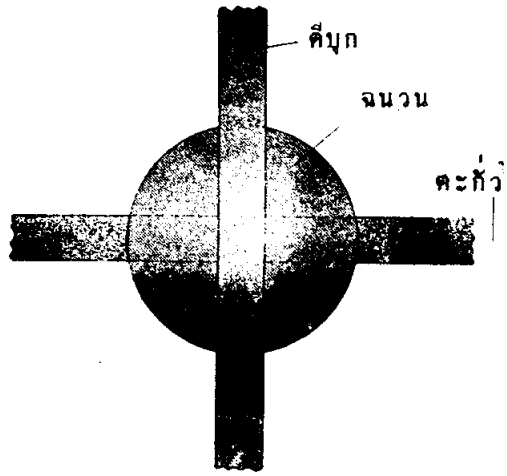
10 เทคโนโลยีใกล้ศูนย์สัมบูรณ์

เราได้กล่าวแล้วในบทก่อนถึงความใฝ่ฝันของคาเมอร์ลิงห์ ออนเนสในเรื่องแม่เหล็กขนาดใหญ่ที่ปราศจากความสูญเสีย และจากการค้นพบสนามวิกฤติที่มีขีดจำกัด ทำให้ท่าทีอื่นๆ ของเทคโนโลยีใหม่ด้านตัวนำยวดยิ่งกระจุยกระจายไปได้อย่างไร แต่ความหวังทั้งหลายชั่วเวลาอันสั้นที่ได้มาจากการค้นพบโลหะผสม ซึ่งยังคงรักษาสภาพต้านทานให้เป็นศูนย์ในสนามแม่เหล็กแรงสูงกลับถูกลบล้างด้วยความล้มเหลวที่อธิบายไม่ได้ของขดลวดที่ออกซ์ฟอร์ด และความพยายามทำนองเดียวกันที่ได้กระทำในไลเดนต่อมาไม่นานนัก เราจะย้อนกลับมายังปัญหานี้พร้อมกับคำตอบในบทต่อไป แต่ในตอนนี้ผลการทดลองที่ทำให้ท้อแท้เหล่านี้ได้ยุติความก้าวหน้าต่อไปในแนวทางดังกล่าวนี้เสียสิ้น จนกระทั่งกลับฟื้นคืนความสนใจขึ้นมาอีกจากการสังเกตโดยบังเอิญอีกยี่สิบปีต่อมา

ขณะที่ต้องยกเลิกการใช้กระแสอย่างแรงและสนามแรงสูงในการประยุกต์กับสภาพนำยวดยิ่ง แต่เรื่องนี้ไม่ได้กระทบกระเทือนความเป็นไปได้ในการนำไปใช้กับเครื่องมือต่างๆที่ใช้กระแสอ่อนและสนามแรงต่ำ นับว่าเรื่องเหล่านี้เป็นไปตามที่คาดกันไว้กล่าวคือ คงอยู่ในขอบข่ายของอุปกรณ์มากกว่าเครื่องจักร และยังเพิ่มข้อดีที่ทำให้ใช้ฮีเลียมเหลวแต่เพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งในเวลานั้นฮีเลียมเหลวเป็นสินค้าที่ค่อนข้างหาได้ยาก การประยุกต์ครั้งแรกเกิดขึ้นมาโดยบังเอิญอีกครั้งหนึ่ง ตัวนำยวดยิ่งทั้งหลายที่แสดงสภาพต้านทานลดลงอย่างกระทันหันไม่เหมาะสมที่จะเป็นเทอร์มอมิเตอร์ไฟฟ้า แต่ในปี ค.ศ. 1930 ผู้ที่ทำงานในไลเดนได้รายงานการวัดต่างๆซึ่งกระทำกับลวดฟอสฟอรัสผสมทองเหลือง ปรากฏว่าแสดงความต้านทานลดลงทีละน้อย ตั้งแต่จาก 7 ค ลงไปจนถึงอุณหภูมิต่ำสุด ตอนนั้นเรายังพันอยู่กับการวัดเชิงแคลอริเมตริกในช่วงฮีเลียมเท่านั้น ดังนั้น เทอร์มอมิเตอร์แบบความต้านทานที่มีความจุความร้อนน้อยจนละทิ้งเสียได้เช่นนั้นดูเหมือนจะมีประโยชน์มหาศาล ตัวอย่างแรกได้พิสูจน์

10.1 ไครโอตรอนเป็นชิ้นส่วนของเครื่องคอมพิวเตอร์ตัวนำยวดยิ่งในรูปแบบอย่างง่ายที่สุด ประกอบด้วยแถบตะกั่ว(ส่วนควบคุม) ซึ่งถูกแยกออกโดยชั้นที่เป็นฉนวน โดยมีแถบดีบุกอยู่ในแนวขวาง(ช่องผ่าน)



ให้เห็นว่าเป็นเทอร์มอมิเตอร์ที่เลิศเลออย่างแท้จริง แต่เรายังระคนอยู่ในช่วงความประหลาดใจที่ไม่น่ารื่นรมย์ต่อไปเมื่อสิ่งขดลวดครั้งต่อๆไปมาใช้ และพบว่าไม่มีลวดใดที่แสดงคุณสมบัติที่พึงประสงค์ ปรากฏว่าลวดที่ใช้เป็นครั้งแรกได้ผ่านการดึงในสีย้อมชนิดหนึ่งซึ่งมีตะกั่วปนเปื้อนอยู่ก่อนแล้ว และพบว่าร่องรอยของตัวนำยวดยิ่งนี้มีอยู่ตามแนวเส้นลวดนั้นแต่เพียงบางๆ

แม้กระนั้น ความโชคร้ายนี้กลับนำไปสู่ความพยายาม ที่จะทำให้ตัวอย่างโลหะตัวนำยวดยิ่งมีความต้านทานเปลี่ยนแปลงทีละน้อยและนำมาใช้ได้ดีสำหรับอุปกรณ์อื่น เราจะกล่าวถึงแต่เพียงบอลอมิเตอร์ที่มีความไวอย่างยิ่ง ซึ่งเป็นเครื่องมือสำหรับหาปริมาณการแผ่ความร้อนเพียงเล็กน้อยได้ โดยที่มีประโยชน์ในการวัดทางดาราศาสตร์และการพัฒนาในระยะเริ่มต้นของเครื่องมือนี้เป็นผลมาจาก ความพยายามที่จะจัดสร้างเครื่องตรวจชีปนาวุธที่ตก

กลับมาสู่โลก ซึ่งจะติดตามแหล่งความร้อนดังเช่นไอเสียจากเครื่องไอพ่น

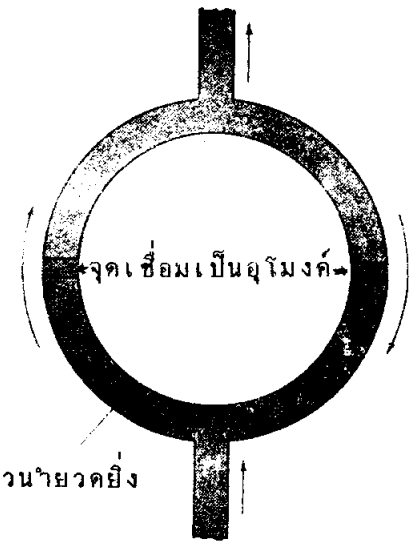
ทั้งหมดนี้นับเป็นการพัฒนาที่เป็นผลพลอยได้บางประการ แต่ในค.ศ.1956 ได้บุกเบิกอุปกรณ์ชิ้นมาชิ้นหนึ่ง ซึ่งนำไปสู่การลงทุนมหาศาลยิ่งกว่าที่ได้ใช้จ่ายกันมาแล้วในเรื่องสภาพนำยวดยิ่ง อุปกรณ์นั้นคือชิ้นส่วนสำหรับปิด-เปิดซึ่งรู้จักกันในชื่อว่า "ไครโอตรอน" แท้ที่จริงการจัดหาอุปกรณ์เช่นนี้มาได้ไม่ใช่เรื่องใหม่ เพราะในปีค.ศ.1935 นางคาซิมีร์-จองเคอร์ได้นำขดตะกั่วเล็กๆมาพันรอบเส้นลวดดีบุก เพื่อป้อนกระแสยวดยิ่งในเชิงแม่เหล็กเข้าสู่วงจรดีบุก เนื่องจากดีบุกมีค่าวิกฤติต่ำกว่าของตะกั่ว ดังนั้นสนามแม่เหล็กที่สร้างขึ้นจากกระแสในลวดตะกั่วจึงไม่ทำลายสภาพนำยวดยิ่งของตัวเอง อีกยี่สิบปีต่อมาดี. เอ. บักแห่งห้องปฏิบัติการของรัฐในอเมริกาได้เสนอที่จะใช้อุปกรณ์นี้ เป็นชิ้นส่วนปิด-เปิดในเครื่องคอมพิวเตอร์เชิงตัวเลข โดยที่รูปแบบอย่างง่ายที่สุดประกอบด้วยแถบดีบุกทำหน้าที่เป็น "ช่องผ่าน" ซึ่งเปิดและปิดภายใต้การ "ควบคุม" ของตะกั่วที่วางขวางกับแผ่นวัตถุฉนวน ซึ่งกั้นขวางอยู่ระหว่างแถบทั้งสอง(รูปที่ 10.1) กลวิธีการระเหยแผนใหม่ช่วยให้การทำแถบเหล่านี้บางมากอย่างยิ่ง ซึ่งหมายความว่าเวลาที่ตอบสนองจะสั้นมาก นอกจากนี้ช่องผ่านที่ทำด้วยดีบุกนั้นสามารถทำให้เป็นส่วนของวงแหวนตัวนำยวดยิ่งซึ่งกระแสที่ไหลเรื่อยไปไหลวนอยู่ โดยการตระเตรียมวงจรอย่างรอบคอบ ก็จะได้วงแหวนเหล่านี้พร้อมด้วยกระแสที่ไหลเรื่อยไปภายใต้การควบคุมไว้ให้เป็น "หน่วยความจำ" ในอุดมคติ ดังนั้นระบบนี้ทั้งหมดจึงคือเครื่องคอมพิวเตอร์เชิงตัวเลขที่ทำงานได้อย่างรวดเร็ว โดยมีหน่วยความจำหมื่นๆซึ่งสามารถดึงข้อมูลออกมาได้อย่างรวดเร็วยิ่ง ทำให้ความฝันของวิศวกรคอมพิวเตอร์เป็นความจริงขึ้นมา นอกจากนี้ในค.ศ.1956 ฮีเลียมเหลวได้กลายเป็นสินค้าในเชิงพานิชย์และมีราคาถูกด้วย

ดังนั้น นับว่าเรื่องนี้ได้เตรียมพร้อมไว้สำหรับการพัฒนาทางวิทยาการในสเกลขนาดใหญ่ และอุตสาหกรรมก็ไม่ได้รั้งรอที่จะรับไปดำเนินการต่อไป อันที่จริงหนึ่งในบรรดาบริษัทเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใหญ่ที่สุดได้เริ่มงานอย่างแข็งขันยิ่ง จนคู่แข่งต่างๆของบริษัทนี้ท้อแท้ใจ

ในการเข้าสู่การแข่งขันที่ไม่ทัดเทียมกัน ซึ่งกลับยุ่งยากซับซ้อนยิ่งขึ้นจากการที่รัฐบาลสหรัฐอเมริกาได้ยื่นข้อเสนอที่จะเป็นแกนกลางสำคัญสำหรับสิทธิบัตร หลังจากได้ใช้จ่ายไปแล้วเกือบประมาณสองร้อยล้านเหรียญสหรัฐฯ บริษัทใหญ่นี้ได้ปิดโครงการเครื่องคอมพิวเตอร์ลง จึงเป็นจุดจบของไครโอตรอน ด้วยความกระตือรือล้นที่จะดำเนินการต่อไปของบริษัทนี้ จึงได้รวบรวมบรรดานักวิทยาศาสตร์ชั้นเยี่ยมยอดซึ่งทำงานในกิจการอื่นอยู่ โดยมองข้ามรายละเอียดปลีกย่อยที่ว่า ไม่มีใครในกลุ่มนี้ที่มีประสบการณ์ยาวนานในเรื่องสภาพนำยวดยิ่ง นับว่าต่างกับโครงการต่างๆที่เคยกระทำกันมาในด้านวิศวกรรมไฟฟ้า เพราะว่าสภาพนำยวดยิ่งค่อนข้างจะ "พิสดาร" และการจัดการในเรื่องนี้ต้องอาศัยบุคคลที่คลุกคลีกับมันและคุ้นเคยกับลักษณะพิเศษต่างๆของมัน

หนึ่งในบรรดาความยุ่งยากที่สำคัญอยู่ในถาดต่างๆ สำหรับระเหยชิ้นส่วนปิด-เปิดที่มีลักษณะเฉพาะคล้ายคลึงกัน และความปรารถนาโดยความสำนึกที่จะพยายามสร้างช่องผ่านที่ทำด้วยดีบุกนั้นให้บริสุทธิ์มากๆ จุดนี้เองจึงเป็นที่มาของข้อขัดข้อง ยิ่งดีบุกถูกทำให้บริสุทธิ์ยิ่งขึ้นเท่าใด ความเป็นเนื้อเดียวกันในช่องผ่านนั้นจะยิ่งน้อยลงไป นับเป็นลักษณะที่รู้จักกันดีในการวิจัยทั้งหลายก่อนหน้านี้ที่เกี่ยวกับสภาพนำยวดยิ่งว่า สามารถทำให้โลหะบริสุทธิ์ยิ่งขึ้นได้เรื่อยๆ แต่ในการทำเช่นนี้ความบริสุทธิ์ของผลผลิตที่ได้ออกมาแต่ละรุ่น ก็ล้วนแต่จะเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นทุกครั้ง ในทางตรงข้ามกลับจะง่ายกว่าที่จะทำโลหะไม่บริสุทธิ์ให้เป็นเนื้อเดียวกัน ในงานของเราซึ่งเป็นด้านวิชาการล้วนๆเราได้เริ่มระเหยโลหะผสมสำหรับช่องผ่านและหลังจากความพยายามอย่างมโหฬาร จึงได้โลหะเหล่านี้มาด้วยความไม่บริสุทธิ์เท่ากันอย่างพอเพียงที่จะเอื้ออำนวยแก่การพัฒนาต่อไปเป็นอย่างดีพอควร การใช้โลหะผสมให้ผลดีอีกประการหนึ่ง กล่าวคือ จะมีความต้านทานสูงในสถานะปกติของช่องผ่านที่สามารถทำให้เหมาะสมกับค่าความต้านทานเชิงซ้อนที่อุณหภูมิห้องได้อย่างสะดวก ในทางตรงกันข้ามการสร้างช่องผ่านที่ทำด้วยดีบุกให้บริสุทธิ์ยิ่งขึ้นเรื่อยๆก่อให้เกิดความต้านทานที่ต่ำลงๆในสถานะ

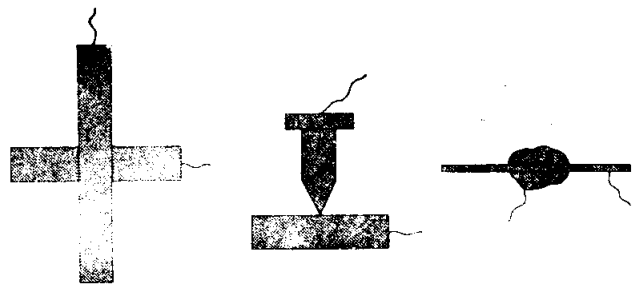
10.2 สควิด(SQUID = Superconductive QUantum Interference Device) มีลักษณะเฉพาะตรงจุดเชื่อมต่อต่างๆเป็นอุโมงค์ ซึ่งขณะที่ยังคงสภาพนำยวดยิ่งจะยินยอมให้ฟลักซ์แม่เหล็กในปริมาณควอนตัมผ่านไปได้



ปกติของมัน ซึ่งทำให้ยากที่จะรับรู้การเปิดและการปิดของตัวมันเองมากขึ้น

อย่างไรก็ตาม กว่าการพัฒนาจะมาถึงจุดนี้ก็สายเกินไป ทั้งนี้เพราะว่าโครงการทางอุตสาหกรรมได้ยุติลงเสียแล้ว และมีการพัฒนาเครื่องคอมพิวเตอร์แบบใหม่ๆขึ้นมาอีก เราได้เสียเวลาไปบ้างในการเชื่อมโยงเรื่องที่น่าตื่นเต้นของไครโอตรอน เพราะเรื่องนี้ให้บทเรียนที่มีค่า หากอาศัยผลที่ได้มาใหม่ๆและการไตร่ตรองอย่างดี น่าจะช่วยทำให้โครงการไครโอตรอนบรรลุความสำเร็จได้ในที่สุด แต่ก็เป็นไปไม่ได้ที่จะชักจูงคณะกรรมการผู้บริหารใดๆหยิบยกโครงการซึ่งคู่แข่งที่ใหญ่ที่สุดของเขาเหล่านี้ได้สูญเสียเงินกว่าล้านเหรียญสหรัฐฯ

10.3 แบบต่างๆของจุดเชื่อมต่อเป็นอุโมงค์
(ก) การสัมผัสระหว่างแถบออกซิไดซ์ของ
ด้วนายวดยิ่ง (ข) การสัมผัสแบบเฉพาะจุด
(ค) ลวดไนโอเบียมที่มีรอยเชื่อมของบัดกรี.
ชนิดอ่อน



(ก) (ข) (ค)

ไปกับมือแล้วขึ้นมาอีก

การพัฒนาล่าสุดที่ประสบความสำเร็จในการใช้สภาพนายวดยิ่งกระแสต่ำ ยังมีข้อได้เปรียบที่ไม่เกี่ยวข้องกับเงินก้อนใหญ่ด้วย นักศึกษาที่เคมบริดจ์ชื่อ**ไบรอัน โจเซฟสัน**ขณะที่ยังเป็นนักศึกษาระดับปริญญาตรีได้ส่งบันทึกเพื่อตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสาร *Nature* ซึ่งได้วางรากฐานสำหรับผลงานที่ส่งเสริมให้เขาได้รับรางวัลโนเบลด้วยอายุเพียง 23 ปี ความสำเร็จของ**โจเซฟสัน**อาศัยการทำให้กระแสยวดยิ่งเป็นควอนตัม ซึ่งเราได้พิจารณาแล้วในบทก่อน เขาได้เชื่อมโยงปรากฏการณ์นี้เข้ากับปรากฏการณ์ควอนตัมอีกกรณีหนึ่ง ตามที่เรียกกันว่า "การลอดอุโมงค์" ซึ่งก็คือความน่าจะเป็นเชิงสถิติควอนตัมของอนุภาคที่ผ่านสิ่งกีดขวาง

เชิงศักย์ จากการสังเกตพบเป็นครั้งแรกในปฏิกิริยานิวเคลียร์ทั้งหลาย อันที่จริงกัมมันตภาพรังสีคือการลอดอุโมงค์เชิงกลศาสตร์ควอนตัมของอนุภาคนิวเคลียร์ ซึ่งได้เจาะผ่านสิ่งกีดขวางออกมาในลักษณะนี้ อิเล็กตรอนในโลหะก็เช่นเดียวกัน สามารถลอดทะลุผ่านฉนวนสิ่งกีดขวางที่บางมากเข้าสู่ชิ้นส่วนของโลหะที่อยู่ติดกันไปได้โดยตลอด การลอดทะลุจากตัวนำยวดยิ่งหนึ่งไปสู่อีกตัวหนึ่งหรือไปสู่โลหะธรรมดาก็เกิดขึ้นเช่นกันด้วย และแสดงถึงการสนับสนุนโดยตรงต่อการกล่าวถึงช่องว่างของพลังงานก่อนหน้านี้ อีกทั้งยังรวมไปถึงต่อการทำให้เป็นควอนตัมของกระแสยวดยิ่งอีกด้วย ในบทที่ 7 ของหนังสือนี้ได้นำลักษณะคลื่นของอนุภาคมาใช้และเราสามารถกล่าวได้ว่า คลื่นอิเล็กตรอนรั่วไหลผ่านชั้นฉนวนออกไป คู่อิเล็กตรอนก็สามารถลอดทะลุไปได้เช่นเดียวกัน แต่จะต้องคำนึงถึงอาพันธ์ในพิกัดที่ยาวของคลื่นเหล่านี้ด้วย จุดเชื่อมต่อที่เป็นอุโมงค์ระหว่างตัวนำยวดยิ่งต่างๆมีคุณสมบัติโดยเฉพาะ ที่สามารถอยู่ในสภาพนำยวดยิ่ง ขณะเดียวกันกับที่ยินยอมให้ฟลักซ์แม่เหล็กผ่านไปได้ด้วย ปรากฏการณ์โจเซฟสันนี้จึงอนุญาตให้นับแต่ละควอนตัมของฟลักซ์แม่เหล็กด้วยอุปกรณ์เชิงมหภาค

ในที่นี้เราไม่สามารถพิจารณาในรายละเอียดของกลไก ที่ใช้คุณสมบัติต่างๆทางควอนตัมของคลื่นอิเล็กตรอนในเสกลขนาดใหญ่เป็นสำคัญ ดังในตัวอย่างเช่น การแทรกสอดของคลื่นอิเล็กตรอน ซึ่งสอดคล้องกับการแทรกสอดทางทรรศนศาสตร์ของแสง ที่ผ่านสลิตคู่หนึ่ง การจัดอุปกรณ์ตามหลักการนี้เรียกว่า สควิด (SQUID = Superconductive QUantum Interference Device) หมายถึง อุปกรณ์การแทรกสอดเชิงควอนตัมตัวนำยวดยิ่ง ด้วยความสามารถในการนับควอนตัมเดี่ยวๆได้ จึงช่วยให้การวัดฟลักซ์แม่เหล็กเป็นไปได้ด้วยความไวที่ไม่เคยปรากฏมาก่อนที่เดียวในขนาดประมาณ 10^{-15} เทสลา ซม.^{2} ส่วนศักย์ไฟฟ้าก็สามารถหาได้ด้วยความแม่นขนาดใกล้เคียงกับการกระเพื่อมขึ้นลงเชิงความร้อนทางสถิติ และสำหรับกระแสก็เป็นเช่นเดียวกันนี้อย่างแท้จริง จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าสำหรับเครื่องมือทางมหภาคเชิงกลศาสตร์ควอนตัมนั้นนำไปประยุกต์ได้หลายประการ แต่เท่าที่ได้บุก

เบิกกันมาจนถึงขณะนี้เป็นเพียงจำนวนน้อยเท่านั้น นอกจากที่จำเป็นต้องใช้ซีเลียมเหลวแล้ว สควิดนับเป็นเครื่องมือที่ง่ายมาก ซึ่งใช้วงแหวนตัวนำยวดยิ่งในรูปแบบอย่างง่าย โดยทำให้มีจุดเชื่อมต่อที่เป็นอุโมงค์สองแห่ง และสายไฟสองสาย(รูปที่ 10.2) สำหรับวัตถุประสงค์บางประการจะใช้แต่เพียง "จุดเชื่อมต่อแรงอ่อน" เพียงจุดเดียวเท่านั้น และส่วนนี้จึงเป็นเพียงส่วนเดียวของเครื่องมือที่ต้องอาศัยความเรียบง่ายบางประการ รูปแบบต่างๆของจุดเชื่อมต่อนี้เมื่อได้นำมาใช้(รูปที่ 10.3) จำเป็นต้องทำการทดลองบ้างเล็กน้อยในบางครั้งหรือต้องปรับอย่างรอบคอบ อย่างไรก็ตาม จุดอ่อนเหล่านี้เป็นเรื่องเล็กน้อยที่ไม่น่าจะทำให้ไขว้เขวไปหากจะนำเครื่องมือแบบใหม่และไวนี้ไปใช้อย่างกว้างขวางต่อไป

แม้จะกลับกลายเป็นว่าอุปกรณ์กระแสอ่อนเหล่านี้มีความสำคัญเพียงใดก็ตาม รางวัลที่แท้จริงสำหรับการใช้สภาพนำยวดยิ่งในทางวิศวกรรมไฟฟ้า ดังที่คาเมอร์ลิงห์ ออนเนสได้คาดการณ์ไว้นั้นอยู่ที่การสร้างสนามแม่เหล็กแรงสูง และนั่นหมายความถึงกระแสไฟฟ้าอย่างแรงที่ปราศจากความต้านทาน ในบทก่อนเราได้กล่าวถึงความพยายามที่ไม่เป็นผลเพื่อที่จะบรรลุในเรื่องนี้ และความหวังทั้งหลายที่จะแก้ปัญหานี้ได้ล้มเลิกไปทีละน้อยในปลายช่วงระหว่างปีค.ศ.1930-1939 จนกระทั่งถูกรื้อฟื้นขึ้นมาอีกอย่างฉับพลันจากการค้นพบโดยบังเอิญหลังจากนั้นมาอีกยี่สิบปี

ในค.ศ.1955 นักฟิสิกส์หนุ่มชื่อจี. บี. อินเดมาแห่งมหาวิทยาลัยอิลลินอยส์ต้องการจะทำการทดลองบางประการ ซึ่งต้องใช้สนามแม่เหล็กที่อุณหภูมิต่ำ จึงได้ตัดสินใจที่จะใช้แม่เหล็กไฟฟ้าพันด้วยลวดไนโอเบียมตามแบบฉบับ ดังเป็นที่ทราบกันจากการทดลองต่างๆที่ดำเนินการในค.ศ.1937 ว่าไนโอเบียมบริสุทธิ์มีค่าวิกฤติประมาณ 0.25 เทสลา และค่านี้น่าจะให้สนามแรงสูงระหว่างชิ้นส่วนที่เป็นขั้วแม่เหล็กของเขาอย่างเหมาะสม สนามนี้แท้ที่จริงกลับมีค่าประมาณ 0.7 เทสลา แต่ค่าวิกฤติของลวดของเขาเป็น 0.5 เทสลา นับว่าเป็นสองเท่าของค่าที่ได้คาดไว้ จากรายงานสั้นๆที่พิมพ์เผยแพร่ดูหมือนว่าอินเดมาไม่ได้กังวลใจ

มากนักในความแตกต่างนี้ แต่กลับค่อนข้างจะเน้นถึงความสำเร็จของแม่เหล็กของเขา โดยแนะนำให้ใช้แม่เหล็กนี้สำหรับกรณีที่คล้ายกัน เหตุการณ์ยังคงไม่มีอะไรเปลี่ยนแปลงในอีกห้าปีต่อมา และเราอาจจะต้องถือว่าอินเดมาหรือคนอื่นๆไม่ได้ตระหนักในการปฏิวัติอย่างลึกซึ้งทางวิศวกรรมตัวนำยวดยิ่ง อย่างไรก็ตาม ค่าวิกฤติเป็นเพียงสองเท่าของค่าที่เคยพิมพ์เผยแพร่มาก่อนหน้านี้ ซึ่งได้จากการวัดเมื่อ 18 ปีก่อน

ก่อนที่เราจะพิจารณานัยสำคัญที่แท้จริงจากการสังเกตของอินเดมาและการส่งผลต่อเหตุการณ์ที่สืบเนื่องทั้งหลาย เราต้องย้อนกลับไปยังเรื่องโลหะผสม งานมากมายมหาศาลได้กระทำไปในเรื่องนี้ตอนช่วงระหว่างค.ศ.1930-1939 โดยเฉพาะอย่างยิ่งชับนิคอฟที่คาร์คอฟและห้องปฏิบัติการออกซ์ฟอร์ดได้ดำเนินการวิจัยเหล่านี้ต่อไปอย่างหนักหน่วง ในระยะนั้นการติดต่อเป็นการส่วนตัวกับรัสเซียในทางปฏิบัติไม่มีอย่างแท้จริง และเราต้องเปรียบเทียบผลการทดลองทั้งหลายจากข้อมูลที่พิมพ์เผยแพร่เท่านั้น ข้อมูลเหล่านี้เหมือนกันมากโดยที่การทะลุทะลวงของฟลักซ์แม่เหล็กเป็นไปอย่างช้าๆ แต่ผลการทดลองล่าสุดของชับนิคอฟใกล้เคียงกับรูปแบบที่ตั้งสมมติฐานไว้ต่อมาโดยเอบริโคซอฟ ในคณะผู้ร่วมงานของคาร์คอฟมีนักโลหะวิทยาที่ยอดเยี่ยมอย่างแท้จริง ซึ่งจะช่วยงานเหล่านี้ได้ด้วย แต่เรื่องทั้งหมดนี้มาถึงจุดจบเมื่อชับนิคอฟถูกจับโดยข้อกล่าวหาทางการเมืองที่กุอ้างขึ้นมาหลายข้อหา และได้สาบสูญไปในคุกของสตาลิน โดยที่เขาไม่ได้กลับออกมาอีกเลย แต่ภรรยาหม้ายของเขาชื่อ ออลกา ทราเปซนิโควา ซึ่งเป็นผู้ร่วมงานของเขาด้วยยังรอดพ้นจากการกวาดล้างนี้มาได้ และเข้าร่วมประชุมครั้งแรกของเราพร้อมกับผู้ร่วมงานชาวโซเวียตทั้งหลายในปี ค.ศ. 1957 ระหว่างที่ได้มีการดื่มเพื่อรำลึกถึงสามีผู้มีชื่อเสียงโด่งดังของนางด้วย

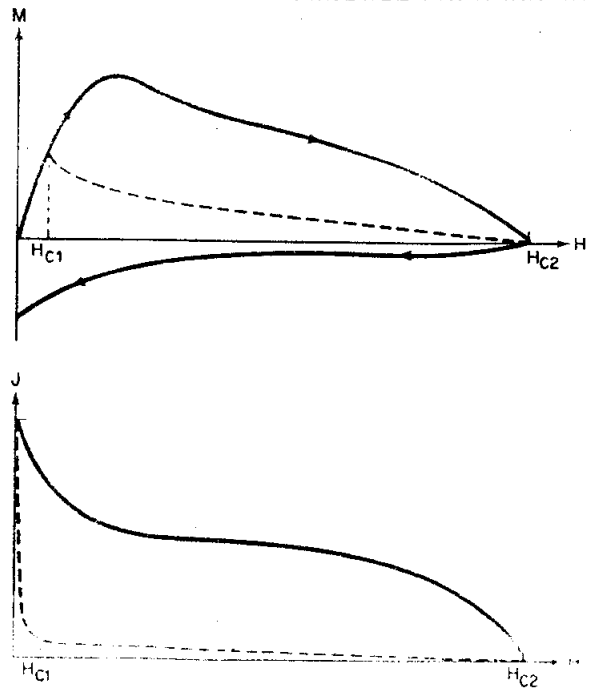
หลายปีก่อนหน้านั้นในที่ประชุมราชบัณฑิตยสภาในค.ศ.1935 ซึ่งยังคงอยู่ในความทรงจำ เราได้รายงานความจริงที่น่าสงสัยว่า ฟลักซ์แม่เหล็กที่ได้ทะลุทะลวงเข้าไปในโลหะผสมมีพฤติกรรมต่างไปจากโลหะบริสุทธิ์ โดยไม่ได้ถูกผลักดันออกมาขณะที่มีการลดสนามภาย

นอก แต่ยังคงถูกกักกันอยู่ภายในโลหะนั้น ความจริงนี้ได้บ่งชี้ว่าโลหะผสมของเราไม่ได้เป็นเนื้อเดียวกันในเชิงแม่เหล็ก แต่เต็มไปด้วยตาข่ายของเส้นใยที่มีค่าวิกฤติซึ่งสูงมากกว่าสารทั้งก้อน ขณะที่สนามภายนอกถูกลดลงจะทำให้กระแสที่ไหลเรื่อยไปถูกสร้างขึ้นในแวดวงของตาข่ายนั้น และฟลักซ์จะถูกกักอยู่เช่นเดียวกับน้ำในรอยพรุนทั้งหลายของ "ฟองน้ำ" รูปแบบนี้ดูเหมือนจะยืนหยัดต่อการทดสอบของกาลเวลา แม้จนกระทั่งสองทศวรรษต่อมาเรื่องนี้ยังมีความซับซ้อนอย่างไม่น่าเป็นไปได้เช่นนั้นหลังจากการค้นพบอีกครั้งที่เรียกว่า"การกักฟลักซ์" ซึ่งเหมือนกันกับ "ฟองน้ำ" เดิมอย่างแท้จริง แต่สิ่งสำคัญยิ่งอยู่ที่ว่า การมีเส้นใยซึ่งมีค่าวิกฤติสูงในสารบางชนิดก่อให้เกิดรากฐานของเทคโนโลยีใหม่ทางวิศวกรรมไฟฟ้ากำลังเชิงสภาพนำยวดยิ่ง

เมื่อเราแทนการใช้คำ "โลหะผสม" ด้วยคำว่า "สารบางชนิด" นั้นจะต้องคำนึงถึงความจริงที่ได้ค้นพบระหว่างงานของเราในตอนเริ่มแรกว่า ร่องรอยต่างๆของการปนเปื้อนแม้แต่เพียงรอยเครียดเชิงกายภาพในโลหะบริสุทธิ์ทั้งหลาย จะเป็นผลให้เกิดการก่อตัวของ "ฟองน้ำ" อันที่จริงได้ใช้เวลาและความพยายามมากมายไปในการกำจัดสภาพไม่เป็นเนื้อเดียวกันทั้งหลาย เฉพาะอย่างยิ่งในโลหะแข็งเชิงกล ดังเช่น แทนทาลัมและไนโอเบียม เหตุผลสำหรับความพยายามเหล่านี้ก็คือ จะต้องหาตัวแปรทางอุณหพลศาสตร์จากข้อมูลทางเหล็กที่แลดทิชของผลึกตัวอย่างทั้งหลายไม่ถูกรบกวนจำเป็นจะต้องมี และดังที่เราได้ให้ข้อสังเกตก่อนหน้านี้แล้วว่า แม้แต่สารละลายโลหะผสมส่วนที่เป็นของแข็งสามารถทำให้เป็นเนื้อเดียวกันอย่างเพียงพอ จนกระทั่งไม่แสดงพฤติกรรมคล้ายกับฟองน้ำได้

จากการค้นพบรูปแบบ 2 ของสภาพนำยวดยิ่ง และติดตามมาด้วยการค้นพบสารที่นำกระแสสูงในเวลาที่ไล่เลี่ยกัน จึงเกิดความสับสนขึ้นมากมายซึ่งยังคงมีอยู่บ้างบางส่วนจนถึงปัจจุบัน พื้นฐานของปรากฏการณ์ทั้งสองนี้เป็นการทะลุทะลวงของฟลักซ์เข้าสู่สารที่มีความตึงผิวเป็นลบ น่าเสียดายที่การทดลองของรูปแบบ 2 ที่บริสุทธิ์เข้าใจได้ยาก จึงต้องยืดเวลา

10.4 คุณสมบัติต่างๆของตัวนำยวดยิ่งที่มีความเครียดสูง (ก) เส้นการทำให้เป็นแม่เหล็กแสดงถึงฮิสเทอริซิสอย่างแรงในแบบ 2 ซึ่งบริสุทธิ์ (เส้นประสีดำ) แสดงเพื่อเปรียบเทียบ (ข) โครงสร้างแบบฟองน้ำยืนยันกระแสวิกฤติที่เพิ่มขึ้นอย่างมากที่สนามแรงสูงยิ่ง



(ก)

(ข)

ออกไปอีกนานแม้ว่าเอบริโคซอฟจะได้ทำนายการมีตัวตนของมันไว้แล้วก็ตาม ในที่สุด เมื่อเราได้ตัวอย่างที่สมบูรณ์แล้ว สมบัติทั้งหมดดังที่ได้ตั้งสมมติฐานไว้โดยทฤษฎีจึงปรากฏออกมา (รูปที่ 9.7). โดยเฉพาะอย่างยิ่งแสดงถึงสนามวิกฤติที่แน่นอนเป็นอย่างดีสองค่า ลักษณะสำคัญที่สุดซึ่งจะกล่าวในตอนนี้ก็คือ การผันกลับได้ทางแม่เหล็กอย่างสมบูรณ์ อนึ่ง เส้นโค้งของ

การทำให้เป็นแม่เหล็กสำหรับสารเดียวกัน ในสถานะที่ถูกทำให้เครียดเป็นที่รู้จักกันอย่างดี ปรากฏว่าแทนที่จะแสดงถึงสนามวิกฤติที่ต่ำกว่าอย่างเฉียบพลันแต่กลับเป็นยอดโค้งและค่อยๆ เข้าใกล้สู่ค่าวิกฤติที่สูงกว่ายิ่งขึ้น ซึ่งบังเอิญเป็นค่าเดียวกันสำหรับสารบริสุทธิ์(รูปที่ 10.4) สิ่งที่ปรากฏเด่นชัดยิ่งกว่านั้นคือการผันกลับไม่ได้ในการกลับไปสู่สนามภายนอกเป็นศูนย์ ลักษณะทั้งหมดนี้เป็นคุณสมบัติเฉพาะของโครงสร้างแบบฟองน้ำนั่นเอง อย่างไรก็ตาม สิ่งที่สำคัญที่สุดคือการเปรียบเทียบกระแสวิกฤติ(รูปที่ 10.4 ข) ค่านี้ของแบบ 2 ที่บริสุทธิ์จะลดลงจนมีค่าน้อยมากทีเดียว เพราะว่าขณะที่ให้กระแสเข้าไปนั้น แรงโลเรนตซ์จะกวาดฟลักซ์แม่เหล็กออกจากสารตัวอย่าง จึงส่งผลให้ใช้เป็นพาหะของกระแสไม่ได้ ในทางตรงกันข้าม ลักษณะฟองน้ำของสารตัวอย่างที่มีความเครียดจะกักเส้นฟลักซ์ ทำให้กระแสวิกฤติยังคงสูงที่สนามแม่เหล็กแรงสูงมาก ลักษณะเด่นที่เป็น "บ่า" นับว่าเป็นเครื่องบ่งชี้อย่างสำคัญสำหรับสารที่จะนำมาใช้ในทางอุตสาหกรรมได้ดี

เรื่องนี้จึงให้คำอธิบายสำหรับการค้นพบโดยบังเอิญของอินเตมา เส้นลวดไนโอเบียมของเขาถูกทำให้เครียดอย่างหนักหน่วง และประกอบด้วยเส้นใยที่มีค่าวิกฤติสูงอย่างเพียงพอ ที่จะให้กระแสยวดยิ่งแรงพอสำหรับแม่เหล็กของเขา อย่างไรก็ดีนัยสำคัญของการค้นพบของอินเตมาได้ผ่านไปโดยไม่มีใครสนใจ จนกระทั่งปีค.ศ.1960เอส. เอช. เอาท์เลอร์ แห่งสถาบันเอ็ม. ไอ. ที. ได้พิมพ์เผยแพร่รายงานฉบับสมบูรณ์ เรื่องการใช้ไนโอเบียมสำหรับแม่เหล็กตัวนำยวดยิ่ง โดยกล่าวถึงขดโซลินอยด์ที่ให้สนามแม่เหล็กถึงขนาด 0.43 เทสลา และสนามแม่เหล็กทำด้วยเหล็กซึ่งมีขดไนโอเบียมพันอยู่โดยรอบ เพื่อสร้างสนามขนาด 1.4 เทสลาในช่องระหว่างขั้ว ดูเหมือนว่าเขาไม่ได้ทราบถึงงานของอินเตมาที่กระทำเมื่อห้าปีก่อน แต่เขาตระหนักอย่างเต็มที่ถึงความสำคัญของความเครียด โดยทำนายว่าลวดไนโอเบียมที่เครียดอาจจะรักษาสภาพนำยวดยิ่งของมันไว้จนถึง 0.8 เทสลา

ในที่สุดเรื่องนี้นับเป็นความก้าวหน้าแท้จริงไปสู่สาขาเทคโนโลยีตัวนำยวดยิ่งในสนาม

แรงสูง ในปีต่อมาเจ. อี. คุนสเลอร์แห่งห้องปฏิบัติการเบลล์เทเลโฟนได้เสนอรายงานอย่างยืดยาวเกี่ยวกับการทดลองที่ใช้สารต่างๆกันและความเหมาะสมของสารเหล่านี้สำหรับประยุกต์ในสนามแรงสูง ต่อจากนั้น เขาได้บรรยายต่อไปถึงการประยุกต์ทั้งหลายที่อาจเป็นไปได้ ดังเช่นการใช้แม่เหล็กแรงสูงสำหรับการหลอมทางเทอร์โมนิวเคลียร์ และการจ่ายกระแสไฟฟ้าเชิงตัวนำยวดยิ่ง โดยให้ข้อสังเกตว่าการวัดต่างๆตลอดจนการคิดตามแนวใหม่เพิ่งมีอายุเพียงไม่กี่เดือนเท่านั้น ความคิดในเรื่องการประยุกต์อีกมากมายอาจจะเกิดขึ้นในไม่ช้า เรื่องนี้จึงแสดงถึงการเน้นหนักเพียงใดในการวิจัยทางสภาพนำยวดยิ่ง ที่ได้เปลี่ยนแปลงไปในทันทีทันใดจากการค้นคว้าหาสมบัติเบื้องต้นไปสู่ปัญหาเชิงเทคโนโลยี นับเป็นลางของการเริ่มต้นโครงการขนาดใหญ่ซึ่งต้องใช้ทุนมหาศาลต่อไป คำถามที่ถามกันเสมอว่าถ้าหากการทดลองที่ออกซ์ฟอร์ดและคาร์คอฟไม่ถูกขัดจังหวะในระหว่างสงคราม เราน่าจะมีแม่เหล็กตัวนำยวดยิ่งที่มีสนามแรงสูงก่อนหน้านั้นสักเสี้ยวหนึ่งของศตวรรษแล้วหรือไม่ ข้าพเจ้าคิดว่าคำตอบสำหรับคำถามนี้ต้องเป็น "ไม่" อย่างแน่นอน เพราะว่าเวลานั้นไม่มีทั้งพื้นฐานที่สำคัญทางไครโอจินิกประกอบกับฮีเลียมเหลวราคาถูกในปริมาณที่ไม่จำกัด กอร์ปกับไม่มีทั้งความต้องการในเชิงเทคโนโลยีนี้ด้วย แม้ว่าใครก็ตามที่แนะนำในตอนนั้นให้ลงทุนหลายหมื่นปอนด์ในการพัฒนาเช่นนั้นน่าจะถูกเพ่งเล็งว่าสติไม่ดีอยู่บ้างไปแล้ว ดังนั้น จึงต้องอาศัยสงคราม การขับดันแบบไอพ่น ลูกระเบิดนิวเคลียร์และการค้นคว้าทางด้านอวกาศเพื่อให้ผู้เสียภาษีคุ้นเคยกับการยอมรับงานวิจัยที่แพงมากเสียก่อน

การค้นหาสารต่างๆที่น่าจะเป็นผลดีในเชิงเทคโนโลยีได้ดำเนินต่อไปตามบทความทบทวนซึ่งรวบรวมโดยคุนสเลอร์ ในการประชุมสัมมนาที่มหาวิทยาลัยคอลเกตในอเมริกา เมื่อปีค.ศ.1963 มีรายงานไม่น้อยกว่า 25 เรื่องเกี่ยวกับสภาพนำยวดยิ่งเสนอโดยผู้เขียนจากทั่วโลก นับแต่นั้นมางานค้นคว้าทางด้านนี้ได้ขยายตัวขึ้นด้วยอัตราที่น่าฉงนอย่างแท้จริง ภายในเวลาไม่ถึงสิบปีต่อมาได้นำโลหะผสมตัวนำยวดยิ่งและสารประกอบกว่าพันชนิดมาทดสอบ

และค้นคว้าการผสมโลหะมากมายเหล่านี้อย่างละเอียด ความหลากหลายของข้อมูลทำให้เกิดปัญหาสำคัญในการเลือกให้เหมาะสม นับว่าหนทางยังคงอีกยาวไกลและต้องลงทุนสูงถ้าหากจะนับจากการหาความรู้ในเรื่องตัวนำยวดยิ่งที่เหมาะสม ไปสู่การผลิตลวดหรือเคเบิลยาวหลายไมล์ซึ่งมีข้อได้เปรียบเชิงเทคโนโลยีและเชื่อถือได้สำหรับการใช้ทางอุตสาหกรรม สิ่งที่จะต้องนำมาพิจารณาก่อนที่จะเลือกได้อย่างถูกต้อง ได้แก่ ค่าวิกฤติสูงทั้งหลาย ราคาของสารมูลฐานต่างๆ สมบัติเชิงกลสาสตร์ทั้งหลายและความง่ายของการผลิต การเลือกนี้อยู่ภายใต้ภาระความรับผิดชอบทางด้านการเงินมหาศาล เพราะนอกจากการพัฒนาบุกเบิกที่ได้ลงทุนสูงเกินไปแล้ว การประกอบการในระดับอุตสาหกรรมต้องใช้เงินก้อนใหญ่มาก ซึ่งโดยทั่วไปต้องอาศัยการร่วมลงทุนของรัฐบาล ภายในเวลาไม่ถึงทศวรรษวิศวกรรมเชิงตัวนำยวดยิ่งได้กลายเป็นธุรกิจขนาดใหญ่มากไปแล้วอย่างแท้จริง

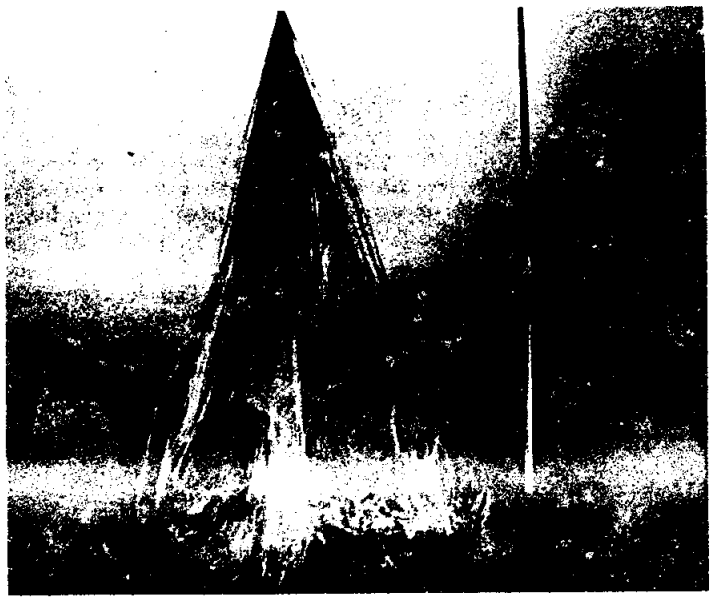
ในบรรดาสารซึ่งอาจเลือกนำมาใช้ได้มากมายนั้น ปรากฏว่ามีเพียงสามชนิดเท่านั้นที่ได้บรรลุระดับประกอบการ ได้แก่ โลหะผสมของไนโอเบียมกับเซอร์โคเนียมหรือกับไทเทเนียมและสารประกอบ Nb_3Sn โดยสารที่สองกำลังนำมาใช้กันเป็นอย่างมาก แต่สารสุดท้ายดูเหมือนจะกำลังมาเป็นอันดับหนึ่ง โลหะผสมสองชนิดแรกสามารถส่งกระแสได้ 10^5 แอมแปร์ต่อซม.^{2} แต่ให้ออกมาที่สนามขนาด 10 เทสลาหรือต่ำกว่า ขณะที่ Nb_3Sn กลับสามารถส่งได้สองเท่าของกระแสนี้ถึง 15 เทสลาหรือสูงกว่า สารสองชนิดแรกช่วยให้ประสบความสำเร็จชั่วคราวเนื่องจากประกอบได้ง่าย ขณะที่ Nb_3Sn ทำให้ยุ่งยากในการประกอบอย่างน่าหวั่นเกรง สารประกอบนี้เปราะบางอย่างยิ่งจึงไม่อาจนำมาพันเป็นขดได้โดยตรง ดังนั้น หลังจากนำสารประกอบนี้มาใช้พันครั้งแรกแล้ว ต่อจากนั้นจึงต้องนำมากระตุ้นซ้ำอีก *ณ หนึ่งมิ* ที่อุณหภูมิสูงขึ้น ถึงแม้จะมีอุปสรรคดังกล่าว แต่กระบวนการนี้ก็นำมาใช้กับไนโอเบียมและทองเหลืองโดยทั่วไปอยู่ในปัจจุบันในขั้นปฐมภูมิของการทำขดลวด ซึ่งถูกเผาจนถึงประมาณ 700 ซ ที่อุณหภูมินี้ดีบุกจากทองเหลืองจะกระจายเข้าสู่โลหะไนโอเบียม ก่อ ตัว

เป็นสารประกอบ Nb_3Sn

ขดลวดที่ทำด้วยโลหะตัวนำยวดยิ่งนั้นเองจะก่อให้เกิดอันตรายอย่างร้ายแรงขึ้นได้ เมื่อไม่ว่าจะเป็นไปด้วยเหตุผลใดก็ตามค่าวิกฤติภายในสูงเกินไป ต่อจากนั้น กระแสอย่างแรงถูกป้อนเข้าไปในทันทีและพลังงานแม่เหล็กมหาศาลที่สะสมอยู่ในขดนั้น จะถูกปลดปล่อยออกมาในรูปความร้อน ซึ่งเป็นที่ทราบกันว่าไม่เพียงแต่ทำให้ฮีเลียมเหลวโดยรอบระเหยไปเท่านั้น แท้ที่จริงยังทำให้ขดหลอมละลายไปด้วย การป้องกันที่เป็นไปได้ประการเดียวคือการจัดชันต์อย่างพอเพียงทำด้วยทองแดงบริสุทธิ์มาก ซึ่งสามารถรับละลอกของกระแสที่สูงขึ้นจนกระทั่งส่วนที่ถูกชัดจังหวะได้รับการ "เยียวยา" จากการปรับช้ำของสนามและการลดอุณหภูมิ สารที่ใช้ในอุตสาหกรรมทั้งหมดจึงถูกสร้างขึ้นในรูปของ "สารผสม" ที่ลวดตัวนำยวดยิ่งถูกฝังลงในพื้นทองแดง เนื่องจากกระแสยวดยิ่งมีแนวโน้มที่จะไหลไปตามผิว ตัวนำยวดยิ่งนั้นเองจึงถูกแบ่งแยกออกเป็นเส้นลวดเล็กๆมากมาย ควรจะได้สังเกตว่าเนื่องจากความต้านทานของเส้นใยเหล่านี้เป็นศูนย์อย่างเด็ดขาด ดังนั้น โลหะใดๆที่มีสภาพต้านทานที่แน่นอนขนาดหนึ่งแม้จะน้อยก็ตาม จะเป็นฉนวนอย่างสมบูรณ์ ฉะนั้น จึงไม่ต้องการฉนวนอื่นใดนอกเสียจากพื้นทองแดงอีกแล้ว ซึ่งทำให้ง่ายขึ้นไม่เฉพาะแต่การพันขดลวดเท่านั้น แต่ในการควบคุมความร้อนของมันเองด้วย

เมื่อต้องการสนามแม่เหล็กขนาดอื่นๆด้วยการเปลี่ยนแปลงทิศทางของฟลักซ์แม่เหล็กจึงไประงับสถานะตัวนำยวดยิ่งไว้ชั่วคราว ซึ่งก่อให้เกิดกระแสไหลวนอย่างแรงในพื้นทองแดง ผลกระทบที่ไม่พึงประสงค์นี้สามารถทำให้ลดลงได้ โดยการบิดเส้นใยตัวนำยวดยิ่งให้เป็นเกลียว ดังนั้น สารผสมตัวนำยวดยิ่งสมัยใหม่สำหรับใช้ในเชิงเทคโนโลยี จึงประกอบด้วยสายเคเบิลทองแดงซึ่งภายในมีเกลียวเส้นใยหลายหมื่นเส้นพันกันฝังอยู่ เนื่องจากทองเหลืองที่แยกเอาดีบุกออกไปเพื่อทำเป็นเส้นใย Nb_3Sn จะไม่ได้ทองแดงบริสุทธิ์มากสำหรับสภาพนำไฟฟ้ายวดยิ่งอย่างสูง เกลียวของทองแดงบริสุทธิ์ที่เพิ่มขึ้นจะต้องถูกกระจายออกไป

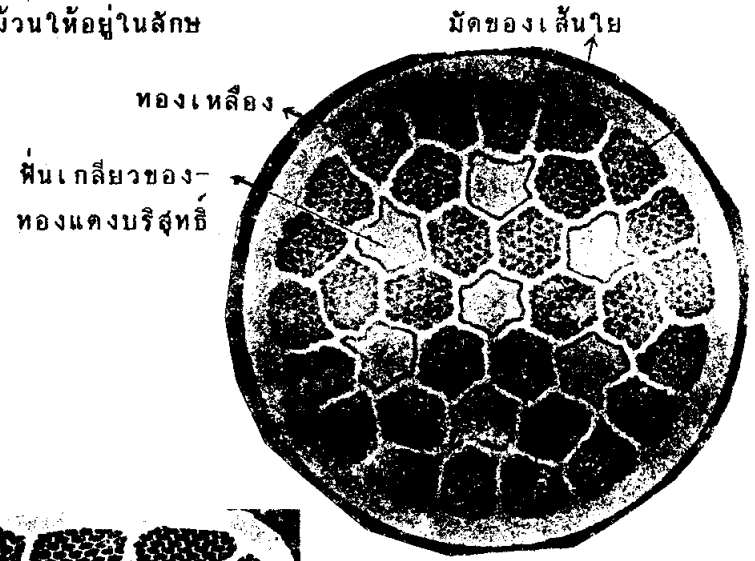
10.5 สารประกอบตัวนำยวดยิ่งที่ใช้ในอุตสาหกรรม (ก)เส้นใยที่บิดเป็นเกลียว (ข)สารประกอบเป็นจำนวน 40,000 เส้น วาดในขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.2 ซม. เมื่อกัดลอกทองเหลืองออกจะเผยให้เห็นเส้นใยแต่ละเส้นฝังอยู่ภายใน

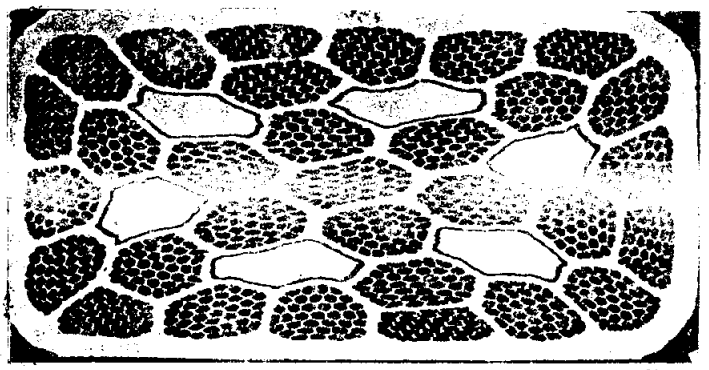


โดยทั่วทั้งสารประกอบนั้น ในที่สุดสารผสมที่ประกอบขึ้นสำเร็จแล้วอาจจะถูกทำให้มีรูปร่างที่มีภาคตัดขวางเป็นสี่เหลี่ยมมุมฉาก เพื่อให้ได้จำนวนการบรรจุสูงภายในขดนั้น(รูปที่ 10.5)

แม้จะมีความยุ่งยากในการประกอบอย่างมากมายดังกล่าวแล้วข้างต้นโดยสังเขป แต่สารทั้งหลายที่มีคุณสมบัติตามรายละเอียดรัดกุมเหล่านี้ ก็ได้ถูกนำมาประกอบการในระดับ

(ค)ภาคตัดขวางที่ขยายขนาดออกอย่างมากของลวดเดียวกันนี้ แสดงให้เห็นถึงมัดทั้งหลายของเส้นใยต่างๆและฟั่นเกลียวทั้งหลายของทองแดงตัวนำสูง (ง)สารเดียวกันนี้ถูกม้วนให้อยู่ในลักษณะของแถบบาง



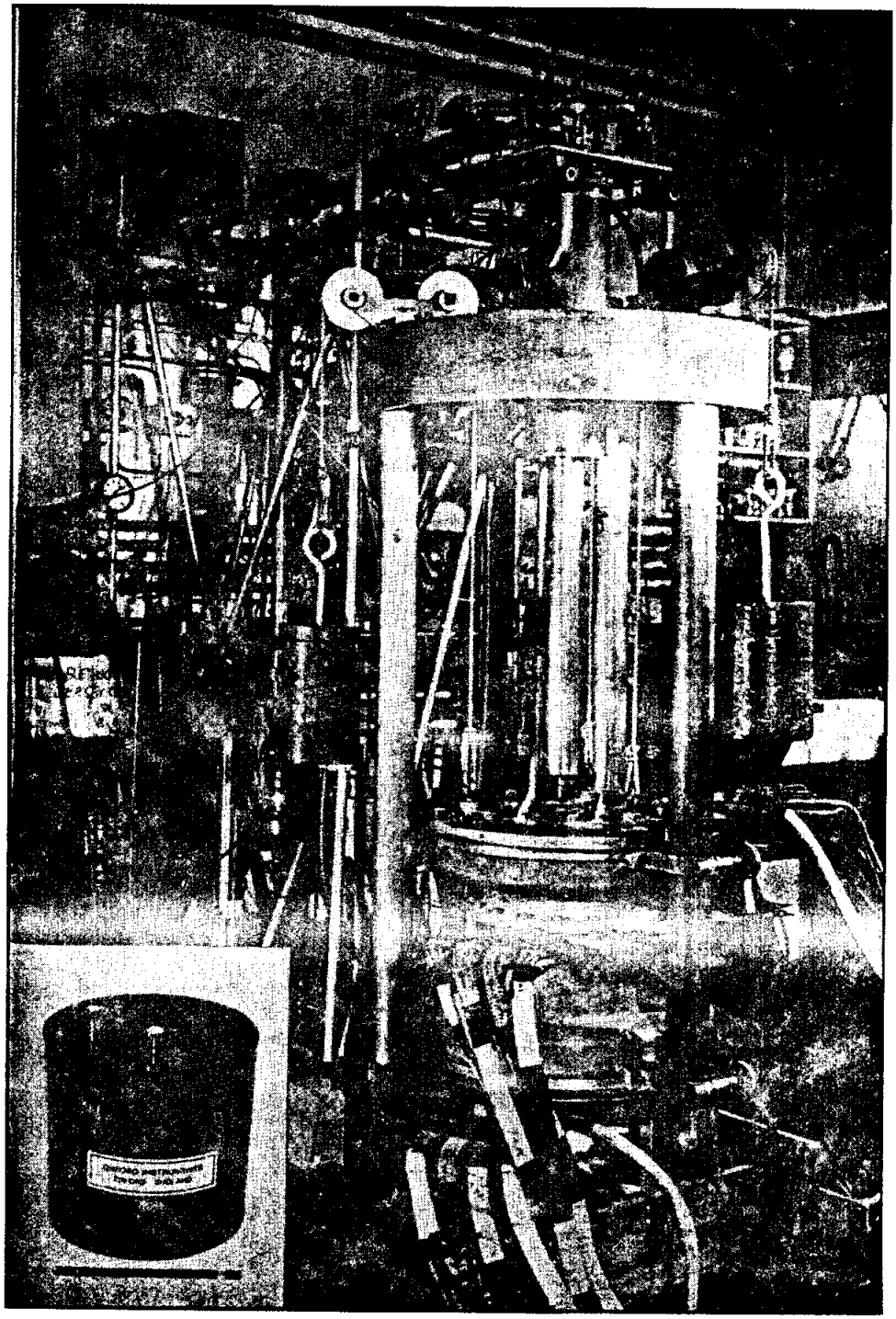


อุตสาหกรรมอยู่ในปัจจุบัน การพัฒนาสารดังกล่าวนี้เป็นความจำเป็นเบื้องต้นสำหรับดำเนินการต่อไปในโครงการเชิงเทคโนโลยีที่สูงส่งและใหญ่โตอย่างยิ่ง ซึ่งเราจะต้องมุ่งมั่นไปในขณะนี้ การประยุกต์ในขนาดใหญ่เช่นนี้ทั้งหมดขึ้นอยู่กับการใช้สนามแม่เหล็กแรงสูง ซึ่งอาศัยตัวนำยวดยิ่งทำให้สามารถรักษาไว้ได้โดยปราศจากการสูญเสีย การใช้ในตอนแรกถูกจำกัด

10.6 การปฏิวัติทางตัวนำยวดยิ่ง ขดโซลินอยด์ทองแดงที่ใช้น้ำระบายความร้อนตามแบบที่ใช้กันมาแต่เดิมสำหรับการลบล้างสภาพแม่เหล็กแบบแอเดียแบติก ในขนาดกำลังไฟฟ้าที่ใช้ 1,000 กิโลวัตต์ จะผลิต 5 เทสลา ปัจจุบันสามารถใช้ขดโซลินอยด์ตัวนำยวดยิ่งขนาดเล็กที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 5 ซม. แทน ซึ่งจะให้ 10 เทสลา

อยู่แต่ในการทดลองเฉพาะการศึกษาค้นคว้าที่อุณหภูมิต่ำ ดังเช่นในการลดอุณหภูมิด้วยการลบล้างสภาพแม่เหล็กของทั้งอิเล็กตรอนหรือสปินนิวเคลียร์อย่างใดอย่างหนึ่ง ต่อมาคือไครโอจีนิกซึ่งจัดเป็นแต่เพียงเครื่องประกอบ แต่ก็นับว่าเป็นสิ่งสำคัญประการหนึ่งและเป็นการพัฒนาที่สำคัญมากยิ่งขึ้น สำหรับการทำให้ขดตัวนำยวดยิ่งเย็นลงเพื่อสร้างสนามแรงสูงที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างมากมาย แต่ไม่มีอะไรที่เกี่ยวข้องกับปัญหาที่อุณหภูมิต่ำทั้งหลาย

อย่างไรก็ตาม อาจจะคลาดเคลื่อนได้หากจะหักหักว่าในกรณีล่าสุดเหล่านี้ สภาพนำยวดยิ่งไม่ได้ดีไปกว่าการเป็นสิ่งทดแทนสำหรับวิศวกรรมไฟฟ้าตามแบบฉบับที่ใช้กันมาแต่เดิม เพราะเราจะได้เห็นการใช้ตัวนำยวดยิ่งช่วยให้ การประยุกต์ซึ่งไม่เคยประสบผลสำเร็จมาก่อนจากการใช้โลหะธรรมดาเป็นไปได้ โดยพิจารณาจากกรณีการทดลองลบล้างสภาพแม่เหล็กแบบแอเดียแบติกเป็นกรณีแรก ในกรณีนี้ขดโซลินอยด์ซึ่งใช้น้ำระบายความร้อนตามแบบเดิมถูกนำมาใช้จนถึงขีดจำกัดของสมรรถนะ ทั้งในแง่ของการป้อนกระแสและในแง่การระ



บายความร้อนของจูลจากขดทองแดงโดยเฉพาะอย่างยิ่งด้วย การใช้ขดโซลินอยด์ตัวนำยวดยิ่งแทนจะทำให้การป้อนกำลังไฟฟ้าอย่างต่ำพอเพียงสำหรับการกระตุ้นขดนั้น และกรณีนี้สามารถสัดวงจรได้หลังจากสร้างกระแสที่ไหลเรื่อยไปในขนาดตามต้องการขึ้นแล้ว ฉะนั้นการระบายความร้อนด้วยน้ำจึงไม่จำเป็น และเนื่องจากอุปกรณ์ทั้งหมดนี้ถูกจุ่มอยู่ในฮีเลียมเหลวไม่ว่าในกรณีใดๆ ดังนั้น ขดโซลินอยด์ตัวนำยวดยิ่งจึงสามารถทำให้เล็กได้ เพราะอยู่ในตำแหน่งที่ล้อมรอบสารระบายความร้อนอย่างใกล้ชิด เมื่อเปรียบเทียบโดยขนาดของอุปกรณ์นี้กับกรรมวิธีตามแบบฉบับที่เคยใช้กันมาแล้ว ความสิ้นเปลืองพลังงานและความเรียบง่ายของการประกอบอุปกรณ์นับว่าน่าประทับใจที่สุด(รูปที่ 10.6)

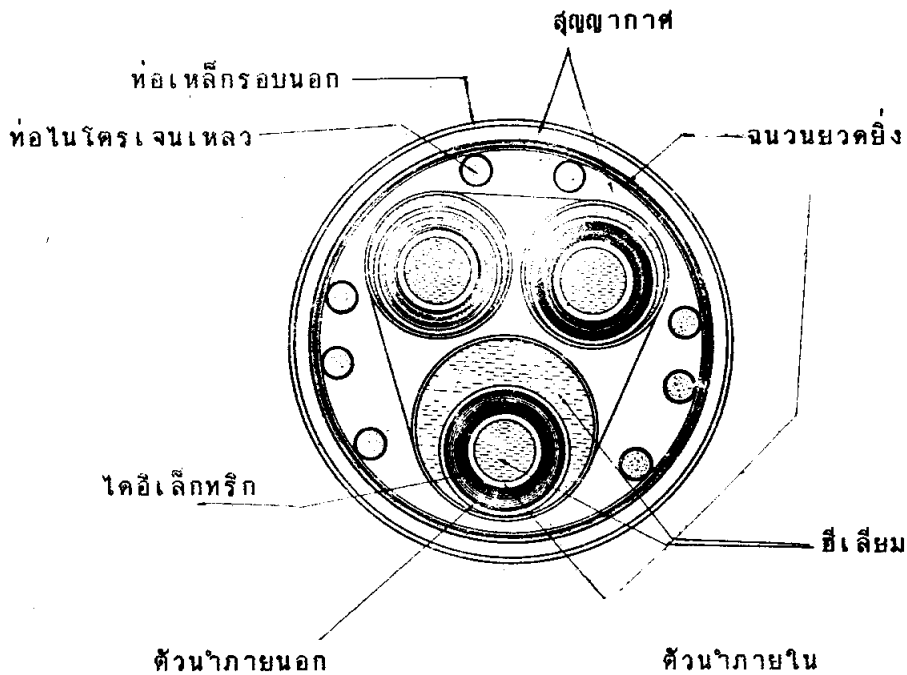
ขั้นตอนต่อไปในการใช้ตัวนำยวดยิ่งในเชิงเทคโนโลยีคือ สนามแม่เหล็กที่ใช้ในงานวิจัยทางนิวเคลียร์ โดยอันดับแรกในห้องฟองและอันดับต่อมาในวงแหวนสะสม ในกรณีแรกปรากฏว่าได้สนามแรงสูงมากซึ่งจำเป็นสำหรับทำให้เส้นทางของอนุภาคความเร็วสูงโค้งได้ ขณะที่ในกรณีที่สองอนุภาคทั้งหลายถูกจำกัดให้วิ่งวนอยู่ในอุโมงค์วงกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเกือบหนึ่งกิโลเมตร วัตถุประสงค์ของการจัดเตรียมเช่นนี้ก็เพื่อเร่งอนุภาคทั้งหลายด้วยการประทุเชิงคาบ โดยที่การเร่งและการจำกัดบริเวณให้อยู่ในเส้นทางเป็นวงกลมถูกสร้างขึ้นโดยสนามแม่เหล็ก เนื่องจากวงแหวนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่จึงจำเป็นต้องใช้พลังงานสนามมหาศาล เรื่องนี้จึงเป็นโครงการที่เกินขีดความสามารถของแม่เหล็กตามแบบฉบับที่ใช้กันมาแต่เดิมมาก ฉะนั้น จึงมีแต่เพียงขดตัวนำยวดยิ่งเท่านั้นที่จะตอบสนองได้ ในประเด็นเดียวกันนี้จะมี "ขวดแม่เหล็ก" และอุปกรณ์ต่างๆที่คล้ายกันโดยภายในมี "พลาสมา" ร้อน ซึ่งเป็นก๊าซของอนุภาคนิวเคลียร์ที่มีพลังงานสูงถูกกักไว้ การกักขังโดยกำแพงแม่เหล็กที่สร้างขึ้นจากสนามแรงสูง จัดเป็นเครื่องเบิกทางไปสู่เครื่องจักรสำหรับการสร้างพลังงานด้วยปฏิกิริยาการหลอมทางนิวเคลียร์ ซึ่งเป็นปฏิกิริยาภายใต้การควบคุมที่ใช้พลังจากระเบิดไฮโดรเจน ปัญหาที่ผูกพันอย่างใกล้ชิดกับโครงการเหล่านี้คือ การสะสมพลังงาน

ตัวนำยวดยิ่ง เมื่อกล่าวถึงการเสี่ยงต่อการล้มเหลวทางไฟฟ้าในขดตัวนำยวดยิ่ง เราได้เคยอ้างอิงไปถึงปริมาณมากมายของพลังงานที่สะสมจากการเหนี่ยวนำในกระแสที่ไหลเรื่อยไปภายในขดดังกล่าว กรรมวิธีตามแบบฉบับที่ใช้กันมาสำหรับการสะสมไฟฟ้าในแบตเตอรีตะกั่วมีข้อเสียอยู่หลายประการ โดยที่ไม่เหมาะสมสำหรับสะสมปริมาณมหาศาลและมีขีดจำกัดของอัตราการส่งพลังงานออกมา นอกจากการป้อนเชิงไครโอจีนิกแล้วสำหรับแหล่งสะสมไฟฟ้าที่ใช้ขดตัวนำยวดยิ่งก็ไม่มีขีดจำกัด ยิ่งไปกว่านั้นยังสามารถดึงกระแสแรงสูงออกมาได้ในช่วงจังหวะที่สั้นมาก ตามโครงการต่างๆที่ได้วางแผนไว้อย่างรอบคอบจึงคาดว่า จะติดตั้งขดตัวนำยวดยิ่งดังกล่าวขนาดมหึมาไว้ใต้ดิน โดยให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่ถึงขนาด 100 เมตร และมีความจุในการสะสมขนาด 30 ล้านกิโลวัตต์-ชั่วโมง

การใช้สายเคเบิลตัวนำยวดยิ่งกำลังอยู่ในระหว่างการพิจารณา ไม่เพียงแต่ในการสะสมกำลังไฟฟ้าเท่านั้นแต่ในการจ่ายไฟฟ้าด้วย เนื่องจากความยาวทั้งหมดของสายนี้จะต้องแช่เย็น ดังนั้น ในระยะทางสั้นที่ต้องการปริมาณพลังงานสูงมาก ดังเช่นในเขตอุตสาหกรรมที่แออัดอย่างยิ่ง จึงเป็นบริเวณที่สมควรจะนำมาใช้ได้อย่างแน่นอน บริษัทหลายแห่งได้นำสายเคเบิลต้นแบบในความยาวที่จำกัดขนาดหนึ่งมาใช้แล้วอย่างได้ผลดี(รูปที่ 10.7) อีกแขนงหนึ่งที่มีความสำคัญในทางอุตสาหกรรมก็คือ การแยกสารที่ถูกทำให้เป็นแม่เหล็กอย่างอ่อน ดังในการทำดินขาวให้บริสุทธิ์หรือการกำจัดน้ำเสีย ในกรณีนี้ปริมาณมากมายของสารที่ไหลอย่างรวดเร็วจะต้องนำมาผ่านสนามแม่เหล็กอย่างแรง ซึ่งถ้าหากควบคุมโดยกรรมวิธีตามแบบฉบับที่ใช้กันมาจะมีราคาแพงอย่างน่าครั่นคร้าม ในทางตรงข้ามกระแสที่ไหลเรื่อยไปอย่างแรงสามารถควบคุมให้ไหลโดยไม่มีการสูญเสีย เนื่องจากกำลังงานที่ต้องใช้น้อยในกระบวนการแยกที่แท้จริง

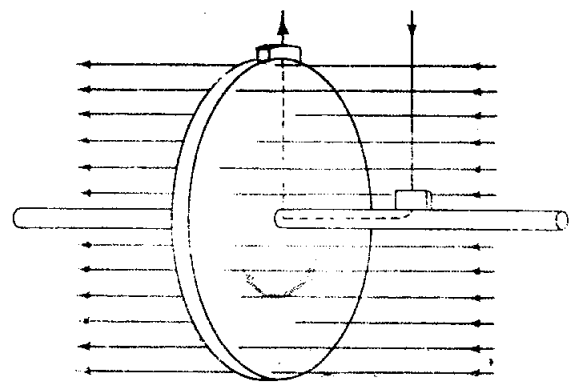
แน่นอนว่ายังไม่อาจหลีกเลี่ยงปัญหาของเครื่องจักรกลที่ทำงานด้วยกำลังเชิงสภาพนำยวดยิ่ง ซึ่งเกิดขึ้นจากการใช้สารที่มีอยู่อย่างเหมาะสม การคำนวณอย่างง่ายแสดงว่าการมี

10.7 สายเคเบิลสำหรับส่งกระแสไฟฟ้าเชิงตัวนำยวดยิ่งพร้อมด้วยการหล่อเย็นโดยฮีเลียมและการกำบังด้วยไนโตรเจนเหลว

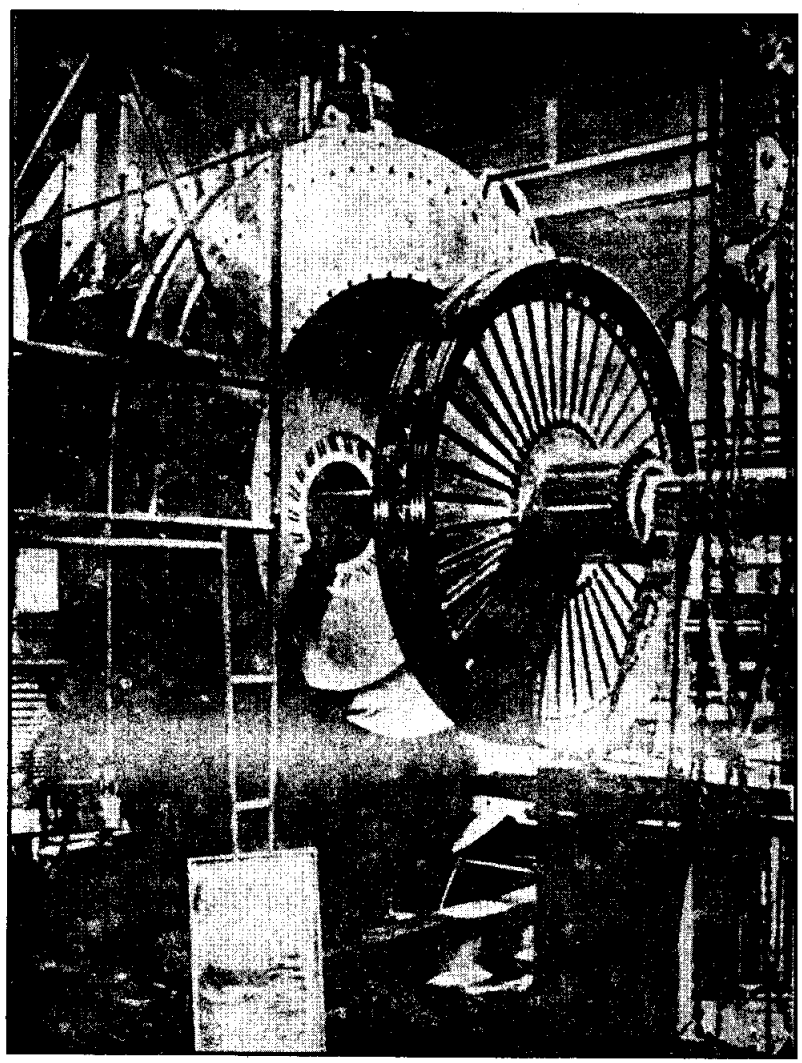


ฮีเลียมเหลวไว้ใช้อาจจะไม่เป็นอุปสรรครุนแรง เมื่อคำนึงถึงการลดความร้อนจากความต้านทานและน้ำหนักของอุปกรณ์ ความยุ่งยากทั้งหลายอยู่ที่การออกแบบระบบการหมุนที่เชื่อถือได้สำหรับมอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งหลาย ปัญหานี้แก้ไขได้บางส่วนและมอเตอร์ตัวนำยวดยิ่งขนาดกว่าสองเมกาวัตต์ได้นำมาใช้งานเป็นผลสำเร็จ โดยปราศจากความยุ่ง

10.8 จานฟาราเดย์และมอเตอร์กระแสตรงชนิดขั้วเดียวกันขนาด 3,250 กำลังม้าอยู่ในระหว่างการก่อสร้าง จานนี้เพิ่งถูกนำมาติดตั้งในครอบรูปวงแหวนซึ่งยึดขดสนามตัวนำยวดยิ่งที่จุ่มอยู่ในฮีเลียมเหลว



ยากนับเป็นเวลานาน นับว่าเป็นไปตามที่ได้คาดไว้เพราะว่าการออกแบบเครื่องจักรเหล่านี้มีความแตกต่างไปจากชนิดซึ่งใช้กันมาตามแบบฉบับ โดยที่เครื่องจักรทั้งหลายนี้ทำงานตามหลักการขั้วเดียวกันซึ่งรู้จักกันดีในชื่อว่า "จานฟาราเดย์" เมื่อทำให้แผ่นกลมทองแดงหมุนไปรอบแกนของมันที่ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก กระแสก็จะไหลจากแกนนี้ไปสู่ขอบวงรอบจานจนสามารถดึงออกมาได้(รูปที่ 10.8) การจัดอุปกรณ์เช่นนี้จึงใช้แทนไดนาโมและการทำให้กลไกผันกลับจะทำหน้าที่เป็นมอเตอร์ไฟฟ้า ข้อได้เปรียบเป็นอย่างมากของเครื่องนี้อยู่ที่ไม่จำเป็นต้องมีสนามที่หมุนไปโดยรอบและสนามแม่เหล็กที่พุ่งผ่านจานนี้สามารถสร้างขึ้นได้โดยขดตัวนำยวดยิ่งที่อยู่นิ่งกับที่ภายในภาชนะสุญญากาศ กระทรวงกลาโหมโดยฝ่ายทหารเรือ

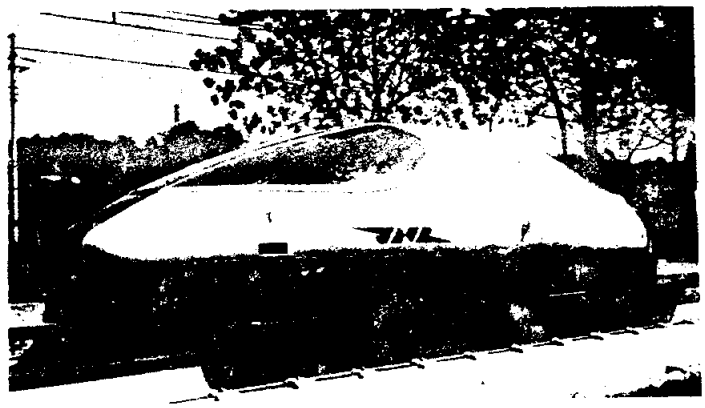


ของอังกฤษได้นำมอเตอร์ตัวแรกของแบบนี้มาขึ้นประจำการและเริ่มใช้งานในต้นค.ศ. 1965 ด้วยต้นแบบขนาด ๒ กำลังม้า(ประมาณ 1,500 วัตต์) ซึ่งเดินเครื่องติดต่อกันมาเป็นเวลา 18 เดือน ในไม่ช้าได้ขยายขนาดขึ้นถึง 50 กำลังม้า(37 กิโลวัตต์) และเพิ่มมอเตอร์อีกตัวหนึ่งขนาด 3,250 กำลังม้า(ประมาณ 2.5 เมกะวัตต์) การประยุกต์ที่เป็นไปได้อย่างชัดเจนสำหรับเครื่องจักรเช่นนี้จะเห็นได้ในเครื่องเดินเรือสมุทร ซึ่งมีเฟืองจักรสำคัญขับดันระบบที่สร้างขึ้นจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวนำยวดยิ่งอย่างสมบูรณ์ ดังที่ได้นำมาใช้งานเมื่อไม่นานมานี้อย่างได้ผล

ในระหว่างนั้นการพัฒนาก็ไม่ได้หยุดนิ่งอยู่กับที่ โดยในอเมริกาได้นำเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้นแบบที่มีตัวหมุนเชิงสภาพนำยวดยิ่งบรรจุด้วยฮีเลียมมาใช้งานอย่างได้ผลดี ความเห็นที่สอดคล้องกันในบรรดาวิศวกรไฟฟ้ากำลังทั้งหลายที่ทำงานในโครงการเหล่านี้ก็คือ เครื่องจักรตัวนำยวดยิ่งปราศจากความยุ่งยากอย่างแท้จริง ทั้งไม่ต้องสงสัยไม่ว่าในกรณีใดๆเลยว่าเครื่องนี้จะสามารถขยายขนาดขึ้นอีกเพื่อใช้ในสถานีไฟฟ้าขนาดใหญ่ทั้งหลายอย่างได้ผลดี อันที่จริง เมื่อได้ความเข้มของไฟฟ้ากำลังเพิ่มขึ้นจากการป้อนพลังงานโดยเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ จะทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงตัวนำยวดยิ่งกลายเป็นเครื่องจักรเพียงแบบเดียวเท่านั้นที่จะจัดการให้พลังงานมากมายนี้ไหลได้อย่างเพียงพอในอีกไม่นานนี้ คาดกันว่าในอัตราที่สูงกว่า 1.5 ล้านกิโลวัตต์โดยประมาณ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงตัวนำยวดยิ่งจะคุ้มค่าอย่างประหยัดกว่าเครื่องจักรที่ใช้กันมาแต่เดิม

แม้ว่าการประยุกต์ในขนาดใหญ่ทั้งหมดนี้ของสภาพนำยวดยิ่งจะดูผิดปกติ แต่ก็มีความเกี่ยวพันบางประการกับเทคโนโลยีทั้งหลายก่อนหน้านี้ ยกเว้นเรื่องที่จะพูดถึงในกรณีล่าสุดเมื่อเร็วๆนี้คือ การขนส่งทางบกอย่างรวดเร็วที่เป็นไปได้ด้วยการยกลอยตัวเชิงแม่เหล็ก การยกลอยตัวโดยอาศัยการผลักดันเชิงไดอาแมกเนติกถูกนำมาสาธิตในห้องปฏิบัติการหลายปีมาแล้ว(รูปที่ 9.2 และ 9.3) แต่การเสนอแนะให้นำไปใช้ยังถูกจำกัดอยู่แต่เพียงที่ใจ

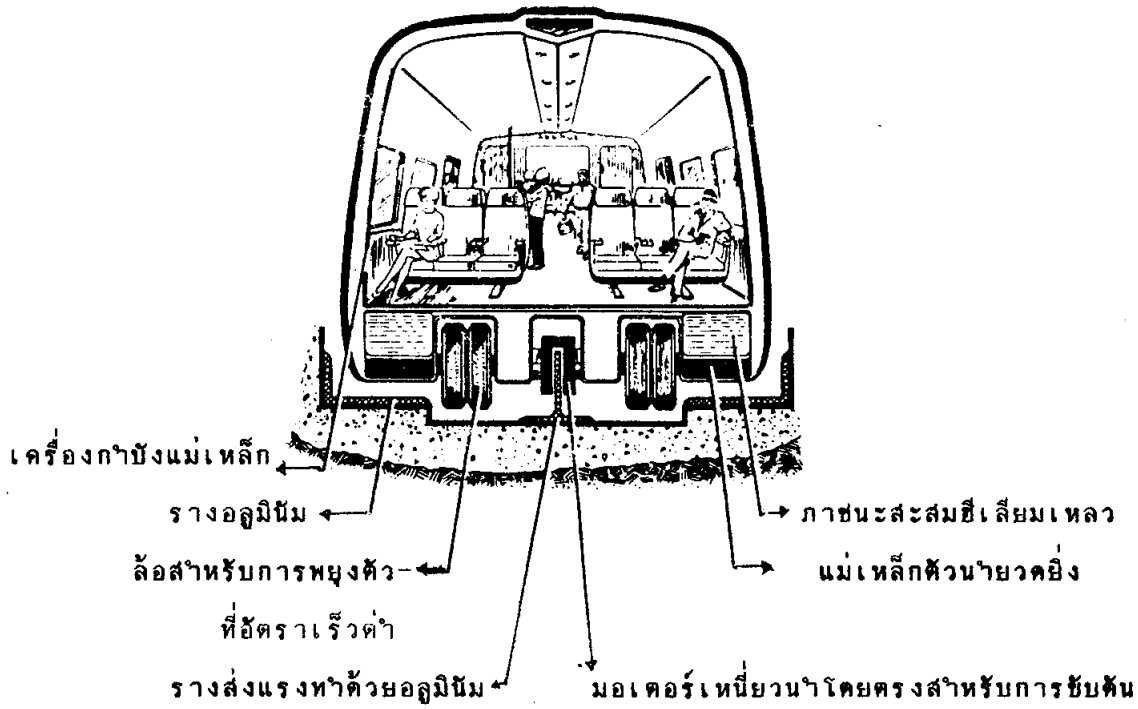
10.9 ยานพาหนะทดลองถูกควบคุมให้ลอยตัวเชิง
แม่เหล็กด้วยขดตัวนำยวดยิ่งสำหรับยกน้ำหนัก



โรสโกปและลูกปืนที่ปราศจากความต้านทานที่อุณหภูมิต่ำ ต่อเมื่อตระหนักกันว่าฐานสำหรับแรงผลักไม่จำเป็นต้องเป็นเชิงตัวนำยวดยิ่งในตัวเอง แต่ภาพเชิงแม่เหล็กสามารถเกิดขึ้นได้ในฐานตัวนำปกติขณะที่แม่เหล็กตัวนำยวดยิ่งเคลื่อนที่อยู่เหนือมันด้วยความเร็วสูง เรื่องทั้งหมดก็จะเปลี่ยนไป ดังจะเห็นว่าในไม่กี่ปีที่ผ่านมาได้สร้างตัวแบบและยานพาหนะต้นแบบขนาดเท่าของจริงหลายคัน แต่ในที่นี้เราไม่สามารถดำเนินเรื่องให้ลึกซึ้งถึงความละเอียดอ่อนต่างๆในการออกแบบของทั้งยานพาหนะนั้น หรือกรรมวิธีของการผลักดันซึ่งทำได้โดยอาศัยสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่เรียกว่า มอเตอร์เชิงเส้น ยานพาหนะเหล่านี้เริ่มต้นเคลื่อนบนล้อจนกระทั่งมีความเร็วสูงพอที่ขดสนามตัวนำยวดยิ่งจะยกให้ลอยขึ้นจากพื้นดิน โดยที่มันลอยอยู่ได้ในเชิงแม่เหล็ก(รูปที่ 10.9)

สำหรับการเดินทางกันเป็นจำนวนมาก ระหว่างใจกลางเมืองที่แออัดห่างกันไม่กี่ร้อยไมล์ จะรู้สึกกันเสมอๆว่าการขนส่งทางบกอาจจะแก้ปัญหานี้ได้ในอุดมคติ ถ้าเพียงแต่อัตรา

10 10 การศึกษาต้นแบบสำหรับรถไฟความเร็วสูงที่ลอยตัวได้ในเชิงสภาพนำยวดยิ่ง



ของเที่ยวการเดินทางสามารถทำให้เพิ่มขึ้นด้วยการออกเดินรถให้ถี่ขึ้น และเหนือสิ่งอื่นใดจะต้องมีอัตราเร็วที่สูงขึ้นด้วย ย่านระหว่างเมืองสองแห่งของโตเกียว-โยโกฮามา และเกียวโต-โอซากา ซึ่งแต่ละแห่งมีพลเมืองกว่าสิบล้านคนที่เดียวและห่างกัน 350 ไมล์ นับเป็นตัวอย่างที่ถือเป็นแบบฉบับได้ ทั้งไม่น่าประหลาดใจว่าญี่ปุ่นได้นำหน้าไปแล้วในด้านรถไฟด่วน รถไฟชั้นเยี่ยมของญี่ปุ่นชื่อ *ชินกันเซ็น* ออกจากสถานีทุกๆ 20 นาที ครอบคลุมระ

ยะทางนี้ภายในเวลากว่าสามชั่วโมงเศษเท่านั้น สามารถขนส่งผู้โดยสารกว่าครึ่งล้านคนต่อวัน อย่างไรก็ตาม วิศวกรญี่ปุ่นทั้งหลายรู้สึกว่าด้วยอัตราการเดินทางขนาด 130 ไมล์ต่อชั่วโมงนี้นับว่าใกล้เคียงกับขีดจำกัดของความปลอดภัย แม้ว่ารถไฟประเภทนี้จะถูกควบคุมด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์อย่างสิ้นเชิงแล้วก็ตาม ภายหลังจากการตรวจสอบระบบต่างๆแล้ววิศวกรเหล่านั้นจึงได้ตัดสินว่า ยานลอยตัวได้ในเชิงแม่เหล็กซึ่งใช้การผลักเชิงด้วนำยวดยิ่ง จะช่วยสนองตอบต่อการแก้ปัญหาการขนส่งมวลชนได้อย่างสมบูรณ์ ข้อได้เปรียบสำคัญของรถไฟเช่นนี้ประการหนึ่งคือ ควบคุมการนำร่องได้อย่างปลอดภัย ขณะที่การสัมผัสโดยตรงใดๆกับพื้นดินจะถูกกำจัดออกไป(รูปที่ 10.10)

จากเรื่องราวของการประยุกต์ในขนาดใหญ่ของสภาพตัวนำยวดยิ่ง จึงสรุปได้ว่าเรากำลังเผชิญหน้าอย่างกระทันหันกับศักยภาพเชิงเทคโนโลยีใหม่อย่างมโหฬาร ซึ่งตั้งอยู่บนรากฐานของระดับอุณหภูมิต่ำที่เข้าใกล้ศูนย์สัมบูรณ์ โดยที่เมื่อสิบปีก่อนหน้าการจัดพิมพ์ครั้งแรกของหนังสือนี้ไม่เคยคาดฝันแต่อย่างใด ขณะนี้เรายืนอยู่ตรงขีดเริ่มเปลี่ยนของการค้นพบอย่างมหาศาล ซึ่งไม่ได้เป็นเรื่องทางวิศวกรรมอีกต่อไป ปัญหาเชิงพัฒนาการที่สำคัญทั้งปวงสามารถแก้ไขได้แล้วอย่างแท้จริงและต้นแบบก็ได้ถูกทดสอบ ขั้นตอนต่อไปจึงขึ้นอยู่กับฝ่ายการคลังต่างๆของรัฐบาลทั้งหลาย และความพร้อมของฝ่ายต่างๆเหล่านี้ที่จะลงทุนจำนวนมหาศาล สภาพนำยวดยิ่งไม่ได้เป็นปัญหาเชิงวิทยาศาสตร์อีกต่อไป ดังนั้น ขณะนี้จึงกลายเป็นหนึ่งในบรรดาประเด็นของการดำเนินนโยบายทางการเมืองด้านเศรษฐกิจไปเสียแล้ว