บทที่ ๒

กายวิภาคและสรีรวิทยาของหัวใจที่เป็นพื้นฐานของการนำเอาเครื่องควบคุมจังหวะการเต้นของหัวใจไปใช้งาน

๒.๑ การทำงานของระบบการไหลเวียนเลือด (๑๐)

ระบบการไหลเวียนเลือดอาศัยหัวใจเป็นตัวสูบฉีดเลือดไปเลี้ยงส่วนต่าง ๆ ของร่างกาย ประกอบด้วย ๒ ระบบ คือ

๑) Systemic circulation

๒) Pulmonary circulation

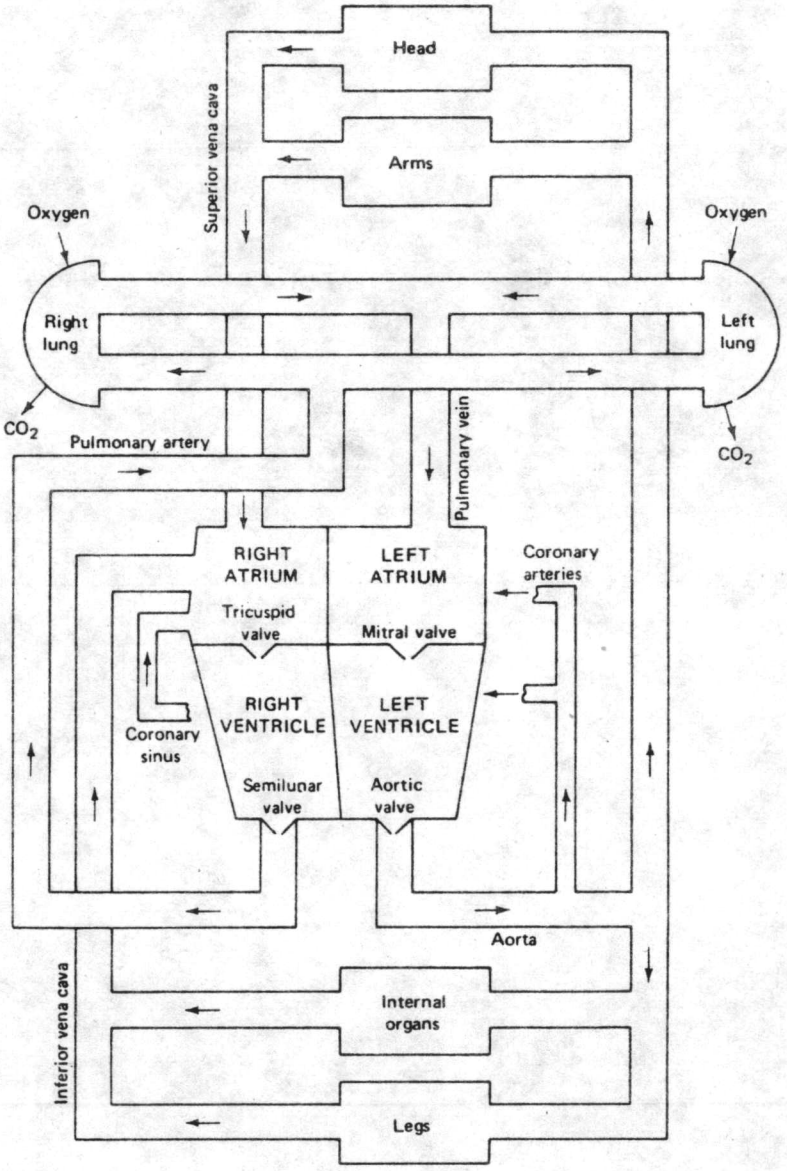
๒.๑.๑ Systemic circulation

การทำงานของระบบนี้เริ่มที่เวนตริเคิลซ้าย เลือดจะถูกบีบตัวจากเวนตริเคิลซ้ายผ่านหลอดเลือดเอออร์ต้า (Aorta) ไปสู่หลอดเลือดแดงไปเลี้ยงส่วนต่าง ๆ ของร่างกาย พาของเสียกลับเข้าทางหลอดเลือดดำเข้าสู่เอเทรียมขวา หัวใจซีกซ้ายจะทำงานหนักเพราะเลือดจะต้องถูกส่งไปเลี้ยงส่วนต่าง ๆ ของร่างกาย หัวใจซีกซ้ายทำหน้าที่เป็นปั๊มความดัน (pressure pump) กล้ามเนื้อหัวใจซีกซ้ายจะแข็งแรงกว่ากล้ามเนื้อหัวใจซีกขวาและมีขนาดใหญ่กว่า

๒.๑.๒ Pulmonary circulation

การทำงานของระบบนี้เริ่มจากเอเทรียมขวาส่งเลือดดำให้เวนตริเคิลขวา นำเลือดเข้าสู่ปอดเพื่อแลกเปลี่ยนออกซิเจน หลังจากนั้นจะนำเลือดแดงเข้าสู่หัวใจทางเอเทรียมซ้าย เป็นการครบวงจรการทำงานของระบบการไหลเวียนเลือด หัวใจซีกขวาจะทำงานเป็นปั๊มปริมาตร (volume pump)

ในรูปที่ ๒.๑ แสดงระบบการไหลเวียนเลือดทั้งระบบ เลือดจะไหลเข้าสู่เอเทรียมขวาสองทางคือทางหลอดเลือดดำ Superior vena cava และ inferior vena cava เลือดจะรวมตัวในเอเทรียมขวา เมื่อเลือดเข้าสู่เอเทรียมขวาเต็มจะเกิดการบีบตัวของเอเทรียมขวา ดันเลือดผ่านลิ้นหัวใจไตรคัสปิด (Tricuspid valve) ลงสู่เวนตริเคิลขวา เลือดจะไหลเข้าสู่เวนตริเคิลขวา จนความดันเลือดมากกว่าความดันเลือดใน เอเทรียม



รูปที่ ๒.๑ แสดงระบบการไหลเวียนเลือด

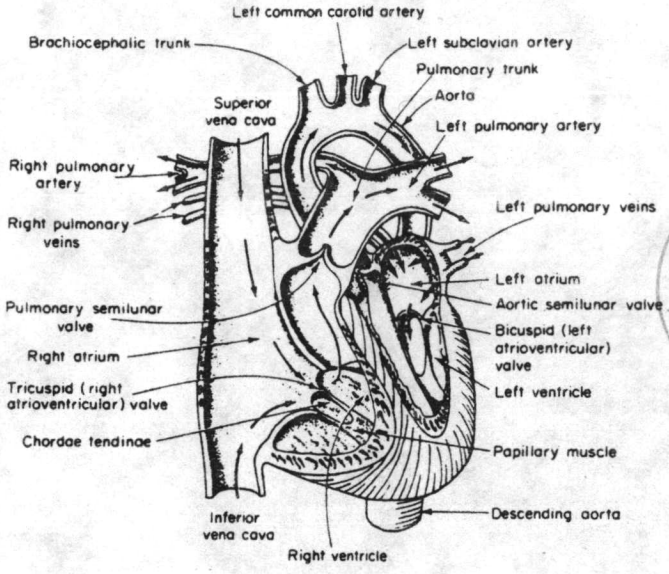
ขวา ลิ้นหัวใจไตรคัสปิด (Tricuspid valve) จะปิด ขณะเดียวกันความดันเลือดในเวนตริเคิลขวาจะดันเลือดให้ลิ้นหัวใจพูลโมนารีย์ (Pulmonary valve) เปิด เลือดจะไหลไปทางหลอดเลือด Pulmonary Artery เข้าสู่ปอด เพื่อแลกเปลี่ยนเอาอ๊อกซิเจนและขับของเสียคาร์บอนไดอ๊อกไซด์ทิ้ง เมื่อเลือดได้รับอ๊อกซิเจนจะไหลเข้าสู่หัวใจทางหลอดเลือดPulmonary vein เข้าทางเอเทรียมซ้าย เอเทรียมซ้ายจะดันเลือดผ่านลิ้นหัวใจไมทรัล (Mitral valve หรือ Bicuspid valve) เข้าสู่เวนตริเคิลซ้าย กล้ามเนื้อหัวใจเวนตริเคิลซ้ายจะบีบตัวทำให้ลิ้นหัวใจไมทรัลปิด ขณะเดียวกันจะดันลิ้นหัวใจเอออร์ติค (Aortic Valve) เปิด เลือดจะพุ่งออกจากเวนตริเคิลซ้ายสู่หลอดเลือดเอออร์ต้า (Aorta) ไปเลี้ยงส่วนต่าง ๆ ของร่างกายแล้วย้อนกลับเข้าสู่เอเทรียมขวาอีกครั้ง การทำงานของหัวใจซีกซ้ายและขวาจะทำงานพร้อมกัน เวนตริเคิลซ้ายจะส่งเลือดสู่หลอดเลือดเอออร์ต้า (Aorta) และเวนตริเคิลขวาจะส่งเลือดสู่หลอดเลือดพูลโมนารีย์อาร์เทอรีย์ (Pulmonary Artery) เลือดในหลอดเลือดเอออร์ต้า (Aorta) จะส่งไปเลี้ยงส่วนต่าง ๆ ของร่างกายโดยผ่านทาง Capillaries เข้าสู่เซล จากนั้นจะย้อนกลับเข้าทางหลอดเลือดดำSuperior vena cava และ inferior vena cava สู่เอเทรียมขวา การไหลเวียนเลือดจะดำเนินไปเช่นนี้ตลอดเวลา โดยอาศัยหัวใจเป็นตัวส่งดันเลือดไปเลี้ยงส่วนต่าง ๆ ของร่างกาย

๒.๒ โครงสร้างของหัวใจ (๑๐)(๑๑)

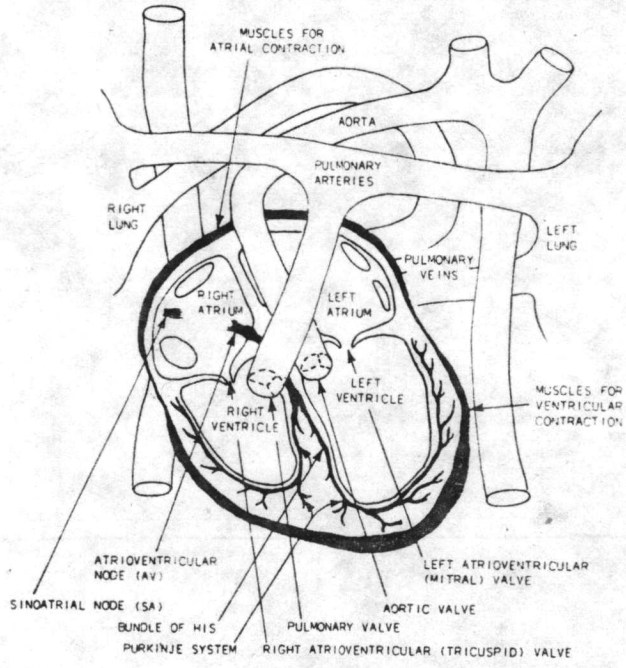
หัวใจประกอบด้วย ๔ ห้อง คือ เอเทรียมขวา เอเทรียมซ้าย เวนตริเคิลขวา และเวนตริเคิลซ้าย ดังแสดงในรูป ๒.๒ (ก) และ ๒.๒ (ข) หัวใจเป็นอวัยวะประกอบด้วยกล้ามเนื้อหลายชนิดตั้งอยู่ในหน้าอกด้านซ้าย ส่วนปลายของหัวใจ (Apex) มีทิศชี้ลงไปทางซ้าย มีเส้นเลือดผ่านหัวใจทั้งสี่ห้อง หัวใจซีกซ้ายและซีกขวาถูกกั้นด้วยผนังกั้น (Septum) บริเวณรอบหัวใจด้านนอกถูกหุ้มด้วยเนื้อเยื่อหุ้มหัวใจเพอริคาเดียม (pericardium) ลักษณะความแตกต่างของหัวใจทั้งสี่ห้องประกอบด้วย

๒.๒.๑ เอเทรียมขวา

ตั้งอยู่บริเวณที่หลอดเลือดดำ superior vena cava และ inferior vena cava มาบรรจบกัน หน้าที่หลักของเอเทรียมขวาเป็นที่รับเลือดเพื่อส่งผ่านไปสู่เวนตริเคิลขวา รวมทั้งบีบตัวเพื่อส่งเลือดเข้าสู่เวนตริเคิลขวาเช่นกัน ตรงบริเวณเอเทรียมขวาใกล้กับจุดบรรจบ



(ก)



(ข)

รูป ๒.๒ ก. ลักษณะโครงสร้างภายในหัวใจและหลอดเลือด

๒.๒ ข. ลักษณะภายในของหัวใจและลิ้นหัวใจรวมทั้งหลอดเลือด

ของหลอดเลือดดำ superior vena cava และinferior vena cava เป็นที่ตั้งของกลุ่มเซลชนิดพิเศษ ที่สามารถกำเนิดคลื่นกระทบ(impulse wave)มาควบคุมจังหวะการเต้นของหัวใจ กลุ่มเซลชนิดพิเศษเรียกว่าSinoatrial-Node (S.A.node) ลักษณะของเซลจะมีขนาดใหญ่กว่าเซลกล้ามเนื้อหัวใจทั่วไป มีเส้นประสาทจากระบบประสาทอัตโนมัติมาเลี้ยงมากมาย กลุ่มเซลชนิดพิเศษนี้จะเป็นตัวกำหนดจังหวะการเต้นของหัวใจ(cardiac pacemaker) ในภาวะปกติ

๒.๒.๒ เวนตริเคิลขวา

ตำแหน่งของเวนตริเคิลขวาอยู่ต่ำลงมาจากเอเทรียมขวา หัวใจทั้งสองติดต่อกันทางลิ้นหัวใจไตรคัสปิด (Tricuspid valve) เวนตริเคิลขวาจะรับเลือดจากเอเทรียมขวาเพื่อส่งไปยังปอด กล้ามเนื้อหัวใจเวนตริเคิลขวาจะหนากว่ากล้ามเนื้อหัวใจเอเทรียมขวา เพราะต้องทำงานหนักกว่า

๒.๒.๓ เอเทรียมซ้าย

เป็นส่วนที่รับเลือดที่ทำการแลกเปลี่ยนอ๊อกซิเจนและคาร์บอนไดอ๊อกไซด์เข้ามา เพื่อส่งต่อไปยังเวนตริเคิลซ้าย ขนาดของเอเทรียมซ้ายจะมีขนาดเล็กกว่าเอเทรียมขวา ผนังภายในหัวใจค่อนข้างเรียบ เมื่อรับเลือดเข้ามาจนเต็มก็จะบีบตัวส่งเลือดเข้าไปยังเวนตริเคิลซ้าย

๒.๒.๔ เวนตริเคิลซ้าย

เป็นหัวใจห้องที่ต้องทำงานหนัก เพราะจะต้องสูบฉีดโลหิตไปเลี้ยงส่วนต่าง ๆ ของร่างกาย เวนตริเคิลซ้ายติดต่อกับเอเทรียมซ้ายโดยผ่านทางลิ้นหัวใจไมทรัล (Mitral valve) เวนตริเคิลซ้ายประกอบด้วยกล้ามเนื้อหัวใจที่แข็งแรง เพราะความดันภายในเวนตริเคิลซ้ายสูงมาก เพื่อจะได้มีแรงดันส่งเลือดไปเลี้ยงส่วนต่าง ๆ ของร่างกายได้ทั่วถึง กล้ามเนื้อหัวใจส่วนนี้จึงหนาที่สุด โดยมีส่วนหนาประมาณ ๓-๔ เท่าของกล้ามเนื้อหัวใจเอเทรียมขวา จากที่กล่าวมานี้หัวใจยังประกอบด้วยเนื้อเยื่อต่าง ๆ ดังนี้

เพอริคาเดียม (Pericardium)

เป็นเยื่อที่หุ้มอยู่รอบหัวใจด้านนอก ประกอบด้วยเยื่อหุ้มชั้นนอกและเยื่อหุ้มชั้นใน

มัยโอคาเดียม (Myocardium)

เป็นกล้ามเนื้อหัวใจที่ประกอบด้วยเนื้อเยื่อ ๓ ชนิด คือ

๑) กล้ามเนื้อที่ทำหน้าที่หดตัวได้แก่ Atrial muscle และ Ventricular muscle

๒) Bundle of His เป็นกลุ่มเซลที่มีลักษณะพิเศษคือไวต่อการกระตุ้นและนำไฟฟ้า

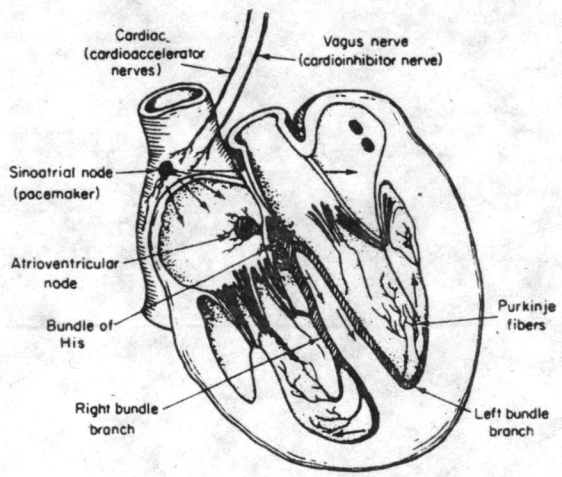
๓) Pacemaker cell เป็นกลุ่มเซลที่สามารถกำเนิดคลื่นกระทบ (impulse wave) ได้เองซึ่งประกอบด้วย Sinoatrial node (S.A.node) และ Atrioventricular node (A-V node)

เอนโดคาเดียม (Endocardium)

เป็นเนื้อเยื่อบาง ๆ ที่หุ้มอยู่ชั้นในสุดของผนังห้องหัวใจ ทำหน้าที่ป้องกันอันตรายให้กับกล้ามเนื้อหัวใจที่เกิดจากสารแปลกปลอมต่าง ๆ ที่มากับเลือด

๒.๓ ระบบสื่อนำ (๑๐)(๑๒)(๑๓)

ระบบสื่อนำเป็นเนื้อเยื่อที่มีลักษณะกึ่งเซลประสาทและกล้ามเนื้อทำหน้าที่นำคำสั่งไปยังส่วนต่าง ๆ ของหัวใจ ในรูป ๒.๓ แสดงระบบสื่อนำของหัวใจ ระบบสื่อนำประกอบด้วย



รูปที่ ๒.๓ ระบบสื่อนำของหัวใจ

๒.๓.๑ Sinoatrial node (S.A.node)

เป็นจุดเริ่มของการเกิดพลังกระทบที่จะทำให้กล้ามเนื้อหัวใจทำงานบีบตัว S.A. node จะเป็นตัวควบคุมจังหวะการเต้นของหัวใจ เป็นกลุ่มเซลที่อยู่บริเวณเอเทรียมขวาใกล้กับรูเปิดของหลอดเลือดดำ Superior vena cava

๒.๓.๒ Atrioventricular node (A-V node)

อยู่ตรงบริเวณรอยต่อของเวนตริเคิลซ้ายและเอเทรียมซ้าย แต่อยู่เหนือลิ้นหัวใจไตรคัสปิด (Tricuspid Valve) หน้าที่ของ A-V node จะนำพลังกระทบจากเอเทรียมสู่เวนตริเคิล

๒.๓.๓ AV Bundle (Bundle of His)

เป็นเนื้อเยื่อที่อยู่ต่อมาจาก A-V node ซึ่งจะทอดไปตามผนังกั้น (Septum) อยู่ก่อนถึงผนังกั้นเวนตริเคิลซ้ายและขวา ทำหน้าที่เป็นทางที่พลังกระทบจะผ่านลงสู่ Bundle Branch

๒.๓.๔ Bundle Branch

เป็นเนื้อเยื่อที่แยกออกมาจาก AV Bundle เป็นแขนงซ้ายและขวา Bundle Branch แขนงซ้ายมีลักษณะสั้นแต่กว้าง ยาวทอดตามผนังเวนตริเคิลซ้าย ส่วน Bundle Branch แขนงขวามีลักษณะยาวทอดลงตามผนังเวนตริเคิลขวา

๒.๓.๕ Purkinje Fiber

เป็นส่วนต่อมาจาก Bundle Branch แตกสาขาแยกตามเข้าไปในเอนโดคาเดียมลงสู่กล้ามเนื้อหัวใจเวนตริเคิล

๒.๔ การนำพลังไฟฟ้าของเซล (๑๐)(๑๔)(๑๕)

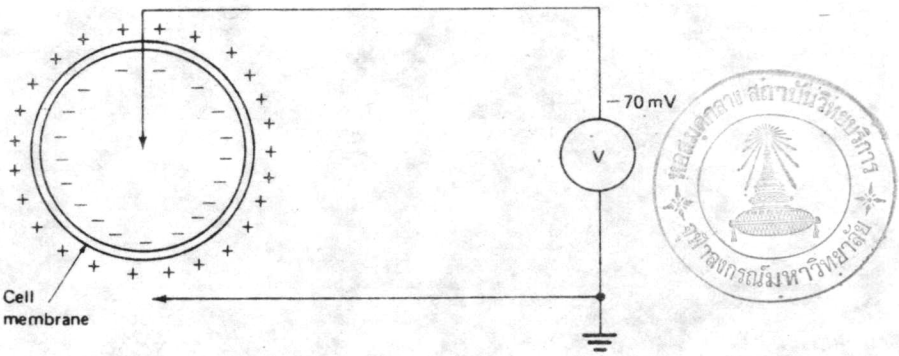
เซลบางชนิดในร่างกาย เช่น เซลกล้ามเนื้อ เซลประสาท มีลักษณะพิเศษที่ยอมให้สารบางอย่างผ่านเข้าไปในเซลได้ รอบ ๆ เซลจะประกอบด้วยของเหลวที่มีไอออนทำให้มีสภาพเป็นตัวนำไฟฟ้า ไอออนที่สำคัญได้แก่โซเดียม (Na^+) โปแตสเซียม (k^+) และคลอไรด์ (cl^-) เซลจะยอมให้โปแตสเซียมและคลอไรด์ผ่านเข้าไปได้ แต่ไม่ยอมให้โซเดียมผ่านเข้าไป ทำให้เกิดความไม่สมดุลย์ทางประจุไฟฟ้า ประกอบกับความเข้มของสารภายในและภายนอกเซลไม่เท่ากัน มีผลทำให้เกิดสภาพ

- ความเข้มข้นของโซเดียมภายนอกเซลมากกว่าภายในเซล ทำให้โซเดียมภายนอกเซลมีแรงดันไฟฟ้าเป็นบวกมากกว่าโซเดียมภายในเซล

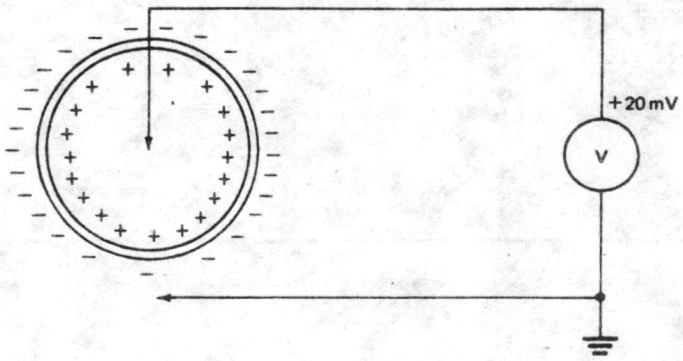
- แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลย์กัน โปแตสเซียมจะพยายามวิ่งเข้าไปในเซลเพื่อรักษาการสมดุลย์ของประจุ ทำให้ความเข้มข้นของโปแตสเซียมภายในเซลมีมากกว่าภายนอกเซล การที่โปแตสเซียมเข้าไปในเซลก็ยังไม่สามารถรักษาการสมดุลย์ของประจุได้ ทำให้เกิดความต่างศักย์ขึ้นระหว่างภายนอกเซลกับภายในเซล เกิดเป็นแรงดันไฟฟ้าขณะพัก ในสภาวะปกติแรงดันไฟฟ้าขณะพักมีค่าประมาณ -๖๐ ถึง -๑๐๐ มิลลิโวลต์ โดยภายในเซลจะมีแรงดันไฟฟ้าเป็นลบมากกว่าภายนอกเซล สภาพที่เกิดแรงดันไฟฟ้าขณะพักนี้เซลจะอยู่ในสภาพโปลาไรซ์ ดังแสดงในรูปที่ ๒.๔

ผนังเซลจะถูกกระตุ้นจากพลังงานภายนอก หรือปฏิกริยาเคมีไฟฟ้าทำให้เกิดคุณสมบัติของผนังเซลเปลี่ยนแปลงไป โซเดียมจะวิ่งเข้าไปในเซลได้เพื่อรักษาสภาพสมดุลย์ทางไฟฟ้า ขณะเดียวกันโปแตสเซียมจะแพร่กระจายออกมานอกเซล แต่การเคลื่อนที่ของโซเดียมจะเร็วกว่าโปแตสเซียมเพราะเมื่อโซเดียมเข้าไปในเซลจะถูกดูดจากคลอไรด์ซึ่งเป็นประจุลบ ส่วนโปแตสเซียมนั้นเคลื่อนที่ได้โดยการแพร่เท่านั้น ทำให้เกิดความไม่สมดุลย์ทางไฟฟ้าขึ้นโดยภายในเซลจะมีสภาพทางไฟฟ้าเป็นบวกมากกว่าภายนอกเซล แรงดันไฟฟ้านี้เป็นแรงดันไฟฟ้าขณะทำงานในสภาพปกติมีค่าอยู่ประมาณ +๒๐ มิลลิโวลต์ สภาพของเซลที่เกิดแรงดันไฟฟ้าขณะทำงานจะอยู่ในสภาพดีโปลาไรซ์ ดังแสดงในรูป ๒.๕

เมื่อเซลอยู่ในสภาพดีโปลาไรซ์ เซลจะพยายามทำให้กลับสภาพเดิมโดยการพยายามขับโซเดียมออกมาภายนอกเซล ให้ภายในเซลมีสภาพเป็นลบมากกว่าภายนอกเซล ลักษณะที่เซลกลับสู่สภาวะขณะพักเป็นสภาพรีโปลาไรซ์ซึ่งเมื่อเซลกลับสู่สภาวะขณะพัก เซลพร้อมที่จะเกิดแรงดันไฟฟ้าขณะทำงานอีกเมื่อผนังเซลมีการเปลี่ยนแปลง



รูปที่ ๒.๔ ภาคตัดขวางของเซลขณะพัก เซลอยู่ในสภาวะโปลาไรซ์

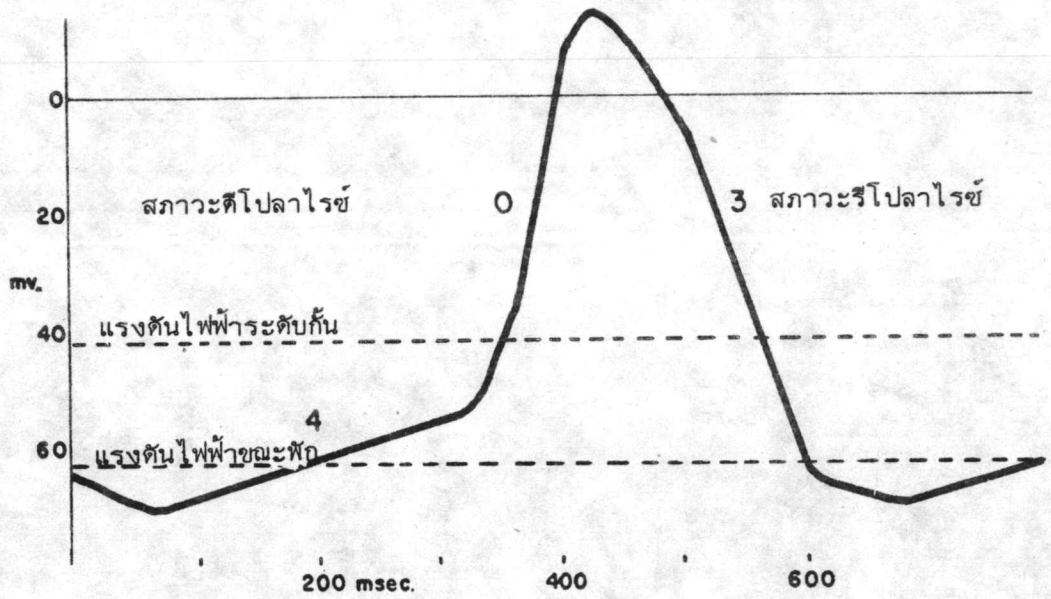


รูปที่ ๒.๕ ภาคตัดขวางของเซลขณะทำงาน เซลอยู่ในสภาวะดีโปลาไรซ์

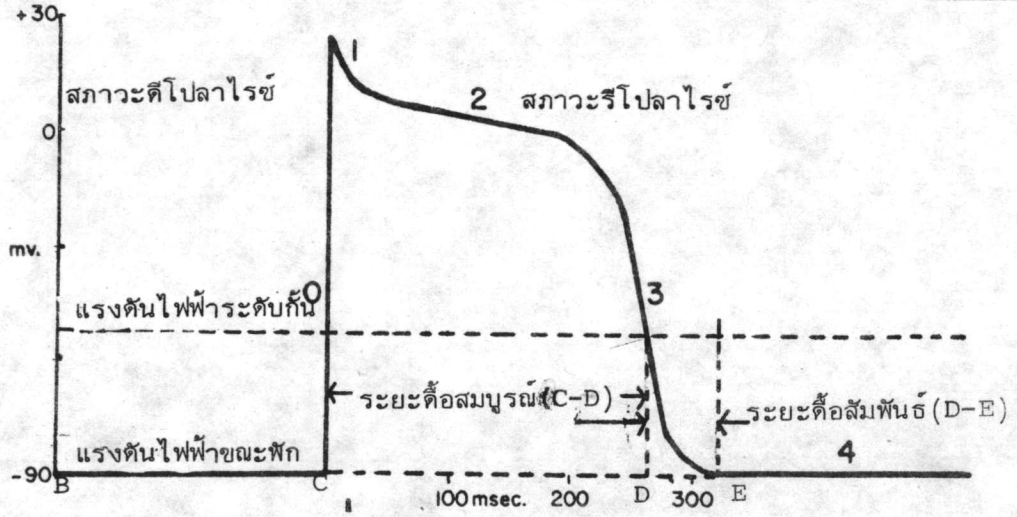
007148

๒.๕ การนำพลังไฟฟ้าของระบบสื่อนำ (๑๒)(๑๔)(๑๖)

สำหรับเซลกล้ามเนื้อหัวใจก็เช่นเดียวกันกับเซลอื่นๆ สามารถเกิดแรงดันไฟฟ้าขณะทำงานได้ แรงดันไฟฟ้าขณะทำงานภายในเซลของหัวใจเกิดขึ้นหลายแห่ง เช่น S.A.node, เอเทรียม, เวนตริเคิล เป็นต้น แต่แรงดันไฟฟ้าขณะทำงานตรงบริเวณ S.A.node เกิดเร็วกว่าเซลบริเวณอื่น ทั้งนี้เพราะเนื่องจากแรงดันไฟฟ้าขณะพักที่ S.A.node มีค่าประมาณ -๕๕ ถึง -๖๐ มิลลิโวลต์ โดยมีแรงดันไฟฟ้าระดับกันประมาณ -๓๕ ถึง -๔๕ มิลลิโวลต์ ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าขณะพักตรงบริเวณอื่น เช่น เวนตริเคิลมีค่าประมาณ -๙๐ มิลลิโวลต์ โดยมีแรงดันไฟฟ้าระดับกันประมาณ -๕๕ มิลลิโวลต์ ดังแสดงในรูป ๒.๖ เมื่อผนังเซลที่ S.A.nodeมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าจะค่อยๆลดลงจนถึงแรงดันไฟฟ้าระดับกัน ซึ่งจะทำให้เซลเกิดแรงดันไฟฟ้าขณะทำงานก่อนเซลอื่นๆในหัวใจ แรงดันไฟฟ้าขณะทำงานนี้จะแพร่ไปตามกล้ามเนื้อหัวใจอย่างรวดเร็วทำให้หัวใจบีบตัวเป็นจังหวะ การเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าที่ S.A.node แสดงในรูป ๒.๖ (ก) พบว่าแรงดันไฟฟ้าขณะพักของเซลที่ S.A.node มีค่า -๖๐ มิลลิโวลต์ เซลจะเกิดแรงดันไฟฟ้าขณะทำงานเมื่อแรงดันไฟฟ้าขณะพักเปลี่ยนแปลงถึงแรงดันไฟฟ้าระดับกัน เซลจะเกิดดีโปลาไรซ์ขึ้น (เฟส ๐) การเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าเป็นไปอย่างช้าๆ กินเวลา ๕๐-๓๐๐ มิลลิวินาที แรงดันไฟฟ้าภายในเซลค่อยลดลงเป็นบวก หลังจากนั้นเซลจะกลับสู่สภาวะขณะพัก เกิดการรีโปลาไรซ์ (เฟส ๓) ภายในเซลจนในที่สุดแรงดันไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงลงสู่สภาวะแรงดันไฟฟ้าขณะพัก (เฟส ๔) ซึ่งแรงดันไฟฟ้าขณะพักมีค่าไม่อยู่กับที่ถ้าเกิดมีการดีโปลาไรซ์ภายในเซลจนแรงดันไฟฟ้าถึงระดับกันก็จะเกิดแรงดันไฟฟ้าขณะทำงานอีก โดยปกติกลุ่มเซลที่ S.A.node จะเกิดแรงดันไฟฟ้าขณะทำงานในอัตรา ๗๐-๘๐ ครั้งต่อนาที ในขณะที่เอเทรียมและเวนตริเคิลเกิดแรงดันไฟฟ้าขณะทำงานในอัตรา ๒๐-๔๐ ครั้งต่อนาที และ ๒๐-๓๐ ครั้งต่อนาที ตามลำดับ ในรูป ๒.๖ (ข) เป็นการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าภายในเซลที่เวนตริเคิล แรงดันไฟฟ้าขณะพักของเซลเวนตริเคิล มีค่า -๙๐ มิลลิโวลต์ มีแรงดันไฟฟ้าระดับกันประมาณ -๕๕ มิลลิโวลต์ ในช่วงเฟส ๐ เป็นระยะที่ภายในเซลเกิดดีโปลาไรซ์อย่างรวดเร็ว ทำให้แรงดันไฟฟ้าภายในเซลเปลี่ยนจากลบเป็นบวก ประมาณ +๒๐ มิลลิโวลต์ หลังจากนั้นเซลจะเข้าสู่สภาวะรีโปลาไรซ์ในช่วงเฟส ๑,๒,๓, เกิดช่วงเวลาดื้อสมบูรณ์ (Absolute refractory period) ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่เซลไม่ตอบสนองต่อสัญญาณกระตุ้นใดๆทั้งสิ้น ช่วงเวลาดื้อสมบูรณ์นี้นับจากการเกิดรีโปลาไรซ์จนแรงดันไฟฟ้าภายในเซลเป็นลบถึงค่าแรงดันไฟฟ้าระดับ



ก) การเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าที่ S.A.node



ข) การเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าที่เวนตริเคิล

รูป ๒.๖ แสดงการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าที่ส่วนต่าง ๆ ของหัวใจ

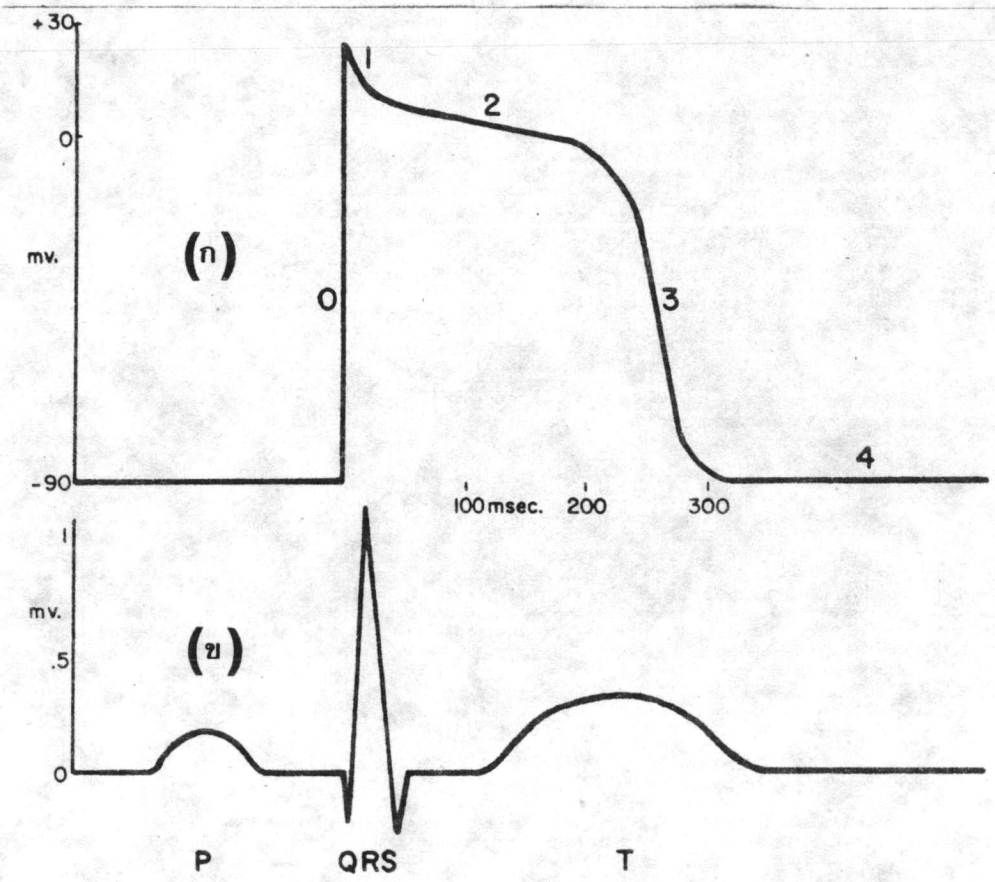
ก้น (ช่วงจาก Cถึง D) หลังจากนั้นแรงดันไฟฟ้าจะเป็นลบถึงค่าแรงดันไฟฟ้าขณะพัก (ช่วงจาก D ถึง E) ซึ่งช่วงเวลานี้เป็นช่วงเวลาดื้อสัมพันธ์ (Relative refractory period) เซลสามารถตอบสนองต่อการกระตุ้นของสัญญาณใด ๆ ได้ถ้ามีขนาดแรงพอ หลังจากช่วงเวลาดื้อสัมพันธ์เซลจะกลับสู่สภาวะแรงดันไฟฟ้าขณะพัก (เฟส ๔) การเกิดรีโปลาไรซ์ภายในเซลเวนตริเคิล ใช้เวลานานประมาณ ๒๐๐-๓๐๐ มิลลิวินาที ซึ่งอยู่ช่วงเวลาดื้อสมบูรณ์ การมีระยะดื้อเป็นคุณสมบัติของหัวใจที่ป้องกันมิให้เต้นเร็ว เพราะการที่หัวใจเต้นเร็วเกินไปจะทำให้ไม่สามารถบีบเลือดออกจากหัวใจได้เลย

การเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าในส่วนต่าง ๆ ของหัวใจในรูป ๒.๖ เป็นการวัดการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าภายในเซล นอกจากนี้สามารถบันทึกภาพการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าจากภายนอกเซลซึ่งเป็นการวัดผลรวมของการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าของเซลหัวใจทั้งหมด ดังแสดงในรูป ๒.๗ ซึ่งได้ทำการเปรียบเทียบรูปร่างของการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขณะทำงานที่เซลเวนตริเคิลกับรูปคลื่นไฟฟ้าหัวใจที่บันทึกจากผิวหนัง (ELECTROCARDIOGRAM) คลื่นไฟฟ้าหัวใจที่บันทึกได้จากผิวหนังเมื่อเปรียบเทียบกับแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงภายในเซลเวนตริเคิลแสดงให้เห็นถึงสภาวะดีโปลาไรซ์และรีโปลาไรซ์ของเซลหัวใจโดย

P-wave	เป็นช่วงเวลาที่ใช้ในการดีโปลาไรซ์เซลเอเทรียมทั้งสองข้าง
QRS-Complex	เป็นช่วงเวลาที่ใช้ในการดีโปลาไรซ์เวนตริเคิลทั้งสองข้าง
T-wave	เป็นช่วงเวลาที่เซลเวนตริเคิลรีโปลาไรซ์เพื่อทำให้แรงดันไฟฟ้าของเซลกลับสู่สภาวะขณะพัก

ในการทำงานครบ ๑ รอบของหัวใจบันทึกคลื่นไฟฟ้าหัวใจได้ในรูป ๒.๗ (ข) ซึ่งมีช่วงเวลาการเกิดคลื่น PQRST และขนาดของแรงดันไฟฟ้า ดังนี้[๑๐]

<u>ขนาดแรงดันไฟฟ้า</u>	P-wave	.๒๕	มิลลิโวลต์
	R-wave	๑.๖	มิลลิโวลต์
	Q-wave	๒๕%	ของ R wave
	T-wave	.๑-.๕	มิลลิโวลต์
<u>ช่วงเวลาระหว่างคลื่น</u>	P-R	.๑๒-.๒	วินาที
	Q-T	.๓๕-.๔๔	วินาที



รูป ๒.๗ (ก) การเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าภายในเซลเวนตริเคิล

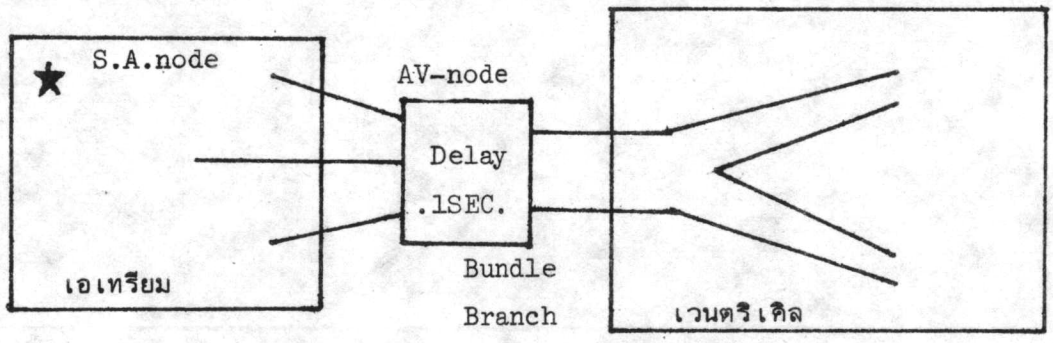
(ข) การเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าของเซลหัวใจทั้งหมด บันทึกจากผิวหนัง

	S-T	.๐๕-.๑๕	วินาที
	QRS	.๐๙	วินาที
ช่วงเวลาของคลื่น	P	.๑๑	วินาที

ดังที่กล่าวมาแล้วการเกิดแรงดันไฟฟ้าขณะทำงานที่ S.A.node มีลักษณะเป็นคลื่นกระทบในอัตรา ๗๐-๘๐ ครั้งต่อนาที คลื่นกระทบจะแพร่กระจายไปสู่เอเทรียมตามระบบสื่อนำ ทำให้เอเทรียมเกิดสภาพดีโปลาไรซ์และเกิดการบีบตัวดันเลือดเข้าสู่เวนตริเคิล คลื่นกระทบจะแพร่ตามระบบสื่อนำไปยัง A-V node ที่จุดนี้มีประสาททำหน้าที่ถ่วงเวลาคลื่นกระทบ เพื่อรอจนกว่าเอเทรียมบีบตัวส่งเลือดเข้าเวนตริเคิลหมด ซึ่งใช้เวลาประมาณ .๑ วินาที คลื่นกระทบจะแพร่ต่อไปตามระบบสื่อนำไปที่ AV Bundle แยกเป็นแขนงซ้ายและขวาและตรงไปที่ Purkinje

Fiber ตามลำดับ ซึ่งจะทำให้เวนตริเคิลเกิดสภาวะดีโปลาไรซ์ กล้ามเนื้อเวนตริเคิลทั้งสองจะหดตัวตามเอเทรียม แรงดันไฟฟ้าขณะทำงานที่เกิดขึ้นในเอเทรียมและเวนตริเคิลจะเป็นไปตามจังหวะของคลื่นกระทบที่มาจาก S.A.node อย่างสม่ำเสมอและตามลำดับทำให้อัตราเต้นของหัวใจไม่เร็วหรือช้าเกินไป โดยในคนปกติขณะพักอัตราเต้นของหัวใจประมาณ ๗๒ ครั้งต่อนาที

การนำคลื่นกระทบในระบบสื่อนำสามารถจัดลำดับการทำงานได้ตามรูปที่ ๒.๘ S.A. node เสมือนเป็นแหล่งกำเนิดคลื่นไฟฟ้า ซึ่งจะเคลื่อนตัวผ่านสาขาต่าง ๆ ในระบบสื่อนำจนในที่สุดถึงกล้ามเนื้อเวนตริเคิล ทำให้เกิดการหดตัวของกล้ามเนื้อเวนตริเคิลบีบตัวส่งเลือดไปเลี้ยงส่วนต่าง ๆ ของร่างกาย ในลักษณะการเคลื่อนตัวของคลื่นกระทบที่เดินทางจาก S.A.node มายังกล้ามเนื้อเวนตริเคิลถ้าไม่สามารถเดินทางมาถึงเวนตริเคิล เวนตริเคิลจะไม่สามารถหดตัวดันเลือดออกจากหัวใจได้



รูป ๒.๘ แสดงการแพร่กระจายคลื่นกระทบจาก S.A.node สู่กล้ามเนื้อเวนตริเคิลโดยผ่านระบบสื่อนำ

๒.๖ สมมุติฐานเบื้องต้นการนำคลื่นไฟฟ้าช่วงแคบแทนพลังกระทบ

จากกายวิภาคและสรีรวิทยาทำให้ทราบว่า S.A.node เป็นตัวกำเนิดพลังกระทบซึ่งมีผลทำให้กล้ามเนื้อหัวใจบีบตัว ในผู้ป่วยที่เป็นโรคหัวใจที่มีสาเหตุมาจากกลุ่มเซลพิเศษที่ S.A. node ทำงานผิดปกติ หรือมาจากความผิดปกติในระบบสื่อนำ เนื่องจากโรคหัวใจมีหลายชนิด(๑) ทำให้หัวใจเต้นผิดจังหวะ (Arrhythmias) อาจจะเต้นช้ากว่าปกติ (Bradyarrhythmias) หรือเต้นเร็วกว่าปกติ (Tachyarrhythmias) อาการผิดปกติเหล่านี้ทำให้หัวใจไม่สามารถสูบฉีดโลหิตไปเลี้ยงส่วนต่าง ๆของร่างกายได้ตามปกติ ทำให้เกิดสภาพ Low cardiac output อาการผิดปกติบางพวกรักษาให้หายขาดได้ด้วยการใช้ยา แต่บางพวกจำเป็นต้องได้รับการผ่าตัดฝังเครื่องควบคุมจังหวะการเต้นของหัวใจ ซึ่งเครื่องจะทำหน้าที่กำเนิดคลื่นไฟฟ้าช่วงแคบแทนพลังกระทบ ทั้งนี้เพราะพลังกระทบมีลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าเหมือนกับคลื่นไฟฟ้าช่วงแคบ สามารถสร้างคลื่นไฟฟ้าช่วงแคบมาใช้แทนพลังกระทบที่ผลิตมาจากกลุ่มเซลพิเศษที่S.A. node ได้ ผู้ป่วยในรายที่การนำคำสั่งตามระบบสื่อนำถูกสกัดกั้นทั้งหมด (Complete Heart block) จะใช้เครื่องควบคุมจังหวะการเต้นของหัวใจแบบให้อัตราเต้นคงที่ (Fixed rate type) โดยเครื่องจะกำเนิดคลื่นไฟฟ้าช่วงแคบส่งไปควบคุมจังหวะการเต้นของหัวใจตลอดเวลา แต่ผู้ป่วยในรายที่หัวใจทำงานได้ในบางขณะ จะใช้เครื่องควบคุมจังหวะการเต้นของหัวใจแบบให้อัตราเต้นเมื่อต้องการ (Demand type) โดยเครื่องจะผลิตคลื่นไฟฟ้าช่วงแคบส่งไปให้หัวใจในช่วงเวลาที่หัวใจทำงานผิดปกติเท่านั้น จะเห็นว่าขอบเขตการใช้งานของเครื่องควบคุมจังหวะการเต้นของหัวใจแบบให้อัตราเต้นเมื่อต้องการมีขอบเขตการใช้งานมากกว่าแบบให้อัตราเต้นคงที่ เพราะผู้ป่วยส่วนใหญ่ที่ใช้เครื่องควบคุมจังหวะการเต้นของหัวใจนั้น หัวใจสามารถทำงานได้เองในบางขณะ กล่าวโดยสรุปเครื่องควบคุมจังหวะการเต้นของหัวใจเป็นเครื่องกำเนิดคลื่นไฟฟ้าช่วงแคบแทนพลังกระทบส่งสัญญาณไปควบคุมจังหวะการเต้นของหัวใจให้ทำงานอยู่ในอัตราเต้นที่เหมาะสม