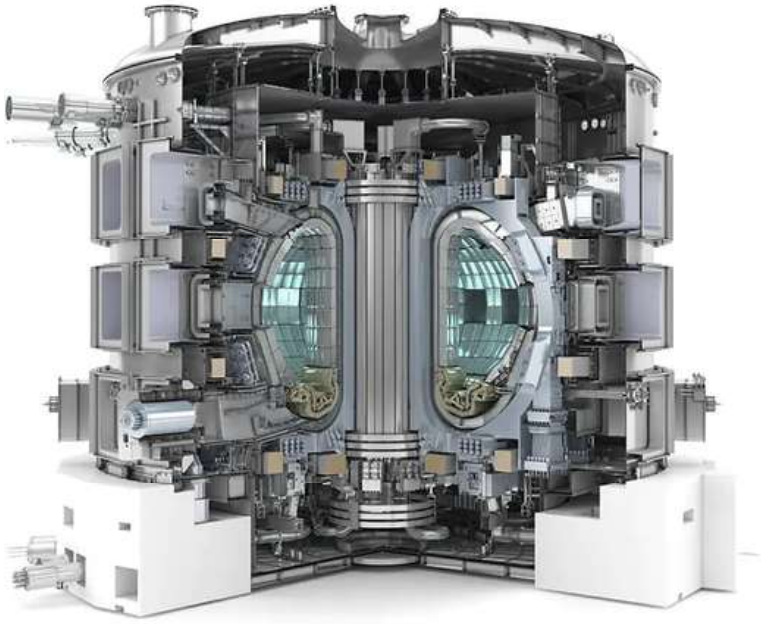
รายงานผลสัมฤทธิ์ภายใต้โครงการ

ITER RESEARCHER EXCHANGE PROGRAM 2025

หัวข้อ

CRYOPLANT SYSTEM





นายนิภัทร ระพิพงษ์

การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

1 เมษายน – 31 พฤษภาคม 2569

ITER Organization

ประเทศฝรั่งเศส



รายงานโครงการ ITER Research Exchange Programs

ณ เมือง Aix-En Provence ประเทศฝรั่งเศส ตั้งแต่วันที่ 31 มีนาคม – 31 พฤษภาคม 2569

โครงการ ITER RESEACH EXCHANGE PROGRAM

เป็นโครงการความร่วมมือระหว่าง สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (สทน.) ร่วมกับ ITER (เดิมย่อมาจาก International Thermonuclear Experimental Reactor) ตั้งอยู่ที่เมือง Cadarache ทางตอนใต้ของประเทศฝรั่งเศส เพื่อพัฒนาบุคลากรของไทย สำหรับเทคโนโลยีนิวเคลียร์ฟิวชั่นและความร่วมมือกันในอนาคต

นิภัทร ระพิพงษ์
วิศวกร
ฝ่ายบริหารและก่อสร้างโรงไฟฟ้าพลังความร้อน
การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย



สมเด็จพระกนิษฐาธิราชเจ้า กรมสมเด็จพระเทพรัตนราชสุดา เจ้าฟ้ามหาจักรีสิรินธร มหาวชิราลงกรณวรราชภักดี สิริกิจการิณีพีรยพัฒน รัฐสีมาคุณากรปิยชาติ สยามบรมราชกุมารี ทรงมีพระกรณียกิจอันสำคัญในการส่งเสริมและพัฒนาวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และนวัตกรรมของประเทศไทย ทรงให้ความสำคัญกับการศึกษาด้านวิทยาศาสตร์ การวิจัย และการพัฒนาบุคลากร โดยทรงสนับสนุนให้เยาวชนมีโอกาสเรียนรู้และเข้าถึงองค์ความรู้ทางวิทยาศาสตร์อย่างทั่วถึง นอกจากนี้ ยังทรงส่งเสริมการนำวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมาประยุกต์ใช้เพื่อพัฒนาคุณภาพชีวิต การเกษตร การสาธารณสุข และการพัฒนาชุมชน พระราชวิสัยทัศน์และพระราชดำริด้านวิทยาศาสตร์มีส่วนสำคัญในการสร้างสังคมแห่งการเรียนรู้ ส่งเสริมศักยภาพของคนไทย และวางรากฐานการพัฒนาประเทศด้วยองค์ความรู้และเทคโนโลยีอย่างมั่นคงและยั่งยืน

คำนำผู้เขียน

โครงการแลกเปลี่ยน ITER Research Exchange Program ถูกจัดโดย สำนักงานเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ หรือ สทน. ซึ่งเป็นโครงการที่เสริมสร้างความรู้ความเข้าใจด้านวิทยาการนิวเคลียร์ฟิวชั่น โดยร่วมกับโครงการที่ยิ่งใหญ่ที่สุดในโลก ณ ขณะนี้คือ องค์กร ITER ซึ่งเป็นความร่วมมือกัน 7 ประเทศอันได้แก่ จีน สหภาพยุโรป อินเดีย ญี่ปุ่น เกาหลี รัสเซีย และ สหรัฐอเมริกา เพื่อสร้างเครื่อง Tokamak ที่ใหญ่ที่สุดในโลกตั้งอยู่ที่ทางตอนใต้ของประเทศฝรั่งเศส

ข้าพเจ้าได้มีโอกาสเข้าไปร่วมศึกษา วิจัย และ เรียนรู้ทางด้าน Cryogenic system ซึ่งอยู่ในระหว่างการทดสอบและเดินเครื่อง และทดสอบร่วมกับแม่เหล็ก Toroidal Coil นับเป็นโอกาสอันดีที่ได้รับประสบการณ์และได้ถ่ายทอดให้ผู้อื่นโดยอาศัยเอกสารรายงานฉบับนี้ เพื่อเผยแพร่ให้ผู้สนใจ และเป็นองค์ความรู้สืบไป

การจะอธิบายระบบ Cryogenic ซึ่งเป็นระบบสนับสนุนนั้น เพื่อที่จะให้ผู้สนใจเข้าใจภาพร่วมของทั้งระบบจำเป็นต้องเริ่มจากระบบหลักคือFusion, Tokamak และ Magnet system ที่เป็นระบบหลักที่ต้องการใช้สาร Cryogenic เพื่อระบายความร้อนและคงอุณหภูมิ โดยทางผู้เขียนกล่าวถึง ปฏิกริยา Fusion และเครื่อง Tokamak โดยสังเขป ในบทที่ 1 และ Magnet system ที่ใช้ในระบบ Cryogenic ในบทที่ 2

Cryogenic system ในบทที่ 3 จะกล่าว ถึงหลักการทางวิทยาศาสตร์ในการทำสารความเย็น ส่วนประกอบของระบบโดยมีระบบของ ITER เป็นต้นแบบ

ในส่วนของบทที่ 4 คือสรุปในภาพรวมของระบบ Cryogenic ใน ITER ร่วมถึงความเป็นไปได้ที่จะใช้ระบบ Cryogenic ในอุตสาหกรรมอื่นๆ อาทิ การแพทย์ การเกษตร อวกาศ และ พลังงาน เป็นต้น

สืบเนื่องจากตัวข้าพเจ้านั้นรู้จักกับระบบ Cryogenic ครั้งแรกจาก ITER โดยมีประสบการณ์ด้านโรงไฟฟ้าอยู่บ้าง จึงจัดทำรายงานฉบับนี้เพื่อให้ผู้สนใจ ได้เข้าใจถึงระบบดังกล่าวซึ่งสนับสนุนระบบใหญ่อย่าง Magnet system และ Tokamak ข้าพเจ้าหวังว่ารายงานฉบับนี้จะเป็นประโยชน์แก่ผู้สนใจ ทางด้านวิทยาการ Cryogenic เพื่อมาประยุกต์ใช้ในด้านต่างๆ ทางอุตสาหกรรมของประเทศไทยต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอน้อมสำนึกในพระมหากรุณาธิคุณ สมเด็จพระกนิษฐาธิราชเจ้า กรมสมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี ที่ทรงให้การสนับสนุนในด้านวิทยาศาสตร์ของประเทศไทย เพื่อประโยชน์ของประเทศ

ข้าพเจ้าขอขอบคุณ บุคลากรจากสถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) หรือ สทน. โดยมี ผู้อำนวยการ สทน. รศ.ดร.ธวัชชัย อ่อนจันทร์, รองผู้อำนวยการ สทน. รศ.ดร.สมศักดิ์ แดงติ๊บ พร้อมทั้งผู้ประสานงานหลักสูตร คุณนพพร พูลยรัตน์ และ คุณจิราภรณ์ พรมพิงค์ ในการสนับสนุนและให้คำแนะนำทั้งก่อน ระหว่าง และ หลังเข้าร่วมหลักสูตร

ข้าพเจ้าขอขอบคุณ ผู้บริหารการไฟฟ้าฝ่ายผลิต (กฟผ.) ที่เห็นความสำคัญของหลักสูตรนี้ พร้อมทั้งส่งเสริมให้ข้าพเจ้าเข้าร่วม รองผู้ว่าพัฒนาโรงไฟฟ้าและพลังงานหมุนเวียน (รวพ.) นายศิริวัฒน์ เจ็ดสี, ผู้ช่วยผู้ว่าวิศวกรรมและก่อสร้างโรงไฟฟ้า (ชพว.) นายเศกสม ทัพทอง, ผู้อำนวยการฝ่ายบริหารและก่อสร้างพลังความร้อน (อหก.) นายพงษ์พันธ์ กรวยทอง, ผู้ช่วยผู้อำนวยการฝ่ายบริหารและก่อสร้างพลังความร้อน (ช.อหก-2) นายนลชำนาญ ชมดวง, หัวหน้ากองเครื่องกลและระบบควบคุม (กคร-พ.) นายปันธกานต์ สถิตเสถียร, แผนกเครื่องมือควบคุมกล (หคก-พ.) นายชาคริต เย็นที่ และผู้ปฏิบัติงานท่านอื่นที่ดำเนินภารกิจของฝ่ายร่วมกันกับข้าพเจ้า

ข้าพเจ้าขอขอบคุณ ผู้ร่วมเดินทางพร้อมกับข้าพเจ้า นายพีรพัฒน์ ลิ่มบุญพา, นางสาวนลิน บุญทองใหม่, นางสาวจุฬารัตน์ บุญธรรม ที่ร่วมทุกข์ร่วมสุขกับข้าพเจ้า คอยเป็นเพื่อนคิด และคอยช่วยให้ข้าพเจ้าปรับตัวเข้ากับ ภาษา วัฒนธรรมร่วมกับข้าพเจ้า

สารบัญ

คำนำผู้เขียน **2**

กิตติกรรมประกาศ **3**

บทที่ 1 ปฏิกริยาฟิวชั่นและเครื่อง Tokamak **5**

บทที่ 1.1 ปฏิกริยาฟิวชั่น (Fusion) **5**

บทที่ 1.1.1 เปรียบเทียบ Inertial Confinement Fusion กับ Magnetic Confinement Fusion 6

บทที่ 1.2 ITER และ Magnetic Confinement Fusion **7**

บทที่ 1.3 Tokamak และหลักการทำงาน **8**

บทที่ 1.3.1 Toroidal Magnet 9

บทที่ 1.3.2 Poloidal Coil 11

บทที่ 1.3.3 Center Solenoid 11

บทที่ 1.4 สรุปบทที่ 1 ..... **12**

บทที่ 2 ระบบแม่เหล็ก Magnet System *14*

บทที่ 2.1 สนามแม่เหล็ก **14**

บทที่ 2.2 วัสดุตัวนำยิ่งยวด Super Conductor **15**

บทที่ 2.3 ITER's Magnet System **17**

บทที่ 2.4 สรุปบทที่ 2 ..... **19**

บทที่ 3 ระบบทำความเย็นยิ่งยวด Cryogenic System *20*

บทที่ 3.1 คุณสมบัติของฮีเลียม (Helium) ในอุณหภูมิต่ำ **20**

บทที่ 3.2 หลักการทำงานระบบทำความเย็นยิ่งยวด **22**

บทที่ 3.2.1 Multi-stage Compressor 22

บทที่ 3.2.2 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน Heat Exchanger 23

บทที่ 4 ITER Cryogenic *25*

บทที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพของวัสดุในอุณหภูมิต่ำ ที่ส่งผลต่อการออกแบบระบบ Cryogenic **28**

บทที่ 4.1.1 คุณสมบัติทางความร้อน (Thermal Properties) ของวัตถุที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ 29

บทที่ 4.1.2 คุณสมบัติทางกล (Mechanical Properties) ที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ 29

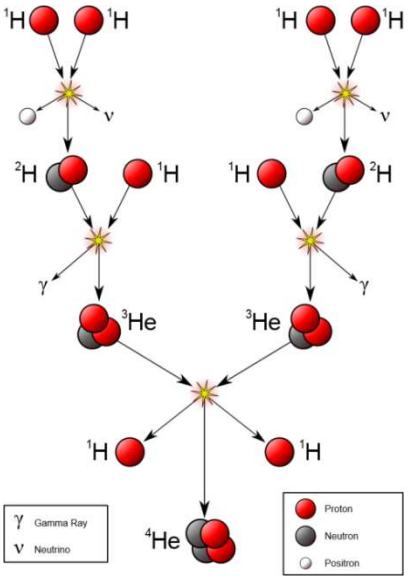
บทที่ 4.1.3 คุณสมบัติทางไฟฟ้า (Electrical Properties) ที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ 30

บทที่ 4.2 Magnetic Cold Test **30**

บทที่ 1 ปฏิกริยาฟิวชั่นและเครื่อง Tokamak

บทที่ 1.1 ปฏิกริยาฟิวชั่น (Fusion)

เมื่อกล่าวถึงปฏิกริยาฟิวชั่น เราไม่สามารถที่จะละเลยที่จะกล่าวถึง ดาวอาทิตย์ ที่เราพบเจอได้เลย เนื่องจากปฏิกริยาจากดวงอาทิตย์ ซึ่ง มอบแสงสว่าง ความร้อน และ พลังงานแก่โลกของเรานั้นเกิดจาก ปฏิกริยาฟิวชั่นที่เกิดขึ้นในดวงอาทิตย์ และเป็นเวลานานที่นักวิทยาศาสตร์พยายามจะ ศึกษา และ จำลองให้ปฏิกริยาดังกล่างให้เกิดขึ้นบนโลกของเรา อันจะเป็นประโยชน์ในด้านพลังงานและอุตสาหกรรมอย่างยิ่งกับมนุษยชาติ



ภาพแสดงปฏิกริยาฟิวชั่นที่เกิดขึ้นบนดวงอาทิตย์



ภาพตัดขวางของดวงอาทิตย์

ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นบนดวงอาทิตย์ คือ การรวมกันระหว่างธาตุเบาอย่าง ไฮโดรเจน 2 อะตอมรวมกันเป็น ธาตุฮีเลี่ยม ซึ่ง ผลรวมระหว่างมวลของ ไฮโดรเจน 2 อะตอม กับ ฮีเลี่ยม ไม่เท่ากันทำให้มวลบางส่วนเปลี่ยนแปลงเป็นพลังงาในรูปของพลังความร้อน และ แสงสว่าง ด้วยสมการที่เราคุ้นเคยกันดีอย่าง

$$\Delta E=\Delta mc^2$$

นักวิทยาศาสตร์ต่างศึกษา ทำความเข้าใจ เพื่อจะจำลองปฏิกริยาดังกล่าวให้เกิดขึ้น ภายในห้องทดลอง และพบว่าดวงอาทิตย์มีข้อได้เปรียบคือ มวลที่มากกว่าโลก ทำให้อะตอมนั้นถูกแรงดึงดูดเกิดปฏิกริยามากกว่าบนโลก การจะทำให้ปฏิกริยาฟิวชั่นเกิดขึ้นบนโลกนั้น เราไม่อาจทำได้เหมือนดวงอาทิตย์ (ใช้แรงดึงดูดทำให้เกิดปฏิกริยา) ในปัจจุบันมีการเสนอวิธีการ 2 ด้วยกันนั้นคือ 1. Inertial Confinement Fusion (การควบคุมพลาสมาด้วยแรงเฉื่อย) และ 2. Magnetic Confinement Fusion (การควบคุมพลาสมาด้วยสนามแม่เหล็ก) และพัฒนาเทคนิคและวัสดุศาสตร์เพื่อ

สอดคล้องกับวิธีการดังกล่าว โดยมีเป้าหมายอยู่ 3 อย่างได้แก่ ความหนาแน่นของสาร (density), อุณหภูมิ (Temperature) และ ระยะเวลาหน่วงของพลาสม่า (Confinement time) หรือที่เรียกรวมกันว่า Triple product จาก Lawson Criterion ซึ่งจะกำหนดว่าพลังงานจากปฏิกริยาฟิวชั่นจะมากกว่าพลังงานที่ใส่เข้าไปเพื่อทำให้เกิดปฏิกริยา

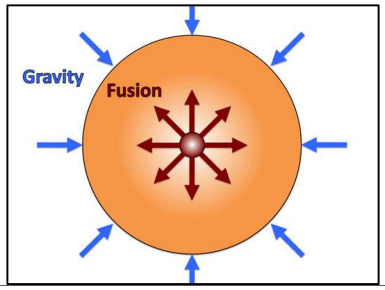
บทที่ 1.1.1 เปรียบเทียบ Inertial Confinement Fusion กับ Magnetic Confinement Fusion

อ้างอิงถึง Lawson criterion ที่แสดงถึงว่าการที่จะได้พลังงานจากปฏิกริยาฟิวชั่น มากกว่าพลังงานที่ใช้เพื่ออำนวยให้เกิดปฏิกริยามีตัวแปร 3 ตัวที่กล่าวไปในบทที่แล้วคือ ความหนาแน่นของสาร, อุณหภูมิ และ ระยะเวลาการหน่วงของพลาสม่า

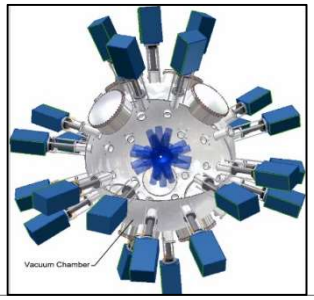
โดยวิธีการของ Inertial Confinement จะใช้เทคนิคการยิงเลเซอร์พลังงานสูงทุกทิศทางแก่ เชื้อเพลิงที่มีความหนาแน่นสูง (Fuel Pallet) ทำให้โมเลกุลเกิดพลังงานสูง และมีบางส่วนชนกันจนเกิดปฏิกริยาฟิวชั่น ซึ่งเทคนิคนี้เกิดขึ้นเพียงชั่วเวลานึง ไม่สามารถทำให้เกิดปฏิกริยาอย่างต่อเนื่องได้

ในส่วนของ Magnetic Confinement จะใช้เทคนิคให้พลาสม่าแขวนอยู่ในสนามแม่เหล็กและเพิ่มอุณหภูมิด้วยเทคนิคต่างๆ อาทิ Ohmic Heating and Current Drive และ Radio-frequency Heating โดยจะสามารถคงสภาพพลาสม่าเพื่อเพิ่มโอกาสการเกิดปฏิกริยาฟิวชั่นได้ หากระบบยังคงความเสถียรของทั้งพลาสม่า และ ระบบแม่เหล็กไว้ได้ แต่จะมีข้อจำกัดด้านความหนาแน่นของเชื้อเพลิงไม่สามารถสูงเกินไปได้ ซึ่งจะส่งผลต่อความเสถียรของระบบ

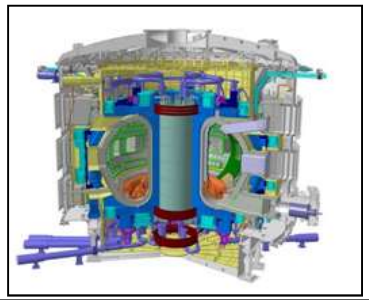
ซึ่งทั้งสองระบบได้เปรียบเทียบกับปฏิกริยาฟิวชั่นบนดวงอาทิตย์ได้ดังนี้



Gravitational Confinement
Temperature ~15 million K
Density ~ 150 g /cm^3
Time ~ 10^9 years



Inertial Confinement
Temperature: ~100-200 million K
Density ~1000 g /cm^3
Time ~10^{-9} s



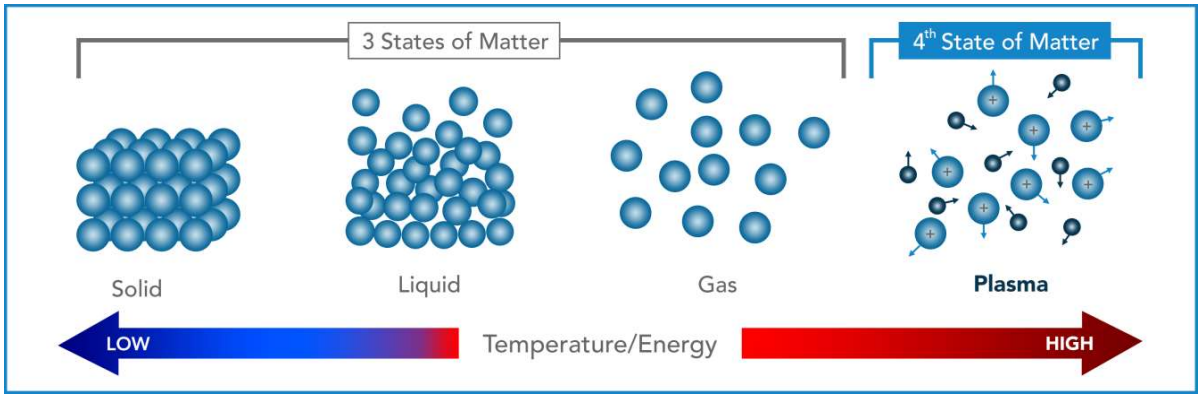
Magnetic Confinement
Temperature ~ 100-200 million K
Density ~ 1x10^{-6} g /cm^3
Time ~ seconds

บทที่ 1.2 ITER และ Magnetic Confinement Fusion

ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) นั้นเป็นองค์กรความร่วมมือระหว่างประเทศตั้งอยู่ทางตอนใต้ของประเทศฝรั่งเศส องค์กรเกิดจากข้อตกลงกันระหว่างประเทศสมาชิก 7 กลุ่มด้วยกันอันได้แก่ จีน สหภาพยุโรป อินเดีย ญี่ปุ่น เกาหลี รัสเซีย และ สหรัฐอเมริกา เพื่อร่วมมือกันสร้างเครื่อง Tokamak ที่ใหญ่ที่สุดในโลก เพื่องานวิจัยและความเป็นไปได้ในการเปลี่ยนพลังงานจากปฏิกริยาฟิวชั่นเป็นพลังงาน ในส่วนของประเทศไทยเป็นข้อตกลงร่วมกันระหว่าง สทน. และ ITER ในการพัฒนาทั้งบุคคลกรและความเชี่ยวชาญของประเทศไทย

ด้วยคุณสมบัติของ Magnetic Confinement ดังที่กล่าวมาทำให้ ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) เลือกใช้วิธีนี้ โดยใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า Tokamak ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้หลักการดังกล่าวมาเพื่อสร้างความเสถียรแก่พลาสม่าในสนามแม่เหล็กโดยมีหลักการทำงาน ดังนี้

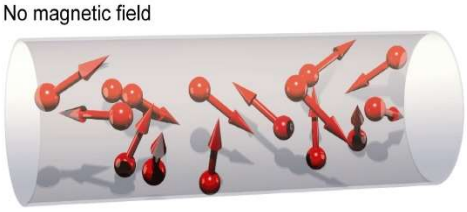
ปฏิกริยาฟิวชั่นจะเกิดได้ดีนั้น ปัจจัยด้านอุณหภูมินับเป็นปัจจัยสำคัญหลักในการพิจารณา เนื่องจากข้อจำกัดที่โลกเรามีแรงดึงดูดน้อยกว่าดวงอาทิตย์มาก ทำให้สสารบนโลกหากต้องการให้เกิดปฏิกริยาฟิวชั่นต้องมีอุณหภูมิที่มากกว่าดวงอาทิตย์มากๆ และสสารที่มีอุณหภูมิมากพอที่จะเกิดปฏิกริยาฟิวชั่นบนโลกหรือแม้แต่ในดวงอาทิตย์นั้นจะเกิดปรากฏการณ์ที่เปลี่ยนสภาพไปเป็นพลาสม่า ดังรูป ซึ่งเป็นสภาพที่ อิเล็กทรอนในโมเลกุลนั้นไม่ถูกจำกัดไว้ที่โมเลกุลเดียว สามารถาเคลื่อนที่โดยอิสระในพื้นที่ของพลาสม่านั้น ซึ่งด้วยอุณหภูมิที่สูงทำให้ไม่ได้มีแต่อิเล็กทรอนเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงเท่านั้น แต่ยังรวมถึงนิวเคลียส์ก็เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงด้วย ทำให้เพิ่มอัตราการเกิดปฏิกริยาฟิวชั่นได้ หากสามารถคงสภาพของพลาสม่าได้นาน



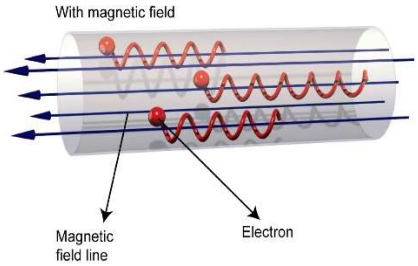
รูปแสดงสถาณของสสารเมื่อได้รับพลังงาน

จุดประสงค์ของอุปกรณ์ Tokamak ที่ทาง ITER เลือกใช้นั้นคือเครื่องมือที่ใช้หลักการ Magnetic Confinement เพื่อให้หน่วงให้พลาสม่าเสถียร เพื่อเพิ่มโอกาสในการเกิดปฏิกริยาฟิวชั่น และ เสริมด้วยเครื่องมือให้พลังงานจากภายนอก โดยจะขอกล่าวถึงหลังการ Magnetic Confinement ซึ่งในรูปด้านล่างแสดงถึงการเคลื่อนที่ของโมเลกุล(อิเล็กตรอน)

ภายใต้สนามแม่เหล็ก โดยภายในระบบของเครื่อง Tokamak อันจะประกอบด้วยระบบแม่เหล็กเพื่อให้พลาสม่ามีความเสถียรอันจะกล่าวในหัวข้อถัดไป



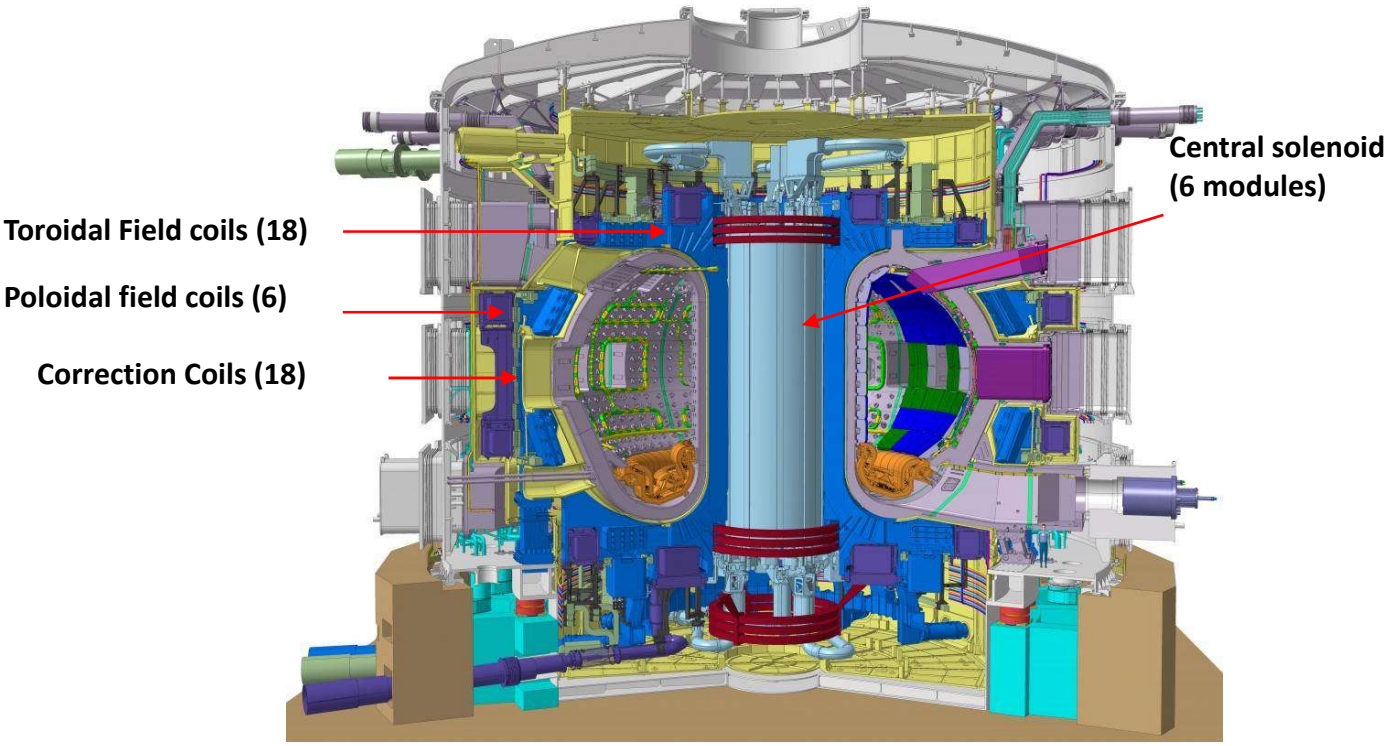
โมเลกุลที่ไม่ได้อยู่ในสนามแม่เหล็ก



โมเลกุลในแรงสนามแม่เหล็ก

บทที่ 1.3 Tokamak และหลักการทำงาน

Tokamak เครื่องที่ใช้หลักการสนามแม่เหล็กและมีระบบประกอบต่างๆ แสดงในรูปด้านล่าง เพื่อช่วยเสริมความสามารถในการควบคุมความเสถียรของพลาสม่า เนื่องจากพลาสม่าเป็นกลุ่มของของไหลที่มีประจุ ทำให้เราสามารถใช้คุณสมบัตินี้ ควบคุมสนามแม่เหล็ก เพื่อให้พลาสม่าเสถียรได้โดยมีระบบแม่เหล็กหลักๆ ดังนี้



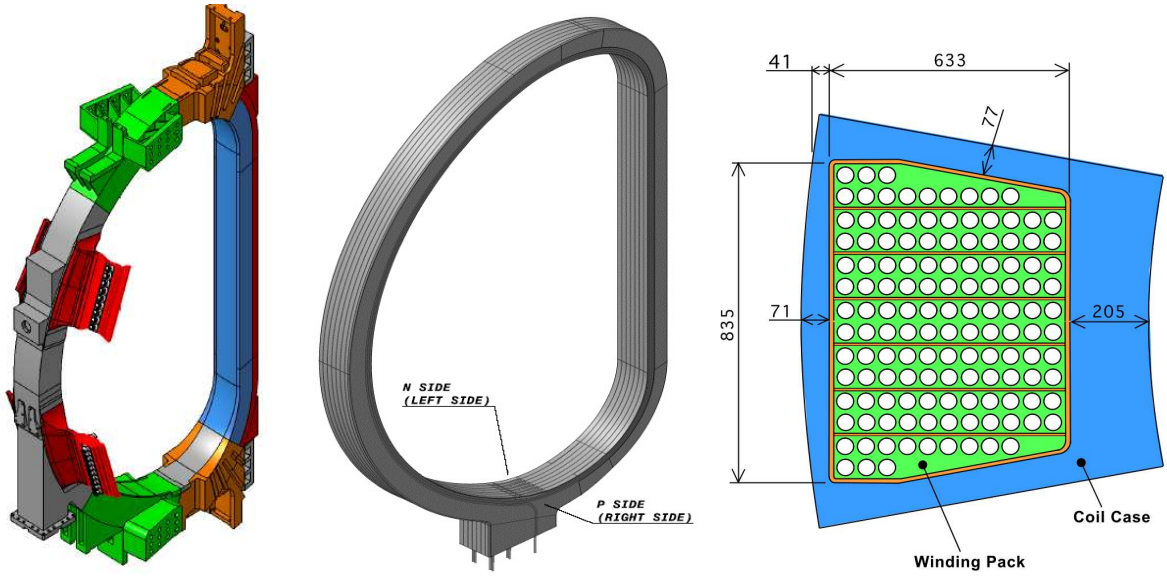
ภาพตัดขวางของ ITER Tokamak

1. Toroidal Magnetic
2. Poloidal Magnet
3. Center Solenoid

โดยจุดมุ่งหมายของระบบแม่เหล็กที่ซับซ้อนดังกล่าวนั้นคือ กักหน่วงให้พลาสม่าให้เสถียรและเกิดการไหลเวียนของพลาสม่า ทำให้โอกาสในการเกิดปฏิกริยาฟิวชั่นมากขึ้น

บทที่ 1.3.1 Toroidal Magnet

เป็นสนามแม่เหล็กที่จัดเรียงเพื่อควบคุมการไหลของพลาสมาให้เป็นรูป ทอรัส (รูปทรงโดนัท) ,Torus, โดยมีทรงดังรูป

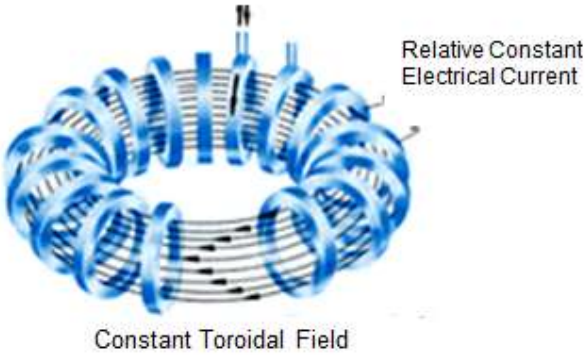


รูปภาพชิ้นส่วนแม่เหล็กทอรัส Toroidal Field Coil



รูปภาพ Toroidal Field Coil Casing Fitting แรกที่ผลิตในปี ค.ศ. ธันวาคม 2017 ประเทศเกาหลี

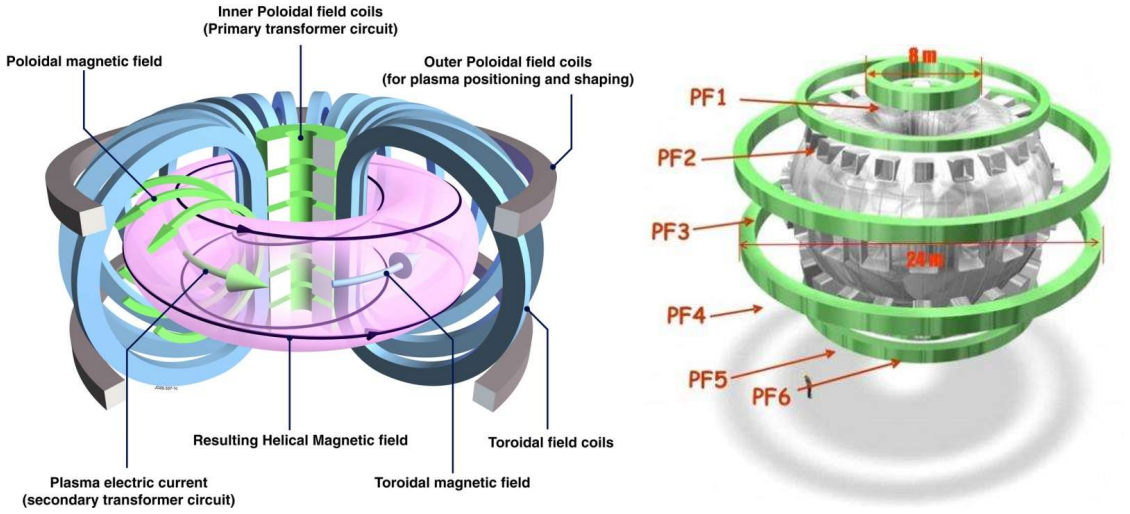
โดยจะสังเกตุเห็นว่า ความเข้มข้นของสนามแม่เหล็กนั้นมีความแตกต่างกันระหว่างรัศมีภายใน และรัศมีภายนอกของทรงทอรัส ,ในเครื่องมือ Tokamak เราเรียกรัศมีภายใน เรียกว่า Minor radius ส่วนรัศมีภายนอก เรียกว่า Major radius, ทำให้เกิดปรากฏการณ์ที่พลาสม่าบางส่วนหลุดไป ทำให้การควบคุมนั้นหากใช้แค่ Toroidal Field Coil เพียงอย่างเดียวไม่ได้ ดังที่แสดงในรูปด้านล่าง

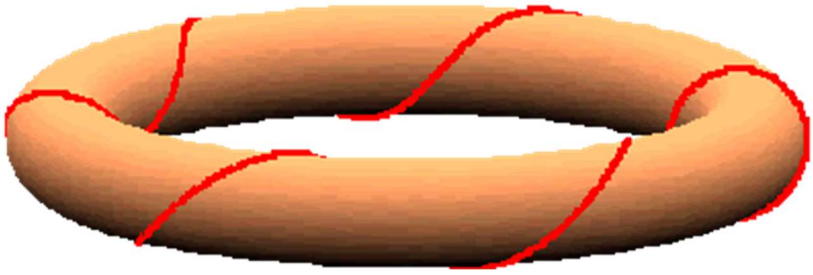


รูปภาพแสดงคุณสมบัติของ Toroidal Field

บทที่ 1.3.2 Poloidal Coil

เพื่อชดเชยปัญหาของพลาสม่าที่เคลื่อนที่ออกจากแนวสนามแม่เหล็กของ Toroidal Magnetic Field นั้นเราจำเป็นต้องให้เกิดการเคลื่อนที่ของพลาสม่าเป็นทรงโดนัทที่เป็นเกรียวที่มีการบิดเล็กน้อย, Helical Magnetic Field, การจะเป็นเช่นนั้นเราจำเป็นต้องติดตั้ง ระบบ Poloidal Field Coil ซึ่งเป็นแม่เหล็กรูปร่างวงแหวนรอบนอก และเมื่อรวมกับแรงแม่เหล็กของ Toroidal Coilแล้วทำให้แรงแม่เหล็กรวมทำให้เราสามารถควบคุมพลาสม่าเป็นทรงโดนัทและมีการบิดเกรียวเล็กน้อยได้ โดยรูปทรงที่ติดตั้งรวมทั้งแรงแม่เหล็ก ดังแสดงในรูปด้านล่าง



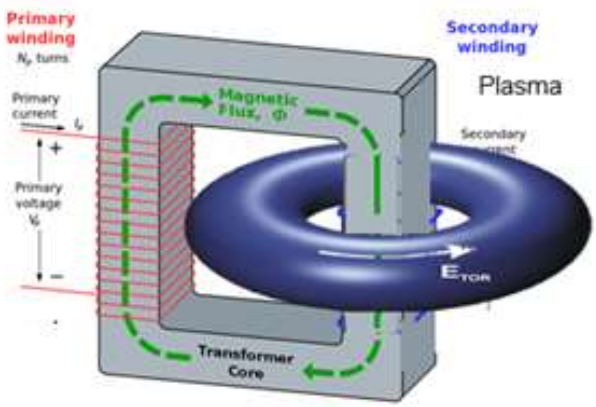


รูปภาพแสดงถึงเส้นแรงแม่เหล็กที่ส่งผลต่อพลาสม่า โดยเป็นรูปทรงทอรัสที่บิดเกลียวเล็กน้อย

บทที่ 1.3.3 Center Solenoid

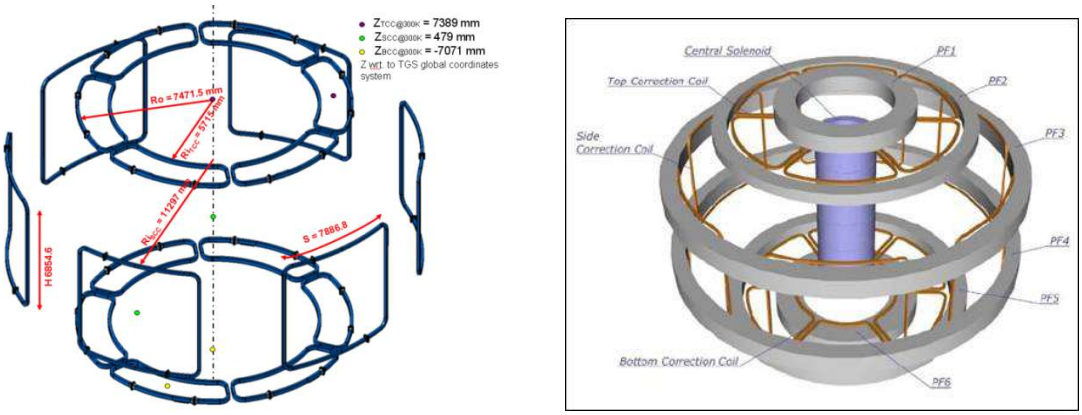
ในช่วงแรกของการเริ่มต้นทำพลาสม่าในระบบ Tokamak นั้นมีการนำเชื้อเพลิง ซึ่งประกอบด้วยทั้ง ดิวเทอเรียม (deuterium) และ ทริเทียม (tritium) ,โดยทั้งคู่เป็นไอโซโทป (isotope) ของธาตุไฮโดรเจน โดย deuterium มีโปรตรอน 1 ตัวและ นิวตรอน 1 ตัว ส่วน tritium มีโปรตอน 1 ตัวและนิวตรอน 2 ตัว ซึ่งโดยปกติธาตุไฮโดรเจน (protium) จะมีโปรตรอน 1 ตัวและไม่มีนิวตรอน, ช่วงแรกของการทำความร้อนทิศทางของพลาสม่าจะไม่เป็นระเบียบทำให้ควบคุมได้ยาก อุปกรณ์ Center Solenoid จึงเข้ามาควบคุมทิศทางการไหลของพลาสม่า พร้อมทั้งยังสามารถป้องกันไม่ให้พลาสม่าเข้า

ใกล้ผนังรัศมีชั้นใน (minor radius) ได้ โดยผลของ Center Solenoid ทำหน้าที่คล้ายหม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer) เพื่อควบคุมพลาสม่าได้ ดังรูปด้านล่าง



ภาพแสดง Center Solenoid ทำหน้าที่เป็น Transformer เพื่อควบคุมพลาสม่าในช่วงเริ่มต้น

ทั้งนี้ทาง ITER ยังพัฒนาหลักการ Tokamak โดยเพิ่มเติมระบบแม่เหล็กอีก 1 ระบบคือ correction coil เพื่อแก้ปัญหาทางด้านการออกแบบและติดตั้ง ซึ่งมีโอกาสเปลี่ยนแปลงจากการคำนวณไปเล็กน้อยโดยมีองค์ประกอบคือขดลวดแม่เหล็กรอบๆ เครื่อง Tokamak ดังรูปด้านล่างนี้



รูป correction coil ซึ่งคอยปรับสนามแม่เหล็กให้เหมาะสมกับความเสถียรของพลาสม่า

บทที่ 1.4 สรุปบทที่ 1

องค์กร ITER นั้นเป็นความร่วมมือกันระดับโลกโดยประเทศสมาชิกหลัก 7 กลุ่มประเทศเพื่อที่จะรวมทรัพยากรทั้งบุคคลากร และ เงิน เพื่อสร้างเครื่องปฏิกริยาฟิวชั่น Tokamak ที่ใหญ่ที่สุดในโลก ณ ขณะนี้ เครื่อง Tokamak ออกแบบโดยอยู่บนหลักการ Magnetic confinement ซึ่งควบคุมพลาสม่าในสนามแม่เหล็กขนาดใหญ่ประกอบด้วยแม่เหล็กระบบ

ต่างๆ เพื่อควบคุมให้พลาสม่าเคลื่อนที่เป็นรูปทอรัส (รูปทรงโดนัท) ที่มีการบิดเล็กน้อย (Helical) เพื่อเพิ่มความเสถียรให้พลาสม่านั้นสมดุล ทำให้โอกาสเกิดปฏิกริยาฟิวชั่นมากขึ้น

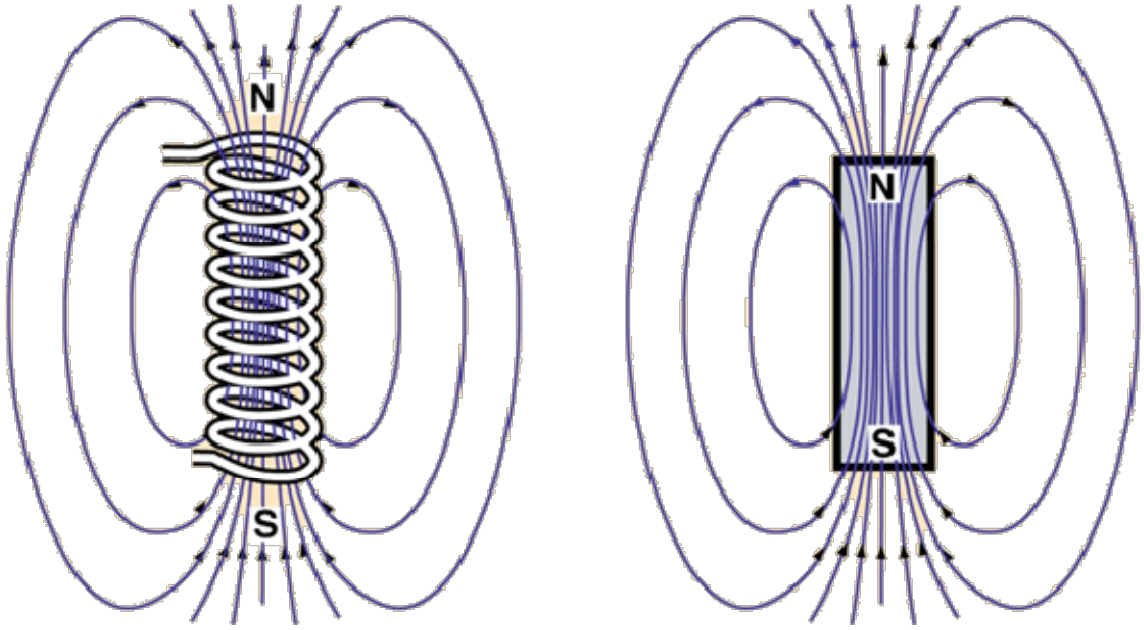
ระบบ Tokamak นั้นนอกจากระบบแม่เหล็กแล้ว ยังประกอบด้วยระบบต่างๆ เพื่อทำให้การทำงานเป็นไปได้อย่างเหมาะสมกับการเดินเครื่องในระยะยาว แต่ที่ทางผู้เขียนเน้นเรื่องระบบแม่เหล็กนั้นเป็นหลักเนื่องจาก เป็นผู้ใช้งานระบบ Cryogenic ดังจะกล่าวถึงโครงสร้างระบบแม่เหล็กในบทถัดไป

บทที่ 2 ระบบแม่เหล็ก Magnet System

จากบทที่ 1 เราจะเห็นได้ว่าแม่เหล็กนั้นเป็นหัวใจหลักของระบบ Tokamak ในการหน่วงควบคุมพลาสม่าซึ่งจะขาดไปเสียไม่ได้ ระบบนี้มีความสำคัญในการสร้างสนามแม่เหล็ก ซึ่งจะกล่าวถึงในบทที่ 2 นี้

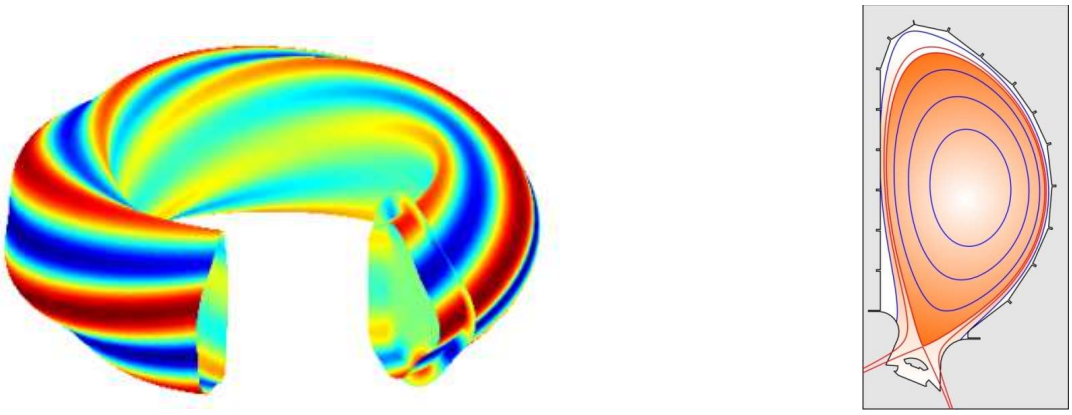
บทที่ 2.1 สนามแม่เหล็ก

การสร้างสนามแม่เหล็กให้เกิดขึ้นนั้น เกิดขึ้นโดยแม่เหล็กถาวร หรือ กระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวนำไฟฟ้า เกิดเป็นสนามแม่เหล็กรอบๆ ตัวนำ โดยแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะเกิดทั้งขั้วเหนือและขั้นใต้ และเส้นแรงแม่เหล็กจะมีทิศทางจากขั้วเหนือไปขั้วใต้ ดังแสดงในรูป



ภาพแสดงเส้นแรงแม่เหล็ก (ซ้าย) แม่เหล็กที่เกิดจากกระไฟฟ้าผ่านตัวนำไฟฟ้า (ขวา) แม่เหล็กที่เกิดจากแม่เหล็กถาวร

ในการควบคุมพลาสม่านั้น ประจุที่เคลื่อนที่อิสระซึ่งเป็นคุณสมบัติของพลาสม่า ทำให้แม่เหล็กที่เกิดจากสารตัวนำไฟฟ้ามีความสำคัญอย่างยิ่ง ด้วยเหตุที่ว่าสามารถปรับความเข้มของสนามแม่เหล็กได้ตามปริมาณกระแสที่ส่งไปในแม่เหล็ก และการจัดเรียงทิศทางของสนามเหล็กสามารถทำได้โดยการจัดเรียงตัวนำในรูปร่างต่างๆ เพื่อจุดประสงค์ให้พลาสม่าลอยอยู่ในห้องสูญญากาศ (Vacuum Chamber) ดังรูปแสดง



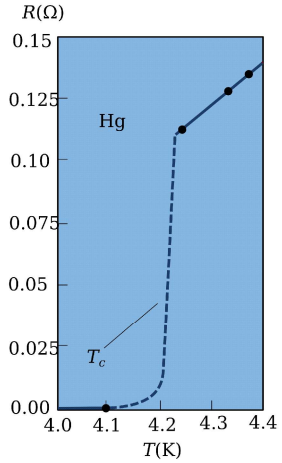
ภาพแสดงรูปร่างของพลาสม่าที่ถูกหน่วงไว้ในสนามแม่เหล็กของ ITER Tokamak

ในกรณีของ ITER ที่ออกแบบแม่เหล็ก Toroidal Field Coil ไว้ที่ 5.3 T, T=tesla หน่วยวัดสนามแม่เหล็ก, (เมื่อเปรียบเทียบแม่เหล็กที่ติดตู้เย็นที่มีความเข้มข้นประมาณ 0.001-0.01 T) ต้องการพลังงานไฟฟ้าเพื่อป้อนให้กับสารตัวนำมหาศาล (ขึ้นอยู่กับการออกแบบสนามแม่เหล็ก โดยหากมีจำนวนรอบมากขึ้นจะทำให้กระแสที่ต้องการลดลง) พลังงานไฟฟ้าดังกล่าวหากสารตัวนำมีความต้านทานไฟฟ้าเพียงเล็กน้อยจะทำให้เกิดความร้อนขึ้น จนอาจเกิดความเสียหายแก่ระบบได้ จึงต้องอาศัยการออกแบบทางวิศวกรรม และวัสดุศาสตร์เพื่อลดความต้านทานไฟฟ้าให้ได้มากที่สุด ในอุดมคติสารที่นำไฟฟ้าและไม่มีความต้านทานเราเรียกว่า วัสดุตัวนำยิ่งยวด (Super Conductor)

บทที่ 2.2 วัสดุตัวนำยิ่งยวด Super Conductor

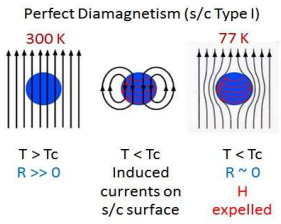
วัสดุตัวนำยิ่งยวด (Super Conductor) นั้นเกิดจากธาตุหรือสารประกอบที่สามารถนำไฟฟ้าได้โดยที่ไม่มีความต้านทาน หรือ สูญเสียพลังงานในรูปของความร้อน แสง หรืออื่นๆ ซึ่งจะเกิดขึ้นได้เมื่อสารตัวนำดังกล่าวนั้น อยู่ต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต (Critical Temperature)

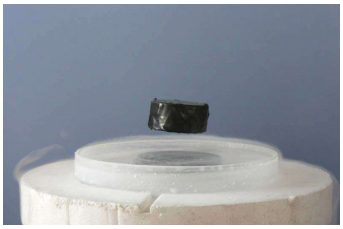
นักวิทยาศาสตร์ค้นพบคุณสมบัติของ วัสดุตัวนำยิ่งยวด จากการทดลองวัดความต้านทานไฟฟ้าในอุณหภูมิที่ต่างกัน และสังเกตุเห็นว่าเมื่อเราลดอุณหภูมิความต้านทานไฟฟ้าจะลดลง จนถึงอุณหภูมินึงที่ความต้านทานไฟฟ้าเป็นศูนย์ เราเรียก อุณหภูมิดังกล่าวว่าอุณหภูมิวิกฤต ดังกราฟที่แสดงด้านล่าง



กราฟแสดงความต้านทานไฟฟ้าที่ลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อผ่านค่าอุณหภูมิวิกฤต (Critical Temperature)

จะเห็นได้ว่า เมื่ออุณหภูมิลดลงน้อยกว่า 4.2 K (เคลวิน) จากการใช้ ฮีเลียมเหลว (Liquid Helium) และอีกหนึ่งคุณสมบัติที่เราสังเกตุเมื่ออุณหภูมิลดลง คือ ปรากฏการณ์ไมสเนอร์ (Meissner's effect) ที่เมื่อตัวนำมีอุณหภูมิน้อยกว่าอุณหภูมิวิกฤตแล้ว ตัวนำจะปฏิเสธแรงแม่เหล็กทำให้เกิดปรากฏการณ์ที่ลอยตัวภายใต้อิทธิพลของสนามแม่เหล็กได้ ดังรูปด้านล่าง



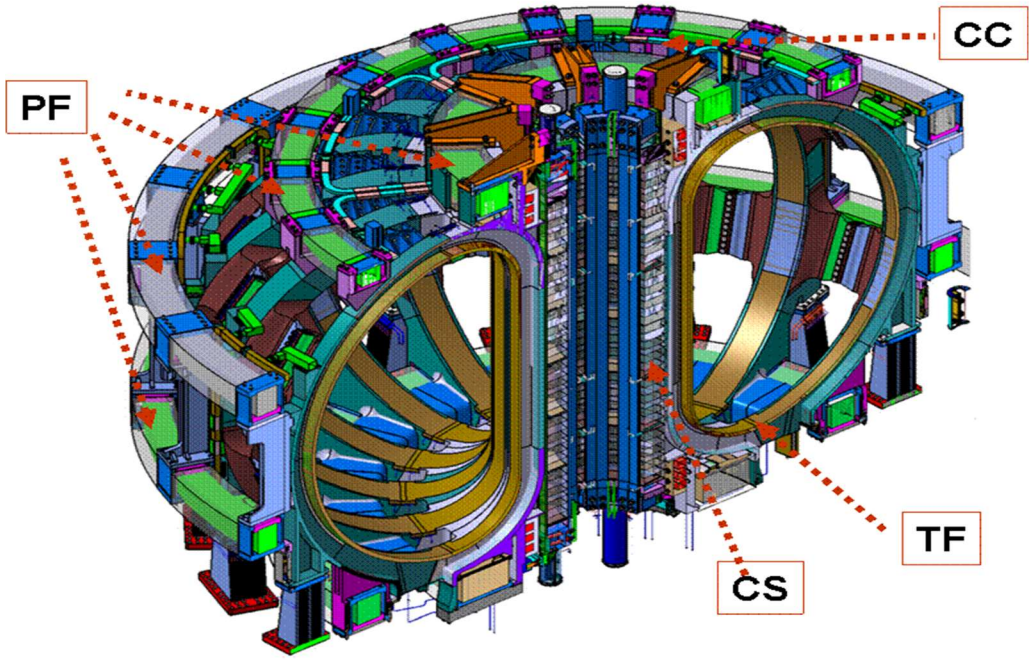




ภาพแสดงปรากฏการณ์ Meissner effect พบว่าในอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต พื้นผิวของตัวนำจะปฏิเสธแรงแม่เหล็ก

บทที่ 2.3 ITER's Magnet System

ดังที่กล่าวในบทที่ 1 และ 2 ระบบ Tokamak ของ ITER จำเป็นต้องออกแบบโดยใช้แม่เหล็กที่เป็นตัวนำยิ่งยวด และสามารถสร้างสนามแม่เหล็กที่มีความเข้มข้นสูงได้ โดยที่ ITER มีระบบแม่เหล็ก 3 ระบบหลักที่เหมือนกันกับ Tokamak ทั่วโลก นั้นคือ 1.Toroidal Magnetic Coil 2.Poloidal Magnetic Coil 3.Center Solenoid และมีส่วนเพิ่มเติมคือ Correction Coil ซึ่งออกแบบมาเพื่อชดเชยค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างก่อสร้างและทดสอบ โดยในที่นี้จะขอทบทวนว่ารูปภาพตัดขวางระบบแม่เหล็กภายใน Tokamak ดังรูปด้านล่าง



รูปภาพแสดงระบบแม่เหล็กภายในเครื่อง Tokamak

โดยที่ PF = Poroidal Magnetic Field Coil

TF = Toroidal Magnetic Field Coil

CS = Center Solenoid

CC = Correction Coil

โดยอ้างถึงการออกแบบแม่เหล็กนั้นต้องรองรับพลังงาน และ น้ำหนักของตัวแม่เหล็กเอง ดังตารางด้านล่าง

System	Energy GJ	Peak Field	Total MAT	Cond length km	Total weight t
Toroidal Field TF	41	11.8	164	82.2	6540
Central Solenoid	6.4	13.0	147	35.6	974
Poloidal Field PF	4	6.0	58.2	61.4	2163
Correction Coils CC	-	4.2	3.6	8.2	85

ตารางออกแบบของระบบแม่เหล็กของ ITER's Tokamak

จากตารางจะเห็นได้ว่า ITER ออกแบบแม่เหล็กที่มีน้ำหนักรวมกว่า 10,000 ตัน และมีพลังงาน (ในรูปของสนามแม่เหล็ก) ประมาณ 51 กิกะจูล (GJ) จึงจะสามารถควบคุมและหน่วยพลาสม่าได้

หากแม่เหล็กดังกล่าวมีความต้านทาน จะทำให้เกิดความร้อนมหาศาล จนระบบไม่สามารถจะคงความเสถียรของพลาสม่าเอาไว้ได้ เราจึงต้องทำให้แม่เหล็กอยู่ในสภาวะตัวนำยิ่งยวด ซึ่งระบบแม่เหล็กของ ITER นั้นเลือกใช้ ส่วนผสมระหว่าง Nb_3Sn (Niobium-Tin) และ Nb-Ti (Niobium-Titanium) นั้นจะมีคุณสมบัติตัวนำยิ่งยวดในอุณหภูมิไม่เกิน 4.2 เคลวิน แต่ในส่วนของพลาสม่าดังแสดงในบทที่ 1 ที่จะทำให้เกิดปฏิกริยาฟิวชั่นนั้นต้องมีประมาณ 100-200 ล้านเคลวิน (100-200 Million Kelvin) ในด้านหนึ่งเราต้องทำให้ แม่เหล็กมีอุณหภูมิไม่เกิน 4.2 เคลวิน แต่ในส่วนของพลาสม่าที่อยู่ไม่ห่างกันนั้นกลับต้องมีอุณหภูมิมากถึง 100-200 ล้านเคลวิน ด้วยข้อจำกัดดังกล่าว ITER จึงต้องออกแบบระบบที่สามารถทำให้แม่เหล็กนั้นคงสภาพตัวนำยิ่งยวดได้ ซึ่งก็คือระบบ Cryogenic system โดยใช้ตัวถ่ายเทความร้อนคือ ฮีเลียม (He) เนื่องจากเป็นธาตุเดียวที่สามารถทำอุณหภูมิได้ถึง 4.2 K และมีคุณสมบัติพิเศษคือ Superfluidity ซึ่งหมายถึงสสารสามารถเคลื่อนที่ได้โดยเสมือนไม่มีแรงเสียดทาน สามารถเคลื่อนที่ผ่านช่องเล็กๆ ได้โดยไม่ทำให้สูญเสียพลังงาน หรือ เติมเต็มช่องว่างได้ โดยทาง ITER ออกแบบสายตัวนำที่มาสร้างสนามแม่เหล็กมี ช่องว่างเล็กๆ ดังกล่าวแสดงในรูปด้านล่าง



ภาพตัวขวางตัวนำ Nb_3Sn และ Nb-Ti ที่สร้างสนามแม่เหล็กของระบบ ITER มีช่องว่างเล็กๆ ระบายความร้อน

บทที่ 2.4 สรุปบทที่ 2

ระบบแม่เหล็กของ ITER นั้นประกอบด้วยแม่เหล็กอยู่ 4 ระบบด้วยกันคือ

1. Toroidal Coil = เมื่อรวมกันสนามแม่เหล็กของ Poriodal แล้วสามารถควบคุมพลาสม่าให้อยู่ในรูปทอรัส (รูปทรงโดนัท) ที่บิดเป็นเกลียวได้

2. Poroidal Coil = เมื่อรวมกันสนามแม่เหล็กของ Toriodal แล้วสามารถควบคุมพลาสม่าให้อยู่ในรูปทอรัส (รูปทรงโดนัท) ที่บิดเป็นเกลียวได้

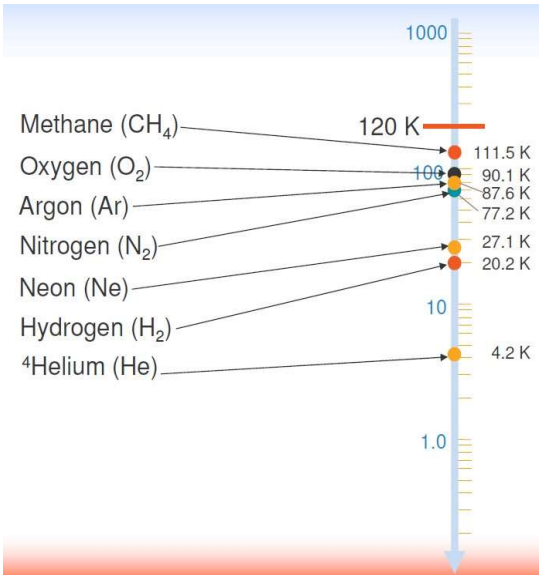
3. Center solenoid = ช่วยเพิ่มการไหลเวียนของพลาสม่า โดยใช้ประจุของพลาสม่าเองกับตัว Center solenoid

4. Correction Coil = เครื่อง Tokamak ต้องใช้ทั้งขนาดและทิศทางของแรงสนามแม่เหล็กที่แม่นยำ แต่เนื่องจากระหว่างการผลิตและประกอบนั้นมีค่าความไม่แน่นอนในการผลิตและประกอบอยู่ตัว Correction Coil ถูกออกแบบมาเพื่อชดเชยค่าความไม่แน่นอนในการผลิตและประกอบนั้น

แม่เหล็กในระบบ Tokamak นั้นจำเป็นต้องผลิตสนามแม่เหล็กแรงสูง ทำให้หากใช้แม่เหล็กปกติจะทำให้เกิดความร้อนและเสียพลังงานมากทาง ITER จึงเลือกใช้ชนิดของตัวนำมาสร้างสนามแม่เหล็กคือ ตัวนำยิ่งยวด ซึ่งตัวนำยิ่งยวดที่เลือกใช้นั้นคือ Nb_3Sn และ Nb-Ti ซึ่งจะคงสภาพการเป็นตัวนำยิ่งยวดที่อุณหภูมิ 4.2 K ซึ่งเป็นอุณหภูมิต่ำ โดยระบบที่จะคงสภาพนั้นได้ต้องใช้ระบบทำความเย็นยิ่งยวดหรือ Cryogenic system โดยใช้ตัวกลางคือ ฮีเลียม ซึ่งจะกล่าวในบทถัดไป

บทที่ 3 ระบบทำความเย็นยิ่งยวด Cryogenic System

Cryogenic, เกิดจากภาษากรีก Cryo = Cold และ Genic = Generation, หรือ ความเย็นยิ่งยวดนั้นไม่ได้มีการกำหนดแน่ชัดว่าอุณหภูมิเท่าใด จึงจะเรียกว่าเป็นอุณหภูมิระดับ Cryogenic แต่โดยทั่วไปอุณหภูมิที่ต่ำกว่า 120 K นั้นจะสามารถเรียกว่าได้เป็นระบบ Cryogenic โดยปัจจุบันมีธาตุหลายชนิดที่สามารถทำอุณหภูมิได้ถึงระดับนี้ ดังแสดงในรูปต่อไปนี้



ภาพแสดงอุณหภูมิต่างที่แก๊สควบแน่นต่ำกว่า 120 K

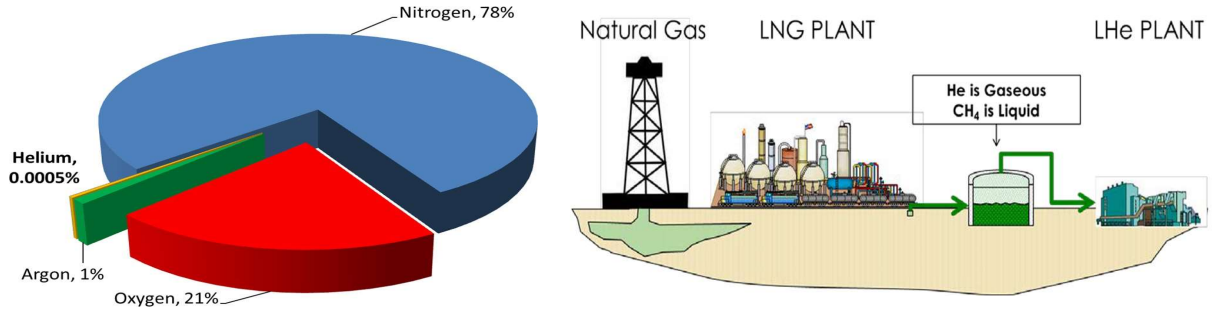
จะเห็นได้ว่าที่ ITER เลือก ฮีเลียม (Helium) เป็นตัวกลางนั้นเนื่องจากสามารถทำความเย็นได้มากที่สุด พอที่จะทำให้ระบบแม่เหล็กคงสภาพตัวนำยิ่งยวดไว้ได้ โดยใช้ ฮีเลียมเหลว (Liquid Helium) เพื่อคงอุณหภูมิของตัวนำยิ่งยวดนั้น

จากข้อจำกัดของการออกแบบระบบที่กล่าวถึงในบทที่ 1 และ 2 นั้นระบบทำความเย็นยิ่งยวดนั้นมีความจำเป็นในการอำนวยให้เกิดสภาวะเหมาะสมที่จะหน่วงพลาสม่าให้เกิดฟิวชั่น โดยธาตุที่สามารถทำความเย็นระดับ 4.2 K ได้นั้นคือ ฮีเลียม (He) ซึ่งมีคุณสมบัติที่เหมาะสมดังนี้ ณ ระดับความดัน 1 บรรยากาศ (1 atm) ฮีเลียมมีอุณหภูมิควบแน่นที่ 4.2 K ทำให้เหมาะสมที่จะให้ตัวนำเป็นตัวนำยิ่งยวดได้ อีกทั้งคุณสมบัติพิเศษที่อุณหภูมิต่ำของฮีลเลียมคือ Superfluidity (ของไหลยิ่งยวด) ทำให้สามารถเคลื่อนที่โดยไม่มีแรงเสียดทาน เกิดปรากฏการณ์ที่ ฮีเลียมเหลว (Liquid Helium) จะไหลไปเต็มช่องว่างในพื้นที่ ซึ่งจะกล่าวถึงคุณสมบัติฮีเลียม และ หลักการทำงานเบื้องต้นของระบบ Cryogenic ในบทนี้

บทที่ 3.1 คุณสมบัติของฮีเลียม (Helium) ในอุณหภูมิต่ำ

ฮีเลียม (He) บนโลกนั้นเป็น 1 ในธาตุที่เบาที่สุด บนโลกเราพบ 2 ไอโซปโทป ด้วยกันคือ He3 และ He4 โดยส่วนประกอบที่พบบนโลกนั้นคือ He4 ส่วน He3 พบได้น้อยมากๆ 0.0001%, 1 ในล้านส่วน (ส่วนใหญ่เกิดจากปฏิกริยา

นิวเคลียร์) ฮีเลียมประกอบอยู่ในบรรยากาศประมาณ 0.0005% จึงไม่คุ้มค่าในทางเศรษฐศาสตร์ในการสกัดฮีเลียมในอากาศ แต่ในบางกรณีเช่นหลุมแก๊สธรรมชาติ ในกระบวณการผลิตแก๊สธรรมชาติเรากลับพบว่ามีจำนวนฮีเลียมเป็นจำนวนมาก ซึ่งเหมาะสมกว่าในทางเศรษฐศาสตร์ ในการพัฒนานำเอาฮีเลียมมาใช้มีความคุ้มค่ามากกว่า ดังแสดงในภาพด้านล่าง



ภาพแสดงฮีเลียมในบรรยากาศ (5 ส่วนในล้านส่วน) และพบมากในหลุมแก๊สธรรมชาติ

ซึ่งเราจะเห็นได้ว่าปริมาณฮีเลียมนั้นจำหน่ายเป็นผลิตภัณฑ์ร่วมกับ แก๊สธรรมชาติจากโรงแยกแก๊สธรรมชาติ ทำให้ ประเทศที่ผลิตแก๊สฮีเลียมให้กับทั้งตลาดนั้นอยู่ในกลุ่มผู้ส่งออกแก๊สธรรมชาติด้วยเช่นกัน ดังแสดงในภาพต่อไปนี้

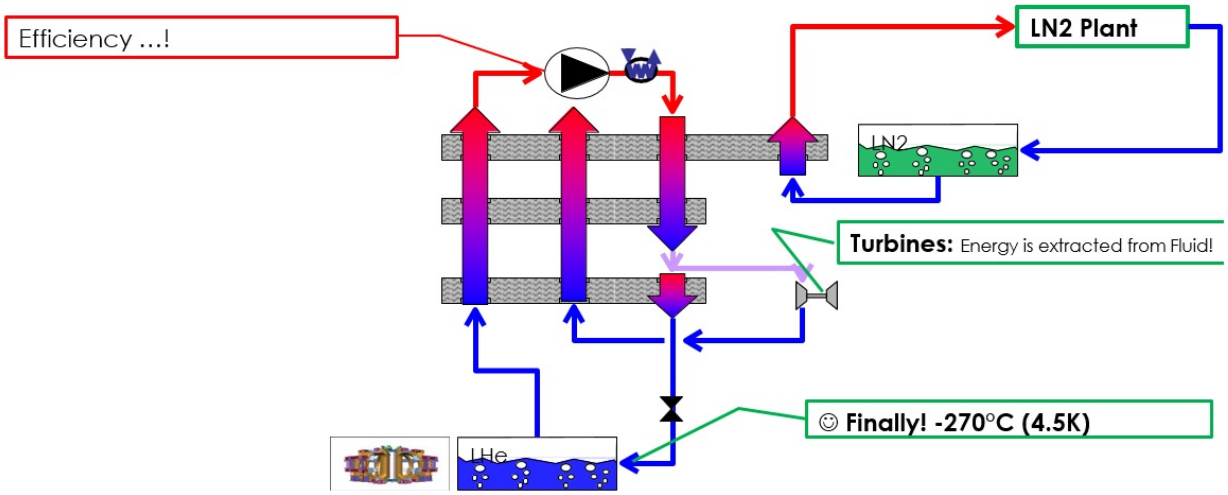


ภาพแสดงปริมาณแก๊สฮีเลียมที่ผลิตของแต่ละประเทศ

การใช้งานแก๊สฮีเลียมมีข้อจำกัด คือ เนื่องจากแก๊สฮีเลียมเป็นแก๊สเฉื่อย, ในสภาวะปกติธาตุฮีเลียมจะไม่ได้ทำปฏิกริยากับธาตุใดเลย, อีกทั้งยังมีน้ำหนักเบากว่าอากาศและลอยออกไปนอกชั้นบรรยากาศได้ ด้วยปัจจัยดังกล่าวทำให้ธาตุฮีเลียมเป็นธาตุที่มีปริมาณจำกัด ดังนั้นเราควรออกแบบระบบให้มีการรักษา นำกลับมาใช้ใหม่ของฮีเลียมด้วย โดยในบทถัดไปจะอธิบายถึงวิธีและหลักการผลิตฮีเลียมเหลว ในระบบ Cryogenic ของ ITER

บทที่ 3.2 หลักการทำงานระบบทำความเย็นยิ่งยวด

การทำงานของระบบทำความเย็นยิ่งยวดนั้นมีหลักการคล้ายกับการทำความเย็นคือ นำแก๊สมาเพิ่มความดันจาก Compressor ได้แก๊สที่มีความดันสูงและอุณหภูมิสูง แล้วจึงลดอุณหภูมิผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน หรือ Heat Exchanger ได้แก๊สที่มันความดันสูงและอุณหภูมิต่ำ และเราสามารถลดอุณหภูมิได้จาก Joule-Thomson Turbine โดยอาศัยหลักการของ Joule-Thomson effect ซึ่งหมายถึง เมื่อแก๊สลดความดันอุณหภูมิของแก๊สจะลดลงด้วย เราจะได้แก๊สที่มีความดันต่ำและอุณหภูมิต่ำ ดังรูป



รูปภาพแสดง Process การผลิต ฮีเลียมเหลว (Liquid Helium or LHe)

ปัจจัยในการผลิตฮีเหลียมเหลวนั้น จำเป็นต้องใช้สารทำความเย็นอื่นๆ เช่น ไนโตรเจนเหลว (LN_2) จำนวนมากเนื่องจากการจะทำให้อุณหภูมิของฮีเหลียมลดลงจนถึงระดับ 4.2 K นั้นต้องผ่านวงจรของการเพิ่มความดัน ลดอุณหภูมิ ลดความดัน(อุณหภูมิจะลดลงด้วย) และเพิ่มความดันอีกรอบ วนไปเป็นวัฏจักรหลายรอบเพื่อให้ความอุณหภูมิที่ต้องการ

จะเห็นได้ว่าแม้หลักการในการผลิตฮีเลียมเหลวนั้น พื้นฐานไม่มีความซับซ้อน แต่การออกแบบและการผลิตแต่ละชิ้นส่วนนั้นมีข้อจำกัดพอสมควร โดยชิ้นส่วนแรกที่จะกล่าวถึงดังนี้

บทที่ 3.2.1 Multi-stage Compressor

ในระบบของ ITER นั้นประกอบด้วย Compressor ทั้งหมด 6 ตัวโดยแบ่งเป็น 4 ตัวสำหรับ 1st stage และอีก 2 ตัวสำหรับ 2nd stage

จากภาพข้างต้นจะเห็นได้ว่า ส่วนที่ทำหน้าที่เพิ่มความดันให้แก่ก๊าซหรือเรียกว่า คอมเพรสเซอร์ (Compressor) นั้นต้องทำงานในหลายความดัน เนื่องจากเมื่อแก๊สสูญเสียความดันแล้วเย็นตัวลง เพื่อจะทำให้อุณหภูมิต่ำลงไปอีก เรา

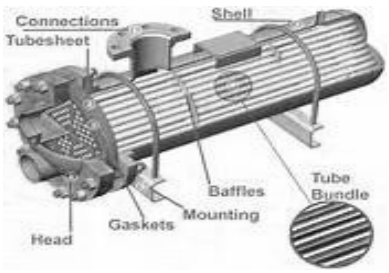
จำเป็นต้องเพิ่มความดันของแก๊สในขั้นต่อไป เมื่อมีข้อจำกัดดังกล่าวทำให้เรามีทางเลือก คือ การใช้คอมเพรสเซอร์หลายๆ ตัว หรือใช้ระบบคอมเพรสเซอร์หลายความดัน (Multi-stage Centifugal Compressor) เพื่อสามารถเพิ่มความดันแก่แก๊สได้หลายค่าตามที่ออกแบบไว้ ดังรูปที่แสดงด้านล่าง

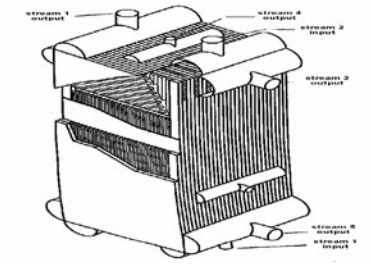


ภาพ Multi-Stage Centifugal Compressor ที่รับความดันจากระบบหลายค่า เพื่อผลิตสาร Cryogenic (LHe)

บทที่ 3.2.2 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน Heat Exchanger

เป็นส่วนสำคัญในการลดอุณหภูมิของแก๊ส มีทั้งหมด 10 ตัว โดยช่วงแรกของการผลิตที่แก๊สฮีเลียมมีความร้อนสูงอยู่ จะลดอุณหภูมิด้วยน้ำเป็นสารแลกเปลี่ยนความร้อน และช่วงที่ต้องทำอุณหภูมิลดลงระดับ Cryogenic จะใช้สารแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นไนโตรเจนเหลว โดยหากแลกเปลียนความร้อนจะใช้ Heat Exchanger ชนิด Shell and Tube ส่วนหากมีไนโตรเจนเหลวเป็นสารแลกเปลี่ยนความร้อนจะใช้ชนิด Plate Heat Exchanger ดังแสดงในรูป

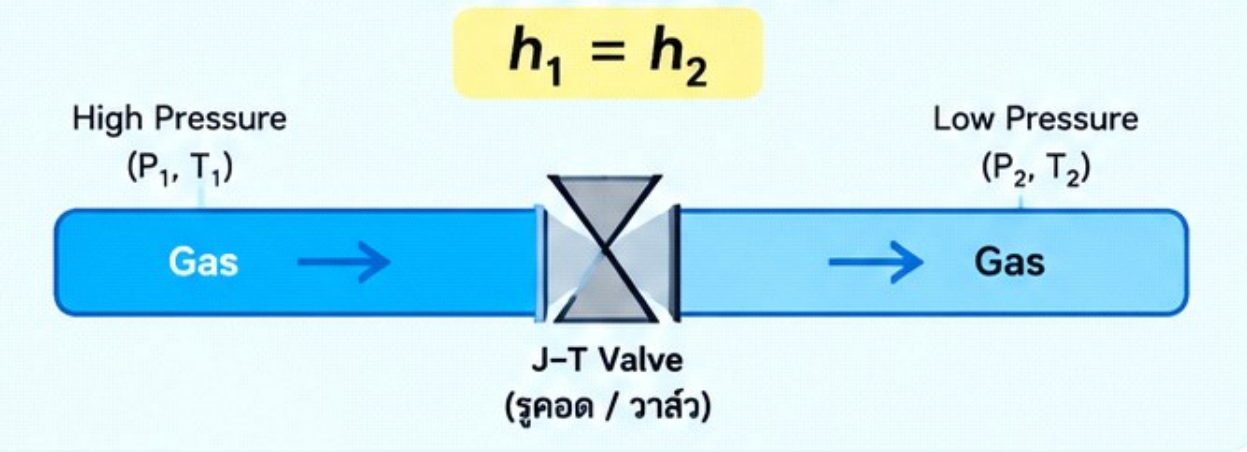




ภาพแสดง (ขวา) Shell and Tube Heat Exchanger (ซ้าย) Plate Heat Exchanger

บทที่ 3.2.3 Joule-Thomson Turbine

ส่วนประกอบที่ทำให้เราสามารถทำให้อุณหภูมิของแก๊ส เข้าสู่ระดับ Cryogenic ได้โดยอาศัยหลักการของ Joule-Thomson effect เมื่อแก๊สอุณหภูมิลดลงหลังจากออกจาก Heat Exchanger แล้วตัวแก๊สยังมีพลังงานเหลืออยู่ในรูปของความดัน ด้วยเหตุนี้เองถ้า แก๊สสามารถลดระดับพลังงานโดยลดความดันจะทำให้อุณหภูมิของแก๊สลดลงด้วย ดังแสดงในรูป โดยที่ P2 น้อยกว่า P1



รูปภาพแสดงแก๊สเมื่อไหล่ผ่าน Joule-Thomson Effect

ด้วยปรากฏการณ์ดังกล่าวทำให้ทาง ITER Cryogenic system นั้นเลือกใช้ Joule Thomson Turbine เพื่อลดความดัน ได้อย่างมีประสิทธิภาพ



ภาพแสดงลักษณะของ Joule Thomson Turbine

โดย Cryogenic Plant มีทั้งหมด 4 ตัว โดยเชื่อมต่อกับระบบหลักจากที่แก๊สผ่านการแลกเปลี่ยนความร้อนกับไนโตรเจนเหลว เพื่อให้ แก๊สฮีเลียมลดอุณหภูมิจนถึงระดับ Cryogenic

บทที่ 4 ITER Cryogenic

จากหลักการดังที่กล่าวมาเราสามารถ ผลิต ฮีเลียมเหลวที่มีอุณหภูมิ 4.2 K ได้ โดยการออกแบบของ ITER นั้น สามารถผลิต ไนโตรเจนเหลว (Liquid Nitrogen) ได้ 530 ตันต่อวัน น้ำร้อนคิดเป็นพลังงานประมาณ 12 MW (ใช้ในระบบทำความร้อนของในพื้นที่ ITER) และสามารถผลิต ฮีเลียมเหลว (Liquid Helium) ได้ 16,000 ลิตรต่อชั่วโมง

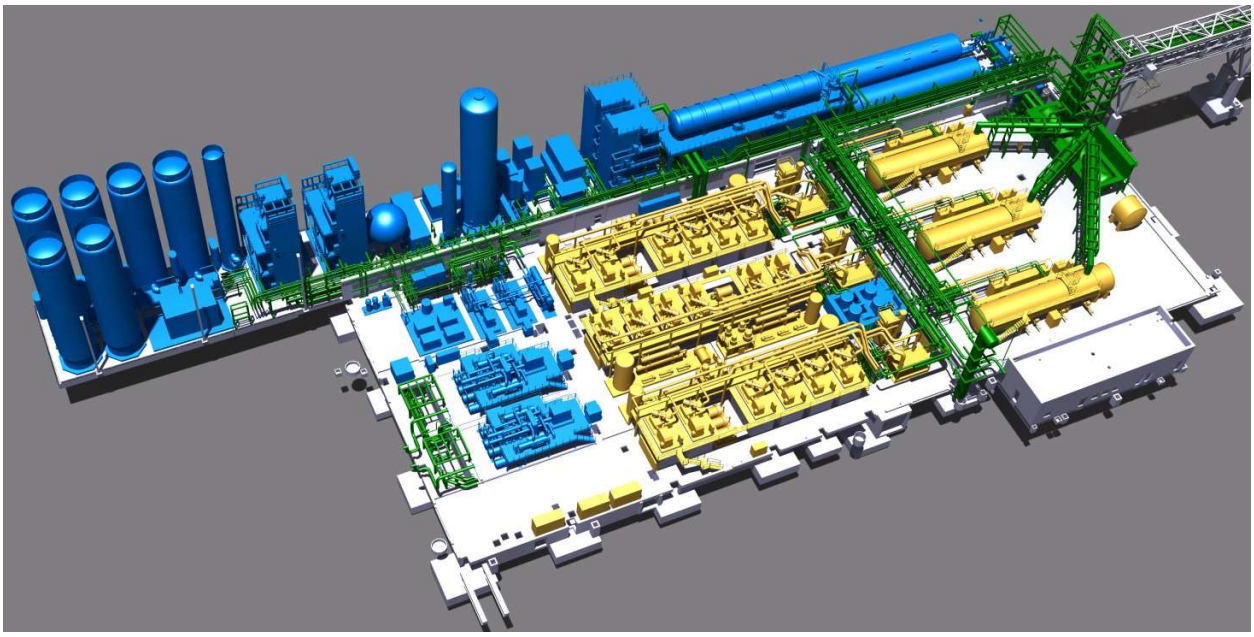
แต่ถ้าเราไม่มีระบบรักษาอุณหภูมิเพียงพอจะทำให้ ITER Cryogenic คงสภาพไว้ก่อนจะส่งไปถึงผู้ใช้งาน (Cryogenic Client) ได้ ด้วยเหตุเช่นนี้เราจึงต้องมีทั้งระบบฉนวนกันความร้อนเข้าสู่ระบบผลิตฮีเลียมเหลว และ ต้องอาศัยฮีเลียมที่มีความเย็นบางส่วนเพื่อเป็นการป้องกันด้วย โดยทาง ITER จะแบ่งการพิจารณาเป็น 3 ส่วนได้แก่

1. Cryoplant ระบบผลิตฮีเลียมเหลว
2. Cryodistribution ระบบขนส่วนฮีเลียมเหลว
3. Cryoline ระบบสุดท้ายที่จะนำฮีเลียมเหลวแก่ผู้ใช้งาน

โดยใน Cryoplant ออกแบบมาเพื่อผลิตฮีเหลียมอยู่ 3 อุณหภูมิด้วยกัน คือ

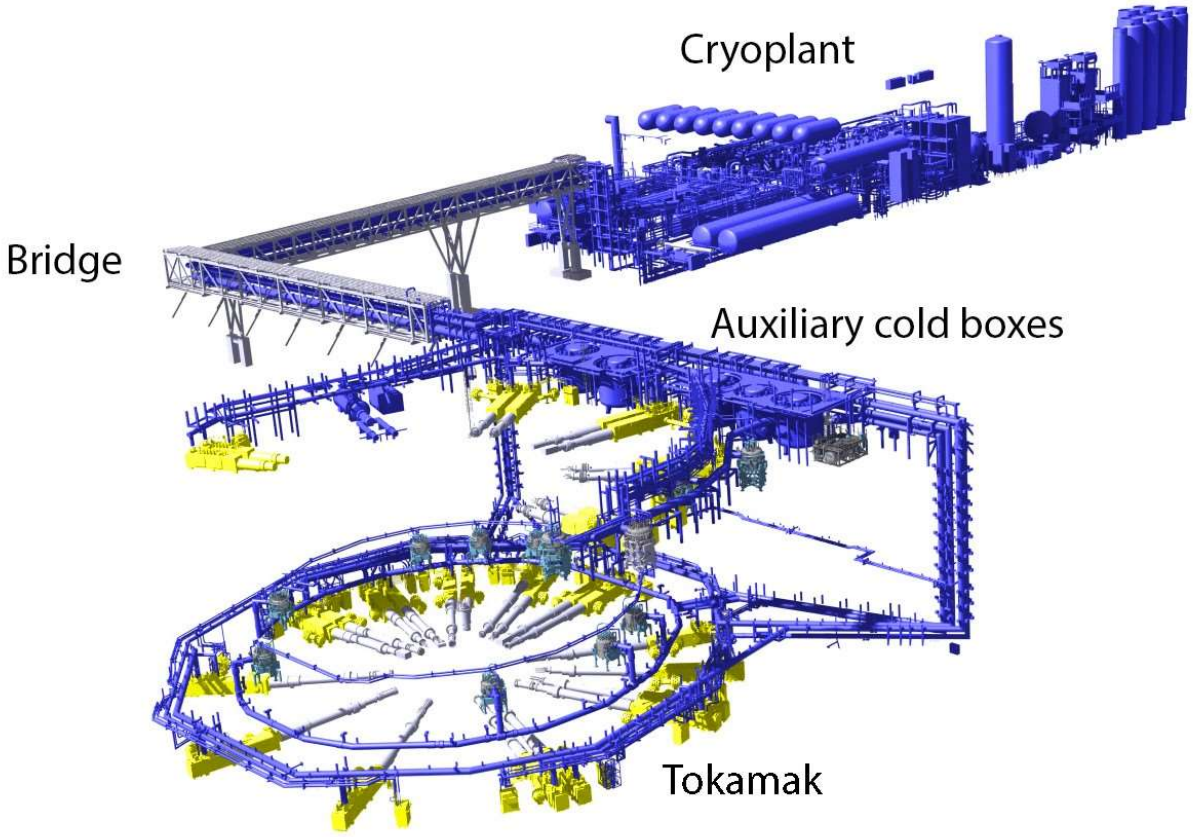
1. 4.2 K เพื่อทำให้ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดทำงานได้
2. 80 K เพื่อใช้เป็นฉนวนกันความร้อนแก่ระบบขนส่งฮีเลียมเหลว
3. 300 K เพื่อใช้เป็นกรณีพิเศษอย่างเช่น Magnet warm-up หรือกรณีฉุกเฉินเช่น Magnet Quenching

ใน Cryoplant จะมีอุปกรณ์ที่ออกแบบไว้ของ ITER ดังที่กล่าวไว้ใน 3.2 โดยลักษณะจะเป็นดังรูปด้านล่างนี้



ภาพแสดงถึงรูป 3D ของ ITER Cryoplant system

ในส่วนของ Cryodistribution นั้นคือระบบท่อที่ขนส่ง ฮีเลียมที่อุณหภูมิต่างๆ เพื่อส่งให้แก่ผู้ใช้งาน (Cryogenic Client) ได้โดยข้อจำกัดด้านการสูญเสียอุณหภูมิ ทำให้ต้องอยู่รวมกันในท่อใหญ่ ซึ่งและมี Heat Jacket พร้อมทั้งระบบ Insulation และ 80 K Helium อยู่ด้วย



ภาพแสดงระบบ Cryodistribution จาก Cryoplant ถึง Auxiliiary cold boxes ที่ตั้งอยู่ในอาคาร Tokamak



ภาพแสดง Cryodistribution line กำลังทำการทดสอบแนวเชื่อมโดยไม่ทำลาย

ในส่วนของ Cryoline นั้นจะคือระบบที่ทำการส่งสารทำความเย็นไปหาผู้ใช้งานโดยระบบออกแบบจาก Cold boxes ที่ตั้งอยู่ในอาคาร Tokamak ไปจนถึง Cryopump เพื่อส่งไปในระบบแม่เหล็กต่อไป



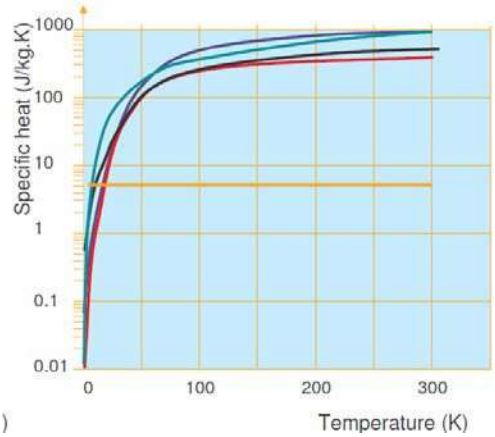
รูปภาพแสดงลักษณะของ Cold boxes ซึ่งตังอยู่ในอาคาร Tokamak

บทที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพของวัสดุในอุณหภูมิต่ำ ที่ส่งผลต่อการออกแบบระบบ Cryogenic

การเลือกใช้วัสดุในระบบทำความเย็นยิ่งยวด นั้นมีความสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากอุณหภูมิมีผลอย่างมากต่อคุณสมบัติทั้งทางกายภาพและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุ การเลือกใช้วัสดุจึงควรคำนึงถึงคุณสมบัติเหล่านั้นเมื่อวัสดุอยู่ในอุณหภูมิต่ำ หรือ อุณหภูมิใช้งาน โดยคุณสมบัติที่เราพบเจอได้เมื่อวัสดุต้องอยู่ในอุณหภูมิต่ำ นั้นมีดังนี้

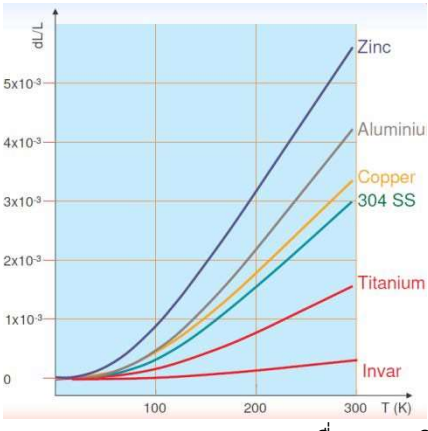
บทที่ 4.1.1 คุณสมบัติทางความร้อน (Thermal Properties) ของวัตถุที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ

วัสดุจะมีความจุความร้อนจำเพาะ (Specific Heat) น้อยลง เมื่อมีอุณหภูมิลดลง



กราฟแสดงค่าความจุความร้อนจำเพาะ (Specific Heat) ของวัตถุในอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง

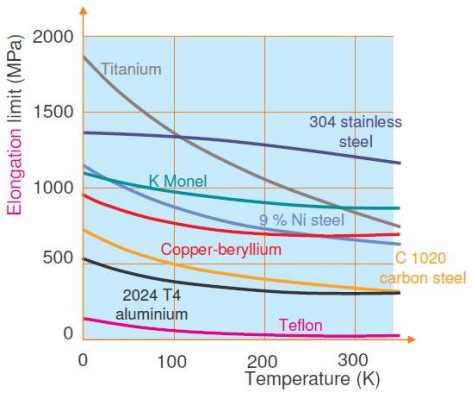
วัสดุจะมีค่า การขยายตัวเนื่องจากความร้อน (Thermal Expansion) และ ความสามารถในการนำความร้อน (Heat Conducivity) น้อยลงเมื่ออุณหภูมิลดลง



กราฟแสดงค่า Thermal Expansion ลดลงเมื่ออุณหภูมิลดลง

บทที่ 4.1.2 คุณสมบัติทางกล (Mechanical Properties) ที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ

เราพบว่าคุณสมบัติ ความยืดหยุ่น (Ductility) นั้นลดลง เพื่ออุณหภูมิลดลง ทำให้วัสดุมีความเปราะ (Brittle) มากขึ้น และ การทนต่อแรงดึง (Traction) นั้นเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง (ใช้พลังงานมากขึ้นในการทำให้วัสดุยืดออกจากแรงดึง) และ ความทนต่อการเสียรูปถาวร (Resillence) นั้นลดลงเมื่ออุณหภูมิลดลง โดยรวมแล้ว วัสดุจะเสียรูปได้ยากในอุณหภูมิต่ำ แต่การเสียรูปจะเป็นแบบเปราะซึ่งเกิดขึ้นทันที (Brittle Failure) หากว่าวัสดุรับแรงกระทำที่มากกว่าที่วัสดุนั้นๆ ทนได้ โดยเราจะแสดงดังกราฟด้านล่าง

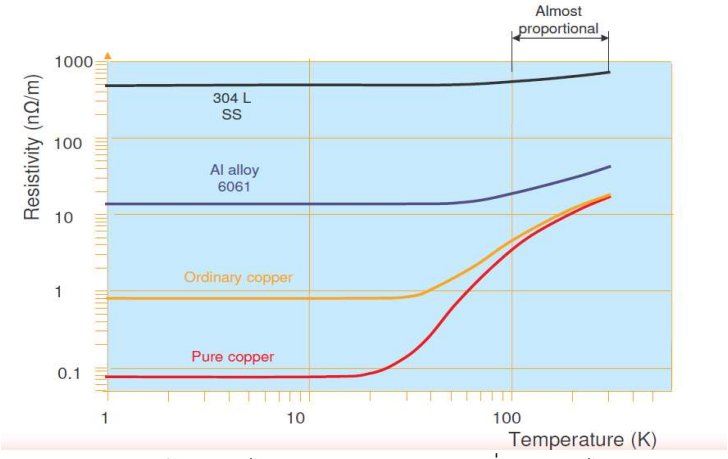


กราฟแสดงขอบเขตของแรงในการยืดตัว (Elongation limit) ของวัสดุในอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง

แม้วัสดุจะมีความเปราะเมื่ออุณหภูมิลดลง แต่เราพบว่าคุณสมบัติต้านทานการล้า (fatique resistance) กลับเพิ่มขึ้น

บทที่ 4.1.3 คุณสมบัติทางไฟฟ้า (Electrical Properties) ที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ

เราพบว่าความต้านทาน (Resistivity) ของโลหะจะลดลงเมื่ออุณหภูมิลดลง เราพบว่าก่อนจะถึงอุณหภูมินึง ความต้านทานไฟฟ้าของโลหะจะลดลงแบบคงที่ แล้วจะหยุดเปลี่ยนแปลงเมื่ออุณหภูมิถึงจุดๆ นึงขึ้นอยู่กับชนิด ความบริสุทธิ์ของวัสดุนั้นๆ



กราฟแสดงค่าความต้านทานไฟฟ้า (Resistivity) เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ

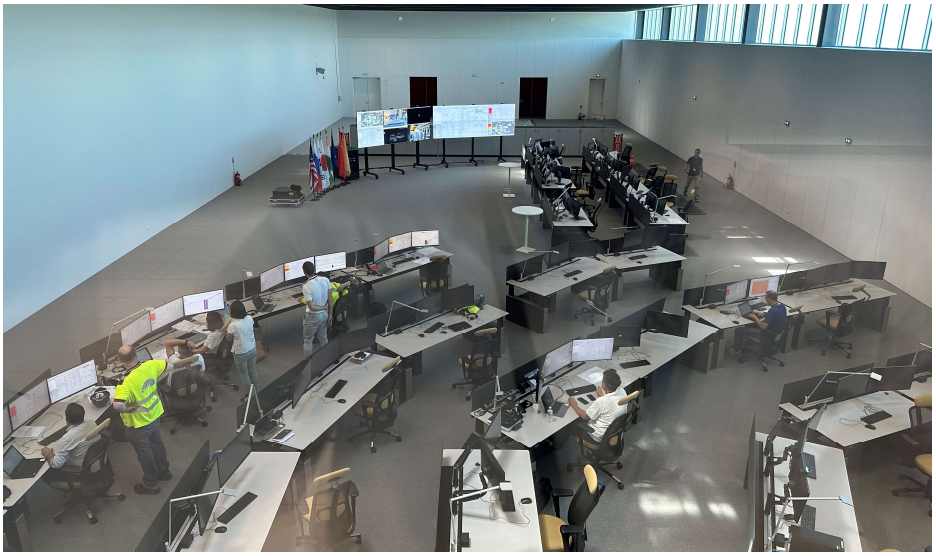
บทที่ 4.2 Magnetic Cold Test

ผู้เขียนได้มีโอกาสเข้าไปมีส่วนร่วม ในการทดสอบระบบ ที่มีความเกี่ยวข้องกันระหว่าง ระบบทำความเย็นยิ่งยกับระบบแม่เหล็ก เนื่องจากทาง ITER ต้องการทดสอบว่าแม่เหล็กสามารถคงสภาพเป็นตัวนำยิ่งยวด (Super Conductor) ได้ตามที่ออกแบบไว้โดยได้ทดสอบ Toroidal Coil ก่อนการติดตั้ง โดยขั้นตอนแรกนั้นคือการ warm-up แม่เหล็ก ที่อุณหภูมิ 300 K ทิ้งไว้เป็นเวลา 14 วัน (เนื่องจากขนาดแม่เหล็กมีขนาดใหญ่เราต้องใช้เวลา

เพื่อให้มั่นใจว่าแม่เหล็กนั้นมีอุณหภูมิที่ถูกต้อง) แล้วค่อยๆ ลดอุณหภูมิช้าๆ จนถึงระดับ 4.2 K เนื่องจากสภาพแม่เหล็กต้องการการแลกเปลี่ยนความร้อนอย่างต่อเนื่องจาก ฮีเลียมยิ่งยวด (Super Critical Helium) ของระบบ Cryogenic นั้นก่อนที่เราจะให้กระแสไหลผ่านตัวนำ ต้องมั่นใจว่า ฮีเลียมยิ่งยวด นั้นมีการไหลเวียนที่เพียงพอ โดยมี Criteria คร่าวคือ ความดันที่แตกต่างกันระหว่างขาเข้า-ขาออก ประมาณ 1 bar และเพื่อป้องกันไม่ให้อุณหภูมิสูงขึ้นเกินจนแม่เหล็กนั้นสูญเสียความเป็นตัวนำยิ่งยวด จึงกำหนดให้อุณหภูมิระหว่างขาเข้า-ขาออก ไม่เกิน 1 K ซึ่งเป็นข้อกำหนดที่ต้องผ่าน



ภาพแสดงขนาดของแม่เหล็ก Toroidal field coil ก่อนการทดสอบ



ภาพภายในห้องควบคุมหลักของ ITER