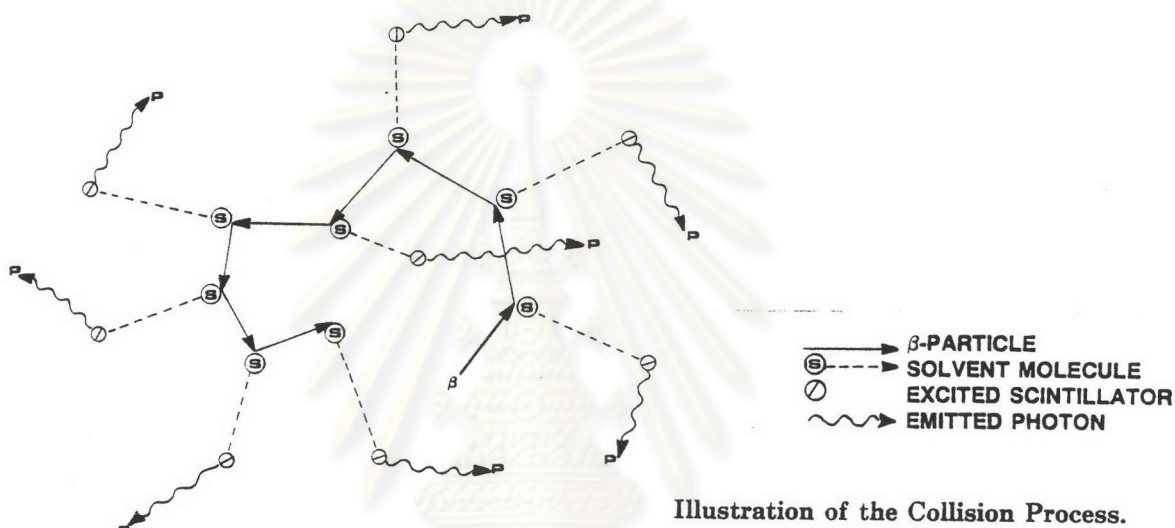
### เครื่องวัดรังสีซิลทิลเลชันของเหลว (Liquid Scintillation Counter)

ไอโซโทปตรีเทียมสลายตัวให้รังสีเบตา พลังงานต่ำเพียง 18.6 keV. การตรวจวัดรังสีแบบธรรมดาโดยใช้ต้นกำเนิดรังสีที่วางอยู่ด้านหน้า scintillation cocktail เรียกว่า "External liquid scintillation counting" ธรรมดาได้ลำบาก เนื่องจากรังสีเบตามีอำนาจทะลุทะลวงต่ำ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการนับรังสีสูงขึ้น ปี ค.ศ. 1953 Hayes ได้นำเอาตัวอย่างรังสีตรีเทียมไปผสมรวมกับ Scintillation solution ทำให้ตัวอย่างสัมผัสโดยตรงกับสาร scintillation ทำให้เกิดผลดีในการนับรังสีและมีข้อได้เปรียบอย่างมาก คือตัวอย่างเป็นของผสมเนื้อเดียวกัน (Homogeneous geometry) ไม่มีผลกระทบจาก Adsorption effects ทำให้ประสิทธิภาพการวัดรังสีสูงสุด เรียกว่า "Internal liquid scintillation counting" ต่อมาบริษัท Packard Instrument Company ได้พัฒนามาเป็นเครื่อง Liquid Scintillation counter ในปัจจุบัน

#### 1. หลักการวัดรังสีแบบซิลทิลเลชันของเหลว

การสลายตัวของสารกัมมันตรังสีตรีเทียม จะปลดปล่อยอนุภาคเบตา (beta) พลังงานสูงสุด 18.6 keV. พลังงานเฉลี่ย 5.7 keV. โดยมีนิวตริโน (neutrino) ซึ่งเป็นตัวแบ่งพลังงาน ซึ่งไม่มีบทบาทสำคัญในกระบวนการวัดรังสีแบบนี้ อนุภาคเบตาจะถ่ายเทพลังงานให้กับตัวกลางที่ผ่านไป 3 ลักษณะ คือ ความร้อน (heat) ไอออไนเซชัน (ionization) และ เอกไซเตชัน (excitation) การถ่ายเทพลังงานในวัดรังสีแบบซิลทิลเลชันของเหลวจะเป็นแบบ Excitation โดยใช้สารละลายซิลทิลเลชัน หรือเรียกว่าค็อกเทล (Scintillation solution or Cocktail) ซึ่งเป็นของผสมระหว่างตัวทำละลาย (Solvent) และ ตัวถูกละลาย (Solute) ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารเรืองแสง (Scintillator) ทำหน้าที่ร่วมกันในการถ่ายเทพลังงาน อนุภาคเบตาจะชนกับ Solvent และถูกดูดกลืนพลังงานส่วนหนึ่งไว้ ทำให้โมเลกุลของ Solvent อยู่ในสภาวะเร้าหรือสภาวะถูกกระตุ้น (Excited state) ซึ่งต่อมาจะถูกถ่ายเทพลังงานส่วนนี้ให้กับโมเลกุลของ Solute ทำให้ชั้นอิเล็กตรอนของ Solute ถูกกระตุ้นและขึ้นไปอยู่สภาวะถูกกระตุ้น (Excited state) เมื่ออิเล็กตรอนกลับเข้าสู่สภาวะพื้น (ground state) จะ

ปล่อยพลังงานออกมาในรูปของโฟตอน (Photon) อนุภาคเบตาตัวหนึ่งสามารถกระตุ้นโดยการชนกับโมเลกุล Solvent ได้มากมาย ดังแสดงในรูปที่ 5 จำนวนโฟตอนที่เกิดขึ้นจะรวมกันเป็นแสงวาบ (Scintillation) การถ่ายเทจากพลังงานเป็นโฟตอนถูกประเมินเป็นแบบเชิงเส้น (linear conversion) ความเข้มของแสงจะเป็นสัดส่วนกับพลังงานเริ่มต้นของอนุภาคเบตา แสงที่เกิดขึ้นจะไปตกกระทบบที่โฟโตคาโทด (Photocathode) เกิดเป็นสัญญาณอิเล็กตรอน และทำให้เพิ่มปริมาณขึ้นในหลอดทวีคูณแสง (Photomultiplier Tube , PMT) เป็นกระแสอิเล็กตรอนซึ่งเป็นสัดส่วนกับแสงที่ตกกระทบบ ในที่สุดจะถูกบันทึกเป็นสัญญาณไฟฟ้าและนำไปวิเคราะห์สัญญาณ



รูปที่ 2.5 การถ่ายทอดพลังงานในระบบวัดรังสีแบบซิลทิลเลชันของเหลว

## 2. ความไวการนับรังสีที่เหมาะสม (Optimizing Counting Sensitivity)

ขีดจำกัดต่ำที่สุดของการนับรังสีหาได้จาก อัตราส่วนระหว่างสัญญาณต่อการรบกวน (Signal to Noise Ratio) ซึ่ง สำหรับการนับรังสีแบบซิลทิลเลชันของเหลวกล่าวในฟังก์ชันของ Efficiency (E) และ Background (B) เรียกว่า Figure of Merit (FM)

$$FM = S^2 / (S + 2B) \quad \text{..... (18)}$$

เมื่อ S = net sample count

B = background count

สำหรับการวัดรังสีระดับต่ำ  $2B \gg S$  ทำให้

$$FM = S^2 / (2B) \quad \text{..... (19)}$$

S เป็นสัดส่วนกับประสิทธิภาพของเครื่องวัดรังสี (Efficiency, E) สมการเปลี่ยนเป็น

$$FM = E^2 / (2B) \quad \text{..... (20)}$$

## 3. การนับรังสีตรีเทียมของตัวอย่างที่เพิ่มความเข้มข้น (Enrich) แล้ว

โดยซึ่ง enriched sample ปริมาณ 10.0 กรัม ผสมกับ liquid scintillator 10.0 มิลลิลิตร ลงในขวดตัวอย่างโพลิเอทิลีนที่ให้ระดับแบคกราวด์ต่ำ นำไปพักเก็บไว้ในเครื่องวัดรังสีแบบซิลทิลเลชันของเหลว (Liquid Scintillation Counter, LSC) ที่อุณหภูมิประมาณ 13 - 15 องศาเซลเซียส ตั้งพารามิเตอร์ในการนับรังสีให้ถูกต้องเหมาะสม ใช้เวลานับรังสีนานตัวอย่างละ 50 - 100 นาที จำนวน 20 - 25 ครั้ง (cycles) รวมเวลานับรังสีนานประมาณ 2000 - 2500 นาที



### 3.1 ประสิทธิภาพของการนับรังสี (Counting Efficiency)

ประสิทธิภาพการนับรังสีของระบบวัดรังสีแบบซิลทิลเลชันของเหลวหาได้จากการเตรียม Standard tritiated water , National Institute of Standard and Technology ( NIST ) ความแรงรังสีจำเพาะ ( Specific activity ) เท่ากับ 1.123 Bq/gram เมื่อ 27 August 1997 , uncertainty 0.97 %

$$E = \text{CPM} / \text{DPM} \quad \text{..... ( 21 )}$$

เมื่อ E = Efficiency

CPM = Count per minute of counting standard

DPM = Disintegration per minute of tritiated water standard

### 3.2 ขีดจำกัดในการวัดตรีเทียม ( Lower Limit of Detection for Tritium Counting ,LLD )

$$\text{LLD} = \{ (16.7)(k)(B)^{1/2} \} / \{ (E)(V)(t)^{1/2} \} \quad \text{Bq/l} \quad \text{..... ( 22 )}$$

เมื่อ k = 3.29 when express LLD in Bq/l

B = background count rate (cpm)

E = efficiency

V = sample volume (ml)

t = counting time (min.)

### 3.3 ความเบี่ยงเบนมาตรฐานของอัตรานับรังสีระดับต่ำ

การวัดรังสีที่มีค่าการนับต่ำใกล้เคียงกับแบคกราวด์ โดยกำหนดอัตรานับรังสีของตัวอย่างมีค่าต่ำกว่า 5 เท่าของแบคกราวด์ เช่นตัวอย่างที่มีรังสีระดับต่ำจากธรรมชาติ พบว่าแบคกราวด์จะมีผลอย่างมากต่อค่าอัตราการนับรังสีสุทธิ (Net Count Rate) ซึ่งจะต้องนำความคลาดเคลื่อน (Error) ของแบคกราวด์เข้ามาพิจารณาด้วยตาม หลักการทางสถิติค่าความผิดพลาดของการนับรังสีสุทธิ (net counting error) หรือความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation, S) เท่ากับ

$$S_{\text{net}} = (S_{\text{gross}}^2 + S_{\text{background}}^2)^{1/2} \quad \text{..... (23)}$$

โดยใช้ Algebraic substitution and manipulation สมการลดรูป

$$S = \{ (CPM_{\text{sample}} / T_{\text{sample}}) + (CPM_{\text{bkg}} / T_{\text{bkg}}) \}^{1/2} \quad \text{..... (24)}$$

เมื่อ	$CPM_{\text{sample}}$	=	count rate of sample ( cpm )
	$CPM_{\text{bkg}}$	=	count rate of background ( cpm )
	$T_{\text{sample}}$	=	counting time of the sample ( min. )
	$T_{\text{bkg}}$	=	counting time of the background ( min. )

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย