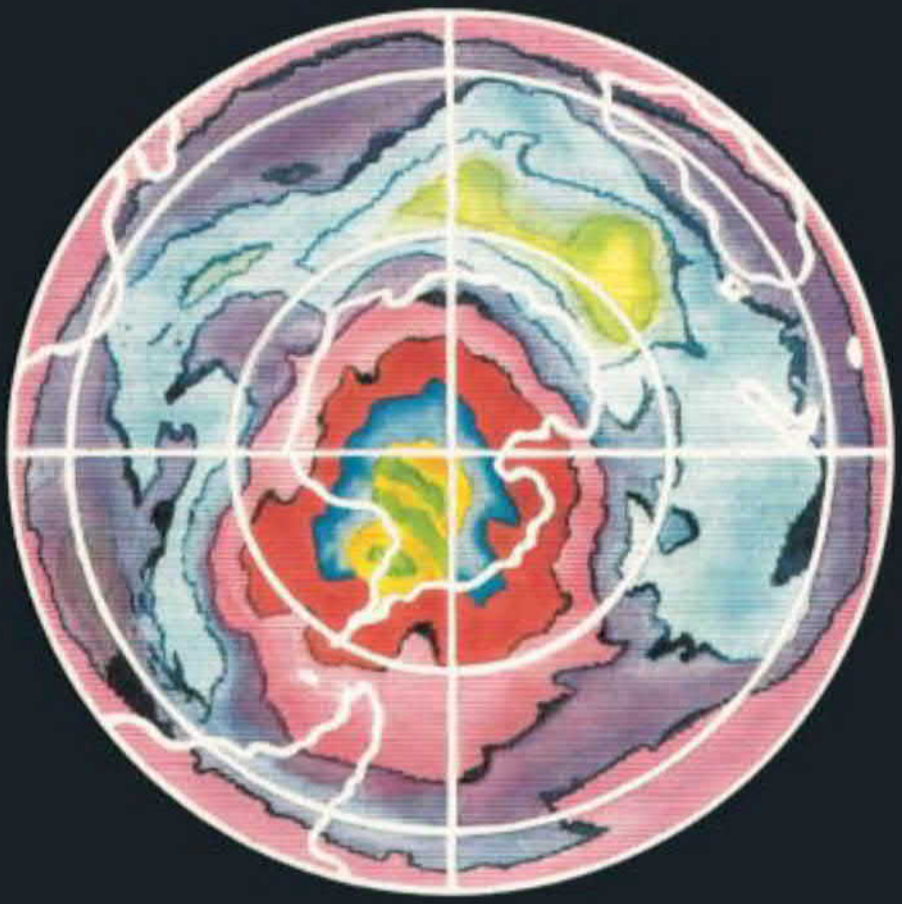
UNEP

ชุดสิ่งแวดล้อมของ UNEP/GEMS เล่มที่ 2

ชั้นโอโซน



หนังสือในชุดเดียวกัน

1. ก๊าซเรือนกระจก
2. ชั้นโอโซน
3. ช้างแอฟริกา
4. มลพิษอากาศในเมือง
5. อาหารปนเปื้อน
6. มลพิษในแหล่งน้ำจืด
7. ผลกระทบจากการทำลายชั้นโอโซน
8. ปรากฏการณ์เอลนิโญ
9. ธารน้ำแข็งกับสิ่งแวดล้อม
10. ผลกระทบเมื่อภูมิอากาศเปลี่ยนแปลง
11. ความหลากหลายทางชีวภาพของโลก
12. มลพิษในทะเลสาบและอ่างเก็บน้ำ
13. ผลกระทบของภูมิอากาศต่อการประมง

ปกเป็นภาพแผนที่แสดงระดับโอโซนเหนือทวีปแอนตาร์กติกา ถ่ายภาพโดยดาวเทียม TOMS เมื่อ ค.ศ.1957 ระดับโอโซนในช่วงฤดูใบไม้ผลิเหนือทวีปแอนตาร์กติกาลดลงประมาณร้อยละ 40

ชั้นโอโซน

The Ozone Layer

ของ UNEP/GEMS

แปลโดยนักแปลเครือข่ายของกรมวิชาการ

ประพนธ์ จันทร์นุรักษ์ นิคม กายราช
ทองเพ็ชร จุมปา ปรีชา ภิญโญยาง เจริญ หลวงเทพ สมศักดิ์ นาวายุทธ

สถาบันการแปลหนังสือ กรมวิชาการ กระทรวงศึกษาธิการ

The Ozone Layer

UNEP 1987

หนังสือชุดสิ่งแวดล้อม เล่มที่ 2

โครงการสิ่งแวดล้อมแห่งสหประชาชาติ ไนโรบี

หนังสือแปลอันดับที่ 168

สาขาสิ่งแวดล้อม

ลิขสิทธิ์ฉบับภาษาไทยเป็นของกระทรวงศึกษาธิการ

สถาบันการแปลหนังสือ กรมวิชาการ กระทรวงศึกษาธิการ แปลและจัดพิมพ์

ครั้งที่ 1 พ.ศ. 2544 จำนวนพิมพ์ 15,000 เล่ม

ข้อมูลทางบรรณานุกรมของหอสมุดแห่งชาติ

สหประชาชาติ. โครงการสิ่งแวดล้อม.

ชั้นโอโซน = The Ozone Layer.-- กรุงเทพฯ:

สถาบันการแปลหนังสือ กรมวิชาการ, 2544.

48 หน้า.

1. การทำลายชั้นโอโซน. I. ระบบตรวจสอบสิ่งแวดล้อมโลก.

II. ประพนธ์ จันทร์นุรักษ์ และคณะ, ผู้แปล. III. กรมวิชาการ. IV. ชื่อเรื่อง.

577.276

ISBN 974-269-033-2

ประกาศกระทรวงศึกษาธิการ
เรื่อง อนุญาตให้ใช้หนังสือในโรงเรียน

ด้วยกรมวิชาการได้จัดทำหนังสือแปลชุดสิ่งแวดล้อม รวม 13 เล่ม ได้แก่ 1) ก๊าซเรือนกระจก 2) ชั้นโอโซน 3) ช้างแอฟริกา 4) มลพิษอากาศในเมือง 5) อาหารปนเปื้อน 6) มลพิษในแหล่งน้ำจืด 7) ผลกระทบจากการทำลายชั้นโอโซน 8) ปรากฏการณ์เอลนิโญ 9) ธารน้ำแข็งกับสิ่งแวดล้อม 10) ผลกระทบเมื่อภูมิอากาศเปลี่ยนแปลง 11) ความหลากหลายทางชีวภาพของโลก 12) มลพิษในทะเลสาบและอ่างเก็บน้ำ และ 13) ผลกระทบของภูมิอากาศต่อการประมง โดยแปลจากหนังสือชุดสิ่งแวดล้อม ของโครงการสิ่งแวดล้อมแห่งสหประชาชาติ และระบบตรวจสอบสิ่งแวดล้อมโลก (UNEP/GEMS Environment Library) เพื่อใช้เป็นหนังสือความรู้สำหรับครู นักเรียน นักศึกษา ตลอดจนประชาชนทั่วไป

กระทรวงศึกษาธิการพิจารณาแล้ว อนุญาตให้ใช้หนังสือนี้ในโรงเรียนได้

ประกาศ ณ วันที่ 27 มิถุนายน พ.ศ. 2544

(นายอำรุง จันทวานิช)
รองปลัดกระทรวง ปฏิบัติราชการแทน
ปลัดกระทรวงศึกษาธิการ

คำนำ

สิ่งแวดล้อมมีคุณค่าอเนกอนันต์แก่มวลชีวิตบนโลก และก่อความรำคาญจนถึงขั้นเป็นอันตรายรุนแรงได้เช่นเดียวกัน สิ่งแวดล้อมใกล้ตัวและสิ่งแวดล้อมโลกมีความสัมพันธ์เชื่อมโยงโดยธรรมชาติ หากเราทุกคนร่วมกันดูแลรักษาสิ่งแวดล้อมใกล้ตัว ระบบสิ่งแวดล้อมทั้งโลกย่อมยั่งยืนและน่าอยู่ตลอดไป

กรมวิชาการเห็นว่าหนังสือชุดสิ่งแวดล้อมของโครงการสิ่งแวดล้อมแห่งสหประชาชาติ และระบบตรวจสอบสิ่งแวดล้อมโลก (UNEP/GEMS Environment Library) ประกอบด้วยประเด็นสิ่งแวดล้อมหลักๆ ของโลกรวม 13 เรื่อง เสนอสาระที่น่าเรียนรู้อย่างมาก ก่อให้เกิดความตระหนักในเรื่องสิ่งแวดล้อมซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของชีวิตเราสมควรเผยแพร่ให้แพร่หลาย จึงได้จัดประชุมปฏิบัติการนักแปลเครือข่าย ของกรมวิชาการเพื่อร่วมกันแปลหนังสือชุดนี้ สำหรับใช้ในโรงเรียนตั้งแต่ระดับมัธยมศึกษาขึ้นไป และเผยแพร่แก่สาธารณชนทั้งหลาย

กรมวิชาการขอขอบคุณนักแปลเครือข่าย ผู้ตรวจ วิทยากร และผู้เกี่ยวข้องทุกคนที่ร่วมกันจัดทำหนังสือนี้ และขอขอบคุณโครงการสิ่งแวดล้อมแห่งสหประชาชาติเป็นพิเศษที่เอื้อเฟื้อลิขสิทธิ์การแปล

(นายประพัฒน์พงศ์ เสนาฤทธิ์)
อธิบดีกรมวิชาการ
22 มิถุนายน 2544

ชั้นโอโซน

ไมเคิล ดี. กวินน์

ระบบตรวจสอบสิ่งแวดล้อมโลก หรือเจมส์ (Global Environment Monitoring Sysem–GEMS) ได้ดำเนินงานจนประสบผลดีเยี่ยมมานานกว่าหนึ่งทศวรรษแล้ว ตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา ได้ประเมินผลสิ่งแวดล้อมที่สำคัญ ๆ ทั่วโลก เช่น ปัญหาภาวะเรือนกระจก ปัญหาป่าไม้เขตร้อนถูกทำลาย และสัตว์ถูกคุกคามจนจำนวนลดลง เช่น ช้างแอฟริกา

เนื่องจากเป็นเรื่องเฉพาะ จึงจัดพิมพ์ผลการประเมินเหล่านี้เป็นเอกสารทางวิชาการตามปกติ แต่ยังไม่ได้จัดพิมพ์ในรูปแบบที่ง่ายแก่การเข้าใจสำหรับผู้ที่ไม่คุ้นเคยกับเรื่องนี้

ดังนั้น UNEP และ GEMS จึงจัดพิมพ์หนังสือชุดนี้ขึ้น เพื่อตอบสนองจุดประสงค์ดังกล่าว หนังสือเล่มนี้เป็นอันดับที่ 2 ในชุด ส่วนเรื่องอื่น ๆ จะทยอยพิมพ์ตามมา โดยมุ่งหวังให้สาธารณชนได้รับรู้สภาพสิ่งแวดล้อมจากผลการประเมินของ UNEP จนเกิดเป็นมติมหาชนเรียกร้องให้หยุดยั้งการทำลายสิ่งแวดล้อม และรักษาไว้ให้ชนรุ่นหลังในอนาคตสามารถดำรงชีวิตอยู่ได้อย่างผาสุกมากเท่าที่จะทำได้

ไมเคิล ดี. กวินน์
ผู้อำนวยการระบบตรวจสอบสิ่งแวดล้อมโลก

สารบัญ

คำนำ	
ถ้อยแถลง	7
บทนำ	8
ภูมิหลังทางวิทยาศาสตร์	12
สมดุลของโอโซน	15
ภัยคุกคามจากมลพิษเคมี	19
แบบจำลองบรรยากาศ	22
แบบจำลองบรรยากาศบอกอะไรได้บ้าง	24
การวัดความเข้มข้นของโอโซน	29
โลกกำลังร้อนขึ้นจริงหรือ?	32
ผลกระทบต่อสังคม	35
ผลกระทบจากรังสีอัลตราไวโอเลตที่เพิ่มขึ้น	35
ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศ	39
การกำหนดนโยบาย	44
แหล่งอ้างอิง	47

ถ้อยแถลง

มอสตาฟา เค. ทอลบา

เหนือพื้นผิวโลกขึ้นไปประมาณ 25 กิโลเมตร มีม่านบาง ๆ ขวางกั้นและปกป้องสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่บนดาวเคราะห์ดวงนี้จากรังสีดวงอาทิตย์ ม่านบาง ๆ ดังกล่าวนี้ คือ ชั้นโอโซน

โอโซนเป็นสิ่งจำเป็นต่อชีวิตมากพอกันกับออกซิเจนและน้ำ หากปราศจากชั้นโอโซน รังสีอัลตราไวโอเลตในระดับที่เป็นอันตรายต่อชีวิตจะสามารถแผ่มายังพื้นผิวโลกได้ จะทำให้สิ่งมีชีวิตบนดาวเคราะห์สีเขียวดับสูญ คล้ายกับว่าชั้นบรรยากาศได้เคลื่อนย้ายออกไป และสิ่งมีชีวิตบนโลกจะล้มตายจนหมดสิ้น ในช่วงต้นคริสต์ทศวรรษ 1970 มนุษย์เริ่มตระหนักว่าตนเองได้ใช้พลังอำนาจจนทำให้ชั้นโอโซนมีประสิทธิภาพในการกรองรังสีแสงอาทิตย์น้อยลง ขณะนี้โรงงานอุตสาหกรรมกำลังปลดปล่อยสารเคมีหลายชนิดขึ้นไปทำลายชั้นโอโซน สารเคมีเหล่านี้อาจยังคงทำลายชั้นโอโซนต่อไปอีกในเวลาร้อยปีข้างหน้าเนื่องจากคงอยู่ในชั้นบรรยากาศได้นาน

เราไม่สามารถทำอะไรได้เลยกับสารเคมีที่หลุดลอยขึ้นไปสู่บรรยากาศ แต่เราสามารถทำบางสิ่งบางอย่างเพื่อจัดการกับสารเคมีที่จะหลุดลอยขึ้นไปได้ในอนาคต เราจำเป็นต้องดำเนินการอย่างใดอย่างหนึ่งเพื่อให้ลูกหลานในอนาคตสามารถดำรงชีวิตอยู่ในสิ่งแวดล้อมที่ดีเหมือนกับพวกเรา มีสัญญาณเตือนเราแล้วว่าหากไม่รีบดำเนินการอย่างเร่งด่วน ลูกหลานในอนาคตจะตกอยู่ในสภาพภูมิอากาศที่แปรเปลี่ยนไป และเผชิญกับรังสีอัลตราไวโอเลตในปริมาณที่มากขึ้น

ขณะนี้ชั้นโอโซนได้รับความเสียหายบ้างเล็กน้อย หรือบางทีอาจยังไม่ได้รับความเสียหายก็ได้ แต่เมื่อเราเข้าใจและตระหนักถึงปัญหาที่เกิดขึ้นจึงควรควบคุมกระบวนการทำลายสิ่งแวดล้อมก่อนที่จะเกิดผลกระทบตามมาทีหลัง ดังนั้นเราจึงจำเป็นต้องมีข้อมูลที่ถูกต้อง และศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับเรื่องนี้อย่างจริงจัง

ข้าพเจ้าเชื่อว่าหนังสือเล่มนี้จะช่วยให้ท่านได้รู้และเข้าใจในปัญหาที่เกิดขึ้นนี้ และปฏิบัติในสิ่งที่ถูกต้อง ขอชื่นชมผู้ที่ต้องการใคร่รู้อย่างละเอียดเกี่ยวกับประเด็นปัญหาสิ่งแวดล้อมที่สำคัญในหนังสือเล่มนี้

มอสตาฟา เค. ทอลบา
ผู้อำนวยการบริหาร
โครงการสิ่งแวดล้อมแห่งสหประชาชาติ

บทนำ

โอโซนเป็นส่วนประกอบเพียงส่วนน้อยในชั้นบรรยากาศโลก นับตั้งแต่เหนือระดับทะเลขึ้นไปจนถึงประมาณ 60 กิโลเมตร ระดับความเข้มข้นของโอโซนแตกต่างกันไป โอโซนมีความสำคัญต่อสังคมมนุษย์ 2 ประการ คือ

โอโซนป้องกันไม่ให้รังสีอัลตราไวโอเลตในช่วงความยาวคลื่นที่เป็นอันตรายแผ่มายังพื้นผิวโลก

ประการแรก โอโซนทำหน้าที่เป็นตัวกรองรังสีอัลตราไวโอเลตในช่วงความยาวคลื่นที่เป็นอันตรายมากที่สุดไม่ให้แผ่มายังพื้นผิวโลก นอกจากนั้นยังทำหน้าที่กรองรังสีอัลตราไวโอเลตในช่วงความยาวคลื่นที่มีอันตรายน้อยกว่าประมาณร้อยละ 70-90 รังสีที่มีความยาวคลื่นในช่วงดังกล่าวนี้สามารถทำให้ผิวหนังไหม้เกรียม เยื่อตาขาวระคายเคืองจากแสงสะท้อนของหิมะเข้าตา ผิวหนังเหี่ยวย่นแก่กว่าวัย และเกิดมะเร็งผิวหนังได้

ประการที่สอง โอโซนมีบทบาทสำคัญหลายประการในการควบคุมอุณหภูมิโลกให้เป็นปกติ โอโซนมีลักษณะเป็นก๊าซเรือนกระจกเช่นเดียวกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เมื่อโอโซนในชั้นบรรยากาศใกล้ผิวโลกมีความเข้มข้นขึ้น รังสีอินฟราเรดที่สะท้อนออกไปจากพื้นผิวโลกจะถูกดูดกลืนไว้ก่อนที่จะกลับคืนสู่อวกาศ จึงทำให้โลกอบอุ่น ในชั้นบรรยากาศที่สูงขึ้นไป การที่โอโซนดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเลตไว้จะยังคงช่วยควบคุมอุณหภูมิโลกให้เป็นปกติได้ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของโอโซนที่เกิดขึ้นในความสูงระดับใดก็ตามล้วนมีอิทธิพลต่อสภาพภูมิอากาศโลก

สารเคมีหลายชนิดมีผลต่อความเข้มข้นของโอโซน เพราะเร่งการแตกตัวทางเคมีในโอโซนให้เร็วขึ้น สารที่สำคัญที่สุดดังกล่าวเป็นสารซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมีง่ายๆ แต่ไวต่อปฏิกิริยาในการทำให้โอโซนแตกตัวมาก สารเหล่านี้ประกอบด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจน คลอรีน และไนโตรเจน กระบวนการเร่งการแตกตัวของโอโซนโดยสารเคมีดังกล่าวส่วนมากมักจะเกิดขึ้นในบรรยากาศชั้นสูง ปกติแล้วสารเคมีเหล่านี้จะอยู่ในสภาพก๊าซปริมาณน้อยที่คงตัวเมื่อได้รับรังสีอัลตราไวโอเลตจะแตกตัวไปเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของโอโซนอีกต่อหนึ่ง ซึ่งได้แก่ ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ ไอน้ำ คลอโรฟอร์ม มีเทน และสารเคมีที่รู้จักกันดีในชื่อคลอโรฟลูออโรคาร์บอน (CFC) ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในเชิงพาณิชย์ในอุตสาหกรรมหลัก อาทิ ในสารละอองไอ ในการผลิตสเปรย์ ในการเป่าโฟม และสารในตู้เย็นเป็นต้น

ระดับโอโซนเหนือบริเวณขั้วโลกใต้ในช่วงฤดูใบไม้ผลิลดลงอย่างมากเป็นประจำทุกปี

ความเข้มข้นของก๊าซปริมาณน้อยในชั้นบรรยากาศข้างต้นกำลังเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ เนื่องจากกิจกรรมด้านอุตสาหกรรม ด้วยเหตุนี้โอโซนจึงถูกทำลายอย่างมาก โดยเฉพาะจากสาร CFC เป็นเรื่องยากที่จะประมาณความรุนแรงจากอันตรายที่อาจเกิดขึ้นเนื่องจากเหตุผลหลายประการ ประการแรกคือ ทั้งปฏิกิริยาเคมีและฟิสิกส์ที่เกิดขึ้นในบรรยากาศเป็นกระบวนการที่ซับซ้อนมาก อีกประการหนึ่งคือ สาเหตุจากก๊าซปริมาณน้อยบางชนิดมีความเข้มข้นในบรรยากาศเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นเรื่องที่อาจจะเข้าใจ

ได้ไม่ทั้งหมด จึงยากที่จะคาดการณ์ได้ว่า ในอนาคตระดับความเข้มข้นของก๊าซเหล่านี้จะมีการเปลี่ยนแปลงในปริมาณเท่าใด ประการที่สามคือ สาร CFC ต้องใช้เวลาระยะในการเคลื่อนที่จากพื้นผิวโลกขึ้นไปสู่ระดับความสูงที่จะก่อให้เกิดความเสียหายได้ ผลกระทบที่เกิดจากสารดังกล่าวแม้จะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ แต่เมื่อเกิดขึ้นแล้วจะทำลายโอโซนจนก่อความเสียหายต่อเนื่องกันไปเป็นระยะเวลานานนับ 100 ปีหรือมากกว่านั้น

การวัดปริมาณของโอโซนในช่วงสองสามทศวรรษที่ผ่านมา แสดงให้เห็นว่าปริมาณโอโซนโดยเฉลี่ยทั้งหมดในโลกยังไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างเด่นชัดนัก อย่างไรก็ตามมีสิ่งบ่งชี้ว่า มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณโอโซนบ้างเล็กน้อยในแต่ละระดับความสูง โดยจะมีปริมาณเพิ่มที่ระดับในความสูงใกล้ผิวโลกและจะลดลงเมื่อสูงขึ้นไป ระยะเวลาเพียงไม่กี่ปีมานี้ปริมาณโอโซนเหนือบริเวณขั้วโลกใต้ลดลงอย่างมากในช่วงฤดูใบไม้ผลิ ซึ่งยังไม่แน่ชัดว่าเป็นเพราะเหตุใด

ผลที่เกิดขึ้นนี้ยังเป็นเรื่องใหม่ และเป็นหลักฐานสำคัญทางประวัติศาสตร์ที่แสดงให้เราได้รู้ว่ากำลังเกิดอะไรขึ้นในชั้นโอโซน และจนถึงขณะนี้ความเสียหายที่เกิดกับชั้นโอโซนเป็นการคาดการณ์ตามทฤษฎี ถ้าผลการศึกษาเป็นที่ยืนยันได้ ย่อมแสดงว่าการเฝ้าสังเกตด้วยหลักการทางทฤษฎีมามากกว่าหนึ่งทศวรรษย่อมเป็นจริง

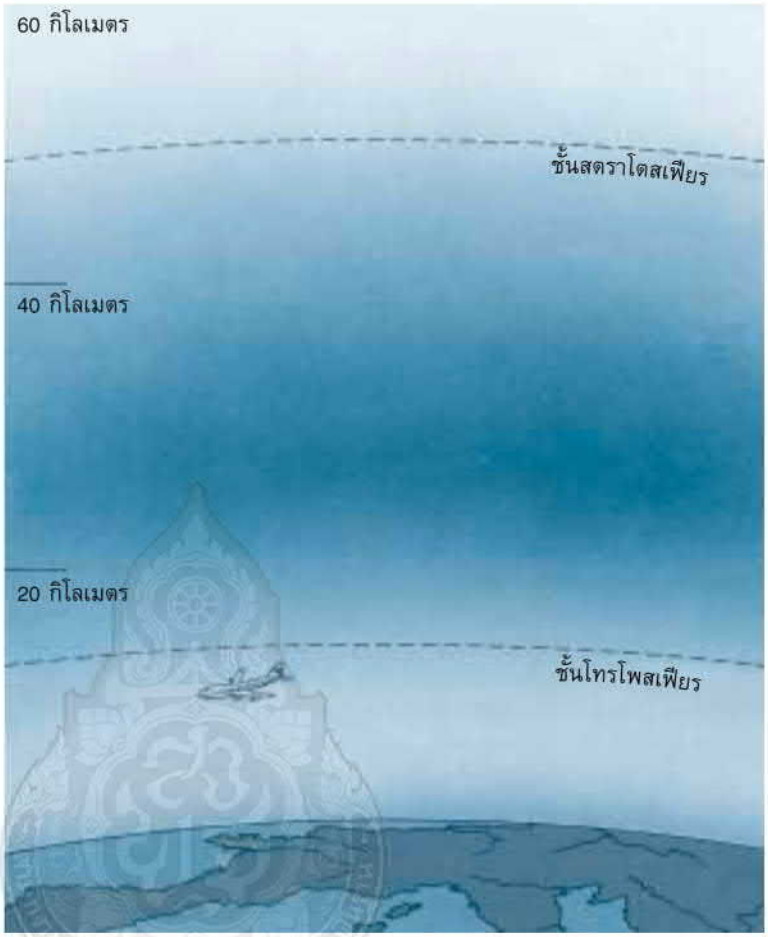
ข้อมูลจากการสังเกตใหม่ ๆ มีความสอดคล้องอย่างกว้าง ๆ กับการคาดการณ์ในสิ่งที่จะเกิดขึ้นต่อชั้นโอโซน การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของบรรยากาศ ซึ่งในแบบจำลองเหล่านี้ระบุว่า ถ้ายังมีการผลิตสาร CFC เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ และความเข้มข้นของสารเคมีชนิดอื่น ๆ ที่ทำลายโอโซนยังคงเพิ่มขึ้นด้วยอัตราที่เป็นอยู่ในปัจจุบัน ระดับโอโซนทั้งหมดจะลดลงร้อยละ 2-3 โดยปริมาตร และโอโซนในชั้นบรรยากาศที่ระดับสูงขึ้นไปจะลดลงมากยิ่งขึ้นในอีก 50 ปีข้างหน้า

ถ้าโอโซนยังคงลดลงอยู่เช่นนี้ มนุษย์จะได้รับรังสีอัลตราไวโอเลตเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้เกิดโรคเกี่ยวกับตาและมะเร็งผิวหนังกับมนุษย์และสัตว์เลี้ยงในทุกพื้นที่ และยังส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของพืช ทำให้ผลผลิตทางการเกษตรลดลง ป่าไม้จะเหลือน้อยลง นอกจากนั้นยังมีผลกระทบต่อระบบนิเวศน้ำเป็นบริเวณกว้าง รวมทั้งปลาซึ่งเป็นอาหารของมนุษย์อีกด้วย เพราะสาหร่ายทะเลเป็นสิ่งมีชีวิตเริ่มต้นในห่วงโซ่อาหารของสัตว์ทะเลซึ่งไวต่อปฏิกิริยาของรังสีอัลตราไวโอเลต

ความสัมพันธ์เชิงปริมาณระหว่างการลดลงของโอโซนกับผลกระทบต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นดังกล่าวยังไม่เป็นที่เข้าใจกันดีนัก ตัวอย่างเช่น การลดลงของโอโซนร้อยละ 10 อาจทำให้เกิดผลกระทบจากรังสีอัลตราไวโอเลตเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 20 ดังนั้นจึงได้ทดลองเพื่อให้เกิดความกระจ่างขึ้นถึงผลกระทบจากการลดลงของโอโซนที่มีต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ ผลผลิตทางการเกษตร และการประมง

สาร CFC ต้องใช้ระยะเวลาในการเคลื่อนที่จากพื้นผิวโลกขึ้นไปสู่ระดับความสูงที่จะทำให้เกิดความเสียหายได้ ผลกระทบที่เกิดจากสารดังกล่าวแม้จะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ แต่เมื่อได้เกิดขึ้นแล้วจะทำลายโอโซนจนก่อความเสียหายต่อเนื่องกันไปเป็นเวลานานนับ 100 ปีหรือมากกว่านั้น

ส่งผลให้เกิดโรคเกี่ยวกับดวงตาและมะเร็งผิวหนังกับมนุษย์และสัตว์เลี้ยงในทุกพื้นที่ และยังส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของพืช



การแปรปรวนในชั้นโอโซน รวมทั้งการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารเคมีชนิดอื่นๆ ดูเหมือนจะเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดภาวะโลกร้อน การประมาณค่าจากแบบจำลองตามทฤษฎีที่ดีที่สุดในปัจจุบันนั้น ระบุว่าอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นระหว่าง 1.5 ถึง 4.5 องศาเซลเซียส ใน ค.ศ. 2030

อุณหภูมิที่สูงขึ้นตามอัตราดังกล่าวย่อมส่งผลกระทบอย่างรุนแรงต่อสังคมมนุษย์ ซึ่งในช่วง 10,000 ปีที่ผ่านมา อุณหภูมิเฉลี่ยของโลกในแต่ละปีที่แตกต่างกันมากกว่า 1 องศาเซลเซียสนั้นแทบจะไม่มีเลย หรือแม้แต่ในช่วงยุคน้ำแข็งที่ผ่านมา อุณหภูมิเฉลี่ยของโลกยังต่ำกว่าปัจจุบันเพียง 5 องศาเซลเซียส

การที่โลกร้อนขึ้นเช่นนี้อาจทำให้บางพื้นที่มีอุณหภูมิสูงขึ้นมาก โดยเฉพาะในเขตละติจูดสูงซีกโลกเหนือ ปริมาณฝนโดยเฉลี่ยจะเพิ่มมากขึ้น แต่ดินกลับแห้งแล้งลง เป็นเพราะน้ำระเหยเพิ่มขึ้นนั่นเอง การกระจายความร้อนในมหาสมุทรทำให้น้ำทะเลเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ แต่เป็นไปโดยสม่ำเสมอ ด้วยเหตุนี้อีกประมาณ 100 ปีหรือมากกว่านั้น อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะทำให้บางส่วนของก้อนน้ำแข็งที่ปกคลุมขั้วโลกละลายและปริมาณน้ำในมหาสมุทรจะเพิ่มขึ้น

การกระจายความร้อนในมหาสมุทรทำให้น้ำทะเลเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ แต่เป็นไปโดยสม่ำเสมอ

ผลกระทบที่จะเกิดขึ้นกับมนุษย์จะกระจายออกไปเป็นบริเวณกว้าง สร้างความเสียหายต่อผลิตผลทางการเกษตร พื้นที่เกษตรกรรมลดลง การเปลี่ยนแปลงระดับน้ำทะเลอาจนำไปสู่การอพยพครั้งใหญ่ เนื่องจากประชากรส่วนใหญ่อาศัยอยู่แนวชายฝั่งทะเล ฐานที่ตั้งทางเศรษฐกิจหลายประเทศและการค้าระหว่างประเทศอาจต้องประสบกับการเปลี่ยนแปลงครั้งใหญ่

สิ่งที่เกิดขึ้นดังกล่าวข้างต้นทำให้เกิดข้อตกลงระหว่างประเทศเพื่อปกป้องชั้นโอโซน ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญยิ่ง จึงได้มีการลงนามร่วมกันระหว่างรัฐบาลประเทศต่าง ๆ ที่กรุงเวียนนา เพื่อพิทักษ์ชั้นโอโซนไว้ใน ค.ศ. 1985 แต่ยังไม่มีผลบังคับใช้ การทำงานในเรื่องนี้ก้าวหน้าไปมากทั้งนี้เพื่อกำหนดให้จำกัดศักยภาพในการผลิตและการใช้ประโยชน์จากสารเคมีหรือด้วยวิธีการอื่น ๆ ขณะเดียวกันประเทศต่าง ๆ รวมทั้งกลุ่มเศรษฐกิจหลายกลุ่มต่างนำกฎข้อบังคับในการควบคุมการใช้ และการผลิตสาร CFC มาปฏิบัติ เนื่องจากสารดังกล่าวคงอยู่ในชั้นบรรยากาศได้เป็นระยะเวลายาวนานมากกว่า 100 ปี ดังนั้นผลกระทบที่จะเกิดขึ้นย่อมคงมีอยู่อีกนาน จึงจำเป็นจะต้องนำกฎข้อบังคับมาใช้เพื่อพิทักษ์ชั้นโอโซนอย่างเร่งด่วน

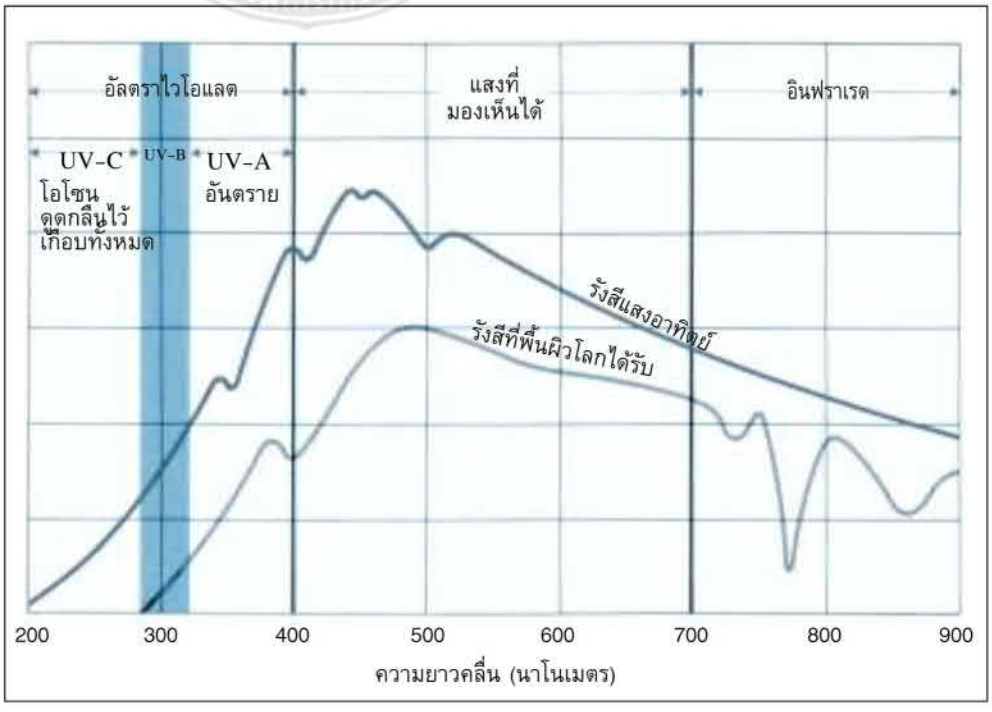
ดังนั้นผลกระทบที่จะเกิดขึ้นย่อมคงอยู่อีกนาน จึงจำเป็นต้องนำกฎข้อบังคับมาใช้เพื่อพิทักษ์ชั้นโอโซนอย่างเร่งด่วน

ภูมิหลังทางวิทยาศาสตร์

ทุกชีวิตบนโลกต้องอาศัยบรรยากาศเพื่อการดำรงชีวิต เท่าที่ค้นพบมีเพียงแต่โลกเท่านั้นที่มีบรรยากาศซึ่งประกอบด้วยก๊าซชนิดต่างๆ รวมทั้งไอน้ำ ผสมกันอยู่ในสัดส่วนที่เหมาะสมต่อการอยู่รอดของสิ่งมีชีวิต ออกซิเจนและน้ำเป็นองค์ประกอบหลักสำหรับการดำรงชีวิต แต่การมีชีวิตอยู่ได้ยังต้องอาศัยก๊าซอื่นๆ อีกหลายชนิด ซึ่งทำหน้าที่กรองรังสีจากดวงอาทิตย์ และปรับอุณหภูมิของบรรยากาศและพื้นผิวโลก ได้แก่ โอโซน โอโซนมีโครงสร้างโมเลกุลประกอบด้วยออกซิเจน 3 อะตอม เป็นก๊าซปริมาณน้อยซึ่งมีอยู่เพียงสองสามส่วนในล้านส่วนของบรรยากาศ หากนำโอโซนในบรรยากาศทั้งหมดมารวมกันที่พื้นผิวโลก จะได้ชั้นก๊าซโอโซนที่หนาเพียง 3 มิลลิเมตรเท่านั้น และหนักเพียง 3,000 ล้านตัน

สิ่งมีชีวิตต้องพึ่งพาโอโซนซึ่งสามารถดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเลตจากดวงอาทิตย์ที่ระดับความยาวคลื่นต่างๆ จนถึงความยาวคลื่น 320 นาโนเมตร (1 นาโนเมตร = 1 ล้านมิลลิเมตร หรือ 10^{-9} เมตร) รังสีอัลตราไวโอเลตที่มีความยาวคลื่น 200–280 นาโนเมตร เรียกว่ารังสี UV-C ซึ่งเป็นอันตรายต่อมนุษย์และสิ่งมีชีวิตทั้งหลาย จนถึงแก่ชีวิตได้ ไม่ว่ารังสีนี้จะมีมากหรือน้อยเพียงใด จะถูกโอโซนในบรรยากาศดูดกลืนไว้จนหมดสิ้น

รังสีอัลตราไวโอเลตที่ความยาวคลื่นระหว่าง 280–320 นาโนเมตร เรียกว่ารังสี UV-B โอโซนสามารถดูดกลืนรังสีชนิดนี้ได้เกือบทั้งหมด บางส่วนของสเปกตรัมของรังสี UV-B เป็นอันตรายต่อการดำเนินชีวิตของสิ่งมีชีวิต แม้รังสีนี้จะแผ่ลงมาถึงพื้นผิวโลกน้อยมากก็ตาม แต่สามารถทำอันตรายต่อดวงตาและก่อให้เกิดโรคมะเร็งผิวหนังได้หากได้รับในปริมาณมาก เกิดผลกระทบรุนแรงต่อปริมาณการผลิตพืชผล ต่อสาหร่ายทะเลและ

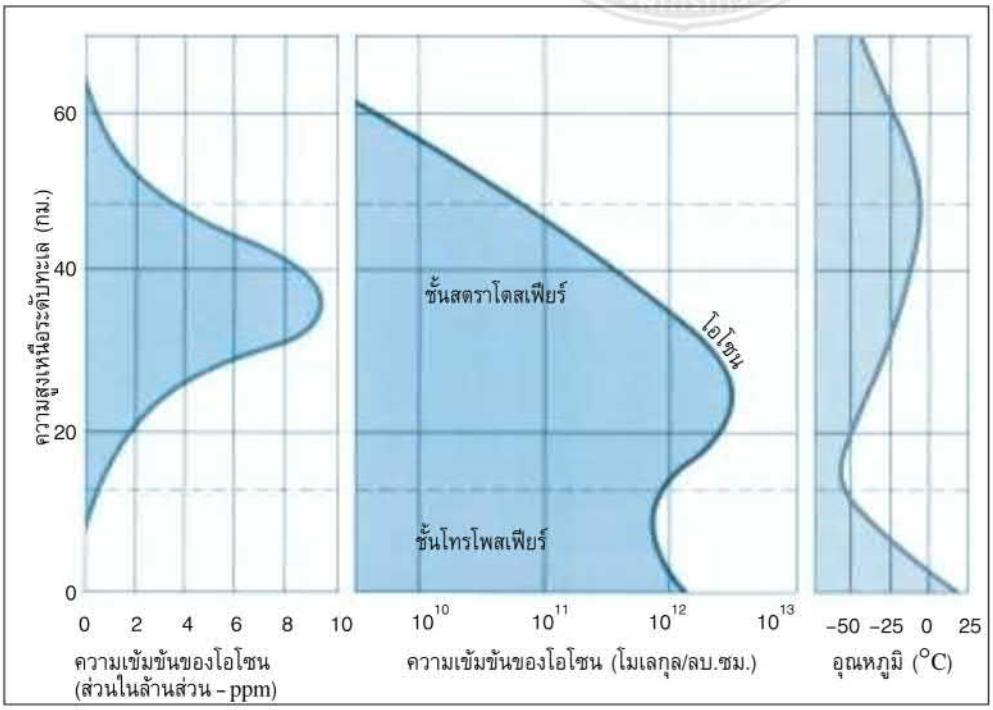


รูปที่ 1 *รังสีดวงอาทิตย์ซึ่งมีความยาวคลื่นตั้งแต่ 100 จนถึงมากกว่า 3,000 นาโนเมตร (นม.) แต่รังสีส่วนใหญ่จะแผ่ลงมาไม่ถึงโลก ความยาวคลื่น 280–320 นาโนเมตร เป็นที่รู้จักกันว่าเป็นรังสี UV-B ซึ่งโอโซนดูดกลืนไว้ได้บางส่วน รังสีชนิดนี้เป็นสาเหตุให้ผิวหนังไหม้เกรียม ทำลายดวงตา ก่อให้เกิดมะเร็งผิวหนัง และเป็นผลให้การเจริญเติบโตของพืชช้าลง*

ผลผลิตการประมงอีกด้วย ส่วนรังสีอัลตราไวโอเลตที่ความยาวคลื่นมากกว่า 320 นาโนเมตร เรียกว่ารังสี UV-A ไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต และโอโซนสามารถดูดกลืนรังสีชนิดนี้ได้

หากพื้นผิวโลกได้รับรังสีอัลตราไวโอเลตโดยปราศจากการกรองจากโอโซนแล้ว สิ่งมีชีวิตที่สามารถมีชีวิตอยู่รอดได้จะมีลักษณะที่แตกต่างจากที่เราเห็นอยู่ในปัจจุบัน ด้วยเหตุที่โอโซนสามารถดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเลตชนิดที่เป็นอันตรายต่อสิ่งที่มีชีวิตได้ จึงเป็นเสมือนร่มกั้นรังสีที่เป็นอันตรายจากดวงอาทิตย์ โอโซนเกือบทั้งหมดอยู่ในบรรยากาศชั้นต่ำสุด 2 ชั้น คือ ชั้นโทรโพสเฟียร์ซึ่งสูงจากพื้นผิวโลกขึ้นไป 12 กิโลเมตร ในชั้นนี้มีไอน้ำที่อยู่ในสภาพเมฆมากมาย และชั้นสตราโตสเฟียร์ที่สูงขึ้นไปอีกประมาณ 50 กิโลเมตร เป็นชั้นที่ค่อนข้างแห้งและเกือบไม่มีเมฆเลย โอโซนในชั้นนี้มีมากที่สุดที่ระดับความสูง 20–50 กิโลเมตรเหนือพื้นผิวโลก ความเข้มข้นสูงสุดประมาณ 10 ส่วนในล้านส่วนโดยปริมาตร อยู่ที่ระดับ 20–25 กิโลเมตร (ดูรูปที่ 2) ทุก 100,000 โมเลกุลของอากาศจะมีโอโซนเพียง 1 โมเลกุลเท่านั้น บางครั้งโอโซนในชั้นสตราโตสเฟียร์อาจลงมาอยู่ในชั้นโทรโพสเฟียร์ได้ แต่โอโซนในชั้นโทรโพสเฟียร์ไม่สามารถขึ้นไปอยู่ในชั้นสตราโตสเฟียร์ได้เลย นั่นคือ ถ้าโอโซนในชั้นสตราโตสเฟียร์หมดไป จะไม่สามารถทดแทนด้วยโอโซนในชั้นที่ต่ำกว่าได้อีก

โอโซนที่พื้นผิวดินจะเบาบางมาก ซึ่งเป็นสิ่งดีเพราะโอโซนเป็นก๊าซพิษ แม้จะมีปริมาณเพียงเล็กน้อยก็ตาม แต่สามารถทำให้เกิดการระคายเคืองต่อระบบหายใจจนถึงระดับที่เป็นอันตรายได้ อย่างไรก็ตาม โอโซนจะเกิดขึ้นในกระบวนการเกิดหมอกควันพิษจากปฏิกิริยาเคมีแสงด้วย เมื่อเผาไหม้เชื้อเพลิงดึกดำบรรพ์จะได้ออกไซด์ของไนโตรเจน



รูปที่ 2 *จากพื้นผิวโลกสูงขึ้นไปจนถึง 60 กิโลเมตร พบว่าโอโซนมีปริมาณที่แตกต่างกันมาก ความเข้มข้นของโอโซนเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนในบรรยากาศชั้นสตราโตสเฟียร์ โอโซนมีความเข้มข้นมากที่สุดที่ระดับความสูงตั้งแต่ 25–35 กิโลเมตร ซึ่งจะมีปริมาณไม่มากไปกว่า 10 ส่วนในล้านส่วนโดยปริมาตร*

แสงแดดจะทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาระหว่างโมเลกุลกับอะตอมของออกซิเจนเป็นโอโซน ดังสมการต่อไปนี้ $O_2 + O \longrightarrow O_3$

นอกจากจะปกป้องโลกจากรังสีที่เป็นอันตรายได้แล้ว โอโซนยังรักษาอุณหภูมิบนพื้นผิวโลกและชั้นบรรยากาศให้เป็นปกติด้วย เริ่มแรกบรรยากาศชั้นโทรโพสเฟียร์ได้รับความร้อนจากรังสีของดวงอาทิตย์ที่สะท้อนกลับไปจากผิวโลก และจากรังสีอินฟราเรดที่แผ่ลงมาจากบรรยากาศชั้นสตราโตสเฟียร์ ชั้นสตราโตสเฟียร์เองได้รับความร้อนจากกระบวนการการดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเลตจากโอโซน ดังนั้นโอโซนจึงเป็นแหล่งรองรับความร้อนในชั้นสตราโตสเฟียร์ เมื่ออุณหภูมิชั้นสตราโตสเฟียร์เปลี่ยนแปลงไปความเข้มข้นของโอโซนจึงเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในชั้นสตราโตส-เฟียร์มีผลต่ออุณหภูมิในบรรยากาศชั้นโทรโพสเฟียร์ จนในที่สุดมีผลกระทบต่อสภาพภูมิอากาศบนพื้นผิวโลก ผลดังกล่าวไม่เพียงแต่จะขึ้นอยู่กับปริมาณโอโซนทั้งหมดในชั้นบรรยากาศเท่านั้น หากยังขึ้นอยู่กับลักษณะการกระจายของโอโซนด้วย

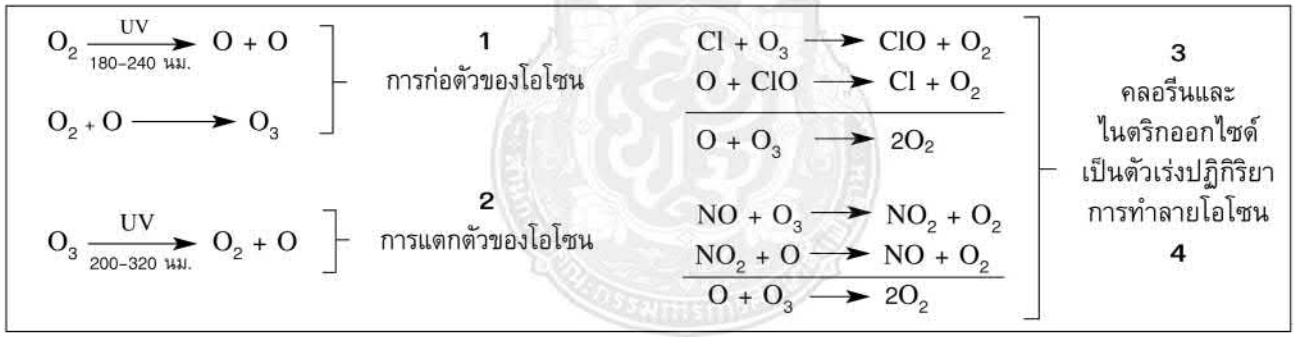
กระบวนการดังกล่าวทำให้เกิดผลตรงข้ามกัน 2 ประการ คือ ระดับความเข้มข้นของโอโซนในบรรยากาศชั้นสตราโตสเฟียร์ลดลง ทำให้ดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเลตได้น้อยลง รังสีอัลตราไวโอเลตจำนวนมากจึงแผ่มายังผิวโลก ทำให้โลกร้อนขึ้น ในทางกลับกันถ้ารังสีอัลตราไวโอเลตถูกดูดกลืนน้อยลง บรรยากาศชั้นสตราโตสเฟียร์จะเย็นลงและจะแผ่รังสีอินฟราเรดมายังโลกน้อยลง เป็นผลให้โลกเย็นลงด้วย ผลที่เกิดขึ้นดังกล่าวอาจหักล้างกันและกันได้หากโอโซนในชั้นสตราโตสเฟียร์ลดลง แต่อาจจะไม่เป็นเช่นนั้นหากระดับโอโซนลดลงมากที่ความสูงระดับสูงขึ้นไป ดังนั้นอุณหภูมิของโลกจึงขึ้นอยู่กับระดับโอโซนเหนือชั้นโทรโพสเฟียร์ และระดับโอโซนล่างชั้นสตราโตสเฟียร์

โอโซนในบรรยากาศชั้นโทรโพสเฟียร์ทำหน้าที่แตกต่างจากชั้นสตราโตสเฟียร์อย่างสิ้นเชิงในการช่วยปรับอุณหภูมิให้เป็นปกติ โอโซนเป็นก๊าซเรือนกระจกเช่นเดียวกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งทำให้อุณหภูมิในชั้นบรรยากาศและอุณหภูมิบนพื้นโลกสูงขึ้นด้วยกระบวนการของปฏิกิริยาเรือนกระจก กระบวนการดังกล่าวเกิดจากการดูดกลืนหรือส่งผ่านรังสีของดวงอาทิตย์ ก๊าซเรือนกระจกยอมให้รังสีดวงอาทิตย์ผ่านลงมาได้ และพื้นผิวโลกจะดูดกลืนไว้ ทำให้โลกอุ่นขึ้น และเมื่อโลกร้อนขึ้นจะปล่อยรังสีที่มีความยาวคลื่นมากกว่ากลับคืนสู่บรรยากาศ และท้ายที่สุดจะออกไปสู่อวกาศ จึงทำให้โลกเย็นลง นี่คือกลไกที่ทำให้อุณหภูมิบนผิวโลกเหมาะสม อย่างไรก็ตาม ก๊าซเรือนกระจกทำให้กระบวนการรักษาดุลของอุณหภูมิเสียไป เพราะกั้นไม่ให้รังสีที่มีความยาวคลื่นมากกว่าซึ่งสะท้อนจากผิวโลกผ่านขึ้นไปได้ โดยดูดกลืนรังสีในบางช่วงความยาวคลื่นเอาไว้ไม่ให้กระจายขึ้นไปสู่อวกาศ และปิดกั้นกลไกที่ทำให้โลกเย็นลง เป็นเหตุให้พื้นผิวโลกและบรรยากาศของโลกค่อย ๆ ร้อนขึ้น

สมดุลของโอโซน

โดยปกติแล้วก๊าซทั้งหลายในชั้นบรรยากาศโลกอยู่รวมกันในลักษณะสมดุลแบบพลวัตกัน และต่างก็มีส่วนเกี่ยวข้องกันในวัฏจักรต่างๆ ในโลก ตัวอย่างเช่น คาร์บอนและไนโตรเจน จะวนเวียนกลับไปกลับมาอยู่ระหว่างพืชและสัตว น้ำ ดิน และบรรยากาศ ก๊าซหลายชนิดในบรรยากาศชั้นสูงจะแตกตัวโดยแสงอาทิตย์เกิดเป็นอนุมูลทางเคมีที่ไวพร้อมจะทำปฏิกิริยากับอนุมูลอื่นๆ เกิดเป็นสารชนิดใหม่ได้อย่างรวดเร็ว

โอโซนเองเกิดจากปฏิกิริยาลูกโซ่ เริ่มต้นจากรังสีแสงอาทิตย์ที่มีความยาวคลื่นน้อยกว่า 242 นาโนเมตร ถูกดูดกลืนโดยโมเลกุลของออกซิเจน ซึ่งจะถูกแยกออกเป็นออกซิเจนอิสระ 2 อะตอม ออกซิเจนอิสระแต่ละอะตอมจะทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของออกซิเจนอย่างรวดเร็ว เกิดเป็นโอโซน โมเลกุลของโอโซนจะแตกตัวเมื่อดูดกลืนรังสี UV-B เกิดเป็นออกซิเจน 1 โมเลกุล และอีก 1 อะตอม (ดูรูปที่ 3)



รูปที่ 3 *การก่อตัวของโอโซน (1) การแตกตัวของโอโซน (2) ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติในบรรยากาศชั้นสตราโตสเฟียร์ แต่อัตราการแตกตัวนั้นเพิ่มขึ้นโดยตัวเร่งปฏิกิริยา ได้แก่ คลอรีน (3) และไนตริกออกไซด์ (4)*

หากไม่มีสารเคมีอื่นเข้ามาเกี่ยวข้องในบรรยากาศ กระบวนการเหล่านี้อาจสมดุลกันได้ ปริมาณโอโซนเฉลี่ยที่มีในบรรยากาศกับที่ถูกทำลาย อาจเปลี่ยนแปลงน้อยมากแม้เวลาจะผ่านไปหลายปีก็ตาม อย่างไรก็ตาม อาจมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของโอโซนตามช่วงฤดูกาล ตำแหน่งที่ตั้งละติจูดต่างๆ บนโลก และตามความเข้มของรังสีดวงอาทิตย์ที่แปรเปลี่ยนตามกาลเวลาทุกๆ 27 วัน และทุกๆ 11 ปีในวัฏจักรสุริยะ อัตราการเกิดโอโซนในชั้นสตราโตสเฟียร์ขึ้นอยู่กับปริมาณรังสีจากดวงอาทิตย์ที่ตกลงในชั้นนี้เกือบทั้งหมด โดยมิได้เกิดจากอิทธิพลของมนุษย์เลย

อย่างไรก็ตาม บรรยากาศประกอบด้วยก๊าซหลายชนิดในปริมาณเล็กน้อยที่เร่งปฏิกิริยาทางเคมีต่าง ๆ ได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งก๊าซในกลุ่มที่ทำให้โอโซนแตกตัว ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยที่ก๊าซเหล่านั้นไม่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีแต่อย่างใด

ก๊าซในกลุ่มที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าว ได้แก่ ออกไซด์ของไนโตรเจน คลอรีน และไฮโดรเจน เนื่องจากปฏิกิริยาทางเคมีมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของก๊าซที่เป็นตัวเร่งปฏิกริยานั้น ซึ่งจะยังคงสภาพเดิมเมื่อปฏิกิริยาสิ้นสุดลง แต่ก๊าซเหล่านี้ในปริมาณเพียงไม่กี่ส่วนในพันล้านส่วน กลับส่งผลกระทบอย่างรุนแรงต่อความเข้มข้นของโอโซนในชั้นบรรยากาศ โดยทำหน้าที่เพียงเร่งปฏิกิริยาเพื่อโอโซนแตกตัวเท่านั้น แต่ละโมเลกุลของก๊าซดังกล่าวสามารถสลายโมเลกุลของโอโซนได้นับพัน ๆ โมเลกุล (ดูรูปที่ 3)

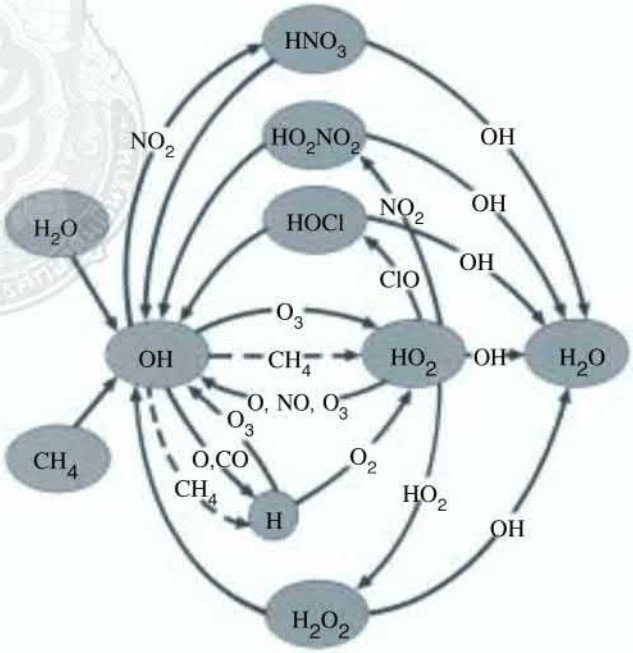
แม้โมเลกุลของก๊าซที่เกี่ยวข้องในการเร่งปฏิกิริยาจะไม่ซับซ้อน แต่รายละเอียดทางเคมีที่เกิดขึ้นในชั้นบรรยากาศนั้นมีความซับซ้อนเป็นอย่างยิ่ง ตัวการสำคัญที่ทำให้

การเกิดปฏิกิริยาเคมีแสงในชั้นบรรยากาศ

สมดุลแบบพลวัตของก๊าซชนิดต่าง ๆ ในบรรยากาศชั้นสตราโตสเฟียร์สามารถคงอยู่ได้ ทั้งนี้เป็นผลจากจำนวนของปฏิกิริยาเคมีที่เชื่อมโยงกันอย่างมากมายระหว่างก๊าซชนิดต่างๆ โดยมีไฮโดรเจน ไนโตรเจน และคลอรีนเป็นธาตุที่สำคัญมากที่สุดที่เกี่ยวข้องในปฏิกิริยาดังกล่าว รูปนี้สรุปถึงปฏิกิริยาที่สำคัญๆ อันเกิดจากก๊าซที่เกี่ยวข้องเหล่านี้

ในทศวรรษ 1970 และทศวรรษ 1980 ความเข้าใจในปฏิกิริยาเคมีแสงในบรรยากาศชั้นสตราโตสเฟียร์ก้าวหน้าไปอย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตาม เมื่อไม่นานมานี้ แม้ว่าความก้าวหน้าจะเป็นไปอย่างต่อเนื่อง อัตราความก้าวหน้าเริ่มจะช้าลง จึงกระตุ้นให้รู้ว่าจะต้องทำความเข้าใจกระบวนการที่เกิดขึ้นทั้งหมดให้มากกว่าเมื่อสองสามปีที่ผ่านมา

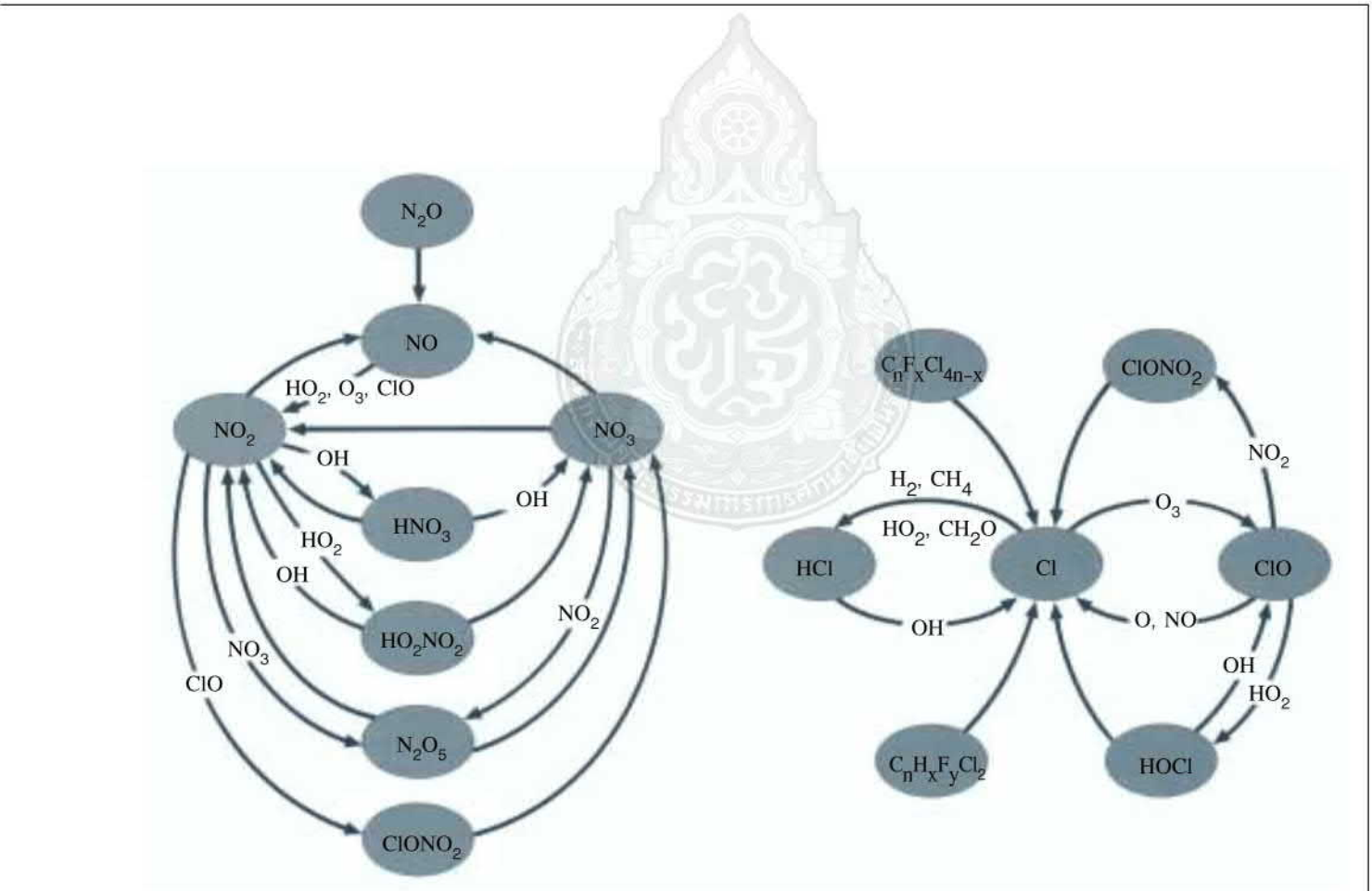
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ปฏิกิริยาเคมีแสงในชั้นบรรยากาศต้องอาศัยข้อมูลเกี่ยวกับปฏิกิริยาเหล่านี้ทั้งหมด รวมทั้งข้อมูลอัตราความเร็วการเกิดปฏิกิริยา ถึงแม้ว่าปฏิกิริยาเคมีแสงจะเป็นระบบที่ซับซ้อน แต่แบบจำลองทางเคมีส่วนใหญ่ในขณะนี้สามารถคาดการณ์ถึงสิ่งที่จะเกิดอย่างกว้าง ๆ ได้คล้าย ๆ กัน ดังนั้นจึงมั่นใจมากขึ้นว่าความพยายามในการพยากรณ์ระดับโอโซนที่อาจจะเปลี่ยนแปลงไปอันเนื่องจากผลของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารเคมีชนิดอื่น ๆ น่าจะถูกต้องขึ้น



วัฏจักรไฮโดรเจน

เกิดปฏิกิริยาทางเคมีดังกล่าว คือ รังสีอัลตราไวโอเลตในลักษณะของอนุภาคที่มีพลังงานสูง ซึ่งเรียกว่า โฟตอน ด้วยเหตุนี้จึงเรียกแขนงวิชาทางเคมีที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาดังกล่าวว่า 'ปฏิกิริยาเคมีแสง' ซึ่งเป็นกระบวนการทางเคมีที่แตกต่างไปจากปฏิกิริยาทางเคมีในรูปแบบอื่น ๆ และเมื่อใดที่บรรยากาศชั้นสตราโตสเฟียร์มีอุณหภูมิและความดันสูง โฟตอนจะทำให้โมเลกุลที่มีรูปแบบง่าย ๆ ของก๊าซดังกล่าว ซึ่งโดยปกติแล้วจะมีความคงตัวนั้นแตกตัวออกจากกันได้

ผลลัพธ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีแสงมีมากมายหลายชนิด ซึ่งได้แก่ อนุมูลสารเคมีชนิดต่าง ๆ เช่น อนุมูลไฮดรอกซิล (OH) และอนุมูลคลอรีน (Cl) ซึ่งมีความไวในการ



ทำปฏิกิริยาสูงมากจึงทำปฏิกิริยากับก๊าซชนิดอื่น ๆ ในชั้นบรรยากาศ รวมทั้งออกซิเจนและโอโซนได้อย่างรวดเร็ว ผลลัพธ์โดยรวมคือ การเกิดสมดุลแบบพลวัตของก๊าซชนิดต่าง ๆ ในชั้นบรรยากาศ ซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราความเร็วที่แตกต่างกันของปฏิกิริยาเคมีจำนวนหลายร้อยปฏิกิริยาในชั้นบรรยากาศ ยิ่งกว่านั้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีเหล่านี้ยังแตกต่างกันอย่างมากตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความดันบรรยากาศ

จากสิ่งที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ทำให้คาดการณ์ได้ยากถึงผลกระทบจากความเข้มข้นของสารเคมีเหล่านี้ที่เพิ่มขึ้นในบรรยากาศชั้นสตราโตสเฟียร์ หากจะให้การคาดการณ์มีประสิทธิภาพต้องมีการพิจารณาถึงผลของปฏิกิริยาเคมีของสารทุกตัวที่เกิดขึ้นพร้อม ๆ กันทั้งหมด

ในสถานการณ์เช่นนี้จะยิ่งมีความซับซ้อนมากขึ้นเรื่อย ๆ เพราะปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นจริงในบรรยากาศชั้นโทรโพสเฟียร์ มีรังสีอัลตราไวโอเลตความเข้มน้อย อุณหภูมิและความดันที่แตกต่างไปจากบรรยากาศชั้นสตราโตสเฟียร์ ตัวอย่างเช่น สารอินทรีย์โมเลกุลง่าย ๆ อาจทำให้ปริมาณโอโซนในชั้นโทรโพสเฟียร์เข้มข้นเพิ่มขึ้น แต่จะทำให้โอโซนในชั้นสตราโตสเฟียร์เบาบางลง

ความเข้าใจเกี่ยวกับรายละเอียดของปฏิกิริยาเคมีแสงเพิ่งเกิดขึ้นเมื่อประมาณ 1 หรือ 2 ทศวรรษที่แล้วนี้เอง ความรู้บางอย่าง เช่น ปฏิกิริยาที่สำคัญในการเกิดอนุมูลไฮดรอกซิล (OH) ได้มีการค้นพบเมื่อไม่นานนี้ นั่นคือ ประมาณปลายทศวรรษ 1970 และยังมีอีกหลายสิ่งหลายอย่างที่ยังไม่รู้ รูปข้างบนและก่อนหน้านี้เป็นการสรุปรายละเอียดบางอย่างของการเกิดปฏิกิริยาเคมีแสงในชั้นบรรยากาศ

ปฏิกิริยาเคมีต่าง ๆ ในชั้นบรรยากาศยังคงดำเนินอยู่ต่อไปและเป็นสิ่งที่นักวิทยาศาสตร์ให้ความสนใจอย่างมาก อย่างไรก็ตาม ความต้องการในการเข้าใจถึงกระบวนการเคมีแสงในชั้นบรรยากาศนั้นมีเพิ่มขึ้น และต้องการความเข้าใจอย่างเร่งด่วนถึงปริมาณความเข้มข้นของสารเคมีเริ่มต้นในชั้นบรรยากาศที่เพิ่มสูงขึ้น ระดับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงดึกดำบรรพ์มีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอ นับเป็นสิบ ๆ ปี แต่ความเข้มข้นของสารเคมีชนิดอื่น ๆ เพิ่งจะเพิ่มขึ้น ประมาณว่าเริ่มเพิ่มขึ้นตั้งแต่ ค.ศ. 1960 โดยบางชนิดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วผิดปกติ ซึ่งสารเคมีเหล่านี้เป็นภัยคุกคามต่อสมดุลของชั้นโอโซนและมีผลกระทบต่ออุณหภูมิโลก

ภัยคุกคามจากมลพิษเคมี

สารประกอบไฮโดรเจน ไนโตรเจน คลอรีน และฟลูออรีนจำนวนมากจากนิคมอุตสาหกรรมมีผลกระทบสำคัญต่อชั้นโอโซน สารเคมีหลายชนิดในชั้นบรรยากาศรวมตัวกันเป็นโมเลกุลต่าง ๆ อาทิ กรดไนตริกและกรดไฮโดรคลอริกที่ละลายน้ำได้ จึงละลายไปกับฝนที่ตกชะผ่านชั้นบรรยากาศสู่พื้นผิวโลกโมเลกุลของกรดไม่สามารถลอยขึ้นไปถึงบรรยากาศชั้นสตราโตสเฟียร์ จึงไม่เป็นภัยต่อชั้นโอโซน แต่กลายเป็นมลพิษในรูปของฝนกรด

อย่างไรก็ตาม ถ้าสารเคมีที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ในลักษณะที่คงตัวไม่ละลายน้ำ จะได้ผลที่แตกต่างจากที่กล่าวมาข้างต้น เช่น ไนตรัสออกไซด์ เมทิลคลอไรด์ มีเทน คาร์บอนเตตระคลอไรด์ รวมทั้งสารประกอบคลอรีนและฟลูออรีน (CFC)

ก๊าซปริมาณน้อยเหล่านี้ยังลอยอยู่ในชั้นโทรโพสเฟียร์เป็นระยะเวลานาน และลอยขึ้นไปสู่ชั้นสตราโตสเฟียร์ ก๊าซเหล่านี้จะทำปฏิกิริยากับสารเคมีชนิดอื่น ๆ โดยอาศัยรังสีอัลตราไวโอเลตและเกิดอนุมูลของสารประกอบ ไฮโดรเจน ไนโตรเจน คลอรีน ฟลูออรีน และโบรมีน ซึ่งเร่งการแตกตัวของโอโซนอย่างรวดเร็ว

ตารางที่ 1 สรุปข้อมูลที่จำเป็นเกี่ยวกับก๊าซปริมาณน้อยบางชนิดที่มีผลต่อความเข้มข้นของโอโซนมากที่สุด ซึ่งก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้รวมอยู่ในก๊าซดังกล่าวนี้ด้วย เพราะก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีผลต่อความเข้มข้นของโอโซน ตลอดจนสามารถทำให้บรรยากาศชั้นสตราโตสเฟียร์เย็นลง โดยลดอัตราเร็วการแตกตัวของโอโซนจากปฏิกิริยาเคมีอื่นๆ และเพิ่มความเข้มข้นโอโซนให้กับบรรยากาศชั้นสตราโตสเฟียร์อย่างมีประสิทธิภาพ

ตารางที่ 1 ก๊าซปริมาณน้อยที่มีผลกระทบต่อโอโซนในบรรยากาศ

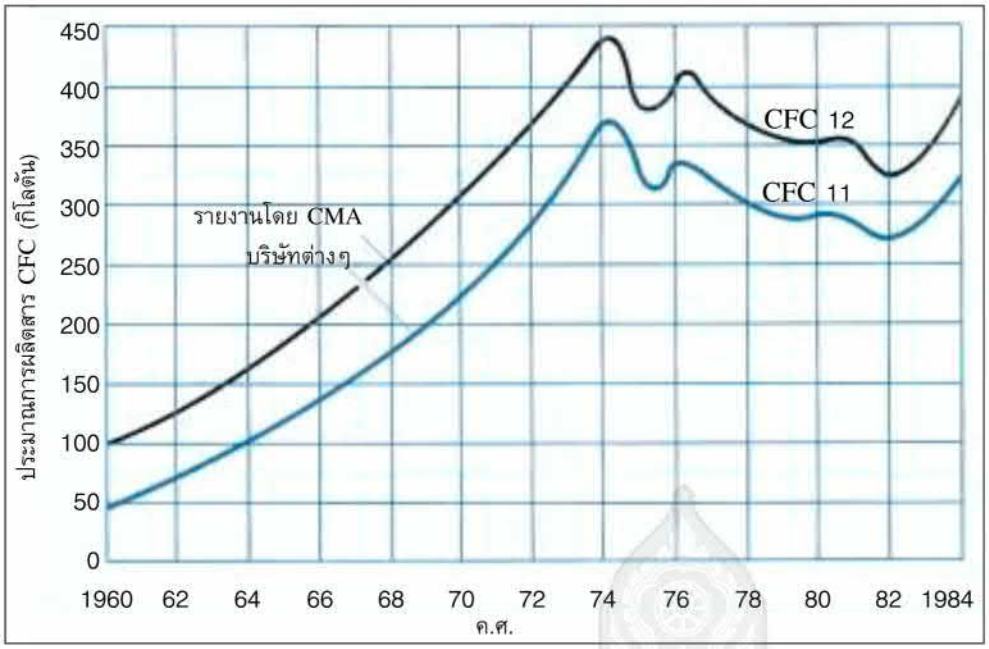
ก๊าซ	*สูตร*	*อายุเฉลี่ยในชั้นบรรยากาศ (ปี)*	*เฉลี่ยทั่วโลก (ส่วนในพันล้านส่วนโดยปริมาตร)*	*อัตราการเพิ่มต่อปี (ร้อยละ)*
CFC 11	$CFCl_3$	75	0.23	5
CFC 12	CF_2Cl_2	110	0.4	5
CFC 113	$C_2F_3Cl_3$	90	0.02	7
ฮาลอน 1301	CF_3Br	110	ต่ำมาก	11
ไนตรัสออกไซด์	N_2O	150	304	0.25
คาร์บอนมอนอกไซด์	CO	0.4	ผันแปร	0–2
คาร์บอนไดออกไซด์	CO_2	7	344,000	0.4
มีเทน	CH_4	11	1,650	1

หากไม่นับสาร CFC และฮาลอน 1301 ที่เป็นสารดับเพลิงชนิดหนึ่งที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย ซึ่งทำลายโอโซนอย่างรวดเร็วแล้ว ยังมีก๊าซชนิดอื่น ๆ ในตารางที่ 1 ที่เกิดขึ้นได้เองตามธรรมชาติและจากอุตสาหกรรม ตัวอย่างเช่น ก๊าซมีเทนตามธรรมชาติ (ก๊าซในที่ลุ่มน้ำขัง) จากบ่อโคลนและบ่อถ่านหิน ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างการย่อยสลายของมูลสัตว์เคี้ยวเอื้องและจากการเน่าเสียของอินทรีย์วัตถุในน้ำในนาข้าว

สาเหตุความเข้มข้นของก๊าซปริมาณน้อยในตารางที่ 1 ที่เพิ่มขึ้นนั้นยิ่งซับซ้อนที่สุด แท้ที่จริงแล้วยังไม่กระจ่างว่า เหตุใดความเข้มข้นของก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์จึงเพิ่มขึ้นในชั้นบรรยากาศได้ จึงเป็นการยากที่จะคาดคะเนระดับก๊าซต่าง ๆ เหล่านี้ในชั้นบรรยากาศ และผลกระทบจากก๊าซดังกล่าวต่อระดับโอโซน ยิ่งกว่านั้นก๊าซที่อยู่ในตารางที่ 1 ไม่ใช่ก๊าซเพียงกลุ่มเดียวที่มีอิทธิพลต่อระดับโอโซนในชั้นบรรยากาศสารชนิดอื่น ๆ อีกหลายชนิดที่ใช้กันไม่แพร่หลายมากนัก ก็มีผลกระทบต่อระดับโอโซนในชั้นบรรยากาศด้วยเช่น ความรู้เกี่ยวกับความเข้มข้นและอัตราความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นของก๊าซเหล่านี้มีน้อยมาก แต่ผลกระทบโดยรวมในการทำลายโอโซนจากก๊าซเหล่านี้จะสูงถึงร้อยละ 25 ของผลกระทบที่เกิดจาก สาร CFC 11 และ CFC 12

ตั้งแต่ต้นทศวรรษ 1960 เป็นต้นมา นักวิทยาศาสตร์วิตกว่าสารเคมีหลายชนิดที่ถูกปล่อยออกมาสู่ชั้นบรรยากาศมากขึ้น จะยิ่งทำให้ความเข้มข้นของโอโซนในบรรยากาศชั้นสตราโตสเฟียร์ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ จึงเป็นผลให้รังสี UV-B ที่เป็นอันตรายต่อมนุษย์แผ่ลงมายังพื้นผิวโลกได้ ตัวอย่างเช่น เครื่องบินจะปล่อยไอน้ำและไนโตรเจนออกไซด์ออกมากับไอเสียในปริมาณมหาศาล แม้ว่าเครื่องบินที่มีความเร็วต่ำกว่าเสียงส่วนใหญ่บินได้ดีในระดับที่ต่ำกว่าบรรยากาศชั้นสตราโตสเฟียร์ แต่เครื่องบินที่มีความเร็วเหนือเสียงจะบินได้สูงกว่าบรรยากาศชั้นสตราโตสเฟียร์ระดับล่าง

กลางทศวรรษ 1960 มีการคาดการณ์กันว่า กลางทศวรรษ 1980 จะมีการใช้เครื่องบินโดยสารความเร็วเหนือเสียงมากกว่า 500 ลำ และเครื่องบินเหล่านี้จะปล่อยสารปนเปื้อนเพียงพอที่จะไปลดระดับโอโซนในบรรยากาศชั้นสตราโตสเฟียร์ได้ แต่ปรากฏว่าการคาดการณ์นี้ผิดพลาด เพราะมีการใช้เครื่องบินโดยสารความเร็วเหนือเสียงเพียงไม่กี่ลำเท่านั้น อย่างไรก็ตาม ในหลายประเทศมีเครื่องบินทหารที่บินเร็วเหนือเสียงในระดับสูงจำนวนมากมายหลายฝูงบิน อาจมีผลกระทบต่อความเข้มข้นของโอโซน ปัจจุบันนี้ยังไม่มีหลักฐานใดที่แสดงว่าการบินใด ๆ ทำให้ระดับความเข้มข้นของโอโซนเปลี่ยนแปลง แม้ว่าการศึกษาตามทฤษฎีดังกล่าวได้แสดงให้เห็นว่า เครื่องบินที่ความเร็วน้อยกว่าเสียงอาจเพิ่มจำนวนโอโซนให้สูงขึ้นเล็กน้อยในระดับบรรยากาศชั้นโทรโพสเฟียร์ขึ้นไปและระดับบรรยากาศชั้นสตราโตสเฟียร์ลงมาได้



รูปที่ 4 *ปริมาณการผลิตสาร CFC 11 และ CFC 12 เพิ่มขึ้นอย่างมหาศาลตั้งแต่ ค.ศ. 1960 หลังจากนั้นลดอัตราการผลิตลงในช่วงกลางทศวรรษ 1970 และได้เพิ่มการผลิตขึ้นอีกครั้งหนึ่ง กราฟนี้ได้จากการรวบรวมข้อมูลเชิงสถิติโดยสมาคมผู้ผลิตสารเคมี (CMA)*

บางคนเชื่อว่าการผลิตปุ๋ยไนโตรเจนในปริมาณที่เพิ่มขึ้นจะทำให้มีการปล่อยสารประกอบไนโตรเจนออกสู่ชั้นบรรยากาศมากยิ่งขึ้น และบางส่วนอาจเป็นอันตรายต่อมนุษย์ในรูปของไนตรัสออกไซด์ ในความเป็นจริงไนตรัสออกไซด์ในชั้นบรรยากาศจะเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 0.25 ต่อปี และผลกระทบที่เกิดจากสารประกอบไนโตรเจนเหล่านี้ดูเหมือนจะมีผลในระยะยาว เพราะโดยเฉลี่ยแล้วโมเลกุลของไนตรัสออกไซด์เมื่อแพร่กระจายออกไปจะคงอยู่ในบรรยากาศได้นานถึง 150 ปี

สารเคมีอีกกลุ่มหนึ่งที่คงอยู่ได้ยาวนานในชั้นบรรยากาศ คือ คลอโรฟลูออโรคาร์บอน ซึ่งเป็นที่รู้จักกันในชื่อของฟรีออน สารเหล่านี้ถูกใช้เป็นตัวขับเคลื่อนในกระป๋องสเปรย์ เทคโนโลยีในการผลิตตู้เย็น ตัวทำละลาย และสารในการผลิตโฟม สารเคมีในกลุ่มนี้ที่ใช้มากที่สุดมีอยู่ 2 ชนิด คือ CFC 11 และ CFC 12 สาร CFC 11 สามารถคงอยู่ในชั้นบรรยากาศได้นานถึง 75 ปี และสาร CFC 12 คงอยู่ได้ถึง 110 ปี ดังนั้นแม้ว่าเราจะสามารถลดระดับการปล่อยสารเหล่านี้ในชั้นบรรยากาศอย่างสิ้นเชิงได้หรือลดลงอย่างรวดเร็วตั้งแต่บัดนี้เป็นต้นไป แต่ยังคงต้องใช้ระยะเวลาอีกหลายทศวรรษเพื่อให้ชั้นบรรยากาศกลับคืนสู่สภาพเดิม

สาร CFC ไม่ได้เกิดขึ้นตามธรรมชาติ แต่เกิดจากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมเท่านั้น ซึ่งในที่สุดแล้วสาร CFC นั้นจะลอยขึ้นไปอยู่ในชั้นบรรยากาศ ยิ่งไปกว่านั้น สารเหล่านี้จะไม่ถูกทำลายในบรรยากาศชั้นโทรโพสเฟียร์ แต่จะใช้ระยะเวลามากกว่าสองสามปีในการแพร่กระจายขึ้นไปอยู่ในบรรยากาศชั้นสตราโตสเฟียร์ สารเหล่านี้จะแตกตัวอย่างช้าๆ โดยปฏิกิริยาเคมีแสงเกิดเป็นคลอรีนอะตอมอิสระที่เป็นตัวการในการทำลายชั้นโอโซน

รูปที่ 5 *การวัดความเข้มข้นของสาร CFC ทุกเดือนในชั้นบรรยากาศ ตั้งแต่ ค.ศ. 1978 ซึ่งแสดงให้เห็นการเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ และเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ เนื่องจากสาร CFC คงอยู่ได้ในชั้นบรรยากาศนานกว่า 100 ปี ซึ่งจะคงอยู่เช่นนี้เป็นระยะเวลายาวนาน ก่อนที่ปริมาณการผลิตสาร CFC จะลดลงจนทำให้ความเข้มข้นของสาร CFC ต่ำลง*

ปริมาณการผลิตสาร CFC เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและมีปริมาณสูงสุดกลางทศวรรษ 1970 จากนั้นจะเริ่มลดลงเพราะมีการตระหนักถึงศักยภาพในการทำอันตรายจากการใช้สาร CFC ในละอองไอ เมื่อไม่นานมานี้ใน ค.ศ.1984 ได้มีการผลิตสาร CFC เพิ่มขึ้นอีกจนมีปริมาณใกล้เคียงกับใน ค.ศ. 1977 (ดูรูปที่ 4) ทั้งนี้เพราะมีการใช้สาร CFC เพิ่มขึ้นในการผลิตภัณฑ์ที่ไม่ใช่สารละอองไอ เช่น CFC 11 ใช้เป็นสารในการเป่าโฟม และสาร CFC 12 ใช้เป็นสารทำความเย็น ระดับสาร CFC ในชั้นบรรยากาศจึงเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว (ดูรูปที่ 5)

แบบจำลองบรรยากาศ

สารเคมีแต่ละชนิดที่กล่าวถึงทั้งหมดในบทก่อนนี้มีผลกระทบแตกต่างกันไป และระดับความสูงที่ต่างกันผลกระทบก็จะแตกต่างกันด้วย จากความรู้ที่ว่าปฏิกิริยาเคมีที่แตกต่างกันจะมีอัตราเร่งในการเกิดปฏิกิริยาแตกต่างกัน นักวิทยาศาสตร์จึงสามารถสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สามารถคาดการณ์ถึงผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของก๊าซปริมาณน้อยต่อระดับความเข้มข้นของโอโซนในชั้นบรรยากาศที่ระดับความสูงต่างๆ กันได้

มีปัญหาสำคัญมากมายรอบด้านในการสร้างแบบจำลองเพื่อการคาดการณ์สภาพบรรยากาศ จนกระทั่งเมื่อเร็ว ๆ นี้ได้มีแบบจำลองที่สำคัญ 2 แบบ แบบแรกใช้สมมุติฐานพิจารณาถึงจลศาสตร์ของสารเคมีในชั้นบรรยากาศว่าอะไรจะเกิดขึ้นต่อไปบ้าง โดยไม่สนใจตัวแปรชนิดอื่น อาทิเช่น การหมุนเวียนของบรรยากาศ อีกแบบหนึ่งพิจารณาตัวแปรเกี่ยวกับการหมุนเวียนโดยทั่วไปของชั้นบรรยากาศทั่วไป โดยสนใจตัวแปรที่เป็นรายละเอียดเล็ก ๆ น้อย ๆ ที่เป็นข้อมูลทางเคมี ในปัจจุบันมีความพยายามผสมผสานแบบจำลองทั้งสองแบบเข้าด้วยกันมากขึ้น แต่การสร้างแบบจำลองที่ผสมผสานกันทั้งข้อมูลทางเคมีและพลวัตของชั้นบรรยากาศนั้นยังไม่ประสบผลสำเร็จมากนักในปัจจุบัน

การสร้างแบบจำลองต่างๆ มีความซับซ้อนอย่างมาก แบบจำลองที่ง่ายที่สุดก็คือแบบจำลองที่ไม่มีมิติ ซึ่งศึกษาเฉพาะสิ่งที่เกิดขึ้นเพียงจุดใดจุดหนึ่งในชั้นบรรยากาศเท่านั้น แบบจำลองเช่นนี้เหมาะที่จะใช้ศึกษาผลกระทบการเปลี่ยนแปลงในอัตราเร็วการเกิดปฏิกิริยาในระบบเคมี

แบบจำลองแบบหนึ่งมิติใช้ในการศึกษาชั้นบรรยากาศในแนวตั้งว่า อะไรจะเกิดขึ้น ซึ่งมีประโยชน์ในการศึกษาการเคลื่อนไหวของบรรยากาศในแนวตั้ง หรือผลกระทบต่อระดับโอโซนโดยเฉลี่ยรวมทั้งโลกตลอดปี แบบจำลองนี้เป็นแบบจำลองที่ใช้กันมากที่สุดในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของโอโซน จนกระทั่งเมื่อสองสามปีที่ผ่านมาจึงเปลี่ยนไปใช้แบบอื่น

แบบจำลองแบบสองมิตินั้นพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีโดยแปรตามละติจูดที่ตั้ง ซึ่งมักจะเป็นการศึกษาถึงองค์ประกอบในแนวนอนที่ซับซ้อนจากการหมุนเวียนของบรรยากาศ บางแบบใช้ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่ขึ้นอยู่กับฤดูกาลและละติจูดที่ตั้งต่างๆ บางแบบใช้ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงระดับชั้นโอโซนตามอุณหภูมิทุกระดับชั้นของบรรยากาศ

แบบจำลองสามมิติเป็นแบบที่ซับซ้อนมากที่สุด ประกอบด้วยแบบจำลองสองมิติในแนวนอนและแบบจำลองหนึ่งมิติในแนวตั้ง แบบจำลองชนิดนี้โดยทั่วไปเป็นแบบจำลองแบบหมุนเวียนที่ใช้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศอย่างกว้าง ๆ รวมทั้งประมาณการอย่างคร่าว ๆ ในสิ่งที่รู้ที่เกี่ยวข้องกับบรรยากาศและปฏิสัมพันธ์อันซับซ้อนที่เกิดขึ้นระหว่างชั้นบรรยากาศกับมหาสมุทร อย่างไรก็ตาม ปัจจุบันมีการใช้แบบจำลองชนิดนี้เพียงช่วงระยะเวลาสั้น ๆ เท่านั้น และส่วนใหญ่จะเป็นข้อมูลพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับจลศาสตร์สารเคมี ในขณะที่แบบจำลองดังกล่าวให้ข้อมูลที่เป็นรูปภาพของสิ่งที่อาจจะเกิดขึ้นกับโลกเมื่อสภาพบรรยากาศแปรเปลี่ยนไปโดยรวม โดยแบบจำลองดังกล่าวยังไม่เพียงพอที่จะคาดการณ์ถึงรายละเอียดที่แท้จริงในระดับภูมิภาค หรือระดับประเทศเฉพาะบางจุดได้

แบบจำลองบรรยากาศบอกอะไรได้บ้าง

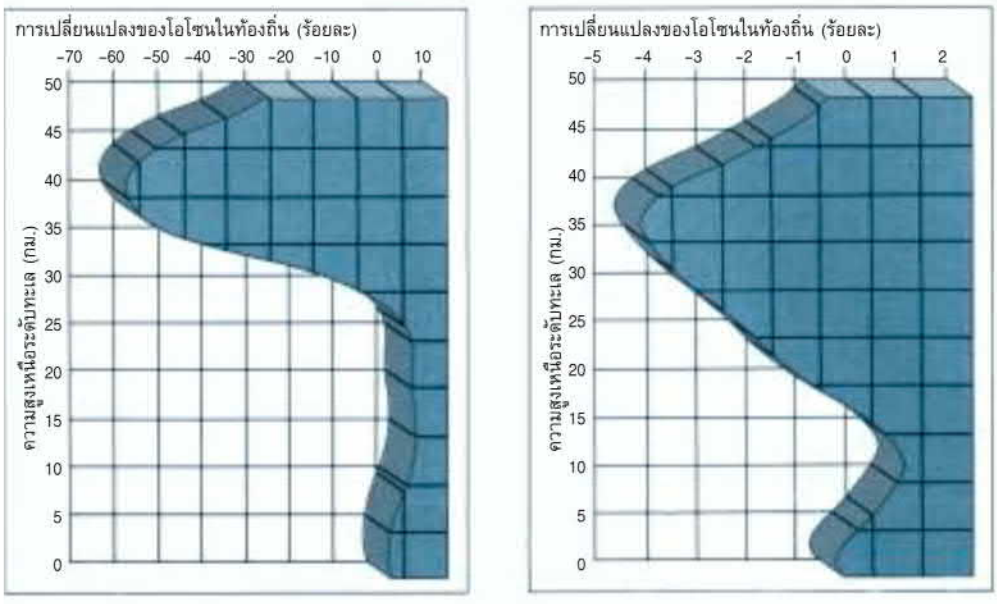
แบบจำลองหลาย ๆ แบบสามารถใช้ในการคาดคะเนถึงสิ่งที่เปลี่ยนแปลงปริมาณของโอโซนทั้งหมดในชั้นบรรยากาศ และวิถีทางการกระจายไปในระดับความสูงต่าง ๆ เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของก๊าซปริมาณน้อยในชั้นบรรยากาศ ในปัจจุบันมีการใช้แบบจำลองดังกล่าวอยู่หลายแบบ และได้มีการปรับปรุงแบบจำลองแต่ละแบบเสมอมาอย่างต่อเนื่อง เมื่อมีการค้นพบความจริงที่เกี่ยวข้องกับชั้นบรรยากาศเพิ่ม

ในขณะที่แบบจำลองสองสามแบบนี้ใช้คาดคะเนหรือทดสอบสมมุติฐานเดียวกัน แต่ผลที่ได้จากแบบจำลองนั้นตรงกันน้อยมาก ปัจจุบันแบบจำลองบรรยากาศจึงได้รับการปรับปรุงจนสามารถคาดคะเนหรือทดสอบสมมุติฐานเดียวกันได้ตรงกันมากขึ้น แม้ว่าบางแบบจำลองอาจจะคาดการณ์ได้ถูกต้องชัดเจนกว่า ตัวอย่างแบบจำลองที่ใช้ในการคาดคะเน ซึ่งแสดงไว้ในหน้าถัดไปเป็นแบบที่ใช้กันทั่วไป วิธีที่ง่ายที่สุดในการศึกษาผลกระทบของสารเคมีที่มีต่อโอโซน คือ การใช้แบบจำลองที่เปลี่ยนตัวแปรทีละตัวในช่วงเวลาใดเวลาหนึ่ง เช่น การเพิ่มขึ้นของ CFC สู่ชั้นบรรยากาศ การศึกษาแบบนี้จะช่วยให้เห็นภาพผลกระทบที่เกิดจากก๊าซปริมาณน้อยชนิดต่าง ๆ ต่อระดับโอโซนบรรยากาศ

โดยทั่วไปแล้ว การแพร่กระจายของสารเคมีสู่บรรยากาศจะเป็นผลให้เกิดดุลยภาพใหม่ในบรรยากาศอย่างต่อเนื่อง การเปลี่ยนแปลงของบรรยากาศ เปรียบเสมือนถังน้ำที่มี

6 สาร CFC 11 และ CFC 12 ที่ผลิตใน ค.ศ. 1980 โอโซนทั้งหมดลดลงร้อยละ 7

7 ไนตรัสออกไซด์เพิ่มขึ้นร้อยละ 20 โอโซนทั้งหมดลดลงร้อยละ 2



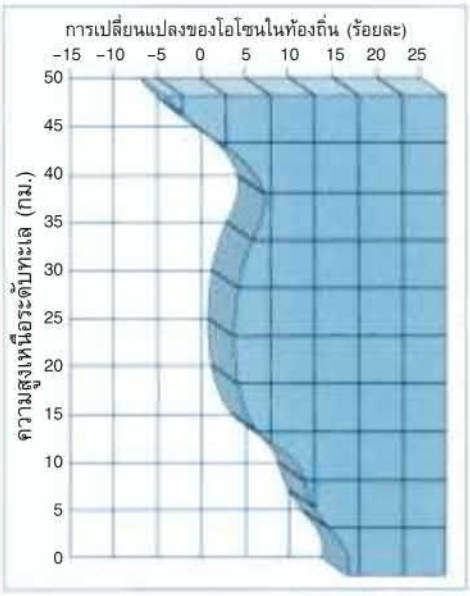
รูปที่ 6-9 *แสดงการคาดคะเนผลกระทบจากความเข้มข้นของสารเคมีชนิดต่าง ๆ ที่เพิ่มขึ้นในชั้นบรรยากาศโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สาร CFC ที่เพิ่มขึ้น (6) และไนตรัสออกไซด์ (7) ทั้งสองรูปทำให้ชั้นโอโซนลดลงร้อยละ 2-3 แต่เป็นผลให้โอโซนลดลงมากที่ความสูง 40 กิโลเมตร*

รูอยู่ข้างล่าง เมื่อเปิดน้ำลงถัง ระดับน้ำจะสูงขึ้น จนแรงดันของน้ำมากพอที่จะดันให้น้ำไหลออกทางรูข้างล่างเพื่อรักษาสมดุลของน้ำหนักน้ำ ที่กดทับลงบนรูข้างล่างไม่ให้มากเกินไป ซึ่ง ณ จุดนั้นระดับน้ำจะคงที่

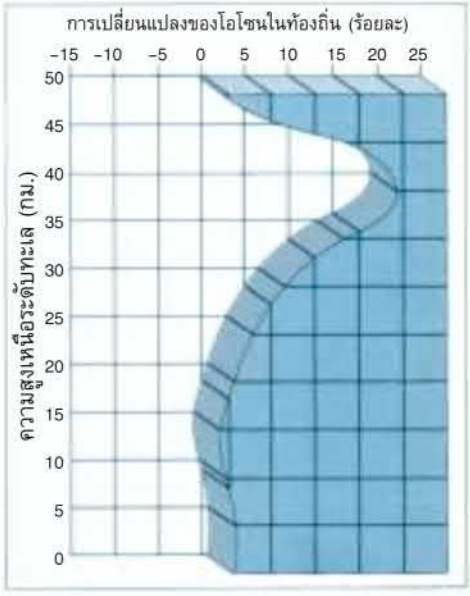
เมื่อเปรียบกับการลดลงของโอโซนในบรรยากาศสามารถอธิบายรายละเอียดเพิ่มขึ้นดังนี้ ก๊อกน้ำเปรียบได้กับการผลิตโอโซนโดยปฏิกิริยาเคมีแสง ซึ่งมนุษย์ไม่ได้เปลี่ยนแปลงแต่อย่างใด ระดับโอโซนจึงอยู่ในระดับที่ค่อนข้างคงที่ สิ่งที่จะทำให้เปลี่ยนแปลงคือ ขนาดของรูที่อยู่ด้านล่างของถังน้ำ ก๊าซปริมาณน้อยที่เพิ่มขึ้นในชั้นบรรยากาศมีแนวโน้มทำให้รูใหญ่ขึ้น เป็นผลให้ระดับของถังน้ำนั่นคือ ปริมาณโอโซนที่ลดลงเปรียบได้กับน้ำ ในถังที่ลดลงจนกว่าจะถึงจุดสมดุลใหม่ รูปข้างล่างแสดงภาวะที่สมดุลใหม่

ตัวอย่างเช่น แบบจำลองต่าง ๆ สามารถแสดงการเพิ่มขึ้นของสาร CFC และไนตรัสออกไซด์ ซึ่งสารทั้งคู่จะลดปริมาณโอโซนทั้งหมดจนอยู่ใน 'สภาวะที่คงตัว' ในชั้นบรรยากาศ ยิ่งกว่านั้นแบบจำลองยังชี้ให้เห็นว่า หากยังผลิตสาร CFC 11 และ CFC 12 อย่างต่อเนื่องในอัตราที่เคยผลิตใน ค.ศ. 1980 ประกอบกับสารเคมีชนิดอื่น ๆ ในชั้นบรรยากาศยังคงมากเท่าเดิม ผลสุดท้ายคือ โอโซนทั้งหมดจะลดลงร้อยละ 7 โอโซนจะเปลี่ยนแปลงไปเพียงเล็กน้อยในช่วงความสูง 25 กิโลเมตร แต่จะเปลี่ยนแปลงอย่างมากถึงร้อยละ 60 ในช่วงความสูง 40 กิโลเมตร (ดูรูปที่ 6) ถ้าไนตรัสออกไซด์เพิ่มขึ้นร้อยละ 20 ผลกระทบโดยทั่วไปที่มีต่อระดับความเข้มข้นของโอโซนจะคล้ายคลึงกับที่กล่าวมาแล้ว แม้ว่าการลดลงทั้งหมดอาจจะมีเพียงร้อยละ 2 เท่านั้น (ดูรูปที่ 7)

8 มีเทนเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า
โอโซนทั้งหมดเพิ่มขึ้นร้อยละ 3



9 คาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า
โอโซนทั้งหมดเพิ่มขึ้นร้อยละ 3



ระดับมีเทนเพิ่มขึ้น (8) ทำให้โอโซนทั้งหมดเพิ่มขึ้นด้วย เพราะมีเทนทำปฏิกิริยากับคลอรีนที่เร่งปฏิกิริยาคาร์บอน-ไดออกไซด์ที่สูงขึ้น (9) อาจทำให้โอโซนทั้งหมดเพิ่มขึ้นด้วย แต่ด้วยเหตุผลที่ต่างกันคาร์บอน-ไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นมีผลให้อุณหภูมิในชั้นบรรยากาศเปลี่ยนแปลงไป

สารเคมีชนิดอื่น ๆ จะให้ผลค่อนข้างแตกต่างกันไป ตัวอย่างเช่น ถ้าความเข้มข้นของก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า ระดับโอโซนทั้งหมดจะเพิ่มขึ้นจริงราวร้อยละ 3 (ดูรูปที่ 8) เพราะก๊าซมีเทนทำปฏิกิริยากับอนุมูลสารประกอบของคลอรีน คลอรีนจึงลดความเข้มข้นของก๊าซมีเทนในชั้นบรรยากาศลง ทำให้เหลือแต่เพียงอนุมูลของสารประกอบคลอรีนอิสระ ซึ่งมีจำนวนน้อยกว่าที่จะไปช่วยเร่งการแตกตัวของโอโซนได้

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าจะเพิ่มโอโซน ทั้งหมดด้วยเช่นกัน (ดูรูปที่ 9) ประมาณร้อยละ 3 แม้จะด้วยเหตุผลที่แตกต่างกันออกไป คาร์บอนไดออกไซด์เป็นก๊าซเรือนกระจก เมื่อความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศชั้นโทรโพสเฟียร์เพิ่มขึ้นเป็นผลให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นด้วย อย่างไรก็ตามอุณหภูมิในบรรยากาศชั้นสตราโตสเฟียร์จะลดลง เพราะก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวปล่อยรังสีอินฟราเรดที่สำคัญ ซึ่งทำให้อากาศในบรรยากาศชั้นสตราโตสเฟียร์นี้เย็นลง เนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเป็นสำคัญ ก๊าซบางชนิดจึงต้องการอุณหภูมิที่สูงกว่าก๊าซชนิดอื่น ๆ ผลกระทบโดยรวมจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จึงทำให้อุณหภูมิในชั้นสตราโตสเฟียร์ลดลง และทำให้ระดับโอโซนเพิ่มขึ้น

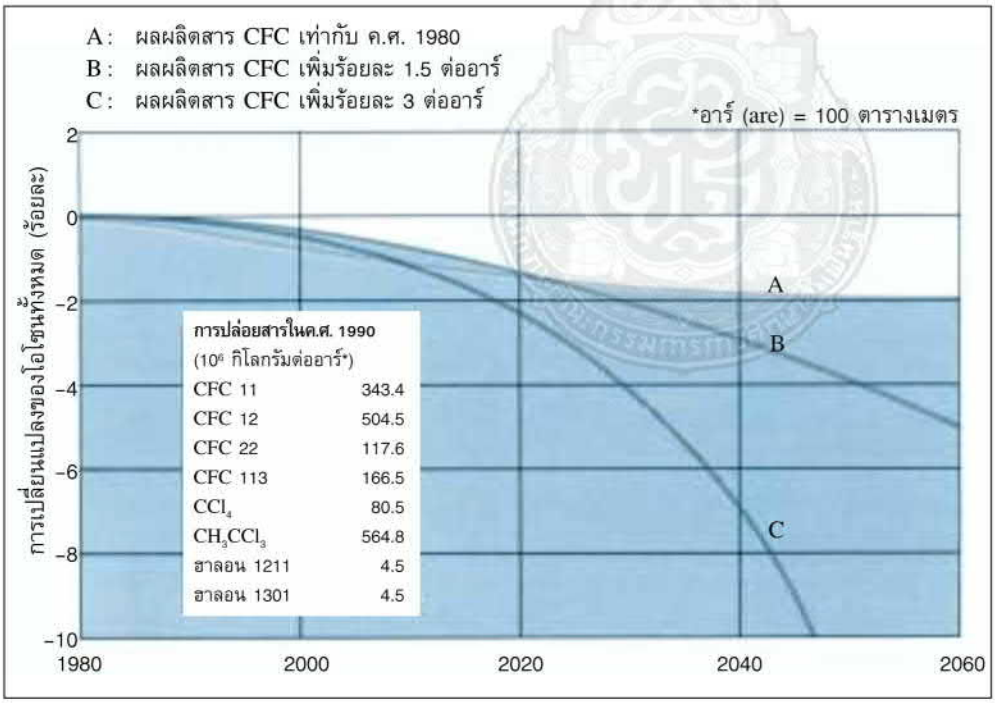
ในโลกแห่งความจริง ความเข้มข้นของสารเคมีที่ต่าง ๆ ในชั้นบรรยากาศดูเหมือนว่าจะเปลี่ยนแปลงไปพร้อม ๆ กัน ดังนั้นแบบจำลองที่คล้ายกับสภาพจริงในสิ่งที่จะเกิดต่อระดับโอโซน ไม่เพียงแค่พิจารณาถึงผลกระทบของสารเคมีแต่ละตัวเท่านั้น แต่ยังต้องพิจารณาการทำปฏิกิริยาซึ่งกันและกันระหว่างสารเคมีด้วย ดังนั้นจึงเป็นสาเหตุให้นักวิทยาศาสตร์ได้สร้างสิ่งที่เรียกว่า แบบจำลองภาวะอากาศแปรปรวนเชิงซ้อนขึ้น เพื่อใช้อธิบายความซับซ้อนทางเคมีที่เกิดในชั้นโทรโพสเฟียร์ และชั้นสตราโตสเฟียร์ให้ได้มากที่สุด

ลักษณะสำคัญของแบบจำลองเหล่านี้คือ จะมีหรือไม่มีข้อมูลของอุณหภูมิที่ป้อนกลับก็ได้ เนื่องจากในกลุ่มก๊าซปริมาณน้อยส่วนใหญ่เป็นก๊าซเรือนกระจก ความเข้มข้นของก๊าซดังกล่าวที่เพิ่มขึ้น จึงมีแนวโน้มที่จะเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในชั้นโทรโพส-เฟียร์ และชั้นสตราโตสเฟียร์ได้ ในทางกลับกันการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะสามารถเปลี่ยนอัตราการเกิดปฏิกิริยาได้ แบบจำลองที่มีกลไกการป้อนกลับข้อมูลของอุณหภูมิมีแนวโน้มให้ผลที่แตกต่างกันไปอย่างเด่นชัดจากแบบจำลองที่ไม่มีกลไกนี้ แบบจำลองที่ปรากฏในหนังสือเล่มนี้เป็นแบบจำลองที่มีการป้อนกลับของข้อมูลอุณหภูมิ

ปัญหาประการหนึ่งในการสร้างแบบจำลองชั้นบรรยากาศ คือ ความเข้มข้นของก๊าซปริมาณน้อยบางชนิดเพิ่มขึ้น ซึ่งยังไม่เป็นที่เข้าใจกันดีนัก จึงยากที่จะคาดคะเนว่าในอนาคตสารเหล่านี้จะเปลี่ยนแปลงไปอย่างไร บางสมมุติฐานจึงตั้งเป็นสมมุติฐานง่าย ๆ เพื่อนำแบบจำลองไปใช้ได้ ขณะที่นำแบบจำลองชั้นบรรยากาศไปใช้ในการประเมินผลกระทบจากระดับความเข้มข้นต่าง ๆ ของโอโซน บ่อยครั้งนำมาตั้งสมมุติฐานอย่างง่าย ๆ ว่า

ก๊าซมีเทนและไนตรัสออกไซด์จะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ในอัตราที่เท่ากับช่วงเวลาที่ผ่านมาเมื่อไม่นานมานี้ สำหรับการคาดคะเนการเพิ่มขึ้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ก็เช่นกัน เพียงแต่จะซับซ้อนมากกว่า กระทรวงพลังงานสหรัฐอเมริกาคาดการณ์ว่า ก๊าซคาร์บอน-ไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศจะเพิ่มขึ้นในอัตราร้อยละ 0.5 ต่อปี อัตราดังกล่าวจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามกาลเวลา

สำหรับสาร CFC นั้น สมมุติฐานที่ตั้งขึ้นค่อนข้างแม่นยำมากกว่า โดยระบุไว้ 3 ประการ ประการหนึ่งคือ ผลผลิตสาร CFC ยังคงที่อยู่ในระดับเดียวกับ ค.ศ. 1980 หรือเพิ่มขึ้นร้อยละ 1.5 หรือ 3.0 ต่อปี (ทวีคูณทุก 47 ปี และ 24 ปีตามลำดับ) สรุปอย่างกว้างๆ คือ ประการแรก มีสมมุติฐานให้มีการร่วมมือกันระหว่างประเทศเพื่อห้ามการผลิตสาร CFC เพิ่มขึ้น ส่วนประการที่สองและสามนั้นแสดงว่าการร่วมมือกันควบคุมสาร CFC มีอยู่จำกัดหรือไม่มีเลย เป็นไปได้ที่อุตสาหกรรมอาจจำกัดการผลิตหรือเข้มงวดการใช้สาร CFC ลงด้วยความสมัครใจ



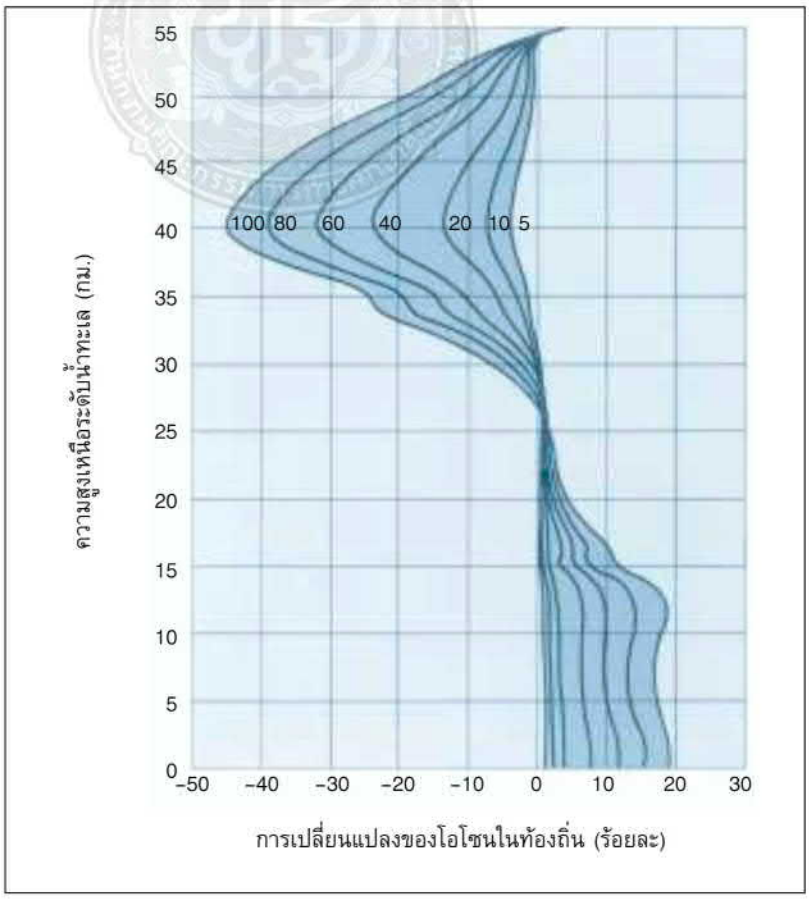
รูปที่ 10 *แสดงการเพิ่มขึ้นของสารเคมีชนิดต่าง ๆ ต่อการลดลงของโอโซนทั้งหมด การคาดคะเนทั้งหมดตั้งอยู่บนสมมุติฐานที่ว่า สารเคมีชนิดอื่น ๆ ยังคงเพิ่มขึ้นในอัตราที่เป็นอยู่ในปัจจุบัน ความเข้มข้นของสารเคมีที่เพิ่มขึ้นระบุไว้ในอัตราร้อยละ 3 ต่อปี จะทำให้โอโซนลดลงในระดับที่ทำให้รังสี UV-B ที่เป็นอันตรายต่อมนุษย์แผ่ลงมาสู่พื้นผิวโลกได้ในช่วงครึ่งแรกในศตวรรษหน้า*

รูปที่ 10 แสดงลักษณะโอโซนที่จะต้องเปลี่ยนแปลงไป หากจำกัดการผลิตสาร CFC ให้คงที่ตามที่กำหนดไว้ในโครงการใน ค.ศ.1990 แบบจำลองแสดงให้รู้ว่าการทำลายระดับโอโซนทั้งหมดจะเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น สิ่งที่เกิดขึ้นนี้ส่วนใหญ่เป็นเพราะความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นของสาร CFC นั้นจะหักล้างกันไปโดยมีเทนที่เพิ่มขึ้น ถ้าผลผลิตสาร CFC เพิ่มขึ้นร้อยละ 1.5 ต่อปี ระดับโอโซนในโลกจะลดลงเฉลี่ย ร้อยละ 3 ในระยะเวลา 60 ปี แต่ถ้าปริมาณการผลิตสาร CFC เพิ่มขึ้นร้อยละ 3 ต่อปี ระดับโอโซนจะลดลง

มากกว่าร้อยละ 10 ในระยะเวลา 60 ปี ผลกระทบที่เกิดจะเลวร้ายลงตามกาลเวลา และเลวร้ายลงอย่างเด่นชัดหากระดับมีเทนไม่เพิ่มขึ้นในอัตราที่เป็นอยู่ในปัจจุบัน

รูปที่ 10 แสดงเพียงผลกระทบที่เกิดต่อระดับโอโซนทั้งหมด สิ่งที่จะเกิดขึ้นตามความเป็นจริงนั้นจะทำให้ระดับโอโซนใกล้พื้นผิวโลกเพิ่มขึ้น และระดับโอโซนในละติจูดที่สูงกว่าลดลงจำนวนมาก ผลกระทบเกิดขึ้นมากที่สุดที่ละติจูดประมาณ 40 กิโลเมตร (ดูรูปที่ 11)

ผลกระทบเหล่านี้จะเกิดรุนแรงอย่างมากในบริเวณใกล้ขั้วโลกมากกว่าในเขตศูนย์สูตร และเกิดขึ้นมากในฤดูใบไม้ผลิมากกว่าฤดูอื่นๆ ผลกระทบที่สัมพันธ์กับเขตละติจูดจะปรากฏเห็นเด่นชัดที่สุด ตัวอย่างเช่น ในสถานการณ์ที่เกิดผลผลิตสาร CFC ในอัตราเดียวกับที่เคยผลิตได้ใน ค.ศ. 1980 ไนตรัสออกไซด์และก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้นในอัตราที่เป็นอยู่ในปัจจุบัน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ยังคงที่ในระดับเดิม การทำลายโอโซนทั้งหมดในฤดูใบไม้ผลิทางตอนเหนือจะสูงถึงร้อยละ 11 ที่ละติจูด 80 องศาเหนือภายใน ค.ศ. 2030 ที่เขตศูนย์สูตร การทำลายดังกล่าวจะสูงกว่าร้อยละ 1 เพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับสถานการณ์เดียวกันสำหรับ ค.ศ. 2030 ทำลายโอโซนจะเฉลี่ยร้อยละ 2



รูปที่ 11 *แสดงการคาดคะเนโอโซนในระดับต่าง ๆ กับความสูง ซึ่งเป็นผลมาจากผลผลิตสาร CFC ที่เพิ่มขึ้นร้อยละ 1.5 ต่อปี หลังจากช่วงเวลา 5-100 ปี แม้ว่าการลดลงโดยรวมจะมีขอบเขตจำกัดที่ความสูง 40 กิโลเมตร การลดลงมีมากกว่าร้อยละ 40 ภายใน 1 ศตวรรษ*

แบบจำลองที่คล้ายคลึงกันนี้สามารถจะนำไปใช้แสดงผลกระทบจากสาร CFC ต่อชั้นบรรยากาศได้ในระยะยาว ตัวอย่างเช่น ถ้าสามารถหยุดการผลิตสาร CFC ลงได้ภายใน ค.ศ. 2000 ความเข้มข้นของโอโซนจะยังคงลดลงต่อไปอีกราว 5–10 ปี จากนั้นโอโซนจะค่อยๆ กลับสู่สภาพเดิมอีกครั้ง แม้อาจจะต้องใช้เวลาหลายสิบปีก่อนที่จะกลับคงที่อยู่ในระดับเดิมได้

จนบัดนี้ข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองยังไม่กระจ่างพอ ความเสียหายของชั้นโอโซนเท่าที่ผ่านมาขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารเคมีชนิดต่าง ๆ ในชั้นบรรยากาศกับกาลเวลาเป็นสิ่งสำคัญ เพราะยังไม่มีใครเข้าใจว่าทำไมเมื่อความเข้มข้นของมีเทนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วแล้วจึงคาดคะเนได้ว่า โอโซนอยู่ในภาวะที่อันตราย เพียงแต่รู้ว่าถ้ามีเทนไม่เพิ่มขึ้นหรือลดลง และปริมาณการผลิตสาร CFC ยังคงมีต่อไปอีก ชั้นโอโซนจะอยู่ในภาวะอันตรายอย่างแน่นอน

แน่นอนที่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไม่ได้เป็นวิธีการเดียวที่จะหาคำตอบได้ว่ามีอะไรเกิดขึ้นบ้างในชั้นบรรยากาศ ยังมีแนวทางอื่น ๆ อีก นั่นคือ การวัดความเข้มข้นของสารเคมี และวิเคราะห์ว่าสารเคมีดังกล่าวเปลี่ยนแปลงไปอย่างไรในช่วงเวลาหนึ่ง ซึ่งการติดตามสังเกตการเปลี่ยนแปลงในชั้นบรรยากาศด้วยวิธีนี้ เป็นการตรวจสอบความแม่นยำในการคาดคะเนของแบบจำลองได้เป็นอย่างดี เป็นการทดสอบว่าค่าที่วัดได้ตรงกับสิ่งที่แบบจำลองคาดการณ์ไว้หรือไม่เพียงใด

การวัดความเข้มข้นของโอโซน

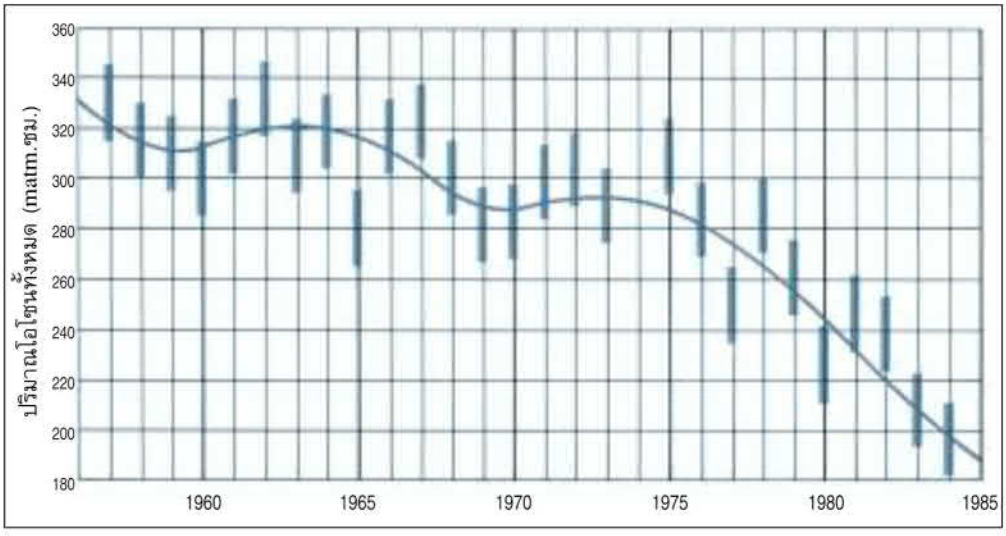
ปัญหาสำคัญประการหนึ่งคือ การเปรียบเทียบการวัดปริมาณโอโซนและการคาดคะเนโดยใช้แบบจำลอง การคาดคะเนส่วนใหญ่มักจะระบุว่าก๊าซปริมาณน้อยในชั้นบรรยากาศมีผลกระทบน้อยมาก กระนั้นเองในบางปีระดับโอโซนยังมีความผันแปรโดยธรรมชาติได้ถึงร้อยละ 6 ด้วยเหตุนี้จึงยากที่จะตรวจสอบแนวโน้มสิ่งที่ผิดปกติเล็ก ๆ น้อย ๆ ในระยะยาว ซึ่งถูกบดบังโดยการเปลี่ยนแปลงที่มีขนาดใหญ่กว่าโดยเกิดจากความผันแปรทางสภาพภูมิศาสตร์ในแต่ละเดือน

มีการวัดปริมาณโอโซนทั้งหมดโดยรวมในชั้นบรรยากาศในหลายพื้นที่ด้วยวิธีการที่หลากหลายเป็นเวลาหลายปี โดยใช้เครื่องมือวัดที่เรียกว่า ดอบสันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ซึ่งอาศัยหลักการที่ว่า สารต่างชนิดกันจะให้รังสีที่มีความยาวคลื่นต่างกัน จากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของผลที่ตรวจวัดได้ทั่วโลกพบว่า ความเข้มข้นของโอโซนโดยเฉลี่ยไม่เพิ่มขึ้นหรือลดลงแต่อย่างใดในช่วง ค.ศ. 1970–1984

อย่างไรก็ตาม มีหลักฐานบางอย่างจากการสังเกตที่แสดงว่าการกระจายของโอโซนในบรรยากาศอาจจะเปลี่ยนแปลงไปตามระดับความสูง จากการตรวจวัดระดับปริมาณก๊าซโอโซนด้วยบอลลูนจากสถานีต่าง ๆ พบว่าความเข้มข้นของโอโซนจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในชั้นโทรโพสเฟียร์ และจะลดลงเล็กน้อยในชั้นสตราโตสเฟียร์ ซึ่งแบบจำลองสภาพบรรยากาศที่คาดการณ์ไว้ก็ได้ผลเช่นเดียวกัน อย่างไรก็ตาม เครือข่ายของการตรวจวัดโดยใช้บอลลูนนั้นมีจำนวนน้อยเกินไป ไม่เพียงพอที่จะพิสูจน์การเปลี่ยนแปลงโอโซนที่แพร่กระจายกันอยู่ทั่วโลก หรือไม่สามารถที่จะยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองได้

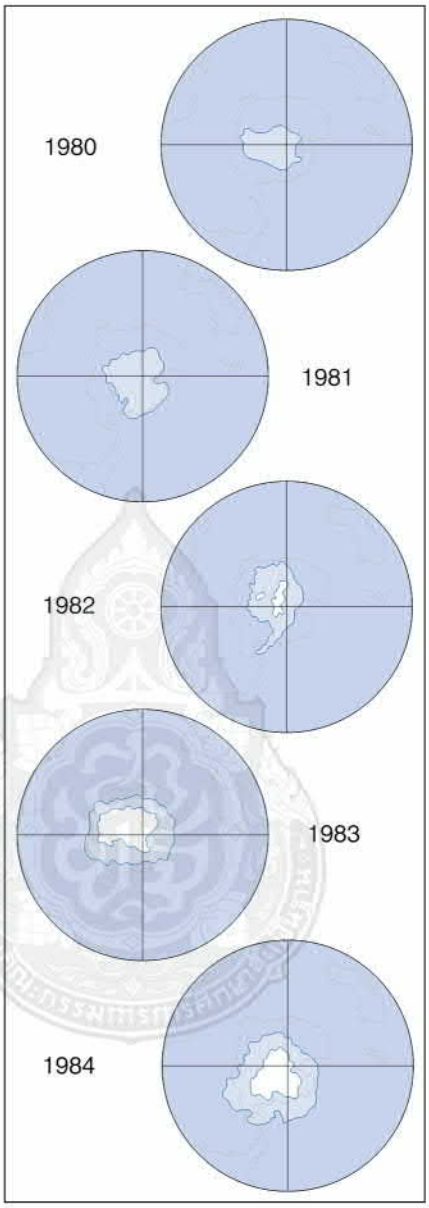
การสังเกตอีกชุดหนึ่งซึ่งใช้เทคนิคการวัดหลายอย่าง ปรากฏว่าความเข้มข้นของโอโซนลดลงอย่างเห็นได้ชัด ประมาณร้อยละ 2-3 ตลอดทศวรรษ 1970-1980 ที่ระดับความสูง 30-40 กิโลเมตร และการคาดคะเนการเคลื่อนไหวของบรรยากาศด้วยแบบจำลองคอมพิวเตอร์ก็ได้ผลลัพธ์เช่นเดียวกัน

ขณะที่มีการโต้แย้งผลจากแบบจำลองดังกล่าว กลับมีการค้นพบอย่างน่าแปลกใจที่สุดในช่วงสองสามปีที่ผ่านมา ณ อ่าวฮัลเลย์ ในบริเวณขั้วโลกใต้ โดยหน่วยสำรวจของประเทศอังกฤษ หน่วยสำรวจดังกล่าวใช้สเปกโตรโฟโตมิเตอร์วัดความเข้มข้นของโอโซนเหนือบริเวณขั้วโลกใต้ทุกเดือนตุลาคม ตั้งแต่ ค.ศ. 1957 ผลปรากฏว่าความเข้มข้นของโอโซนเหนือบริเวณขั้วโลกใต้ลดลงเกือบร้อยละ 40 ตั้งแต่ ค.ศ. 1957 และลดลงมากที่สุดกลางทศวรรษ 1970 (ดูรูปที่ 12) การตรวจวัดนี้ได้รับการยืนยันข้อมูลจากดาวเทียม ตั้งแต่ ค.ศ. 1979 เป็นต้นมา ซึ่งเมื่อไม่นานมานี้ได้แสดงให้เห็นการทำลายชั้นโอโซนเหนือบริเวณขั้วโลกใต้ และอาจขยายมาขึ้นทางเส้นศูนย์สูตรที่เส้นละติจูด 45 องศาใต้ ถึงแม้จะมีผลกระทบน้อยกว่าบริเวณขั้วโลกใต้ก็ตาม



รูปที่ 12 *ผลการวัดที่เกิดขึ้นบริเวณขั้วโลกใต้ ณ อ่าวฮัลเลย์ แสดงระดับโอโซนที่ลดต่ำลงร้อยละ 40 ระหว่างฤดูใบไม้ผลิบริเวณขั้วโลกใต้ตั้งแต่ ค.ศ. 1957 ผลกระทบปรากฏเพิ่มขึ้น แต่สาเหตุการลดลงของโอโซนยังอยู่ในระหว่างการหาคำอธิบาย*

นักวิทยาศาสตร์ยังต้องศึกษาค้นคว้าอีกมากมายกว่าจะยอมรับการค้นพบดังกล่าว ซึ่งแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์เองยังไม่สามารถคาดการณ์ได้แน่ชัดว่ามีช่องโหว่ของชั้นโอโซนเหนือบริเวณขั้วโลกใต้ ซึ่งความลึกของช่องโหว่นี้ได้เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เหตุการณ์เช่นนี้เกิดขึ้นในระหว่างฤดูใบไม้ผลิ ณ บริเวณขั้วโลกใต้เท่านั้น แม้ว่าจะเป็นการเริ่มลดลงของโอโซนในตำแหน่งที่ตั้งต่าง ๆ ลักษณะเช่นนี้อาจเกิดขึ้นได้เท่ากัน เนื่องจากผลของสภาพภูมิศาสตร์เฉพาะแห่งที่อยู่ใกล้ขั้วโลก โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณขั้วโลกใต้ แบบจำลองบรรยากาศได้คาดการณ์ให้เห็นว่าหากระดับโอโซนทั้งหมดถูกทำลายลงจนถึงศตวรรษหน้า ผลกระทบที่เกิดขึ้นที่ขั้วโลกจะรุนแรงมากกว่าในเขตศูนย์สูตรหลายเท่า



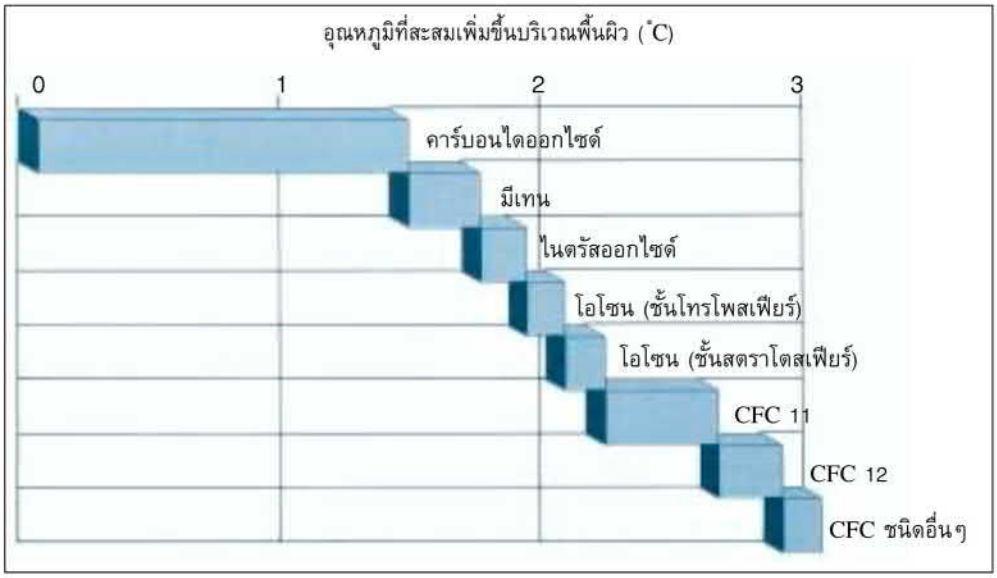
รูปที่ 13 *แสดงแผนที่อย่างง่าย ๆ ของระดับปริมาณโอโซนบริเวณขั้วโลกใต้ ที่ได้รับข้อมูลจากดาวเทียม TOMS ในวันที่ 7 ตุลาคม ค.ศ. 1980–1984 แผนที่นี้แสดงให้เห็นว่าระดับโอโซนต่ำลงมากเท่าไรในระยะเวลา 5 ปี*

โลกกำลังร้อนขึ้นจริงหรือ?

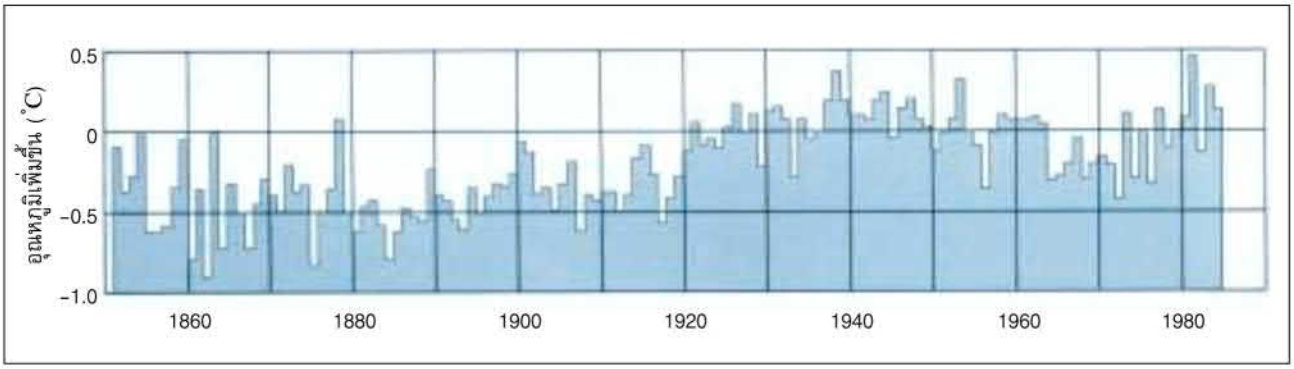
เนื่องจากโอโซนเป็นก๊าซเรือนกระจก การเปลี่ยนแปลงระดับโอโซนในบรรยากาศชั้นโทรโพสเฟียร์จึงมีผลต่ออุณหภูมิที่พื้นผิวโลกและชั้นบรรยากาศ ยิ่งกว่านั้นยังส่งผลกระทบต่อไปยังบรรยากาศชั้นสตราโตสเฟียร์ ซึ่งโอโซนในชั้นนี้ทำหน้าที่เป็นแหล่งรองรับความร้อน และดูดกลืนรังสีดวงอาทิตย์ที่แผ่เข้ามา

ผลกระทบที่เกิดกับโอโซนเพียงอย่างเดียวนั้นสามารถคำนวณได้ง่าย เพราะเราไม่ได้นำผลกระทบอื่นอันเกิดจากก๊าซปริมาณน้อยต่าง ๆ มาพิจารณาด้วย ซึ่งก๊าซปริมาณน้อยเหล่านี้มีผลกระทบต่อโอโซน และยังมีลักษณะเป็นก๊าซเรือนกระจกด้วยเช่นกัน แม้ว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะจัดว่าเป็นก๊าซเรือนกระจกที่มีอิทธิพลมากที่สุด แต่ถ้าจะเทียบกันโดยโมเลกุลต่อโมเลกุลแล้ว ก๊าซปริมาณน้อยชนิดอื่นอาจจะมีผลกระทบที่ร้ายแรงกว่าก็ได้ ตัวอย่างเช่น มีการคำนวณพบว่า หนึ่งโมเลกุลสาร CFC 11 หรือ CFC 12 มีผลกระทบต่อโมเลกุลอากาศถึง 10,000 โมเลกุล

นอกจากนี้ การคาดการณ์ผลกระทบโดยรวมที่มีต่ออุณหภูมิโลกยังหมายถึงการประมาณความเข้มข้นก๊าซปริมาณน้อยชนิดต่าง ๆ ในชั้นบรรยากาศในอนาคต โดยใช้สมมุติฐานที่คล้ายกับสมมุติฐานแบบจำลองภาวะแปรปรวนเชิงซ้อนในการคาดคะเนผลกระทบจากอุณหภูมิเพิ่มขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากระดับก๊าซคาร์บอน-ไดออกไซด์เกือบเท่ากับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากก๊าซปริมาณน้อยชนิดอื่น ๆ รวมกันใน ค.ศ. 2030 ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อาจทำให้อุณหภูมิโลกเพิ่มขึ้นประมาณ 1.5 องศาเซลเซียส และก๊าซปริมาณน้อยชนิดอื่น ๆ จะทำให้อุณหภูมิโลกเพิ่มขึ้นอีก 1.5 องศาเซลเซียส อุณหภูมิจึงสูงขึ้น 3 องศาเซลเซียส (ดูรูปที่ 14)



รูปที่ 14 *อุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากความเข้มข้นของก๊าซเรือนกระจกและก๊าซคาร์บอน-ไดออกไซด์ ใน ค.ศ. 2030 คาดการณ์ว่าจะสูงขึ้นประมาณ 3 องศาเซลเซียส ซึ่งอุณหภูมิที่สูงขึ้นครึ่งหนึ่งมีสาเหตุมาจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์*



รูปที่ 15 *อุณหภูมิที่ผืนดินเฉลี่ยประจำปีในซีกโลกเหนือตั้งแต่ ค.ศ. 1850 แบ่งได้เป็น 3 ระยะ คือ ระยะแรกเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ จนถึง ค.ศ. 1940 ระยะที่ 2 ลดลงทันทีจนถึงประมาณ ค.ศ. 1970 และระยะที่ 3 เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงปัจจุบัน อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น 0.5 องศาเซลเซียสนั้นคาดว่าน่าจะมีสาเหตุมาจากความร้อนจากภาวะเรือนกระจก*

แบบจำลองที่ใช้คำนวณผลดังกล่าวข้างต้นคาดการณ์ว่าอุณหภูมิโลกจะเพิ่มขึ้นทันที ไม่ใช่เป็นไปทีละน้อย ๆ ซึ่งที่จริงแล้วจะต้องใช้เวลานานนับหลายสิบปีกว่ามวลของน้ำในมหาสมุทรจะมีอุณหภูมิสูงขึ้น

นักวิทยาศาสตร์ประมาณว่า ครึ่งหนึ่งของอุณหภูมิโลกที่เพิ่มขึ้น 3 องศาเซลเซียสจะเกิดขึ้นภายใน ค.ศ. 2030 ส่วนอีกครึ่งหนึ่งจะต้องใช้เวลามากกว่าสองสามทศวรรษจึงจะทำให้โลกมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจริง

การคาดการณ์ดังกล่าวยังไม่แน่นอนนัก แบบจำลองที่ใช้ยังไม่สามารถตรวจสอบความถูกต้องของตัวแปรที่ซับซ้อนทั้งหมดได้และการประมาณความเที่ยงตรงของแบบจำลองสามารถคาดการณ์ได้ว่า อุณหภูมิจะสูงขึ้น 3 และหรือ ±1.5 องศาเซลเซียส โดยมีสมมุติฐานเบื้องต้นว่าสามารถคาดคะเนก๊าซปริมาณน้อยในชั้นบรรยากาศในอนาคตได้อย่างถูกต้อง เพราะแม้ว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณก๊าซดังกล่าวเพียงเล็กน้อย จะทำให้ผลการคาดการณ์แตกต่างกันอย่างมาก อย่างไรก็ตามสิ่งที่แน่นอนนั้นคือ หากมีปริมาณก๊าซที่ทำให้เกิดภาวะเรือนกระจกเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องด้วยอัตราเร็วดังเช่นในปัจจุบัน เชื่อได้ว่าอนาคตโลกจะร้อนขึ้นอย่างแน่นอน

แท้จริงแล้วมีหลักฐานเพิ่มขึ้นที่แสดงว่า สิ่งที่กล่าวข้างต้นกำลังเกิดขึ้นแล้ว การบันทึกอุณหภูมิที่พื้นดินจำนวนมากในซีกโลกเหนือตั้งแต่ ค.ศ. 1850 จนถึงขณะนี้ แสดงให้เห็นว่าโลกกำลังร้อนขึ้นแล้ว แม้ว่าเมื่อ 130 ปีที่ผ่านมา การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิโดยเฉลี่ยจะน้อยกว่า 1.5 องศาเซลเซียส แต่ในช่วงเวลาดังกล่าวอุณหภูมิได้เพิ่มขึ้นประมาณ 0.5 องศาเซลเซียส ทั้งนี้รวมถึงอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ ในช่วง ค.ศ. 1885–1940 ตามด้วยอุณหภูมิที่ลดลงอย่างฉับพลันประมาณ ค.ศ. 1970 และอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว (ดูรูปที่ 15) ซึ่งสาเหตุของการเปลี่ยนแปลงนี้ยังไม่เป็นที่ทราบแน่ชัด ปัจจุบันนักวิทยาศาสตร์ส่วนใหญ่เชื่อว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในระยะสั้น ๆ เป็นผลจากภูเขาไฟระเบิด และการเปลี่ยนแปลงความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์ แต่ถ้าเป็นการเปลี่ยนแปลงระยะยาวแล้วน่าจะเกิดจากความร้อนจากภาวะเรือนกระจก

เชื่อกันว่าสถานการณ์ตั้งแต่ ค.ศ. 1960 เป็นต้นมา แตกต่างจากสถานการณ์ก่อนหน้านี้มาก เพราะก๊าซชนิดต่าง ๆ นอกจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทำให้เกิดผลกระทบจากภาวะเรือนกระจกมากขึ้น แบบจำลองภูมิอากาศระบุว่าตามทฤษฎีแล้ว อุณหภูมิควรจะสูงขึ้น 0.6–2.0 องศาเซลเซียสตั้งแต่ ค.ศ. 1960 อย่างไรก็ตาม ผลจาก 'ช่วงล้าของความร้อน'ของอุณหภูมิที่เพิ่มทำให้ต้องใช้เวลานาน กว่าความร้อนในมหาสมุทรจะเพิ่มขึ้น อุณหภูมิจึงเพิ่มขึ้นเพียงครึ่งหนึ่งจากความเข้มข้นของก๊าซเรือนกระจกที่เพิ่มขึ้น ดังนั้น สิ่งที่สังเกตได้จริงในธรรมชาติจึงสอดคล้องกับการคาดการณ์สภาพชั้นบรรยากาศโดยใช้แบบจำลอง แต่ก็ยังไม่แน่ชัดว่า เป็นเพราะความบังเอิญ หรือแบบจำลองมีความเที่ยงตรงในการคาดการณ์

อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นประมาณ 3 องศาเซลเซียส ใน ค.ศ. 2030 แม้จะดูเหมือนเป็นปริมาณเล็กน้อย แต่ความเป็นจริงแล้ว กลับมีผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตบนพื้นโลกอย่างมาก สามารถเปรียบเทียบให้เห็นอย่างชัดเจนว่า ในยุคน้ำแข็งนั้นโลกมีอุณหภูมิเฉลี่ยต่ำกว่าปัจจุบันเพียง 5 องศาเซลเซียส ยิ่งไปกว่านั้นในช่วงระยะ 10,000 ปีที่ผ่านมา อุณหภูมิโลกโดยเฉลี่ยเปลี่ยนแปลงไปเกินกว่า 1 องศาเซลเซียสนั้นมีน้อยมาก ผลกระทบที่เกิดขึ้นกับสังคมจากที่โลกมีอุณหภูมิสูงขึ้นนี้จะมีการวิเคราะห์โดยละเอียดในตอนต่อไป

ผลกระทบต่อสังคม

การเปลี่ยนแปลงของระดับโอโซนมีผลกระทบต่อสังคมในอนาคตแตกต่างกัน 2 ประการคือ ประการแรก ระดับโอโซนที่ลดลงในบรรยากาศชั้นสตราโตสเฟียร์ทำให้รังสีอัลตราไวโอเลตแผ่มายังพื้นผิวโลกเพิ่มขึ้น ประการต่อมา การเปลี่ยนแปลงการกระจายโอโซนส่งผลกระทบต่ออุณหภูมิโดยเฉลี่ยของโลกด้วย เช่น โอโซนที่เพิ่มขึ้นในชั้นโทรโพสเฟียร์ และโอโซนที่ลดลงในชั้นสตราโตสเฟียร์

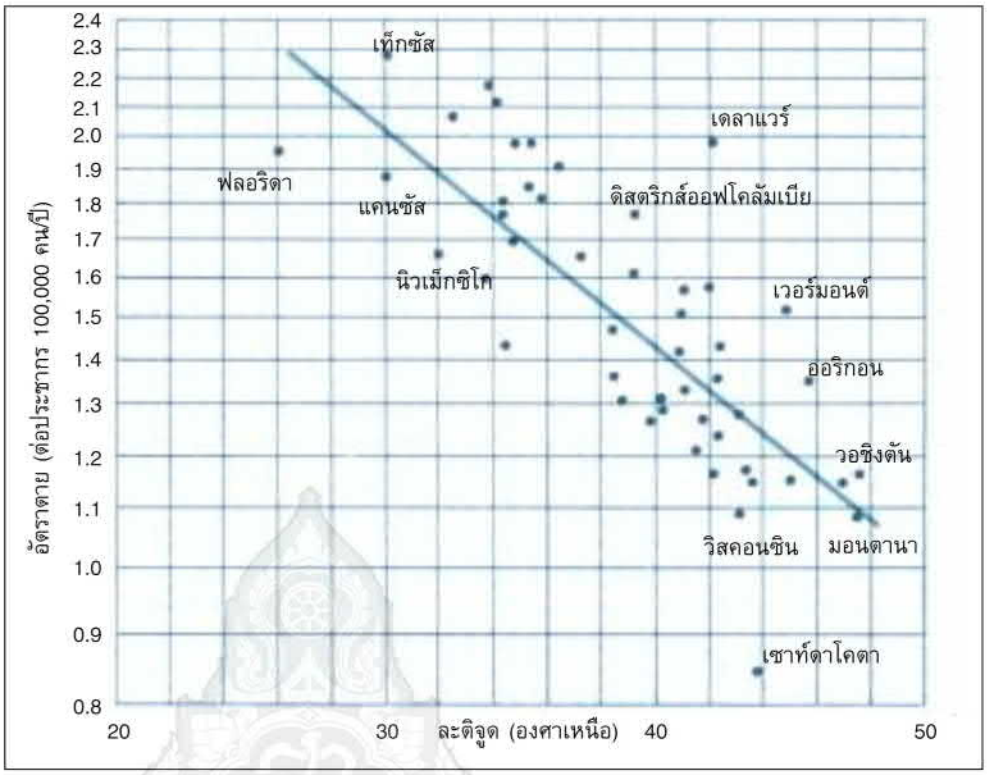
ผลกระทบจากรังสีอัลตราไวโอเลตที่เพิ่มขึ้น

โอโซนสามารถดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเลตบางส่วนจากดวงอาทิตย์ในช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 290-320 นาโนเมตร ซึ่งเรียกรังสีในช่วงคลื่นนี้ว่ารังสี UV-B รังสีชนิดนี้ทำให้ผิวหนังไหม้เกรียม เกิดอาการเยื่อตาขาวระคายเคือง ซึ่งมีสาเหตุมาจากแสงสะท้อนจากหิมะเข้าตา ตาอักเสบ เป็นโรคมะเร็งผิวหนัง แก่ก่อนวัย และผิวหนังเหี่ยวย่นเป็นริ้วรอย ในช่วงความยาวคลื่นดังกล่าว ความยาวคลื่นสั้นกว่าจะมีผลกระทบต่อเนื้อเยื่อทางชีวภาพมากกว่าความยาวคลื่นที่ยาวกว่า อย่างไรก็ตามชั้นบรรยากาศสามารถกรองรังสีที่มีความยาวคลื่นสั้นได้ดีกว่ารังสีที่มีความยาวคลื่นยาว รังสี UV-B ที่มีความยาวคลื่นในช่วงกลางของรังสีทั้งหมด คือประมาณ 305 นาโนเมตร จะมีผลกระทบทางชีวภาพสูงสุด

บริเวณเขตศูนย์สูตรในขณะท้องฟ้าแจ่มใส รังสี UV-B ความยาวคลื่นในช่วงกลางจะแผ่รังสีมาสู่พื้นผิวโลกได้ร้อยละ 30 ซึ่งบางแห่งอาจจะได้รับรังสีเพียงร้อยละ 10 ขึ้นอยู่กับระดับความเข้มข้นของโอโซนและความหนาแน่นของเมฆ อย่างไรก็ตาม ในบริเวณเส้นละติจูดที่สูงขึ้นไปในฤดูร้อนอาจได้รับรังสี UV-B แตกต่างกันเล็กน้อย จากบริเวณเส้นศูนย์สูตร ดังนั้นทั่วโลกจึงได้รับอันตรายจากรังสี UV-B อย่างทั่วถึงกัน แม้ว่าในการได้รับรังสีตลอดทั้งปี ณ บริเวณยิ่งใกล้เส้นศูนย์สูตรจะได้รับมากกว่าก็ตาม

ความผันแปรในระดับโอโซนส่งผลกระทบต่อปริมาณรังสี UV-B ที่แผ่ลงมา ถ้าความเข้มข้นของโอโซนโดยรวมลดลงร้อยละ 10 รังสี UV-B ที่แผ่มายังพื้นผิวโลกจะเพิ่มขึ้นร้อยละ 20

รังสี UV-B สามารถทำอันตรายโปรตีน และ DNA ที่เป็นสารเคมีที่ถ่ายทอดข้อมูลทางพันธุกรรมในสิ่งมีชีวิตได้ นอกจากนั้นยังทำให้เซลล์ตายหรือลักษณะทางพันธุกรรมที่ถ่ายทอดโดย DNA เปลี่ยนแปลงได้ กระบวนการประการหลังนี้มีผลทำให้เกิดโรคมะเร็งในมนุษย์ 2 ชนิดคือ มะเร็งผิวหนังเฉพาะถิ่น ซึ่งปกติรักษาได้ อีกชนิดหนึ่งร้ายแรงกว่ามาก คือ มะเร็งผิวหนังมีลาโนมา มีผู้เป็นโรคมะเร็งผิวหนังมีลาโนมาน้อยมาก แต่มะเร็งชนิดนี้มีโอกาสทำให้เสียชีวิตสูง ทุกปีมีผู้เสียชีวิตด้วยโรคมะเร็งผิวหนังทั่วโลก



รูปที่ 16 *แสดงอัตราการตายด้วยโรคมะเร็งชนิดมีลาโนมา หนึ่งในมะเร็งผิวหนังหลายชนิดกับละติจูดที่ตั้ง โดยอัตราการตายเกิดขึ้นกับคนผิวขาวที่อยู่ใกล้เส้นศูนย์สูตรมากกว่า*

ประมาณ 10,000 คน มีการศึกษาเกี่ยวกับผู้เป็นโรคมะเร็งผิวหนังเฉพาะถิ่นมากมาย โรคมะเร็งดังกล่าวมักเกิดกับคนผิวขาวมากกว่าคนผิวสีเข้ม และสัมพันธ์กับชนเผ่าคอเคเซียนในสหรัฐอเมริกา แม้ว่าจะไม่พบการทำลายโอโซนก็ตาม คนกลุ่มนี้ประมาณร้อยละ 12-30 มีโอกาสเป็นโรคมะเร็งผิวหนังชนิดที่ไม่ใช่มีลาโนมาได้ตลอดชีวิต ยิ่งไปกว่านั้นโอกาสที่จะเป็นมะเร็งชนิดที่ไม่ใช่มีลาโนมายังมีเพิ่มมากขึ้นอีกด้วย ในทางกลับกันมะเร็งดังกล่าวยังมีความสัมพันธ์กับเส้นละติจูด นั่นคือ ผู้ที่อยู่ใกล้เส้นศูนย์สูตรจะเป็นโรคมะเร็งผิวหนังมากกว่าผู้ที่อยู่ใกล้ขั้วโลก (ดูรูปที่ 16) ตัวอย่างเช่น การศึกษาชิ้นหนึ่งพบว่าอัตราผู้ที่เป็นโรคมะเร็งผิวหนังในพื้นที่หนึ่งของรัฐเท็กซัสต่อปีมี 379 ราย จากประชากร 100,000 คน ในขณะที่รัฐไอโอวาซึ่งอยู่ตอนเหนือขึ้นไปมีผู้ที่เป็นโรคมะเร็งผิวหนังเพียง 124 รายจากประชากร 100,000 คน โดยภาพรวมแล้วในทศวรรษ 1970 สหรัฐอเมริกามีผู้ป่วยด้วยโรคมะเร็งผิวหนังประมาณ 300,000 รายจากผู้ป่วยด้วยโรคมะเร็งทั้งหมด หมายความว่า 1 ใน 2-3 ของผู้ป่วยด้วยโรคมะเร็งจะเป็นมะเร็งผิวหนัง ในบางพื้นที่ตัวเลขจะต่ำกว่านี้มาก เช่น ทางตอนใต้ของสหภาพโซเวียตมีผู้ป่วยด้วยโรคมะเร็งผิวหนังประมาณร้อยละ 15-26 ของผู้ด้วยโรคมะเร็งผิวหนังทั้งหมด และในทางตอนเหนือร้อยละ 9-14 ประเทศที่มีอัตราการป่วยด้วยโรคมะเร็งผิวหนังสูงสุดที่เด่นชัด ได้แก่ ออสเตรเลีย

มีความพยายามศึกษาค้นคว้ามากมายเพื่อคาดคะเนรังสี UV-B ว่าเพิ่มขึ้นเพียงใดจึงส่งผลกระทบต่อการเกิดโรคมะเร็งผิวหนัง การคาดคะเนที่ดีที่สุดเมื่อไม่นาน ความคิดหนึ่ง

ที่ยังไม่แน่ใจ คือ การคาดคะเนของสถาบันวิทยาศาสตร์แห่งชาติสหรัฐอเมริกา ซึ่งประมาณการว่าทุกร้อยละ 1 ที่โอโซนถูกทำลาย ทำให้มีโอกาสป่วยด้วยโรคมะเร็งผิวหนังเพิ่มขึ้นร้อยละ 2 ในสหรัฐอเมริกาหากชั้นโอโซนลดลงร้อยละ 3 จะทำให้มีผู้เป็นโรคมะเร็งผิวหนังเพิ่มขึ้น 18,000 รายในแต่ละปี ตัวเลขที่น่าตกใจจะยังคงเกิดขึ้นเช่นเดียวกันนี้หากคนอเมริกันเคลื่อนย้ายลงไปทางใต้อีก 2-3 ละติจูด ซึ่งน้อยคนนักที่จะรู้ถึงผลดังกล่าว

เป็นการยากที่จะทำให้ข้อมูลในการค้นพบดังกล่าวชัดเจนสำหรับคนทั่วโลกได้ เพราะคนผิวขาวมีแนวโน้มที่จะเป็นมะเร็งผิวหนังมากกว่าคนผิวสีเข้ม แม้เพียงแต่ถูกแดดแผดเผาก็จะมีโอกาสเป็นมะเร็งผิวหนังได้ ยิ่งกว่านั้นยังมีการเตือนให้ระวังอันตรายจากผลกระทบของรังสีอัลตราไวโอเลตที่เพิ่มขึ้น โดยระวังไม่ให้ร่างกายได้ถูกแสงอาทิตย์โดยตรง โดยเฉพาะอย่างยิ่งต่อร่างกายที่ส่วนไม่ค่อยสัมผัสกับรังสีดังกล่าว สาเหตุหนึ่งของอัตราการเพิ่มขึ้นของการเกิดมะเร็งผิวหนังในปัจจุบันนี้ ได้แก่ความนิยมในการอาบแดดที่เพิ่มขึ้นโดยมีเสื้อผ้าน้อยชิ้น หรือไม่มีเลย ดังผลการวิจัยใหม่ที่ยืนยันในข้อเท็จจริงนี้ระบุว่าถ้าความเข้มของรังสี UV-B เพิ่มขึ้นร้อยละ 10 จะทำให้ผู้ชายเป็นมะเร็งผิวหนังชนิดมีลาโนมาในบริเวณที่รับแสงแดดโดยตรงเพิ่มขึ้นร้อยละ 8 และในบริเวณที่ไม่ถูกแสงแดดบ่อยนักเพิ่มขึ้นร้อยละ 6 สำหรับผู้หญิงอัตราการเป็นมะเร็งจะเพิ่มขึ้นร้อยละ 10 และ 5 ตามลำดับ

อัตราผู้เสียชีวิตด้วยโรคมะเร็งผิวหนังที่เพิ่มขึ้น จะแตกต่างกันไปตามระดับการทำลายโอโซนซึ่งไม่สามารถกำหนดสถิติแน่นอนได้ทั่วโลก นักวิทยาศาสตร์ชาวอเมริกันประเมินว่าหากควบคุมการแพร่กระจายสาร CFC อย่างดีจะช่วยลดจำนวนผู้ป่วยโรคมะเร็งผิวหนังชนิดมีลาโนมาได้ถึง 1.65 ล้านคน และลดค่าใช้จ่ายในการรักษาได้ถึง 196-455 ล้านเหรียญสหรัฐ

รังสี UV-B ที่เพิ่มขึ้นมีผลร้ายแรงต่อร่างกายมนุษย์อีกมากมาย ที่น่ากลัวที่สุดคือ ทำให้การทำงานของระบบภูมิคุ้มกันร่างกายลดต่ำลง ซึ่งทำให้ยังไม่ปรากฏอาการของโรคทั้ง ๆ ที่เกิดมะเร็งขึ้นแล้ว เพราะระบบภูมิคุ้มกันของร่างกายจะทำหน้าที่ตรวจจับเซลล์มะเร็งที่เริ่มเข้าทำลายเซลล์ร่างกาย แล้วสร้างสารประกอบที่ไปกระตุ้นให้ร่างกายสร้างภูมิคุ้มกันเข้าทำลายเซลล์มะเร็ง ก่อนที่มะเร็งนั้นจะก่อตัวขึ้น มีการวิจัยพบว่าระบบภูมิคุ้มกันของร่างกายจะลดประสิทธิภาพลงมาก หากความเข้มของรังสี UV-B เพิ่มขึ้น ดังนั้นเมื่อโอโซนในบรรยากาศชั้นสตราโตสเฟียร์ถูกทำลายจนมีปริมาณลดลงจึงส่งผลให้โรคติดเชื้อทางผิวหนังจากไวรัสเพิ่มสูงขึ้นด้วย เช่น เริม งูสวัด และแผลพุพองต่าง ๆ

แม้ว่าพืชสามารถพัฒนากลไกป้องกันรังสี UV-B ที่มีความเข้มสูงได้ แต่จากการทดลองในห้องปฏิบัติการพบว่า พืชจะมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นต่างกันไปในการตอบสนองต่อรังสี UV-B ที่เพิ่มขึ้น จากการทดสอบปฏิกิริยาที่มีต่อรังสี UV-B กับพืชกว่า 200

ชนิด ปรากฏว่าพืชจำนวน 2 ใน 3 ตอบสนองอย่างเด่นชัด พืชที่ไวต่อแสง เช่น ฝ้าย ถั่วลันเตา ถั่วฝักยาว แตง และกะหล่ำปลี มีอัตราการเจริญเติบโตช้ากว่าปกติ และละอองเกสรของพืชบางชนิดจะหยุดการเจริญเติบโตลง รังสี UV-B สามารถทำลายฮอร์โมนชนิดต่าง ๆ และคลอโรฟิลล์ ซึ่งเป็นสารเคมีที่สำคัญในกระบวนการสังเคราะห์แสง ทำให้อัตราการสังเคราะห์แสงของพืชลดลง ผลผลิตของพืชในฤดูกาลจึงต่ำลงตามไปด้วย การทดลองที่เห็นเด่นชัด ได้แก่ การทดลองกับถั่วเหลือง ในระยะยาวพบว่าถ้าระดับโอโซนลดลงร้อยละ 25 จะทำให้ผลผลิตถั่วเหลืองลดลงร้อยละ 20-25 ถ้าชั้นโอโซนถูกทำลายอย่างรุนแรงจะทำให้ผลผลิตไม้ซุงและพืชผลชนิดต่าง ๆ ลดลง ต้นไม้ และหญ้าจะได้รับผลกระทบจากระดับรังสี UV-B ที่เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน

รังสี UV-B สามารถส่องทะลุได้ลึกในน้ำใส จึงคุกคามสาหร่ายเซลล์เดียว ซึ่งเป็นสิ่งมีชีวิตเริ่มแรกของระบบห่วงโซ่อาหารในน้ำ ปัญหานี้กระทบต่อระบบนิเวศน์น้ำ จนทำให้จำนวนปลาลดลง เกิดผลกระทบรุนแรงต่อตัวอ่อนของปลา ผลการวิจัยพบว่าตัวอ่อนของปลาแอนโชวี (anchovy) ที่อยู่ในน้ำลึกถึง 10 เมตร หากได้รับรังสี UV-B ที่มีความเข้มสูงกว่าระดับปกติเพียงร้อยละ 20 ก็อาจตายหมดได้ภายใน 15 วัน

การทดลองค้นคว้าวิจัยหาความสัมพันธ์ของปริมาณรังสี UV-B ที่เพิ่มขึ้นกับความเสียหายต่อชีวิตพืชและสัตว์กำลังก้าวหน้าไปไกลมาก แม้จะไม่สามารถคาดหมายได้ว่าความรุนแรงที่เกิดขึ้นจากการเพิ่มขึ้นของรังสี UV-B จะมากเพียงใด แต่เป็นที่แน่นอนว่าความเข้มข้นของโอโซนที่ลดลงเพียงเล็กน้อยสามารถทำให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์ เกษตรกรรม และการประมงได้ มนุษย์และสัตว์น้ำจะทุกข์ทรมานจากมะเร็งผิวหนังและโรคที่เกี่ยวข้องกับตาเพิ่มสูงขึ้น พืชที่เพาะปลูกจะให้ผลผลิตต่ำ ผลผลิตไม้ซุงจะลดลง โดยที่ผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในทะเลเป็นเรื่องยากที่จะเข้าใจ ซึ่งกลัวกันว่าสิ่งแวดล้อมในทะเลจะเปลี่ยนแปลงไปอย่างกะทันหัน เพราะสิ่งมีชีวิตเซลล์เดียวในทะเลมีความไวต่อรังสี UV-B มาก

ในที่สุดการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของโอโซนในอนาคตจะทำลายชีวิตพืชและสัตว์ทั้งทางตรงและทางอ้อม อุณหภูมิโลกที่สูงขึ้นรวมกับระดับความเข้มข้นของโอโซนลดลงทำให้เกิดหมอกควันพิษในอากาศอย่างรุนแรงและบ่อยขึ้น รังสีอัลตราไวโอเลตทำให้วัตถุสังเคราะห์เสื่อมสภาพลง เช่น ทำให้สีทาบ้าน สีเคลือบหน้าต่างซีดจางลง สีหลังคารถยนต์แตกเป็นผงฝุ่น ทำลายพลาสติกในอุตสาหกรรมการก่อสร้างและอื่น ๆ ความเข้มของรังสี UV-B ที่เพิ่มขึ้นเป็นการเพิ่มปัญหาดังกล่าวให้รุนแรงขึ้น ถ้าปริมาณสาร CFC เพิ่มขึ้นร้อยละ 25 ต่อปี จะมีผลให้เกิดการทำลายโอโซนมากถึงร้อยละ 26 ใน ค.ศ. 2075 เมื่อถึงเวลานั้นความเสียหายที่เกิดขึ้นต่อสิ่งต่าง ๆ เช่น PVC จะเพิ่มมากขึ้น และค่าใช้จ่ายในการแก้ปัญหาสภาพแวดล้อมในตอนนั้น คาดว่าจะสูงถึง 4.7 พันล้านเหรียญสหรัฐ

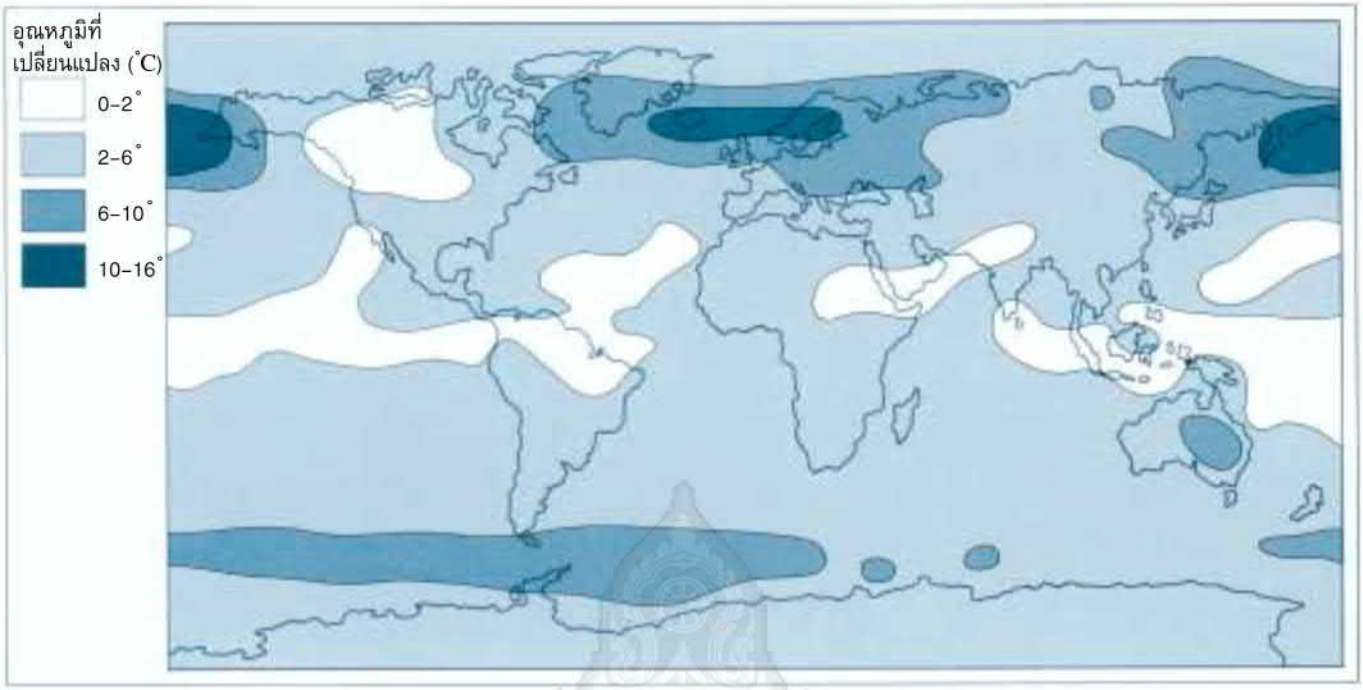
ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศ

การคาดคะเนผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของโอโซนต่อสภาพภูมิอากาศจะไม่มีความหมายเลย หากไม่พิจารณาถึงผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของก๊าซชนิดอื่น ๆ ในชั้นบรรยากาศ โอโซนเป็นก๊าซเรือนกระจกเช่นเดียวกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซปริมาณน้อยที่มีอิทธิพลต่อการกระจายตัวของโอโซน เมื่อศึกษาสภาพภูมิอากาศโลก เราต้องพิจารณาอันตรายของก๊าซปริมาณน้อยเหล่านี้อย่างเป็นระบบ และศึกษาบทบาทหน้าที่จากก๊าซปริมาณน้อยในการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของก๊าซชนิดอื่น ๆ ที่มีผลต่อสภาพภูมิอากาศทั่วโลก การคาดคะเนที่ดีสุดเมื่อไม่นานมานี้กล่าวว่า ใน ค.ศ. 2030 ความสัมพันธ์อย่างเป็นระบบของก๊าซเหล่านี้จะทำให้โลกร้อนกว่าปัจจุบันประมาณ 3 องศาเซลเซียส ถ้าเป็นเช่นนั้นจริงจะเกิดผลกระทบอะไรบ้างต่อมวลมนุษย์

โลกร้อนขึ้นไม่ใช่เป็นเรื่องเล็กน้อย ช่วงเวลาพันปีก่อนโลกมีอุณหภูมิสูงกว่าปัจจุบัน แต่เมื่อพิจารณาดูแล้วไม่เกินกว่า 3 องศาเซลเซียส ตัวอย่างเช่น กรีนแลนด์เคยได้ชื่อว่า ดินแดนสีเขียว เพราะฝั่งทะเลในเขตนี้มีสีเขียวของพืช แต่ปัจจุบันดินแดนแห่งนี้ปกคลุมไปด้วยน้ำแข็งจึงมีสีขาวไปทั่ว ควรจะตั้งชื่อใหม่ว่าไวต์แลนด์ (White Land) หรือดินแดนสีขาว จึงจะเหมาะสมกว่า ยุคกลางตอนปลายเมื่ออุณหภูมิโลกลดลงบ้าง ทำให้ตั๊กแตนระบาดในสวิตเซอร์แลนด์

การที่โลกร้อนขึ้นนั้นไม่ได้หมายความว่า อุณหภูมิในที่ต่าง ๆ จะสูงขึ้นเท่ากันทั้งหมดทั่วโลกตรงกันข้าม บางแห่งจะมีอุณหภูมิสูงกว่าที่อื่น ๆ (ดูรูปที่ 17) พื้นที่ในเขตละติจูดตอนกลางจะมีฤดูร้อนที่ยาวนานขึ้น แต่ฤดูหนาวจะสั้นลง อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะเห็นได้ในฤดูหนาวมากกว่าฤดูร้อน และอุณหภูมิเฉลี่ยในรอบปีจะลดลงกว่าเดิม

บางเมืองอาจผจญกับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปอย่างรุนแรง เช่น กรุงวอชิงตัน ดี.ซี. จะได้รับผลกระทบจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า ในปัจจุบันอุณหภูมิเฉลี่ยในกรุงวอชิงตัน ดี.ซี. ที่สูงเกินกว่า 38 องศาเซลเซียส จะเกิดขึ้นเพียงวันเดียวในรอบปี นอกนั้นสูงกว่า 32 องศาเซลเซียสประมาณ 35 วันต่อปี กลางศตวรรษหน้าตัวเลขดังกล่าวจะเพิ่มเป็น 12 และ 85 วันต่อปี ทำให้กรุงวอชิงตัน ดี.ซี. เป็นอีกแห่งหนึ่งที่อุณหภูมิร้อนกว่าปัจจุบันมาก ซึ่งกลางคืนจะร้อนมากขึ้นด้วย เพราะในปัจจุบันแม้อุณหภูมิในเวลากลางคืนที่สูงกว่า 27 องศาเซลเซียส เฉลี่ยแล้วจะมีเพียง 1 คืนต่อปีเท่านั้น แต่เมื่อคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าจะมีกลางคืนที่มีอากาศร้อนมากถึง 19 คืนต่อปี



รูปที่ 17 *อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าจากการคาดคะเนด้วยแบบจำลองบรรยากาศโดยในฤดูหนาวอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นถึง 6-10 องศาเซลเซียส ในทางเหนือทวีปของยุโรป*

ในชั้นบรรยากาศที่ร้อนมีขีดความสามารถอุ้มไอน้ำที่ระเหยเพิ่มขึ้น ซึ่งอัตราการระเหยที่พื้นผิวจะเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกันจึงทำให้ชั้นบรรยากาศชุ่มชื้นขึ้น เพราะไอน้ำที่ระเหยขึ้นไปเป็นก๊าซเรือนกระจกชนิดหนึ่ง ซึ่งสามารถกระจายตัวไปได้ไกลจึงทำให้โลกอุ่นขึ้น อัตราการระเหยที่เพิ่มสูงขึ้นบอกเป็นนัยว่า อัตราการตกของฝนจะเพิ่มตามด้วย และยังคงดำเนินอยู่เช่นนี้เรื่อยไปในภาวะสมดุล ระหว่างน้ำที่ระเหยเข้าไปในชั้นบรรยากาศทั้งหมดและน้ำที่ตกลงมาจากชั้นบรรยากาศ อย่างไรก็ตาม อัตราการตกของฝนในโลกนั้นจะไม่มีรูปแบบที่แน่นอนตายตัว ซึ่งอัตราของฝนที่ตกดังกล่าวจะเพิ่มขึ้นในบางพื้นที่และลดลงในบางที่

โดยทั่วไปอุณหภูมิที่อุ่นขึ้นจะมีผลกระทบอันซับซ้อนต่อขั้วโลก แม้ว่าหิมะและน้ำแข็งมีแนวโน้มจะละลายเพิ่มขึ้นก็ตาม ในพื้นที่หนาวจัดอาจมีหิมะตกหนักมากขึ้นเนื่องจากหยาดน้ำฟ้ามีอัตราสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม ในขณะที่น้ำแข็งละลายมากขึ้นเป็นผลให้การสะท้อนของรังสีดวงอาทิตย์บนพื้นผิวโลกใกล้ขั้วโลกลดลง โลกจึงดูดกลืนรังสีความร้อนไว้มาก ทำให้มีการกระจายความร้อนไปในเขตละติจูดที่สูงขึ้นไป แต่บริเวณขั้วโลกใต้เกิดผลกระทบน้อยกว่า เพราะมีการแตกตัวของแผ่นน้ำแข็งตามฤดูกาล

ปรากฏการณ์เหล่านี้เป็นเพียงสองสามส่วนเท่านั้น ที่เรารู้ว่าเกิดจากภาวะโลกร้อน นักวิทยาศาสตร์พยายามที่จะสร้างแบบจำลองลักษณะของบรรยากาศ เมื่อโลกได้รับผลกระทบจากสภาวะนี้ รวมทั้งผลต่อเนื่องที่เกิดขึ้นตามมาภายหลัง ซึ่งผลที่ได้จากการ

คาดหมายนั้นปรากฏขึ้นจริงในบริเวณกว้าง แต่ในระดับภูมิภาคยังคงมีความผิดพลาดอยู่มาก

แบบจำลองส่วนมากบ่งชี้ว่า ปริมาณหยาดน้ำฟ้าโดยรวมทั่วโลกเพิ่มขึ้นร้อยละ 7-11 แต่อัตราการระเหยของน้ำที่สูงขึ้นทำให้ผืนดินมีความแห้งแล้งมากขึ้นด้วยเช่นกัน อย่างน้อยที่สุดในเขตละติจูดกลางและโดยเฉพาะอย่างยิ่งละติจูดกลางในซีกโลกเหนือ ช่วงต้นฤดูใบไม้ผลิเป็นสัญญาณเตือนถึงอันตรายที่จะเกิดกับการเจริญเติบโตของพืชในเขตผลิตพืชผลที่สำคัญของโลก แบบจำลองหนึ่งบ่งชี้ว่า พื้นดินในเขตอเมริกาเหนือไซบีเรีย ด้านตะวันออกเฉียงใต้ของทวีปอเมริกาใต้ พื้นที่ป่าดิบชื้น และบริเวณใกล้ขั้วโลก จะแห้งแล้งมากขึ้น บริเวณที่มีความชุ่มชื้นเพิ่มมากขึ้น ได้แก่ พื้นที่ของประเทศในเขตร้อน และเขตชายฝั่งมหาสมุทรด้านตะวันตก

ความร้อนที่เกิดขึ้นมากพอที่จะทำให้น้ำแข็งที่ขั้วโลกละลายได้หรือ? หากธารน้ำแข็งปริมาณมหาศาลในกรีนแลนด์และขั้วโลกใต้ละลายจะทำให้ระดับน้ำทะเลสูงขึ้น ถ้าแผ่นน้ำแข็งในขั้วโลกใต้ด้านตะวันตกละลาย จะทำให้ระดับทะเลสูงขึ้นถึง 5 เมตร และจะส่งผลกระทบอย่างรุนแรง ท่าเรือหลายแห่งไม่สามารถใช้ประโยชน์ได้ พื้นที่ลุ่มทั่วโลกจะถูกน้ำท่วม การเคลื่อนตัวของน้ำแข็งบริเวณขั้วโลกเหนือจะส่งผลกระทบมากทั้งทางยุทธศาสตร์และทางเศรษฐกิจ ยกเว้นแบบจำลองคอมพิวเตอร์ซึ่งได้บ่งชี้ว่า แม้น้ำแข็งขั้วโลกจะบางลงหรือมีขนาดเล็กลงกว่าเดิมนั้น จะไม่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงระยะเวลาอันใกล้นี้

ระดับน้ำทะเลที่เพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ ซึ่งเป็นผลมาจากการกระจายความร้อนในมหาสมุทรนั้น คาดว่าหากโลกร้อนขึ้น 1.5-5.5 องศาเซลเซียส จะทำให้ระดับน้ำทะเลสูงขึ้นระหว่าง 20-165 เซนติเมตร ตามลำดับ เมื่อเทียบกับช่วงเวลาที่ผ่านมาระดับน้ำทะเลในช่วงศตวรรษ 20 เพิ่มสูงขึ้นประมาณ 5-19 เซนติเมตร และเนื่องจากประชากรจำนวนถึง 1 ใน 3 ของโลกอาศัยอยู่หนาแน่นในพื้นที่ 60 กิโลเมตรจากชายฝั่ง การเปลี่ยนแปลงระดับน้ำทะเลดังกล่าวจึงน่าจะก่อความเดือดร้อนต่อประชากรที่อาศัยอยู่ในบริเวณนี้เป็นอย่างมาก อาจทำให้เกิดการอพยพผู้คนจำนวนมากและเกิดปัญหายุ่งยากกับเมืองที่อยู่ใกล้ชายฝั่งทะเล เช่น นครนิวยอร์ก และกรุงเทพมหานคร เป็นต้น

นักวิทยาศาสตร์จำนวนหนึ่งได้ศึกษาปัญหาหลาย ๆ ด้านเพื่อค้นหาผลกระทบที่จะเกิดขึ้นกับโลก ดังเช่นใน ค.ศ. 2100 มีผลแสดงให้เห็นว่าพื้นที่ลุ่มต่ำของสหรัฐอเมริการะหว่างร้อยละ 20-55 อาจจมอยู่ใต้ทะเล ซึ่งส่งผลกระทบต่อการทำประมงส่วนใหญ่และแหล่งอาศัยของสิ่งมีชีวิตหลายชนิด ถ้าระดับน้ำทะเลสูงถึง 50 เซนติเมตร จะเกิดปัญหากับประเทศอียิปต์เป็นอย่างมาก เพราะพื้นที่สามเหลี่ยมปากแม่น้ำไนล์ ซึ่งเป็นที่อยู่อาศัยของประชากรกว่าร้อยละ 16 ของประเทศจะถูกน้ำท่วม

ประเทศบังกลาเทศจะประสบกับความรุนแรงมากกว่าที่อื่นๆ เพราะโดยปกติแล้วจะได้รับผลกระทบจากน้ำท่วมและพายุโซนร้อนอยู่เป็นประจำ คาดว่าหากระดับน้ำทะเลสูงขึ้น 50 เซนติเมตร น้ำจะท่วมพื้นที่ที่เป็นแผ่นดินร้อยละ 12 ของประเทศ ถ้าหากระดับน้ำทะเลสูง 2-2.5 เมตร น้ำจะท่วมพื้นที่มากกว่าหนึ่งในสี่ของประเทศ ซึ่งเป็นแหล่งอาศัยของชาวบังกลาเทศ บังกลาเทศก็เหมือนกับประเทศกำลังพัฒนาทั้งหลายที่ต้องพึ่งพาพื้นที่ต้นน้ำ เพื่อสร้างเขื่อนกั้นน้ำ และผลิตกระแสไฟฟ้าพลังน้ำ เขื่อนเหล่านี้จะช่วยดักตะกอนของดินที่ไหลเทลงมากับแม่น้ำไว้ที่บริเวณปากแม่น้ำเมื่อระดับน้ำทะเลเพิ่มสูงขึ้นจึงทำให้ถูกน้ำท่วมได้ง่าย

ผลกระทบทั้งหมดที่เกิดขึ้นต่อสังคมมนุษย์เป็นสิ่งเตือนให้ประชากรโลกรับรู้ถึงปัญหาที่ร้ายแรง ตัวอย่างเช่นความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นอาจจะทำให้ปริมาณการผลิตพืชผลทางการเกษตรพืชเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม อุณหภูมิเฉลี่ยที่สูงขึ้นกลับทำให้ปริมาณการผลิตผลิตข้าวโพด และข้าวสาลีในทวีปอเมริกาเหนือ และยุโรปตะวันตกลดลง คาดว่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นอย่างฉับพลัน 2 องศาเซลเซียส อาจทำให้ปริมาณการผลิตพืชผลโดยเฉลี่ยลดลงร้อยละ 10 และหรือ ±7 ในขณะที่ผลกระทบนี้อาจไม่ร้ายแรงนัก แต่การเปลี่ยนแปลงในระดับใหญ่กว่านี้อาจแก้ไขปัญหาได้ยากในพื้นที่ผลิตอาหารที่ไม่ได้ผลผลิตคุ้มทุน การเปลี่ยนแปลงปริมาณการผลิตเพียงเล็กน้อยอาจก่อให้เกิดปัญหาที่รุนแรงตามมาในภายหลัง เช่น พื้นที่ในบริเวณป่าเขตร้อนที่ปัจจุบันใช้ทำการเพาะปลูกเป็นเกษตรกรรมที่ยั่งยืนได้ โดยที่การเกษตรในพื้นที่แบบนี้ใช้ประโยชน์ได้ยาก หากภูมิอากาศเปลี่ยนแปลงไป สภาพดินบริเวณป่าเขตร้อนที่เคยอุดมสมบูรณ์จะยิ่งไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ทางการเกษตรได้เลย

สภาพอากาศที่แห้งแล้งหรือชุ่มชื้นมากเกินไปไม่มีผลกระทบเฉพาะการผลิตอาหารของโลกเท่านั้น แต่ยังรวมถึงกิจกรรมต่าง ๆ ของมนุษย์ทุกด้าน ผืนป่าที่เหลือน้อยจะเคลื่อนขึ้นไปทางขั้วโลก ความต้องการด้านพลังงานจะเปลี่ยนไป รวมถึงรูปแบบเศรษฐกิจการค้าของโลกซึ่งจะเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย การศึกษาชิ้นหนึ่งได้ศึกษา 'ผลกระทบแบบน้ำตก' โดยวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสภาพบรรยากาอย่างเป็นลำดับขั้นในรัฐซัตแคตเชวันที่อยู่ทางตอนใต้ของแคนาดา แบบจำลองบรรยากาศซึ่งทำการศึกษาโดยคาดการณ์ถึงผลของระดับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า (ซึ่งจะทำให้อุณหภูมิโดยเฉลี่ยของโลกเพิ่มขึ้นเป็น 3 องศาเซลเซียส)

ผลของการคาดการณ์ด้วยแบบจำลองดังกล่าวสรุปว่า อุณหภูมิเฉลี่ยในพื้นที่นี้จะสูงขึ้น 3.4 องศาเซลเซียส หยาดน้ำฟ้าจะเพิ่มขึ้นร้อยละ 18 ปริมาณการผลิตอาหารจะแปรเปลี่ยนเพราะสภาพอากาศที่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม เช่น ผลผลิตข้าวสาลีจะลดลงร้อยละ 25 รายได้จากผลผลิตทางเกษตรจะลดลงร้อยละ 26 การจ้างงานภาคเกษตรกรรม

จะลดลงร้อยละ 3 การจ้างงานในเขตเมืองทั้งหมดจะลดลงร้อยละ 1.9 อำนาจการซื้อที่อยู่อาศัยจะลดลงร้อยละ 12

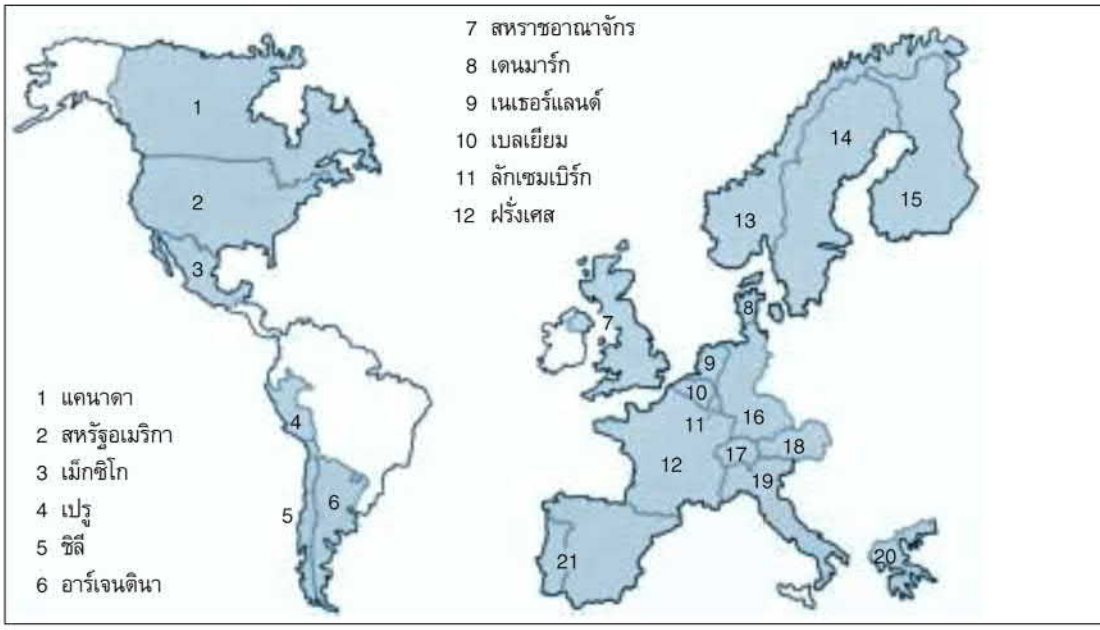
เนื่องจากมนุษย์ได้พยายามปรับตัวอยู่ตลอดเวลาตามการเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศ ผลกระทบจากภาวะโลกร้อนจะมากหรือน้อยจึงขึ้นอยู่กับอัตราความเร็วของการเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศ หากการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและเป็นไปโดยฉับพลัน ผลที่เกิดขึ้นตามมาจะแก้ไขได้ยากกว่าผลที่เกิดจากการเปลี่ยนไปอย่างช้า ๆ และจะไม่มีประโยชน์อันใดที่จะพยายามแยกให้ชัดเจนว่า ผลที่เกิดดังกล่าวที่มีต่อมนุษย์นั้น 'เป็นอันตราย' หรือ 'ไม่เป็นอันตราย' ซึ่งมนุษย์จะต้องปรับตัวเองให้เหมาะสมกับการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศทุกรูปแบบอยู่แล้ว ทั้งนี้ต้องใช้เวลายาวนานหลายปีกว่าจะเห็นผล

การกำหนดนโยบาย

ปัญหาที่เกิดจากการผันแปรของชั้นโอโซนนั้นแตกต่างจากปัญหาสิ่งแวดล้อม เพราะมีผลกระทบกับชีวิตความเป็นอยู่ของผู้คนทั่วไป เนื่องจากไม่ใช่ปัญหาที่เกิดเฉพาะประเทศพัฒนาแล้วหรือประเทศด้อยพัฒนาเพียงประเทศใดเท่านั้น ทั้งนี้ถือเป็นปัญหาโลก

หลักฐานที่แสดงถึงความเสียหายที่เกิดขึ้นจริงนั้นมีอยู่น้อยมาก เมื่อเทียบกับปัญหามลพิษอื่น ๆ เช่น ฝนกรด มลพิษชายฝั่งทะเล พื้นที่ป่าลดน้อยลง หรือการเกิดภาวะแห้งแล้งแบบทะเลทราย ดังนั้นความร่วมมือระหว่างประเทศในการพิทักษ์ชั้นโอโซนเป็นสิ่งสำคัญสิ่งแรกในการจัดการสิ่งแวดล้อม ความร่วมมือระหว่างประเทศอย่างเข้มแข็งเท่านั้นช่วยป้องกันปัญหาดังกล่าวได้อย่างมีประสิทธิภาพก่อนที่จะเกิดอันตรายอย่างใหญ่หลวง ด้วยเหตุผลข้างต้น UNEP จึงมีบทบาทในการพิทักษ์ชั้นโอโซน

ใน ค.ศ. 1977 UNEP ได้จัดประชุมผู้ชำนาญการเพื่อวางแผนปฏิบัติการโลกว่าด้วยชั้นโอโซน แผนปฏิบัติการนี้ได้ส่งเสริมโครงการการวิจัยและประเมินผลที่เกิดขึ้นภายหลังชั้นโอโซนมีการเปลี่ยนแปลงไป บทบาทของ UNEP คือ เป็นผู้รวมกลุ่มและประสานความร่วมมือ โดยจัดตั้งคณะทำงานพิเศษที่ชื่อว่า คณะกรรมการประสานงานชั้นโอโซน (Coordinating Committee on the Ozone Layer – CCOL) ใน ค.ศ. 1986 โดยศึกษาประเมินถึงสิ่งที่เป็นภัยคุกคามต่อชั้นโอโซนตามความรู้ใหม่ ๆ เกี่ยวกับกระบวนการต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในชั้นบรรยากาศ และแนวโน้มในการปล่อยสารเคมีเข้าสู่ชั้นบรรยากาศโลกรวม 8 โครงการ ในรายงานของ CCOL ใน ค.ศ. 1986 ระบุว่า เกิดภัยคุกคามรุนแรงกับชั้นโอโซนขึ้นอีกครั้ง และคาดว่าปริมาณโอโซนจะลดลงมากในอนาคต ในปีเดียวกันนี้คณะทำงานพิเศษ CCOL ได้ประเมินผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวที่จะเกิดขึ้นกับมนุษย์ด้วย

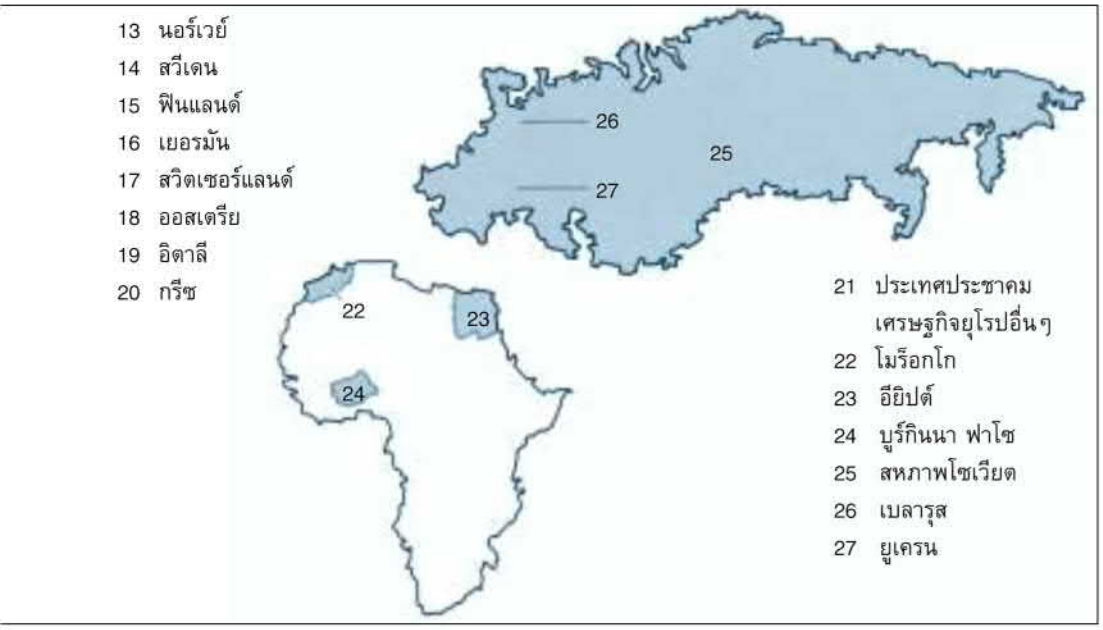


รูปที่ 18 *ใน ค.ศ. 1987 ประเทศต่าง ๆ 27 ประเทศ ได้ร่วมกันลงนามในอนุสัญญาเวียนนาเพื่อพิทักษ์ชั้นโอโซน ประเทศที่ร่วมลงนามในอนุสัญญาดังกล่าวจะต้องปกป้องสุขภาพอนามัยและสิ่งแวดล้อมจากการเปลี่ยนแปลงของโอโซน โดยร่วมมือกันสังเกตค้นคว้าวิจัย และแลกเปลี่ยนข้อมูลข่าวสารระหว่างกัน*

ผลของความห่วงใยต่อชั้นโอโซนนี้ต่อเนื่องมาเป็นเวลาหลายปี ซึ่งนำไปสู่การยอมรับจากหลายประเทศถึงความจำเป็นที่จะต้องปกป้องชั้นโอโซนไว้ ดังนั้น UNEP จึงจัดตั้งคณะทำงานที่มีผู้เชี่ยวชาญทางด้านกฎหมายและด้านเทคนิคต่าง ๆ จัดการประชุมอนุสัญญาเพื่อพิทักษ์โอโซนที่กรุงเวียนนาขึ้น ประกอบด้วยตัวแทนจาก 21 ประเทศ และประเทศในกลุ่มประชาคมยุโรปเมื่อเดือนมีนาคม ค.ศ. 1985 (มติที่ประชุมเริ่มบังคับใช้ต้น ค.ศ. 1987) ซึ่งมีหลายประเทศที่ร่วมลงนามในการประชุมครั้งนี้ด้วย

โดยที่ประชุมได้กำหนดปฏิญญาร่วมกัน 21 ประการ แยกเป็นหมวดว่าด้วยการปกป้องสุขภาพอนามัยของมนุษย์ และสิ่งแวดล้อมจากผลกระทบจากการทำลายโอโซน และภาคผนวก 2 ประการ เพื่อส่งเสริมความร่วมมือด้านการวิจัย การสังเกตเฝ้าระวัง และการแลกเปลี่ยนข้อมูลร่วมกันระหว่างประเทศ

ความห่วงใยต่อชั้นโอโซนมีมากขึ้นเป็นลำดับจนหลายประเทศได้ออกกฎข้อบังคับการผลิตและการใช้ผลิตภัณ ์ที่มีสาร CFC ตัวอย่างเช่น ใน ค.ศ. 1978 สหรัฐอเมริกาได้ห้ามใช้สาร CFC เป็นตัวขับเคลื่อนสารละอองไอ ใน ค.ศ. 1980 ที่ประชุมคณะรัฐมนตรีชี้ขาดของประชาคมเศรษฐกิจยุโรปกำหนดไม่ให้ประเทศสมาชิกเพิ่มการผลิตสาร CFC11 และ CFC 12 ทำให้สามารถลดการใช้สาร CFC ที่ใช้กับสารละอองไอได้ถึงร้อยละ 30 (ปลาย ค.ศ. 1981 เปรียบเทียบกับ ค.ศ.1976) ประเทศอื่นๆ เช่น เบลเยียมและโปรตุเกส ได้ห้ามการผลิตสาร CFC ด้วยเช่นกัน เนเธอร์แลนด์กำหนดให้ติดคำเตือนอันตรายต่อสุขภาพจากสารนี้ไว้บนกระป๋องฉีดสารละอองไอ (กระป๋องสเปรย์) เดนมาร์กห้ามใช้สารที่มีส่วนประกอบของสาร CFC ในสารละอองไอตั้งแต่ ค.ศ. 1987 สวีเดนและนอร์เวย์ห้ามใช้สาร CFC กับสารละอองไอที่ไม่มีกลิ่นด้วยเช่นกัน



ข้อตกลงอนุสัญญาเวียนนาว่าด้วยการควบคุมการใช้สารคลอโรฟลูออโรคาร์บอน ในประเทศพัฒนาแล้วมีสาระสำคัญคือ การลดปริมาณการผลิตสาร CFC ที่ใช้แช่แข็ง ลงจากเดิมร้อยละ 20 ให้มีผลปฏิบัติใน ค.ศ. 1988 แต่ปัญหาอยู่ที่ตัวเลขการผลิตสารนี้ ทั่วโลกยังไม่เป็นที่ทราบแน่ชัด สมาคมผู้ผลิตสารเคมีได้แจ้งตัวเลขของผู้ผลิตรายใหญ่ 21 แห่งในสหรัฐอเมริกา แคนาดา ยุโรป ญี่ปุ่น บราซิล เม็กซิโก ออสเตรเลีย และอินเดีย ต่อ UNEP และ CCOL ในส่วนของสหภาพโซเวียตแม้ไม่ได้เป็นสมาชิกของสมาคม ผู้ผลิตสารเคมีก็ได้แจ้งถึงปริมาณการผลิตสาร CFC11 และ CFC12 ซึ่งมี 60,000 ตัน โดยปริมาณการผลิตแต่ละปีขึ้นอยู่กับการส่งออกไปยังกลุ่มประเทศยุโรปตะวันออกเป็นหลัก

ในช่วงเวลาที่ผ่านมาความร่วมมือระหว่างประเทศในการปกป้องชั้นโอโซนมี เพิ่มขึ้นอย่างเร่งด่วน แม้ว่าแบบจำลองในปัจจุบันคาดการณ์ว่าระดับการทำลายจะน้อย กว่าช่วงเวลาสองสามปีที่แล้ว ซึ่งการคาดการณ์ในแบบจำลองเหล่านี้สามารถเชื่อถือได้ มากกว่า ที่จริงแล้วหลายปีที่ผ่านมา มีหลักฐานจากการสังเกตการณ์ซึ่งสามารถยืนยันใน สิ่งที่ผ่านมาว่าเป็นเพียงการคาดการณ์จากทฤษฎีเท่านั้น นี่คือจุดเปลี่ยนสำคัญด้านความรู้ ที่ใช้คาดคะเนถึงสิ่งที่จะเกิดขึ้นในอนาคต และตรวจสอบด้วยการสังเกตจริง เนื่องจากเมื่อ เร็ว ๆ นี้ได้ค้นพบช่องโหว่ที่น่าตกใจในชั้นโอโซน ซึ่งกำลังแผ่ขยายตัวออกไป เหนือบริเวณ ขั้วโลกเหนือ ทำให้นักวิทยาศาสตร์วางแผนการทดลองอย่างละเอียดเพื่อติดตามตรวจสอบ ข้อมูลความเข้มข้นของก๊าซปริมาณน้อยในชั้นบรรยากาศโดยใช้ดาวเทียมและเครื่องบิน ซึ่งผลที่ได้รับจะช่วยให้เรามีความเข้าใจอย่างละเอียดในเรื่องชั้นโอโซน และสามารถนำ ข้อมูลมาแก้ไขปรับปรุงแบบจำลองบรรยากาศโลกให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้นได้

ข้อมูลจากการศึกษาพบว่า การทำลายชั้นโอโซนในชั้นบรรยากาศในเขตละติจูดสูง มีความรุนแรงมากกว่าพื้นที่อื่น ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งประเทศที่มีอัตราการเสี่ยงสูง ในช่วงต้น ฤดูใบไม้ผลิอัตราเสี่ยงจะสูงกว่าช่วงเวลาอื่น เพราะเป็นช่วงที่รังสี UV-B มีความเข้มสูงสุด ในทำนองเดียวกันภาวะโลกร้อนเนื่องจากโอโซนถูกทำลายจึงจัดเป็นปัญหาเร่งด่วนที่ต้อง แก้ไข ในอนาคตอาจต้องลดการใช้เชื้อเพลิงดึกดำบรรพ์ เช่น ถ่านหิน น้ำมัน และก๊าซ เพื่อควบคุมสภาพภูมิอากาศที่เปลี่ยนแปลง โดยวางแผนแก้ไขล่วงหน้าไว้นับสิบปีก่อน ที่ผลกระทบดังกล่าวจะเกิดขึ้น

มนุษย์เรายังมีประสบการณ์น้อยในการจัดการกับปัญหาดังกล่าว โลกและปัญหา เหล่านี้อาจทำให้เกิดผลกระทบที่ซับซ้อนหลายมิติ แต่สิ่งที่ยังเป็นข้อสงสัยขณะนี้คือ ผู้ที่มีหน้าที่กำหนดนโยบายและการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ทั้งเรื่องการลดผลกระทบจากรังสี UV-B และการรักษาสภาพภูมิอากาศของโลกไม่ให้เปลี่ยนแปลงไปอย่างรุนแรงในอนาคต สามารถแก้ไขปัญหาได้อย่างมีประสิทธิภาพเพียงใด และสามารถนำวิธีการใหม่ ๆ ใดบ้าง มาแก้ปัญหาเหล่านี้

แหล่งอ้างอิง

Breuer, G. *Air in Danger: ecological perspectives of the atmosphere.* Cambridge, Cambridge University Press, 1980.

Inadvertent Climate Modification. Cambridge, Massachusetts, MIT Press, 1971, Report of the Study of Man's Impact on Climate.

International Council of Scientific Unions, United Nations Environment Programme and World Meteorological Organization. *Report of the International Conference on the Assessment of the Role of Carbon Dioxide and of other Greenhouse Gases in Climate Variations and Associated Impacts,* Villach, Austria, 9-15 October 1985. Geneva, WMO, 1986.

Kates, Robert W., with Ausubel, Jesse H., and Berberian, Mimi (eds.). *Climate Impact Assessment.* London, John Wiley, 1985 (SCOPE 27).

MacCracken, Michael C., and Luther, Frederick M. (eds.). *The Potential Climatic Effects of Increasing Carbon Dioxide.* Washington DC, US Department of Energy, 1985 (DOE/ER-0237).

NASA, US Federal Aviation Administration, NOAA, UNEP, WMO, Commission of the European Communities, Bundesministerium für Forschung und Technologie. *Atmospheric Ozone 1985: assessment of our understanding of the processes controlling its present distribution and change*, 3 vols. Geneva, WMO, 1986, Global Ozone Research and Monitoring Project Report No. 16.

National Academy of Sciences. *Halocarbons: environmental effects of chlorofluoromethane release.* Washington DC, National Academy of Sciences, 1975.

National Academy of Sciences. *Manmade impacts on the stratosphere.* Washington DC, National Academy of Sciences, 1975.

Seidel, S., Tirpak, D., and Hoffman, J. S. *Potential health and environmental effects of ozone depletion and climate change.* Paper prepared for UNEP workshop on Protecting the Stratospheric Ozone Layer, Leesburg, Virginia, September 8-12, 1986.

Titus, Jame G. (ed.). *Effects of changes in stratospheric ozone and global climate: Volume 1, Overview.* Proceedings of the International Conference on Health and Environmental Effects of Ozone Modification and Climate Change, 16-20 June 1986. Nairobi and Washington DC, United Nations Environment Programme and United States Environmental Protection Agency, 1986.

Tromp, S. W. *Biometeorology: the impact of the weather and climate on humans and their environment.* London, Heyden, 1980.

United Nations Environment Programme. *Report of the Eighth Session of the Coordinating Committee on the Ozone Layer,* Nairobi, Kenya, 24-28 February 1986. Nairobi, UNEP, 1986.

United Nations Environment Programme. *Possible Effects of Man's Activities on the Ozone Layer and Climate.* Nairobi, UNEP, 1986, UNEP Policy Support Document.

Watson, R. T., Geller, M. A., Stolarski, R. S., and Hampson, R. F. *Present State of Knowledge of the Upper Atmosphere: processes that control ozone and other climatically important trace gases.* NASA, Washington D. C., 1986, NASA Reference Publication 1162.

ผู้จัดทำ

ผู้แปล

1. นายประพนธ์ จันทร์นุรักษ์
2. นายนิคม กายราช
3. นายทองเพ็ชร จุมปา
4. นายปรีชา ภิญโญยาง
5. นายเจริญ หลวงเทพ
6. นายสมศักดิ์ นาวายุทธ

ผู้ตรวจ

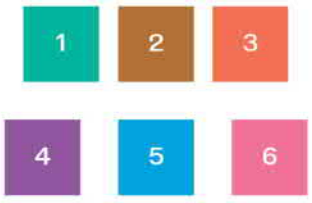
รองศาสตราจารย์ ดร. จริยา สุจารีกุล

บรรณาธิการที่ปรึกษา นางสาวจินตนา ใบกาซูยี
ผู้อำนวยการสถาบันการแปลหนังสือ

บรรณาธิการอำนวยการ นางสาวอุษณีย์ วัฒนพันธ์

บรรณาธิการ นางสาวมะลิ เกือบสันเทียะ

ผู้แปล



1 ปรีชา ภิญโญยาง
2 ประพนธ์ จันทร์นุ ักษ์
3 สมศักดิ์ นาวายุทธ
4 ทองเพ็ชร จุมปา
5 นิคม กายราช
6 เจริญ หลวงเทพ

หนังสือชุดสิ่งแวดล้อมของ UNEP/GEMS