การผ่าตัดรักษา Cavernous Carotid Artery Aneurysms
Surgical Treatment of Cavernous Carotid Artery Aneurysms

กิติพร ศรีอมรรัตนกุล, พ.บ. ว.ว. ประสาทศัลยศาสตร์
นาแสง อัครธรรมโชติ, พ.บ. ว.ว. ประสาทศัลยศาสตร์
สมเกียรติ วงศ์สุริยนันท์, พ.บ. ว.ว. ประสาทศัลยศาสตร์

หน่วยประสาทศัลยศาสตร์ ภาควิชาศัลยศาสตร์
คณะแพทยศาสตร์วชิรพยาบาล มหาวิทยาลัยนวมินทราธิราช

บทคัดย่อ Abstract

Cavernous carotid artery aneurysm (CCAA) เป็น aneurysm ที่อยู่บริเวณ cavernous segment of internal carotid artery (ICA) ในอดีตให้การรักษาโดย direct clipping ซึ่งจำเป็นต้องอาศัย skull base approach เนื่องจากอยู่ในตำแหน่งที่ติดกับฐานกะโหลกซึ่งเข้าถึงได้ยาก และพบว่าหลังผ่าตัดมี cranial nerve deficit มากขึ้น ดังนั้น Indirect surgical treatment จึงมีเข้ามามีบทบาทแทนที่ โดยหลักการคือ parent artery occlusion อย่างเดียวหรือร่วมกับ extracranial-intracranial (EC-IC) bypass โดยวิธีการมีทั้ง trapping of aneurysm, proximal occlusion of ICA และ proximal occlusion of common carotid artery ซึ่งยังไม่มีข้อสรุปที่ชัดเจนว่าวิธีการใดเหมาะสมที่สุด อีกทั้งชนิดของ EC-IC bypass (low-flow หรือ high-flow bypass) ก็ยังเป็นที่ถกเถียงกัน บทความนี้เป็นการทบทวนวรรณกรรมหลายฉบับ รวบรวมวิธีการและผลการรักษา ได้ข้อสรุปว่า CCAA ที่ไม่ได้มาด้วย direct carotid-cavernous fistula (CC fistula) การผ่าตัด high-flow bypass with cervical ICA ligation น่าจะเหมาะสมที่สุด อย่างไรก็ตามถ้ามาด้วย direct CC fistula ซึ่งแสดงถึง CCAA อยู่ในภาวะ active bleeding การผ่าตัดที่เหมาะสมที่สุดคือ high-flow bypass with trapping of aneurysm นอกจากนั้นยังได้วิเคราะห์กลไกการเกิด aneurysm thrombosis จากการทำ cervical ICA ligation

Cavernous carotid artery aneurysm is the aneurysm located at cavernous segment of internal carotid artery (ICA). In the past, the main surgery was direct clipping which caused significant cranial nerve deficits and morbidities due to the cavernous sinus exposure, therefore the indirect treatment was developed and almost totally replaced the former treatment. The principle of indirect treatment is parent artery occlusion with or without extracranial-intracranial (EC-IC) bypass. Several procedures for the parent artery occlusion include trapping of aneurysm, proximal occlusion of ICA, and proximal occlusion of common carotid artery. The best procedure is still controversial. Also, the necessity (with or without bypass) and the type (low-flow or high-flow type) of EC-IC bypass is debatable. The data of many literatures were collected and reviewed in this article about the treatment methods and outcomes. From many information, we can conclude that the most appropriate treatment is high-flow bypass with cervical ICA ligation except for the CCAA presented with direct carotid-cavernous fistula (CC fistula) which should be treated with high-flow bypass with trapping of the aneurysm. We also discuss and postulate the possible mechanism of aneurysm thrombosis after cervical ICA ligation.

บทนำ

Aneurysm ของ cavernous segment of internal carotid artery (ICA) หรือ cavernous carotid artery aneurysm (CCAA) เป็น aneurysm ที่อยู่ภายใน cavernous sinus ซึ่งเป็น extradural structure ติดกับฐานกะโหลกศีรษะ ต่างจาก intradural aneurysm ชนิดอื่นๆ ด้านบนและด้านข้างของ CCAA ถูกคลุมด้วย fiber ของ cranial nerve III, IV, VI, V1 และ V2 ด้านล่างและด้านในติดกับ skull base ทำให้อาการและอาการแสดงของผู้ป่วยต่างจาก aneurysm ชนิดอื่น ความเสี่ยงที่จะแตกและมีเลือดออกเข้าไปใน subarachnoid space มีไม่มาก ผู้ป่วยมักจะมาด้วยอาการของ mass effect ต่อโครงสร้างโดยรอบ เนื่องจากความพิเศษในตำแหน่งของ aneurysm ชนิดนี้ ทำให้การผ่าตัดรักษามีความซับซ้อนมากกว่าตำแหน่งอื่นๆ ในอดีตมีการรักษาแบบ direct clipping ซึ่งต้องอาศัย skull base approach เพื่อเข้าสู่ cavernous sinus พบว่าหลังการผ่าตัดมีการบาดเจ็บต่อ neural structure ที่อยู่รอบ aneurysm อย่างมีนัยสำคัญ ทำให้เกิดการพัฒนาการรักษาแบบ indirect surgical treatment ซึ่งมีหลักการคือ parent artery occlusion อย่างเดียวหรือร่วมกับ extracranial-intracranial (EC-IC) bypass ซึ่งมีหลายวิธีการได้แก่ trapping of aneurysm, proximal occlusion of ICA และ proximal occlusion of CCA ซึ่งยังไม่มีข้อสรุปที่แน่นอนว่าวิธีการใดเหมาะสมที่สุดทั้งในแง่ผลการรักษาและมีความซับซ้อนในการผ่าตัดน้อย[1,2]

ระบาดวิทยา

CCAA พบได้ไม่บ่อย พบประมาณ 3-5% ของ intracranial aneurysm และพบประมาณ 14% ของ internal carotid artery (ICA) aneurysm โดยส่วนมากไม่พบสาเหตุที่ชัดเจน (idiopathic) สาเหตุอื่นที่พบได้เช่น เกิดจากการบาดเจ็บ (traumatic), และการติดเชื้อ เป็นต้น[1,2]

อาการทางคลินิก

อาการและอาการแสดงของ CCAA แตกต่างจาก intracranial aneurysm อื่นๆ เนื่องจากอยู่ใน extradural space ติดฐานกะโหลกศีรษะและ cranial nerve คู่ที่ III, IV, IV, V1 และ V2 ทำให้อาการและอาการแสดงส่วนมากเกิดจาก mass effect ของ aneurysm ต่อโครงสร้างเหล่านี้ได้แก่ ophthalmoparesis, ptosis, facial numbness และ facial pain เป็นต้น หาก aneurysm มีขนาดใหญ่มากอาจกด optic nerve ทำให้เกิดอาการตามัวได้ซึ่งกรณีแบบนี้พบน้อย ความเสี่ยงในการเกิด subarachnoid hemorrhage (SAH) น้อย[4,5]

SAH พบประมาณ 0-16% ของ CCAA จะเกิดในกรณีที่ aneurysm มีขนาดใหญ่ขึ้นและโตเข้ามาใน subarachnoid space, มีการแตกทะลุผ่านผนังของ cavernous sinus เข้า subarachnoid space หรือ โตเข้าไปใน sellar turcica แล้วแตกทะลุผ่าน diaphragm sellae เข้า subarachnoid space มีรายงานว่า CCAA ที่เกิดบริเวณ anterior genu of ICA มีความเสี่ยงสูงในการเกิด subarachnoid hemorrhage[6,7]

ในกรณีที่ CCAA แตกเข้าสู่ cavernous sinus ทำให้เกิด direct carotid cavernous fistula (CC fistula) ผู้ป่วยจะมาด้วยอาการ sudden severe neuro-ophthalmologic symptoms ซึ่งเกิดจาก engorgement ของ superior orbital fissure หรืออาจมาด้วย intracerebral hemorrhage ซึ่งเกิดจาก cortical venous congestion[8]

บางรายอาจมาด้วยเลือดกำเดาไหล (epistaxis) ซึ่งเกิดจาก aneurysm แตกเข้าไปใน sphenoid sinus โดยส่วนใหญ่ของ CCAA มีกระดูกบางๆกั้นระหว่าง CCAA กับ sphenoid sinus และพบว่า 4% ไม่มีกระดูกกั้นเลย[9]

อาการและอาการแสดงของ CCAA ได้ถูกรวบรวมไว้ในตารางที่ 1

ข้อบ่งชี้ในการรักษา

ในการตัดสินใจรักษา CCAA จำเป็นต้องพิจารณาถึงข้อดีและข้อเสียของการรักษาอย่างรอบคอบ เนื่องจากยังไม่มีแนวทางการรักษาที่ชัดเจน อีกทั้งข้อมูลด้านธรรมชาติของโรคยังมีไม่มาก ข้อบ่งชี้ในการรักษาได้ถูก

Table 1 Clinical presentations of cavernous carotid artery aneurysms[2-9]

Clinical presentations of cavernous carotid artery aneurysm
• Mass effect on cranial nerves
– Ptosis
– Ophthalmoparesis
– Facial pain or numbness
– Visual disturbance
• Dysarthria
• Acute subdural hematoma
• Subarachnoid hemorrhage
• Intracerebral hemorrhage
• Direct carotid-cavernous fistula causing acute loss of vision
• Epistaxis

Table 2 Indications for treatment of cavernous carotid artery aneurysms[2,6]

Indications for treatment of cavernous carotid artery aneurysms
Asymptomatic aneurysms
• Extension of aneurysm into subarachnoid space
• Extension of aneurysm into sphenoid sinus
• Origin from anterior genu of cavernous carotid
• Radiographic enlargement of aneurysm
Symptomatic aneurysms
• Subarachnoid hemorrhage
• Epistaxis
• Unbearable ipsilateral face or retro-orbital pain
• Progressive ophthalmoplegia
• Progressive visual loss
• Sudden, severe ophthalmoplegia

รวบรวมไว้ในตารางที่ 2[2,6]

การผ่าตัดรักษา CCAA และผลการรักษา

โดยหลักการของการรักษา cerebral aneurysm วิธีการที่ดีที่สุดคือ การกำจัด aneurysm ออกจากระบบการไหลเวียนเลือดโดยรักษา parent vessel และ normal vessel อื่นๆไว้ให้ได้

ในอดีต มีการให้การผ่าตัดรักษาด้วยวิธีการ direct clipping หรือ clip reconstruction ซึ่งเป็นวิธีที่ทำได้ยาก เนื่องจาก CCAA อยู่ใน cavernous sinus ซึ่งอยู่ติดฐานกะโหลกศีรษะ จำเป็นต้องอาศัย skull base technique (extradural approach) และหลีกเลี่ยงไม่ได้ที่จะต้องมีผลกระทบต่อ neural structures ที่อยู่รอบ cavernous sinus อีกทั้งในการหนีบ aneurysm ที่มีขนาดใหญ่อาจจำเป็นต้อง temporary clip นาน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง giant aneurysm การใส่คลิปเพื่อ reconstruct lumen ของ ICA เป็นเรื่องที่ยาก อาจทำให้เกิด ICA occlusion มีผลทำให้เกิด neurological deficit หลังการผ่าตัดอย่างมีนัยสำคัญ เช่น oculomotor nerve palsy, abducens nerve palsy, visual deterioration, blindness และ contralateral hemiparesis[10-13]

วิธีการผ่าตัดรักษาอีกแบบหนึ่งคือ indirect surgical treatment โดย parent artery occlusion อย่างเดียวหรือร่วมกับ distal revascularization ซึ่งวิธีนี้ไม่จำเป็นต้องเข้าไปหา aneurysm โดยตรง ลดโอกาสการบาดเจ็บต่อ neural structures รอบๆ cavernous sinus หลังการผ่าตัด และสามารถทำให้เกิด thrombosis ในตัว aneurysm ได้ทันทีเช่นกัน[8,14]

จากการทบทวนวรรณกรรมและตำราทางประสาทศัลยศาสตร์ต่างๆ จนถึงปัจจุบันพบว่า indirect surgical treatment มีหลากหลายวิธี พอสรุปได้คือ[18,19,23-32]

1. Cervical ICA occlusion (direct ligation หรือ gradual occlusion โดยใช้ Selverstone clamp) อย่างเดียวหรือร่วมกับ EC-IC bypass

2. Common carotid artery occlusion อย่างเดียวหรือร่วมกับ EC-IC bypass

3. Aneurysm trapping (cervical ICA ligation and clipping of supraclinoid ICA just proximal to ophthalmic artery) อย่างเดียวหรือร่วมกับ EC-IC bypass

โดยการทำ EC-IC bypass ก็มีความหลากหลาย ซึ่ง

อาจสรุปได้เป็น 2 กรณีคือ

1. Selective revascularization พิจารณาจากผลของการทำ balloon test occlusion (BTO) โดยแบ่งออกเป็นแบบไม่ทำ EC–IC bypass, ทำ low–flow bypass (< 50 ml/min)15 เช่น superficial temporal artery–middle cerebral artery (STA–MCA) bypass หรือทำ high–flow bypass (> 50 ml/min)[15] ซึ่ง high–flow bypass ก็มีทั้งการใช้ radial artery graft (RAG) หรือ saphenous vein graft (SVG) โดย protocol ของ BTO และ criteria ของการพิจารณานั้นก็มีความแตกต่างกันตามแต่ละสถาบัน ยังไม่มีมาตรฐานที่ใช้กันอย่างสากล[16-21]

2. Universal revascularization พิจารณาทำ EC–IC bypass ในทุกรายที่ทำ ICA occlusion อาจเป็น STA–MCA bypass, EC–RAG–MCA bypass, หรือ EC–SVG–MCA bypass โดยส่วนใหญ่ทำชนิด high–flow bypass

ตำราประสาทศัลยศาสตร์หลายเล่มจนถึงปัจจุบัน มีความเห็นที่แตกต่างกันออกไป จึงยังไม่มีข้อสรุปที่ชัดเจนว่าวิธีการใดเหมาะสมที่สุดในการผ่าตัดรักษา CCAA

ใน Brain surgery (1993) โดย Apuzzo (บรรณาธิการ) Fukushima และคณะแนะนำว่า ในกรณี giant CCAA ให้ผ่าตัด simple carotid occlusion หรือ trapping of aneurysm อย่างเดียวหรือร่วมกับ EC–IC bypass[22]

ใน Management of cerebral aneurysms (2004) โดย Le Roux และคณะ (บรรณาธิการ) Russell และ Jafar แนะนำให้รักษาด้วยวิธี complete trapping อย่างเดียว หรือร่วมกับEC–IC bypass โดยผูก cervical ICA และ ใส่ clip ที่ supraclinoid ICA ส่วน proximal ต่อ ophthalmic artery เลือกชนิดของ bypass โดยใช้ preoperative BTO ถ้า BTO ผ่านและค่า CBF ปกติ แนะนำให้ทำ permanent endovascular balloon occlusion ที่ตัว aneurysm โดยไม่จำเป็นต้องทำ EC–IC bypass[2]

ใน Neurovascular surgery ฉบับพิมพ์ครั้งที่สอง (2015) โดย Spetzler และคณะ(บรรณาธิการ) Welch และคณะ แนะนำว่าให้ผ่าตัดรักษา cavernous carotid aneurysm ด้วยวิธี complete trapping อย่างเดียวหรือร่วมกับ EC–IC bypass โดยผูก cervical ICA และ ใส่ clip supraclinoid ICA ส่วน proximal ต่อ ophthalmic artery และให้ความเห็นว่าวิธี proximal carotid ligation อย่างเดียวจะมี retrograde filling เข้าสู่ aneurysm อาจทำให้เกิด delayed rupture, อาการทาง cranial nerve แย่ลง และ thromboembolic phenomenon[3]

จากการทบทวนวรรณกรรมจนถึงปัจจุบัน มีหลาย case series ทำการรักษาด้วยหลายวิธี พอรวบรวมได้ดังนี้

ปี 1989 Little และคณะ รายงานการรักษา symptomatic CCAA จำนวน 15 ราย ด้วยการทำ ICA occlusion without high–flow bypassโดยใช้หลายวิธี เช่น Selverstone clamp occlusion of ICA ค่อยๆบิดจนปิดสนิทใน 24 ชั่วโมง, ICA ligation, Aneurysm trapping, STA–MCA bypass with Selverstone clamp occlusion of ICA ส่วนใหญ่ได้ผลการรักษาดี พบว่ามี delayed ipsilateral cerebral ischemia จำนวน 2 ราย (13%) และมี partial retrograde filling of the aneurysm จำนวน 3 ราย มี complete aneurysm thrombosis จำนวน 78.6%[23]

ปี 1999 Houkin และคณะรายงานการรักษาผู้ป่วย giant หรือ large CCAA ที่มาด้วย ocular nerve signs จำนวน 36 ราย โดยวิธีการ ligation of ICA (ส่วนใหญ่ของผู้ป่วย) หรือ trapping of ICA (cervical ICA ligation and ICA clipping just proximal to Ophthalmic artery origin) (ส่วนน้อยของผู้ป่วย) โดยทุกรายได้รับการทำ ECA–RAG–MCA bypass หลังผ่าตัดพบว่ามี bypass graft patency 97% (35 ราย) ผู้ป่วย 1 รายมี bypass graft ตันหลังผ่าตัดทำให้เกิด cerebral infarction ซึ่งอาการดีขึ้นจนหายภายใน 1 เดือน ไม่พบ ischemic symptoms หรือ cerebral hypoperfusion syndrome ในผู้ป่วยที่มี bypass graft patency ดี ทุกรายหลังการผ่าตัดมีอาการทางตาดีขึ้นและ aneurysm หายไปทั้งหมด[24]

ปี 2000 Niiro และคณะรายงานการรักษาผู้ป่วย giant หรือ large CCAA จำนวน 11 ราย ด้วยวิธี gradual occlusion ที่ ICA หรือ common carotid artery โดยใช้ Selverstone clamp โดยไม่ทำ EC–IC bypass หลังผ่าตัด

พบว่า เกิด Early และ delayed ischemic events ที่สมองซีกเดียวกับที่ทำ carotid occlusion จำนวน 3 ราย (27.3%) 2 ราย (18%) มีการเกิด aneurysm ที่ตำแหน่งอื่น (de novo aneurysm) จากการติดตามผู้ป่วยระยะยาว ได้แก่ CCAA ข้างตรงข้าม และ anterior communicating artery aneurysm ซึ่งเกิดจาก hemodynamic stress[25]

ปี 2006 Chibbaro และคณะรายงานการรักษาผู้ป่วย symptomatic CCAA 8 ราย ด้วยการทำ EC-IC bypass with aneurysm trapping โดย preserve ophthalmic artery ในการเลือกทำ bypass ช่วงแรกผู้นิพนธ์ใช้ selective revascularization (โดยดูจากผลของ balloon test occlusion) แต่ช่วงหลังเปลี่ยนมาใช้ universal revascularization โดยใช้ radial artery graft ได้ผลการรักษาดี aneurysm หายไป 100% ผู้ป่วยทั้งหมดมีอาการดีขึ้น มี perioperative stroke 1 รายซึ่งอาการดีขึ้นเรื่อยๆ[26]

ปี 2007 Kai และคณะรายงานการรักษาผู้ป่วย giant CCAA 19 ราย ด้วยการทำ ICA occlusion อย่างเดียวหรือร่วมกับ EC-IC bypass โดยพิจารณาจาก preoperative balloon test occlusion ทำ proximal ICA occlusion 8 ราย ที่เหลือทำ coil trapping ผู้ป่วย 10 รายได้รับการทำ bypass (low-flow bypass 7 ราย, medium-flow bypass 2 ราย, high-flow bypass 1 ราย) หลังผ่าตัดอาการดีขึ้น 16 ราย มี transient ischemia 1 ราย[18]

ปี 2007 Murai และคณะรายงานผู้ป่วย giant และ large CCAA จำนวน 13 ราย ให้การรักษาด้วย EC-RAG-MCA bypass with cervical ICA ligation (9 ราย) และ trapping of aneurysm (4 ราย) ทุกรายพบว่า aneurysm หายไปหลังผ่าตัดและ bypass graft patency ดี อาการดีขึ้น 61.5% เกิด cranial nerve dysfunction (III และ IV) ชั่วคราวหลังผ่าตัดจำนวน 3 ราย[27]

ปี 2010 Shimizu และคณะได้รายงานการรักษา large และ giant CCAA ด้วย cervical ICA occlusion (โดยวิธี ligation หรือ coil embolization) อย่างเดียวหรือร่วมกับ bypass (STA-MCA หรือ high-flow bypass) ขึ้นอยู่กับผลของ preoperative BTO และ single photon emission computed tomography ผลการรักษาพบว่า เกิด postoperative ischemia 16.7% โดยทั้งหมดเป็น embolic stroke และ aneurysm หายไปหมด 100%[19]

ปี 2010 Elhammady และคณะทำการรักษาผู้ป่วย large และ giant CCAA ที่ไม่สามารถคลิปหรือใส่ขดลวดได้จำนวน 7 ราย รักษาด้วยการทำ common carotid artery ligation อย่างเดียวหรือร่วมกับ bypass (เลือกโดยใช้ preoperative BTO พบว่า aneurysm หายไปทุกรายในระยะแรกและมีอาการดีขึ้น หนึ่งรายมี recurrent aneurysm ที่หนึ่งปีหลังการรักษา โดย mean radiographic long-term follow-up เท่ากับ 14.2 เดือน นอกจากนี้ยังพบว่ามี de novo CCAA ขนาด 4 mm ที่ข้างตรงข้ามกับที่ทำ common carotid artery ligation จำนวน 1 ราย ที่ 3 ปีหลังการผ่าตัด[28]

ปี 2011 Murai และคณะรายงานการรักษาผู้ป่วยสูงอายุ (มากกว่า 70 ปี) ที่มี large และ giant symptomatic CCAA โดยทุกรายทำ High-flow bypass (โดยใช้ RAG) และ cervical ICA ligation ผลการรักษาพบว่า aneurysm หายไปหมดทุกราย อาการดีขึ้น 87.5% โดยหนึ่งรายมี postoperative small area of cerebral infarction ที่ frontal lobe ฝั่งเดียวกัน ทำให้เกิด transient dysarthria และ gait disturbance ส่วนอีกรายหนึ่งมี convulsive seizures ซึ่งเกิดจาก postoperative hyperperfusion syndrome[29]

ปี 2013 Ohtaki และคณะทำการรักษาผู้ป่วย 10 ราย (11 aneurysms) ที่มี large และ giant CCAA โดยวิธี cervical ICA occlusion อย่างเดียวหรือร่วมกับ EC-IC bypass (without bypass หรือ low-flow หรือ high-flow bypass ขึ้นกับผล preoperative BTO) ทุกรายมีผลการรักษาดี ยกเว้น 1 รายมี ipsilateral cerebral infarction หลังจากการทำ endovascular ICA occlusion without bypass ซึ่งเกิดจาก false negative result ของ BTO[30]

ปี 2014 Menon และคณะทำการรักษาผู้ป่วย large and giant cavernous carotid aneurysm จำนวน 11 ราย ด้วยวิธี EC-IC bypass (low-flow หรือ high-flow bypass ขึ้นกับผล preoperative BTO) with cervical ICA ligation

ทุกรายมี aneurysm thrombosis หลังการรักษา อาการดีขึ้น 4 ราย อาการคงเดิม 4 ราย[31]

ปี 2014 Ishishita และคณะรายงานการรักษา large และ giant CCAA จำนวน 18 ราย ด้วยวิธี universal EC-IC graft bypass (radial artery หรือ saphenous vein graft) with cervical ICA ligation พบว่ามี aneurysm obliteration 100% ไม่มี complication ทุกรายมีอาการดีขึ้นหลังการรักษา[32]

ปี 2016 Matano และคณะรายงานการผ่าตัดรักษา large and giant ICA aneurysm ด้วยวิธี high-flow bypass with cervical ICA ligation โดยในจำนวนผู้ป่วยทั้งหมด 38 ราย เป็น CCAA จำนวน 28 ราย (73.6%) ผลการรักษาโดยรวมพบว่า ผู้ป่วยมีอาการทางการมองเห็นและการกลอกตาที่ผิดปกติดีขึ้นกว่าก่อนผ่าตัด 73.6% และพบว่า aneurysm มี complete obliteration 94.7% มี asymptomatic cerebral infarction 13.1% ไม่มี complication อื่นๆ[33]

วิธีการรักษา จำนวนผู้ป่วย ผลการรักษา และภาวะแทรกซ้อนหลังการผ่าตัด ได้ถูกรวบรวมไว้ในตารางที่ 3

การนำเลือดมาเลี้ยงใหม่แบบ selective กับ การนำเลือดมาเลี้ยงใหม่แบบ universal (Selective revascularization vs. Universal revascularization)

การพิจารณาทำ EC-IC bypass เพื่อ flow preservation (flow replacement) ในปัจจุบันแบ่งออกเป็นสองค่ายใหญ่ๆคือ 1). Selective revascularization และ 2). Universal revascularization[26]

ผู้นิพนธ์ส่วนมากนิยมใช้ selective revascularization คือ การพิจารณาว่าจะทำ EC-IC bypass ก่อนการทำ ICA occlusion หรือไม่ และถ้าจะทำ bypass จะใช้แบบ STA-MCA bypass หรือ EC-RA-MCA bypass หรือ EC-SV-MCA bypass นั้น ขึ้นอยู่กับ collateral blood flow หรือ cross flow ซึ่งทดสอบโดยการทำ preoperative BTO[19,34] ถึงแม้ว่า preoperative BTO จะผ่าน แต่ก็พบว่าเกิด ischemic stroke ตามมาได้ถึง 30% หลังจากทำการอุด ICA และการที่จะบ่งชี้ว่า BTO ผ่านหรือไม่นั้น มีหลายเกณฑ์ที่นำมาใช้ร่วม เช่น neurologic, radiographic, electrophysiological, perfusion, and provocative testing (hypotensive challenge)[34] นอกจากนั้น ถ้า BTO ไม่ผ่าน EC-IC bypass ชนิดใด (STA-MCA bypass หรือ EC-RA-MCA bypass หรือ EC-SV-MCA bypass) จะเหมาะสมนั้นยังไม่มีข้อสรุปที่ชัดเจน เนื่องจากการทบทวนวรรณกรรมพบว่ามีหลายแนวทางและยังไม่มีแนวทางใดที่ได้รับการยอมรับให้เป็นมาตรฐานสากล[16-20,28,35]

ผู้นิพนธ์บางส่วนมีแนวคิดว่า ความเสี่ยงโดยรวมของการไม่ทำ revascularization ในผู้ป่วยที่สามารถผ่าน ICA balloon occlusion test (ความเสี่ยงจากการทำ BTO เองคือ 3.7-7%[36,37] false negative rate ของ BTO ซึ่งคือความเสี่ยงของ immediate ischemic complications หลังจากทำ carotid artery occlusion เท่ากับ 7-22% มี mortality rate 5.5%) มีมากกว่าความเสี่ยงจากการผ่าตัด revascularization (EC-IC bypass surgical risk = 3-10%) นอกจากนี้ ยังมีความเสี่ยงในระยะยาวจากการทำ arterial occlusion without revascularization นั่นคือ de novo formation of aneurysms (new aneurysm formation) (0-10%) เนื่องมาจาก hemodynamic stress บริเวณเส้นเลือดที่เป็น collateral blood supply ดังนั้นผู้นิพนธ์กลุ่มนี้จึงเลือกที่จะทำ revascularization ในผู้ป่วยทุกรายที่ทำ occlusion of a parent vessel เพื่อรักษา complex aneurysms (universal revascularization)[26,32,38,39]

การเลือกชนิดของ graft เพื่อใช้ bypass

ในกลุ่มของ universal revascularization ก็ยังมีคำถามว่า bypass graft ชนิดใด (STA, RAG or SVG) ที่เหมาะสมสามารถให้ blood flow ทดแทนเส้นเลือดที่ถูกอุดไปได้อย่างเพียงพอ ไม่เกิด low-flow related ischemic complication ในอนาคต

ผู้นิพนธ์ส่วนมากมีการแบ่ง EC-IC bypass ออกเป็น 3 ชนิดตามอัตราการไหลเชิงปริมาตร (volume blood rate) ได้แก่ 1) low-flow bypass (ใช้ STA graft) 15-25 ml/

Table 3 Summary of indirect surgical treatment and outcome of cavernous carotid artery aneurysms[18,19,23-33]

Author	No. of cases	Surgical technique improve	Symptom aneurysm thrombosis	% of complete ipsilateral ischemic stroke	% of postoperative complication	Other
Little et al. 1989	15	1. Selverstone clamp occlusion of ICA over 24 hr. (8 cases) 2. ICA ligation (1 case) 3. Aneurysm trapping (4 cases) 4. STA-MCA bypass with Selverstone clamp occlusion of ICA over 24 hr. (2 cases)	33% (60% not change) *30 days after surgery	78.6%	2/15 cases (13%) - One case for STA-MCA bypass with Selverstone clamp occlusion - One for ICA ligation	CN3,CN5 palsy 2/15 cases
Houkin et al. 1999	36	1. ECA-RA-MCA bypass with cervical ICA ligation → most cases 2. ECA-RA-MCA bypass with trapping (cervical ICA ligation and ICA clipping just proximal to OphA origin) → few cases	100%	100%	1/36 cases (2.8%) - RA graft occlusion	-
Niiro et al. 2000	11	Selverstone clamp occlusion of 1. Common carotid artery with ECA ligation (8 cases) 2. ICA (3 cases)	72.7%	100%	3/11 cases (27.3%) - Early 1 case - Delayed 2 cases	-De novo aneurysm formation (2 cases, contralateral CCA and Acom) -Ruptured Acom aneurysm (1 case) -Delayed re-enlargement of CCA (2 cases)
Murai et al. 2007	13	ECA-RA-MCA bypass with 1. Cervical ICA occlusion (9 cases) 2. Trapping (4 cases)	61.5%	100%	0%	CN3,6 palsy (3/13 cases)
Shimizu et al. 2010	12	Cervical ICA occlusion (ligation or coil embolization) with 1. High flow bypass (6 cases) 2. STA-MCA bypass (4 cases) 3. No bypass (2 cases) Depend on BTO and SPECT	66.7%	100%	2/12 cases (16.7%) -Both are embolic stroke. -One case is asymptomatic.	-CN2 (1 case) -CN3,4 (2 cases) -CN3,4,6 (1 case) -CN6 (1 case)
Chibbaro et al. 2006	8	Trapping with high-flow bypass (depend on preop. BTO) ICA occlusion	100% 84.2%	100% 100%	1/8 perioperative Stroke 1/19 cases (12.5%)	

Table 3 Summary of indirect surgical treatment and outcome of cavernous carotid artery aneurysms[18,19,23-33] (continued)

Author	No. of cases	Surgical technique improve	Symptom aneurysm thrombosis	% of complete ipsilateral ischemic stroke	% of postoperative complication	Other
Kai et al. 2007	19	(proximal occlusion = 8, coil trapping = 11) with/without EC-IC bypass (depend on preop BTO) (bypass = 10, No bypass = 9)	–	–	develop transient ischemia	–
Elhammady et al. 2010	7	Common carotid artery ligation with or without bypass (depend on preop. BTO)	100%	100% (1 case recurrence after 1 year)	0%	-De novo aneurysm formation 1 cases (contralateral CCA) 3 years after common carotid artery ligation
Murai et al. 2011	8 (all cases > 70 year)	ECA-RA-MCA bypass with cervical ICA occlusion	87.5%	100%	1/8 cases (12.5%) - A small ipsilateral frontal ischemia (transient dysarthria and gait disturbance)	-CN4 (1 case) -Epilepsy due to hyperperfusion syndrome (1 case)
Ohtaki et al. 2013	11	Cervical ICA occlusion with/without EC-IC bypass (without bypass or low-flow or high-flow bypass depend on preop. BTO)	100%	100%	1 case after endovascular ICA occlusion without bypass	–
Menon et al. 2014	11	EC-IC bypass (low-flow or high-flow bypass depend on preop. BTO) with cervical ICA ligation	36.4% (no change 36.4%)	100%	0%	–
Ishishita et al. 2014	18	Universal EC-IC graft bypass (radial artery or saphenous vein graft) with cervical ICA ligation	100%	100%	0%	
Matano et al. 2016	28	Universal EC-IC graft bypass (radial artery or saphenous vein graft) with cervical ICA ligation	76.3% (overall)	94.7% (overall)	Overall 13.1% asymptomatic cerebral infarct	–

Abbreviations: anterior communicating artery (Acom), balloon test occlusion (BTO), cranial nerve (CN), external carotid artery (ECA), internal carotid artery (ICA), middle cerebral artery (MCA), Ophthalmic artery (OphA), radial artery (RA), superficial temporal artery (STA), vertebral artery (VA)

min, 2) moderate (intermediate)-flow bypass (ใช้ RAG) 40-70 ml/min บางรายงาน 50-150 ml/min และ 3) high-flow bypass (ใช้ SVG) 70-140 ml/min บางรายงาน 100-250 ml/min[15,40,41] บางรายงานแบ่ง EC-IC bypass ออกเป็น 2 ชนิด คือ 1) low-flow bypass (< 50 ml/min) มักใช้ STA เป็น graft และ 2) high-flow bypass (> 50 ml/min) มักใช้ RAG หรือ SVG เป็น graft[15]

Surdell และคณะพบว่า เส้นผ่าศูนย์กลางโดยเฉลี่ยของ superficial temporal artery (STA) และ occipital artery (OA) คือ 2 mm ของ radial artery (RA) คือ 3.5 mm ของ saphenous vein คือ 5 mm โดยมีความแตกต่างกันในผู้ป่วยแต่ละรายและต่างกันตามอายุ[15,17]

จากความรู้ทางชลศาสตร์ Darcy's equation และ Hagen-Poiseuille's equation แสดงให้เห็นว่า อัตราการไหลเชิงปริมาตร (volume flow rate) แปรผันตามพื้นที่หน้าตัดการไหล (cross-sectional area) นั่นคือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรแปรผันตามเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อยกกำลังสอง ([diameter]2)[42,43] จากข้อมูลดังกล่าวจะเห็นได้ว่า อัตราการไหลเชิงปริมาตร (volume flow rate) ของ graft แต่ละชนิดนั้นมีช่วงที่กว้าง และใน graft ชนิดเดียวกันเองก็มีขนาดแตกต่างกันมากในแต่ละคนและแต่ละช่วงอายุ ดังนั้นการที่ graft จะให้ปริมาตร blood flow มากหรือน้อยนั้นไม่ได้ขึ้นอยู่กับชนิดของ graft แต่ขึ้นอยู่กับขนาด (เส้นผ่าศูนย์กลาง) ของ bypass graft ที่เลือกใช้[44]

พบว่า patency rate ของ radial artery graft (RAG) คือ 91-100% ของ saphenous vein graft (SVG) คือ 73-93% เนื่องจากการมี valve และการเกิด varices ทำให้ SVG มี patency ต่ำกว่า RAG ดังนั้นในการทำ high flow bypass จึงพิจารณาเลือกใช้ RAG เป็นตัวเลือกแรก ยกเว้นในกรณีที่ Allen test ให้ผลบวก จึงจำเป็นต้องเลือกใช้ SVG โดย Matsukawa H และคณะได้เสนอ valveless saphenous vein graft technique โดยการตัด SVG ส่วนที่มี valve ออกและทำ end-to-end anastomosis ก่อนนำมาใช้เป็น bypass graft พบว่า ไม่เกิด graft vasospasm เลย, มี patency rate 100% หลังจากการตรวจติดตามช่วง 93-287 วัน (เฉลี่ย 210 วัน) และไม่พบ low-flow related ischemic complication[45]

นอกจากการพิจารณาถึง patency rate และ availability ของ bypass graft แต่ละชนิดแล้ว สิ่งที่สำคัญมากอีกอย่างหนึ่งคือ bypass graft ที่เลือกใช้นั้นต้องสามารถให้ปริมาตร blood flow เพียงพอกับความต้องการโดยไม่ทำให้เกิด low-flow related ischemic complication ในภายหลัง ปริมาตร blood flow ที่ได้จาก EC-IC bypass ขึ้นอยู่กับขนาดของ donor vessel[44], bypass graft15 และ recipient vessel[46] ไม่ได้ขึ้นกับชนิดของ bypass graft ว่าเป็น STA, RAG หรือ SVG[42] Matsukawa H และคณะทำการศึกษาปัจจัยในการเกิด low-flow related ischemic complication และอาการที่แย่ลงทางระบบประสาทหลังผ่าตัดรักษา complex ICA aneurysm ด้วย high-flow bypass พบว่า middle cerebral artery pressure (MCAP) ratio ≤ 0.7-0.8 และ (graft/C2 diameter)^2 < 0.4-0.68 มีความสัมพันธ์กับการเกิด low-flow related ischemic complication และอาการที่แย่ลงทางระบบประสาทอย่างมีนัยสำคัญ โดย MCAP สามารถวัดได้ขณะผ่าตัดหลังจากการทำ STA-M2 bypass โดยการสอด catheter ขนาดเล็กเข้าไปใน side branch ของ STA graft และวัด pressure จากแขนงของ STA ด้วย pressure transducer (เครื่องวัด arterial line) โดย clip occlusion ตรง STA ส่วน proximal ต่อ side branch MCAP ratio คือ pressure หลังจากปล่อย bypass graft และ clamp ICA แล้ว (bypass pressure) หารด้วย pressure ก่อนปล่อย bypass graft และ ก่อน clamp ICA (initial pressure) (รูปที่ 1)[42,43]

การที่จะสามารถ monitor MCA pressure ได้โดยตรงนั้น จะต้องมีการทำ bypass ทั้ง low-flow bypass (STA-M3) และ high-flow bypass บน ipsilateral M2 branch ตามลำดับ เรียกว่า "double-insurance bypass" เนื่องจาก 1) สามารถให้ blood flow ไปยัง distal MCA territory ระหว่างที่ต่อ RAG หรือ SVG กับ M2-3 และ 2)สามารถ

monitor การไหลเวียนเลือด (perfusion) ในเชิงปริมาณ (quantitative estimation) ทั้งก่อนทำ high-flow bypass (initial MCA pressure, รูปที่ 1A) หลังจาก clamp ICA (collateral pressure, รูปที่ 1B) และหลังจากเปิด high-flow bypass (bypass pressure, รูปที่ 1C) [47,48,49]

จากข้อมูลที่ว่า (graft/C2 diameter)^2 < 0.4-0.68 มีความสัมพันธ์กับการเกิด low-flow related ischemic complication และอาการที่แย่ลงทางระบบประสาทอย่างมีนัยสำคัญ (1,2) จะเห็นได้ว่า ถ้าเส้นผ่าศูนย์กลางของ bypass graft และ C2 segment (ophthalmic segment) of ICA (graft/C2 diameter) มีสัดส่วนน้อยกว่า 0.63-0.82 จะมีโอกาสเกิด low-flow stroke หลังการผ่าตัด ดังนั้น เมื่อวางแผนจะทำการอุด ICA ควรมีการประเมิน Allen test และเส้นผ่าศูนย์กลางของ bypass graft (RAG หรือ SVG) และ C2 segment of ICA ก่อนการผ่าตัดโดยวัดจาก CT angiography หรือ digital subtraction angiography (DSA) เพื่อคำนวณ RAG/C2 diameter หาก ratio มีค่า < 0.63-0.82 หรือ Allen test ให้ผลบวก ก็มีความจำเป็นต้องใช้ SVG แทน RAG (โดยเฉลี่ย SVG มีขนาดใหญ่กว่า RAG) โดยอาจพิจารณาใช้ valveless saphenous vein graft technique ดังกล่าว[42,43,45] หลังจากต่อ high-flow bypass และผูก cervical ICA แล้ว ถ้า middle cerebral artery pressure (MCAP) ratio > 0.7-0.8 แสดงว่า bypass graft สามารถให้ cerebral perfusion เพียงพอ นอกจากนั้นยังสามารถ monitor bypass pressure ได้ตลอดการผ่าตัดจนถึงก่อนปิดหนังศีรษะ ทำให้สามารถ detect ภาวะ intraoperative bypass graft occlusion ได้ อย่างไรก็ตาม การวัด MCAP สามารถบอกได้เพียง cortical perfusion ไม่สามารถบอก deep cerebral perfusion ซึ่งถูกเลี้ยงด้วย perforating artery ได้ จึงแนะนำให้ใช้ neurophysiologic monitoring เช่น somatosensory-evoked potential (SSEP) หรือ motor-evoked potential (MEP) ร่วมกับการ monitor MCAP[48]

The appropriate surgical treatment of CCAA

จากข้อมูลข้างต้น (ตารางที่ 3) จะเห็นว่า การรักษาที่ได้ผลดี (aneurysm หายไปถาวร อาการผู้ป่วยดีขึ้น) และมี postoperative ipsilateral cerebral ischemia ต่ำ

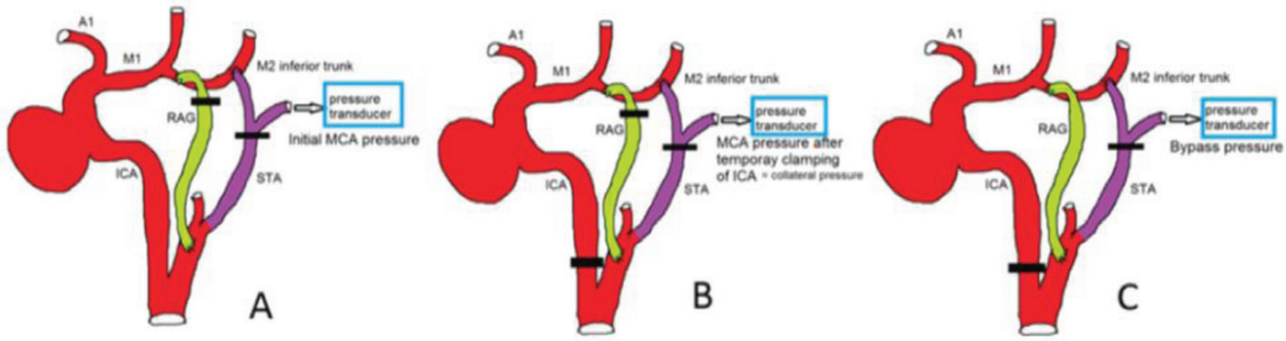

Figure 1 แขนงหนึ่งของ STA ถูกนำไปต่อกับ M3 distal ต่อ M2 ที่จะเป็น recipient ของ high-flow bypass ก่อน (double-insurance bypass) หลังจากนั้นจึงทำการต่อ bypass graft กับ M2 สอด catheter ขนาด 22-gauge เข้าใน side branch ของ STA และต่อกับ pressure transducer เพื่อ monitor MCA pressure (MCAP) (A) Initial MCA pressure วัดโดย clamp STA ส่วนที่ proximal ต่อ side branch โดยยังไม่คลาย clamp bypass graft (B) วัด MCAP หลังจากที่ temporary clamping ที่ cervical ICA ซึ่งเป็น collateral pressure (C) bypass graft วัดได้หลังจากคลาย clamp bypass graft และทำการ monitor pressure ต่อไปเรื่อยๆจนกระทั่งเย็บปิดหนังศีรษะ middle cerebral artery (MCA), superficial temporal artery (STA), second segment (M2) and third segment (M3) of middle cerebral artery (ดัดแปลงจาก Matsukawa และคณะ[42,43])

คือ 1) วิธี high-flow bypass with cervical ICA ligation และ 2) วิธี high-flow bypass with aneurysm trapping (cervical ICA ligation and ICA clipping just proximal to ophthalmic artery origin) (รูปที่ 2) ซึ่งทั้งสองวิธีดังกล่าวให้ผลการรักษาเหมือนกัน[24] หากแต่ว่าวิธี aneurysm trapping จะต้องใส่คลิปที่ C3 segment of ICA just proximal to ophthalmic artery เพื่อ preserve blood flow ไปยัง ophthalmic artery ซึ่งการจะทำเช่นนั้นได้มักจำเป็นต้องทำ anterior clinoidectomy และเปิด distal dural ring ซึ่งเป็นการเสียเวลาและอาจเพิ่มภาวะแทรกซ้อนโดยไม่จำเป็น ดังนั้นวิธีการที่ซับซ้อนน้อยที่สุดจึงควรเป็น high-flow bypass with cervical ICA ligation[24,33] โดยจะเลือกใช้ bypass graft ชนิดใดขึ้นอยู่กับ graft/C2 diameter ratio และผลของ Allen test[42,43,45]

ในกรณีข้างต้นทั้งหมดเป็นกรณีที่ CCAA ไม่ได้อยู่ในภาวะ active bleeding คือ อาจเป็น unrupture aneurysm หรือ ruptured aneurysm ที่ไม่ได้อยู่ในช่วงที่กำลังแตก แต่หาก CCAA อยู่ในภาวะ active bleeding ซึ่งพบในผู้ป่วยที่มาด้วย direct carotid-cavernous fistula (CC fistula) เนื่องจากมีการแตกของ CCAA เข้าสู่ cavernous sinus ซึ่งมีการดำเนินโรคที่รวดเร็ว ได้แก่ การมองเห็นแย่ลงอย่างรวดเร็ว, papilledema, และ refractory elevation of the intraocular pressure ซึ่งถือเป็นข้อบ่งชี้ในการรักษาอย่างทันที (emergent treatment) Hasegawa และคณะ รายงานผู้ป่วย CCAA ที่มาด้วย severe direct CC fistula มีอาการปวดศีรษะและการมองเห็นลดลงอย่างรวดเร็ว ได้ให้การรักษาด้วย urgent EC-RA-MCA bypass with aneurysm trapping (cervical ICA ligation และ clipping of C3 segment of ICA just proximal to ophthalmic artery) (รูปที่ 3) โดยผู้ป่วยมีอาการดีขึ้นและ direct CC fistula หายไปทันทีหลังการผ่าตัด[8]

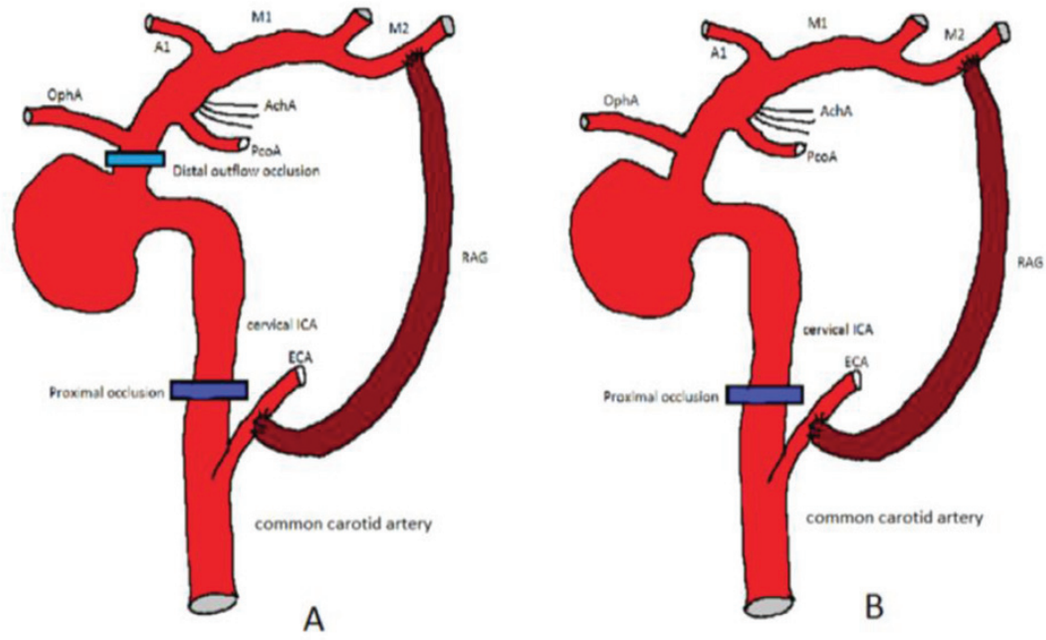

Figure 2 (A) Trapping (cervical ICA ligation with clipping of C3 segment of ICA, just proximal to ophthalmic artery origin) of CCAA with high flow bypass. (B) Cervical ICA ligation with high flow bypass. ทั้งสองวิธีนี้ทำให้เกิด complete aneurysm thrombosis เหมือนกัน First segment of anterior cerebral artery (A1), anterior choroidal artery (AchA), first segment of middle cerebral artery (M1), second segment of middle cerebral artery (M2), ophthalmic artery (OphA), posterior cerebral artery (PCA), posterior communicating artery (PcoA), radial artery graft (RAG).

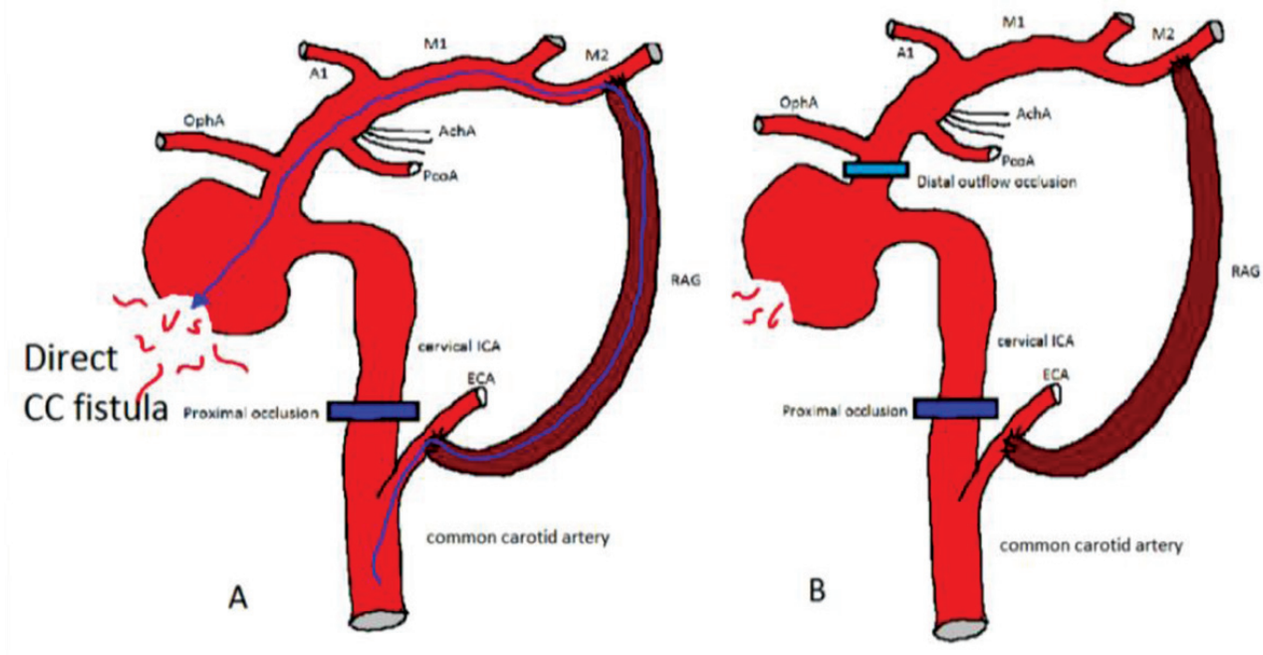

Figure 3 การผ่าตัดรักษา CCAA ที่มาด้วย direct CC fistula (A) ด้วยวิธี proximal ICA occlusion อย่างเดียว ไม่สามารถปิด fistula ได้หมดเนื่องจากมี retrograde flow มายัง fistula (B) ด้วยวิธี trapping of the aneurysm สามารถหยุด blood flow ที่ผ่าน fistula ได้ทันที

Mechanism of aneurysm thrombosis after high-flow bypass with cervical ICA occlusion

การที่ aneurysm หายไปหลังการทำ proximal ICA occlusion ยังไม่มีการอธิบายกลไกได้อย่างแน่ชัด จากการทบทวนวรรณกรรมต่างๆ มีข้อมูลดังนี้

ผู้นิพนธ์บางท่านรายงานการรักษาผู้ป่วย aneurysm ด้วยการ parent artery occlusion โดยการใช้ “blind-alley formation” (blind-end formation) strategy ซึ่งคือการอุด parent artery (proximal หรือ distal ต่อ aneurysm) และแขนงต่างๆของ parent artery ทำให้ aneurysm อยู่ในปลายตัน (รูปที่ 4)[44,50,51,52]

Takahashi และคณะรายงานการรักษาผู้ป่วย giant partially thrombosed basilar tip aneurysm ด้วย proximal parent artery occlusion (clipping of BA) แต่ aneurysm ไม่เกิด complete thrombosis หลังการผ่าตัด เนื่องจากมี blood flow จาก posterior communicating artery ทั้งสองข้าง (รูป 5A) จึงทำการผ่าตัดครั้งที่สองโดยใช้ “blind-alley” formation technique คือ clip occlusion ที่

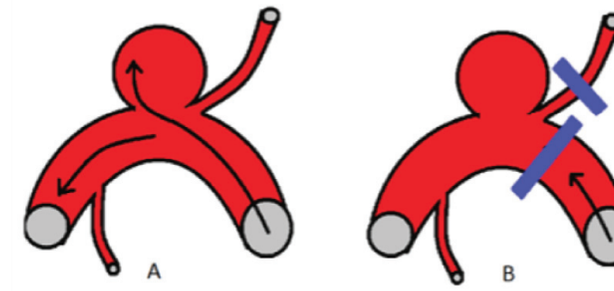

Figure 4 ภาพแสดง (A) aneurysm and (B) การรักษาด้วย “blind-alley formation” (blind-end formation) strategy โดยการอุด parent artery ส่วน proximal ต่อ aneurysm และแขนงของ parent artery ทำให้ aneurysm อยู่ในปลายตัน (ดัดแปลงจาก Shimizu และคณะ52)

posterior communicating artery ข้างหนึ่งและ P2 segment of PCA ข้างเดียวกันหลังจากทำ STA-P2 bypass ทำให้ aneurysm อยู่ในปลายตัน (รูป 5B) หลังผ่าตัดพบว่ามี complete obliteration ของ aneurysm[50]

Miyamoto และคณะรายงานการรักษาผู้ป่วย giant

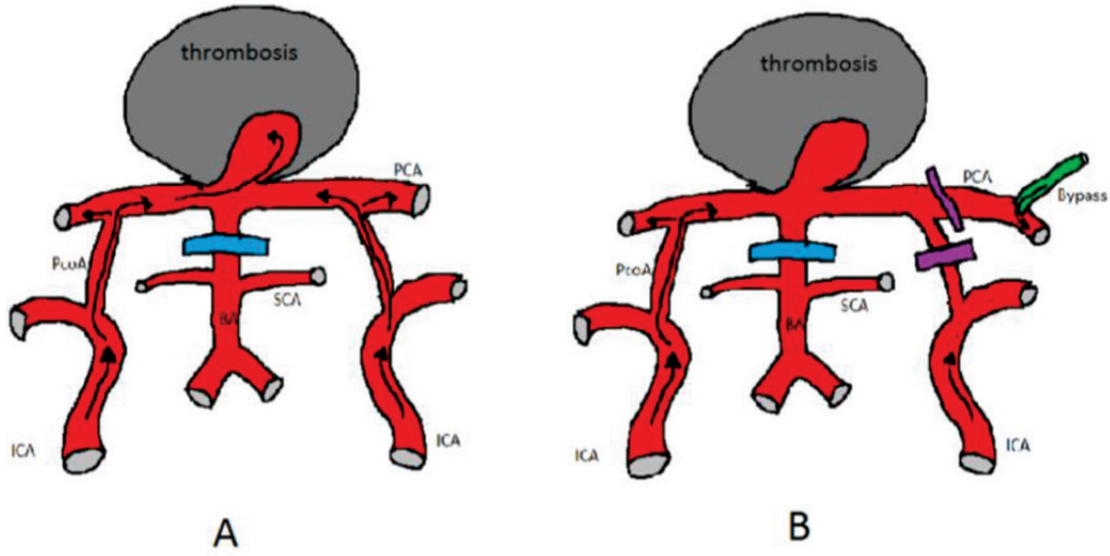

Figure 5 (A) การผ่าตัดรักษา partially thrombosed giant basilar tip aneurysm ด้วยการ proximal occlusion ซึ่งไม่สำเร็จ เนื่องจากมี blood flow มาจาก posterior communicating artery (PcoA) ทั้งสองข้างเข้าสู่ aneurysm ในการผ่าตัดครั้งแรก (B) ในการผ่าตัดครั้งที่สอง ใส่ clip เพิ่มที่ PcoA ข้างหนึ่งและ occlude PCA (P2 segment) ข้างเดียวกันหลังจากทำ STA-PCA bypass ทำให้ aneurysm อยู่ในปลายตัน ("blind-alley formation") หลังผ่าตัดพบว่ามี complete aneurysm thrombosis (ดัดแปลงจาก Takahashi และคณะ50) Basilar artery (BA), superior cerebellar artery (SCA), superficial temporal artery (STA), posterior cerebellar artery (PCA)

partially thrombosed basilar tip aneurysm 2 รายด้วยวิธี "maximal flow reduction strategy" ซึ่งใช้แนวคิดเดียวกับ "blind-alley" formation ประสบผลสำเร็จในการทำให้เกิด complete aneurysm thrombosis (รูปที่ 6)[51]

Shimizu และคณะรายงานการรักษาผู้ป่วย unclippable ophthalmic segments of ICA aneurysm 1 ราย และ supraclinoid segments of ICA aneurysm 2 ราย ประสบผลสำเร็จในการรักษาด้วยวิธี "blind-alley" formation technique +/- EC-IC bypass[52]

การรักษาด้วยวิธี parent artery occlusion มีรายงานการเกิด ischemic complication ของ small branch ที่อยู่ใกล้กับ occlusion site ดังนี้[21,44,53]

Jafar และคณะรายงานการเกิด anterior choroidal artery thrombosis จากการรักษา giant posterior communicating artery segment aneurysm ด้วย ECA-SVG-MCA bypass with cervical ICA ligation และ รายงานการเกิด perforator thrombosis จากการรักษา giant midbasilar artery aneurysm ด้วย ECA-SVG-SCA bypass with endovascular occlusion of parent vertebral artery[21]

Sughrue และคณะรายงานการเกิด thrombotic occlusion ของ perforators และ branch artery จำนวน4 ราย (7%) หลังการรักษาผ่าตัด giant intracranial aneurysm โดยทุกรายมี patency of bypass ดีทั้งหมด ได้ยกตัวอย่างผู้ป่วย 2 ราย ได้แก่ รายที่หนึ่งเป็น giant basilar trunk aneurysm ทำการรักษาด้วย EC-RAG-PCA bypass with distal occlusion บน basilar artery ด้วย aneurysm clip หลังผ่าตัดพบว่าเกิด gradual thrombosis ของ aneurysm และ เกิด basilar perforators occlusion ทั้งๆที่ยังมี antegrade blood flow ไปยัง basilar trunk ส่งผลให้ผู้ป่วยเสียชีวิต รายที่สองเป็น giant ICA bifurcation aneurysm รักษาด้วย EC-RAG-MCA bypass with proximal occlusion ที่ supraclinoid ICA ส่วน distal ต่อ PcoA ด้วย aneurysm clip หลังผ่าตัดพบว่าเกิด aneurysm thrombosis และมี occlusion ของ anterior choroidal artery ทำให้เกิด capsular infarction[14]

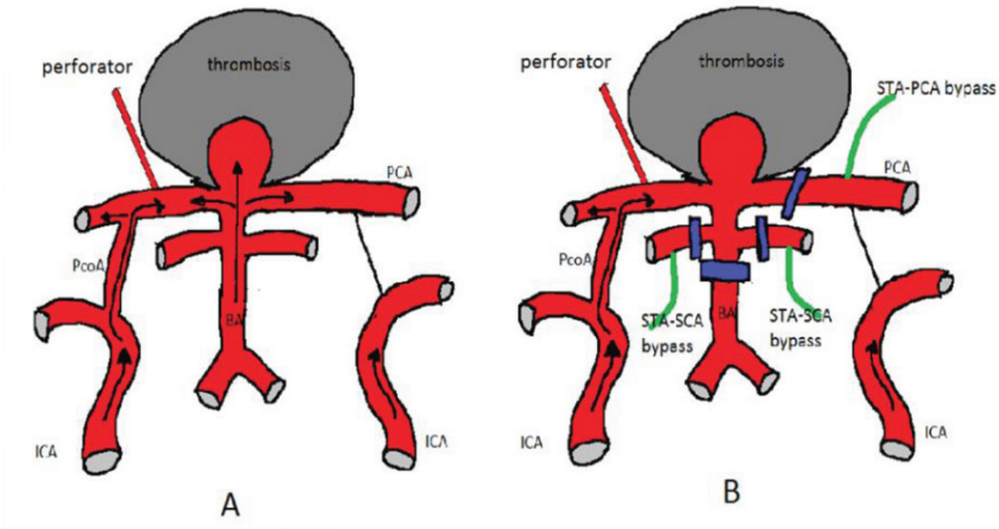

Figure 6 (A) A partially thrombosed giant basilar tip aneurysm. (B) การผ่าตัดรักษาด้วย maximal flow reduction strategy ("blind-alley formation"). (ดัดแปลงจาก Miyamoto และคณะ51)

Ota และคณะรายงานการรักษา complex intracranial aneurysm 7 ราย ด้วยการทำ EC-IC bypass procedure to PCA หลังผ่าตัดมี 3 ราย เกิด infarction บริเวณที่เลี้ยงด้วย perforator ที่ออกจาก PCA ใกล้กับ occlusion site ซึ่งเกิดจาก "Blind-alley" (Blind-end) formation ทำให้เกิด retrograde thrombosis ของ parent artery มีผลให้ perforators ขนาดเล็กที่ออกใกล้กับ occlusion site (อยู่ใน blind end) เกิดการอุดตัน (thrombosis) (รูปที่ 7) เกิดทั้งในกรณี endovascular coiling และ open surgery ซึ่งปัญหานี้ยังไม่สามารถแก้ไขได้ในปัจจุบัน[44]

Murakami และคณะรายงานการรักษาผู้ป่วย CCAA 16 ราย และ paraclinoid ICA aneurysm 16 ราย ด้วยวิธี EC-IC bypass with proximal occlusion of ICA (16 รายที่เป็น CCAA ใช้วิธี cervical ICA ligation, ส่วน paraclinoid aneurysm มีทั้ง cervical ICA ligation, trapping by clip, proximal ICA occlusion และ distal ICA occlusion) พบว่า 5 ราย เกิด ischemic complication บริเวณที่เลี้ยงด้วย perforator และ anterior choroidal artery ที่อยู่ใกล้กับ occlusion site ซึ่งเกิดเฉพาะใน paraclinoid aneurysm เท่านั้น ให้ข้อสรุปว่า ICA aneurysm ที่อยู่ distal location อยู่ใกล้กับ perforators สำคัญ (paraclinoid aneurysm) มีความเสี่ยงต่อการเกิด perforator occlusion มากกว่า ICA aneurysm ที่อยู่ proximal (cavernous segment) และการอุด parent artery ด้วย endovascular coiling มีความเสี่ยงต่อ perforator occlusion มากกว่าการอุดด้วย clip[53]

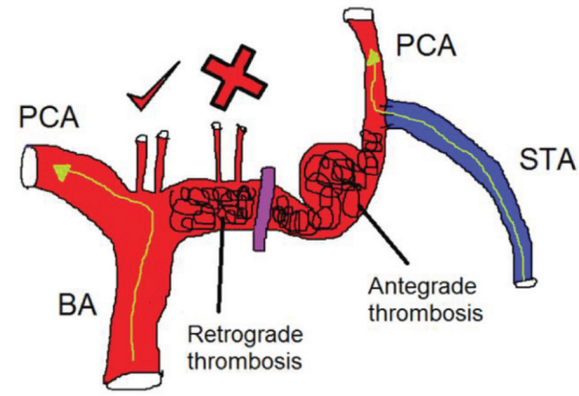

Figure 7 การผ่าตัดรักษา fusiform PCA aneurysm ด้วยการ proximal occlusion with STA-P2 bypass เกิด thrombosis ใน blind end ทั้งสองด้านของ clip ส่งผลให้เกิด perforator occlusion บริเวณ proximal ต่อ occlusion site และ aneurysm thrombosis บริเวณ distal ต่อ clip posterior cerebral artery (PCA), second segment of posterior cerebralartery (P2), superficial temporal artery (STA)

Sato และคณะรายงานการรักษา broad-neck paraclinoid ICA aneurysms ขนาด 6 mm ที่ communicating segment และ 13 mm ที่ ophthalmic segment ด้วยวิธี ECA-RAG-M2 bypass with cervical ICA ligation โดยทำให้เกิด reversed blood flow ลงมาที่ supraclinoid ICA ออกทาง ophthalmic artery ซึ่งเรียกว่าเป็น "flow outlet" และเกิด thrombosis ของ aneurysm ทั้งสองลูก โดยไม่เกิด occlusion ของ anterior choroidal artery (รูปที่ 9A) ให้ความเห็นว่า ต้องมีแขนงของ ICA ที่มีขนาดใหญ่พอที่จะเป็น flow outlet สำหรับ reversed blood flow เพื่อป้องกัน perforator thrombosis ซึ่ง ophthalmic artery โดยส่วนมากมีขนาดที่ใหญ่พอที่จะเป็น flow outlet ของ reversed blood flow จาก ECA-RAG-M2 bypass หลังจากทำการผูก cervical ICA จึงไม่เกิด thrombosis ของ anterior choroidal artery และ posterior communicating artery เนื่องจากมี blood flow ไหลผ่าน communicating segment และ ophthalmic segment of ICA ไปออกที่ ophthalmic artery (ไม่ใช่ blind end) และส่วนที่อยู่ proximal ต่อ ophthalmic artery ลงไปจนถึง common carotid artery จะเกิด thrombosis เนื่องจากเป็น blind end จากการที่ได้ผูก cervical ICA ไว้ ถ้า posterior communicating artery มีขนาดใหญ่พอที่จะสามารถเป็น flow outlet ได้ ก็สามารถทำการ trapping ophthalmic segment aneurysm โดยผูก cervical ICA และใส่ clip บน ICA ใต้ต่อ posterior communicating artery ได้ (รูปที่ 9B)[54]

Kazumata และคณะรายงานการรักษา ruptured blood blister-like ICA aneurysm จำนวน 20 ราย ด้วย aneurysm trapping หรือ direct clipping with EC-IC by-

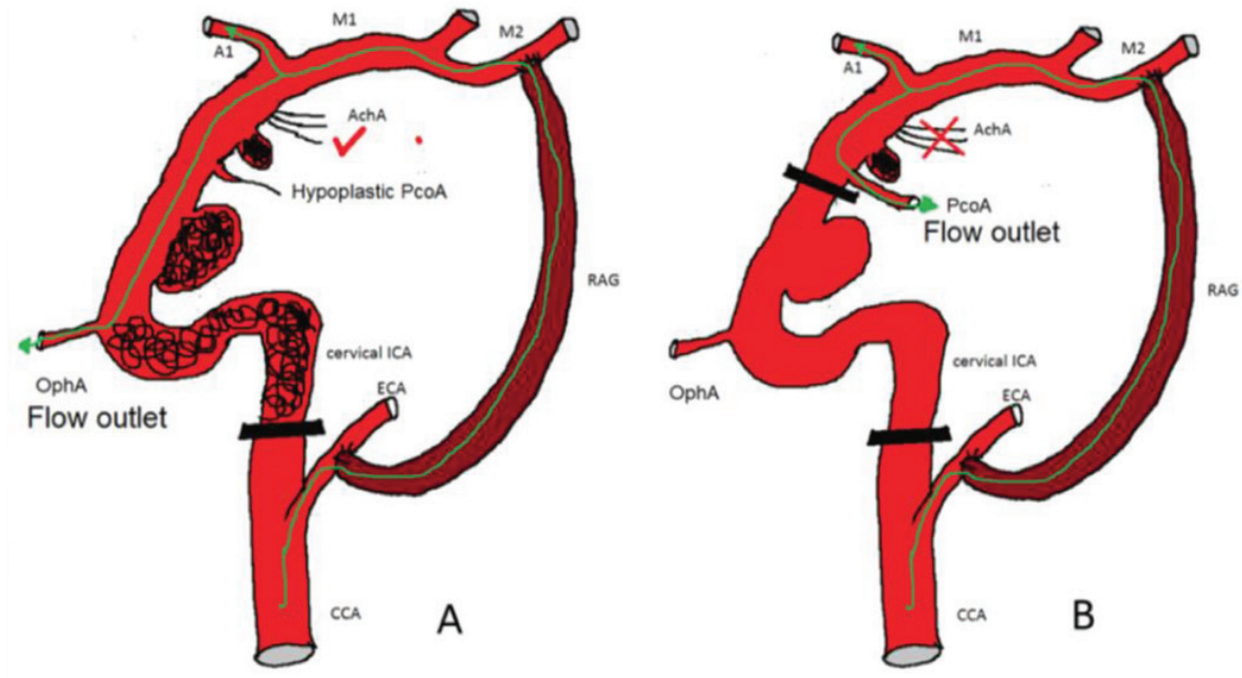

Figure 8 การรักษา broad-neck paraclinoid ICA aneurysms ที่ communicating segment และ ophthalmic segment (A) ในกรณีที่ PcoA มีขนาดเล็ก จึงผ่าตัดด้วยวิธี ECA-RAG-M2 bypass with cervical ICA ligation ทำให้เกิด reverse blood flow ผ่าน aneurysm neck ลงมายัง OphA ซึ่งทำหน้าที่เป็น flow outlet ทำให้เกิด aneurysm thrombosis ทั้งหมด และไม่เกิด AchA occlusion (B) ในกรณีที่ PcoA มีขนาดใหญ่พอ สามารถทำ trapping of communicating ICA aneurysm ได้ โดยไม่เกิด AchA occlusion เนื่องจาก PcoA ทำหน้าที่เป็น flow outlet (ดัดแปลงจาก Sato และคณ54) anterior choroidal artery (AchA), external carotid artery (ECA), internal carotid artery (ICA), ophthalmic artery(OphA), posterior communicating artery (PcoA), radial artery graft (RAG), second segment of middle cerebral artery(M2)

pass หลังผ่าตัดพบว่า 2 รายที่ทำ trapping มี infarction ของ anterior choroidal artery ซึ่งคาดว่าเกิดจาก retrograde thrombosis จากการที่ PcoA มีขนาดเล็ก หรือ aneurysm อยู่ distal ต่อ origin of PcoA (รูปที่ 9) เป็นการชี้ให้เห็นความสำคัญของ flow outlet[55]

จากวรรณกรรมข้างต้นที่ทำการผ่าตัดรักษา CCAA ด้วยวิธี cervical ICA occlusion with high-flow bypass ไม่พบว่าเกิดการอุดตันของ anterior choroidal artery (AchA) หรือ perforators หลังการผ่าตัดเลย[14,19,24,27,29-33] และข้อมูลจาก postoperative CTA หรือ angiography พบว่ามี retrograde blood flow จาก bypass graft ผ่าน MCA ลงมาจนถึง ophthalmic segment of ICA ออกไปยัง ophthalmic artery (flow outlet) โดยไม่ผ่านลงไปถึง aneurysm[24,29,31,33] จึงอาจพอสรุปได้ว่า ophthalmic artery (โดยส่วนมาก) หรือ posterior communicating artery (กรณี Ophthalmic artery มีขนาดเล็กมาก และ posterior communicating artery มีขนาดใหญ่พอ) สามารถทำหน้าที่เป็น flow outlet ได้ (รูปที่ 10)

Patency ของ branch artery หลังการทำ parent artery occlusion ขึ้นอยู่กับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ branch artery นั้น[14] ในปัจจุบันยังไม่ทราบแน่ชัดว่า เส้นเลือดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กที่สุดเท่าใดที่จะสามารถทำหน้าที่เป็น flow outlet ได้ Yamao และคณะพบว่า cortical branch of first segment (M1) of MCA ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 mm สามารถทำหน้าที่เป็น flow outlet ได้ ในการรักษา true posterior communicating artery aneurysm ด้วยวิธี flow reduction surgery[56] Grand และคณะทำการศึกษาเส้นผ่าศูนย์กลางของหลอดเลือดสมอง พบว่า ophthalmic artery มีขนาด 0.7 – 2.0 mm (เฉลี่ย 1.1 mm), posterior communicating artery มีขนาด 0 – 2.5 mm (เฉลี่ย 1.5 mm), anterior choroidal artery มีขนาด 0.5 – 2.0 mm (เฉลี่ย 1.1 mm)[56] จากข้อมูลดังกล่าวอาจตั้งข้อสังเกตว่า เส้นเลือดที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางอย่างน้อย 0.7 – 2 mm สามารถเป็น flow outlet ได้

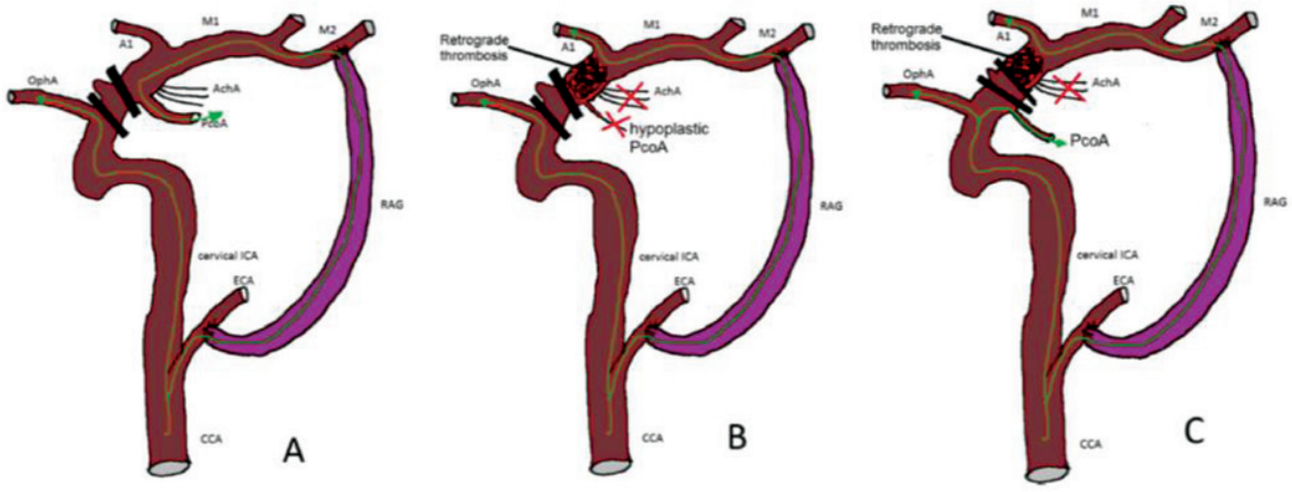

Figure 9 การรักษา ruptured blood blister-like ICA aneurysm (A) กรณีที่ aneurysm อยู่ระหว่าง OphA และ PcoA (proximal type) ให้การรักษาด้วยวิธี trapping with bypass ถ้า OphA และ PcoA มีขนาดใหญ่พอที่จะเป็น flow outlet ได้ จะไม่เกิด antegrade thrombosis ไปที่ origin of AchA (B) ถ้า PcoA มีขนาดเล็กจนไม่สามารถเป็น flow outlet ได้ จะเกิด AchA occlusion จาก antegrade thrombosis (C) กรณีที่ aneurysm อยู่ distal ต่อ PcoA (distal type) ให้การรักษาด้วยวิธี trapping with bypass จะเกิด AchA occlusion จาก antegrade thrombosis เช่นกันเนื่องจาก AchA มีขนาดเล็กจนไม่สามารถเป็น flow outlet ได้ anterior choroidal artery (AchA), internal carotid artery (ICA), ophthalmic artery (OphA), posterior communicating artery (PcoA)

โดยอาจยืนยันด้วย intraoperative angiography, Indocyanine green-videoangiography (ICG-VA) หรือการติดตาม motor evoked potential (MEP) ขณะผ่าตัด

การรักษา large หรือ giant ICA aneurysm โดยวิธี carotid ligation พบว่าโอกาสการเกิด thrombosis ของ aneurysm หลังการทำ carotid ligation แปรผกผันกับปริมาณของ collateral circulation และยิ่งตำแหน่งของ aneurysm อยู่ proximal มากเท่าใด โอกาสการเกิด thrombosis ก็ยิ่งมากขึ้น ดังนั้น aneurysm ที่ตำแหน่ง petrous และ cavernous segment จึงมีโอกาสที่จะเกิด thrombosis มากที่สุดเนื่องจากมีแขนงขนาดเล็กและจำนวนน้อย จึงไม่ทำให้เกิด retrograde collateral flow จาก extracranial circulation และไม่เป็น flow outlet ของ retrograde blood flow จาก intracranial collaterals (รูปที่ 10) Aneurysm ที่ตำแหน่ง ophthalmic, supraclinoid segment หรือ ICA bifurcation มีโอกาสเกิด thrombosis น้อยลงตามลำดับ เนื่องจากมี retrograde blood flow ผ่าน aneurysm neck ลงมายัง anterior communicating artery, posterior communicating artery และ ophthalmic artery ตามลำดับ[28,54] (รูปที่ 8A) ยกเว้น aneurysm นั้นมีโอกาสที่จะเกิด thrombosis อยู่แล้ว เช่น partially thrombosed aneurysm[58,59] หรือ giant aneurysm ที่มีค่า dome/neck ratio มาก[60] ดังนั้นโดยทั่วไปการรักษาด้วยวิธีนี้จึงมีประสิทธิภาพน้อยใน aneurysm ที่ตำแหน่ง anterior cerebral artery และ middle cerebral artery

ด้วยลักษณะทางกายวิภาคศาสตร์ที่ว่า ไม่มีแขนงขนาดใหญ่อยู่บน ICA ส่วน proximal ต่อ CCAA[14,61] และมี ophthalmic artery, posterior communicating artery

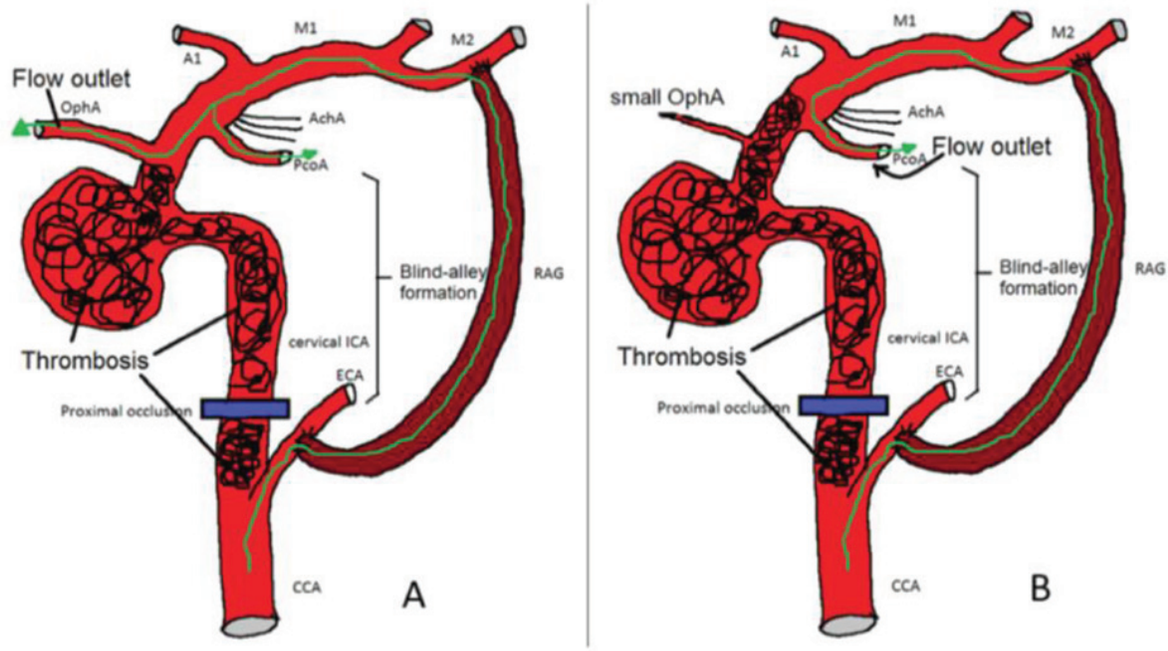

Figure 10 การผ่าตัดรักษา cavernous carotid artery aneurysm ด้วยวิธี cervical ICA occlusion with high-flow bypass โดยทำให้ aneurysm อยู่ในปลายตัน (blind end) จะเกิด antegrade thrombosis จากบริเวณที่ทำ ligation ขึ้นไปตลอดทางรวมถึง aneurysm จนสุดที่ side branch แรกที่มีขนาดใหญ่พอที่จะเป็น flow outlet (A) โดยส่วนมาก OphA จะมีขนาดใหญ่พอ ทำให้เกิด retrograde blood flow จาก MCA ลงมาจนถึง ophthalmic segment of ICA และไหลออกทาง OphA (B) กรณีที่ OphA มีขนาดเล็กมาก และ PcoA มีขนาดใหญ่พอ PcoA จึงเป็น flow outlet แทน เนื่องจากมี retrograde blood flow ผ่าน AchA และ perforators ของ ICA terminus จึงไม่เกิด การอุดตันของ AchA และ perforators ต่างๆ Anterior choroidal artery (AchA), internal carotid artery (ICA), ophthalmic artery (OphA), posterior communicating artery (PcoA)

หรือ anterior choroidal artery (ที่มีขนาดใหญ่เพียงพอที่จะทำหน้าที่เป็น flow outlet) อยู่ distal ต่อ aneurysm ส่งผลให้การผ่าตัดรักษาด้วยการทำ high-flow bypass with cervical ICA ligation สามารถทำให้เกิด complete aneurysm thrombosis ได้โดยไม่ต้องทำ trapping ซึ่งอาจอธิบายกลไกได้ด้วย "blind-alley" (blind-end) formation และไม่ก่อให้เกิด occlusion ของ perforators, anterior choroidal artery และ posterior communicating artery[14] (รูปที่ 10)

Conclusion

จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่า การผ่าตัดรักษา CCAA ที่ไม่ได้มาด้วย direct CC fistula วิธีที่เหมาะสมที่สุดให้ผลการรักษาดี มีภาวะแทรกซ้อนน้อย และเทคนิคไม่ซับซ้อน คือ High-flow bypass with cervical ICA ligation โดย aneurysm thrombosis อาจเกิดจาก antegrade thrombosis จาก "blind-alley" (blind-end) formation ส่วนกรณี CCAA ที่มาด้วย direct CC fistula ควรผ่าตัดด้วยวิธี High-flow bypass with trapping of aneurysm จึงจะสามารถปิด fistula ได้อย่างสมบูรณ์

References

1. Mikabe T, Ogihara R, Tomita S, Kin H, Karasawa H, Watanabe S, et al. Giant intracranial aneurysm visualized by prolonged injection angiography – Case report (author's transl). No Shinkei Geka 1980;8:749-53.
2. Russell SM, Jafar JJ. Microsurgical treatment of intracavernous carotid artery aneurysms. In: Le Roux PD, Winn RH, Newell DW, editors. Management of Cerebral Aneurysms. Philadelphia: Saunders; 2004. p. 711-29.
3. Welch BG, Eddleman CS, Vance AZ, Samson DS. Management strategies for intracavernous aneurysms. In: Spetzler RF, Kalani MYS, Nakaji P, eds. Neurovascular surgery. 2nd ed. New York: Thieme, 2015:529-37.
4. Hahn CD, Nicolle DA, Lownie SP, Drake CG. Giant cavernous carotid aneurysms: Clinical presentation in fifty-seven cases. J Neuroophthalmol 2000; 20:253-8.
5. Silva MN, Saeki N, Hirai S, Yamaura A. Unusual cranial nerve palsy caused by cavernous sinus aneurysms. Clinical and anatomical considerations reviewed. Surg Neurol 1999;52:143-8.
6. Linskey ME, Sekhar LN, Hirsch WL Jr., Yonas H, Horton JA. Aneurysms of the intracavernous carotid artery: Natural history and indications for treatment. Neurosurgery 1990;26:933-7.
7. Diaz FG, Ohaegbulam S, Dujovny M, Ausman JI. Surgical alternatives in the treatment of cavernous sinus aneurysms. J Neurosurg 1989;71:846-53.
8. Hasegawa H, Inoue T, Tamura A, Saito I. Urgent treatment of severe symptomatic direct carotid cavernous fistula caused by ruptured cavernous internal carotid artery aneurysm using high-flow bypass, proximal ligation, and direct distal clipping: Technical case report. Surg Neurol Int 2014;5:49.
9. Inoue T, Rhoton AL Jr., Theele D, Barry ME. Surgical approaches to the cavernous sinus: A microsurgical study. Neurosurgery 1990;26:903-32.
10. Dolenc VV. A combined epi- and subdural direct approach to carotid-ophthalmic artery aneurysms. J Neurosurg 1985;62:667-72.
11. Dolenc VV. Intracavernous carotid artery aneurysm.In: Carter LP, Spetzler RF, editors. Neurovascular surgery. USA: McGraw-Hill;1995: p. 659-672.
12. Sekhar LN, Burgess J, Akin O. Anatomical study of the cavernous sinus emphasizing operative approaches and related vascular and neural reconstruction. Neurosurgery 1987;21:806-16.
13. Fukushima T, Day J, Tung H. Intracavernous carotid artery aneurysms. In: Apuzzo MLJ, editor. Brain surgery: complication avoidance and management. USA:Churchill Livingstone;1993: p. 925-944.
14. Sughrue ME, Saloner D, Rayz VL, Lawton MT. Giant intracranial aneurysms: Evolution of management in a contemporary surgical series. Neurosurgery

2011;69:1261-70.

15. Sekhar LN, Natarajan SK, Ellenbogen RG, Ghodke B. Cerebral revascularization for ischemia, aneurysms, and cranial base tumors.Neurosurgery 2008;62(6 Suppl 3):1373-408.
16. Parkinson RJ, Bendok BR, O'Shaughnessy BA, Shaibani A, Russell EJ, Getch CC, Awad IA, Batjer HH. Temporary and permanent occlusion of cervical and cerebral arteries. Neurosurg Clin N Am 2005; 16(2):249-56.
17. Surdell DL, Hage ZA, Eddleman CS, Gupta DK, Bendok BR, Batjer HH. Revascularization for complex intracranial aneurysms. Neurosurg Focus 2008;24(2): E21.
18. Kai Y, Hamada J, Morioka M, Yano S, Mizuno T, Kuroda J, Todaka T, Takeshima H, Kuratsu J. Treatment strategy for giant aneurysms in the cavernous portion of the internal carotid artery. Surg Neurol 2007;67(2): 148-55.
19. Shimizu H, Matsumoto Y, Tominaga T. Parent artery occlusion with bypass surgery for the treatment of internal carotid artery aneurysms: Clinical and hemodynamic results. Clin Neurol Neurosurg 2010; 112:32-9.
20. Ashley WW, Amin-Hanjani S, Alaraj A, Shin JH, Charbel FT. Flow-assisted surgical cerebral revascularization. Neurosurg Focus 2008;24(2):E20.
21. Jafar JJ, Russell SM, Woo HH. Treatment of giant intracranial aneurysms with saphenous vein extracranial-to-intracranial bypass grafting: indications, operative technique, and results in 29 patients. Neurosurgery 2002;51(1):138-44.
22. Fukushima T, Day J, Tung H. Intracavernous carotid artery aneurysms. In: Apuzzo MLJ, editor. Brain surgery: complication avoidance and management. USA:Churchill Livingstone;1993: p. 925-44.
23. Little JR, Rosenfeld JV, Awad IA. Internal carotid artery occlusion for cavernous segment aneurysm. Neurosurgery 1989;25:398-404.
24. Houkin K, Kamiyama H, Kuroda S, Ishikawa T, Takahashi A, Abe H. Long-term patency of radial artery graft bypass for reconstruction of the internal carotid artery. Technical note. J Neurosurg 1999; 90:786-90.
25. Niiro M, Shimozuru T, Nakamura K, Kadota K, Kuratsu J. Long-term follow-up study of patients with cavernous sinus aneurysm treated by proximal occlusion. Neurol Med Chir (Tokyo) 2000;40:88-96.
26. Chibbaro S, Tacconi L. Extracranial-intracranial bypass for the treatment of cavernous sinus aneurysms. J Clin Neurosci 2006 Dec;13(10):1001-5.
27. Murai Y, Teramoto A, Mizunari T, Kobayashi S, Kamiyama H. Treatment of complex internal carotid artery aneurysm using radial artery grafts. Surg Cereb Stroke 2007;35:387-93. [Article in Japanese]
28. Elhammady MS, Wolfe SQ, Farhat H, Ali Aziz-Sultan M, Heros RC. Carotid artery sacrifice for unclippable and uncoilable aneurysms: endovascular occlusion vs common carotid artery ligation. Neurosurgery 2010;67(5):1431-6.
29. Murai Y, Mizunari T, Umeoka K, Tateyama K, Kobayashi S, Teramoto A. Radial artery grafts for symptomatic cavernous carotid aneurysms in elderly patients. Neurol India 2011;59:537-41.
30. Ohtaki S, Mikami T, Iihoshi S, Miyata K, Nonaka T, Houkin K, Mikuni N. Strategy for the treatment of large-giant aneurysms in the cavernous portion of the internal carotid artery. No Shinkei Geka 2013;41(2):107-15. [Article in Japanese] abstract
31. Menon G, Jayanand S, Krishnakumar K, Nair S. EC-IC bypass for cavernous carotid aneurysms: An initial experience with twelve patients. Asian J Neurosurg 2014;9(2):82-8.
32. Ishishita Y, Tanikawa R, Noda K, Kubota H, Izumi N, Katsuno M, et al. Universal extracranial-intracranial graft bypass for large or giant internal carotid aneurysms: techniques and results in 38 consecutive patients. World Neurosurg 2014;82(1-2):130-9.
33. Matano F, Murai Y, Mizunari T, Tamaki T, Tateyama K, Koketsu K, et al. Recovery of visual and ophthalmologic symptoms after treating large or giant internal carotid artery aneurysm by high-flow bypass with

cervical ligation. World Neurosurg 2017;98:182-8.

34. Kupersmith MJ, Hurst R, Berenstein A, Choi IS, Jafar J, Ransohoff J. The benign course of cavernous carotid artery aneurysms. J Neurosurg 1992;77(5): 690-3.
35. Charbel FT, Amin-Hanjani S. Decision making in cerebral revascularization surgery using intraoperative CBF measurements. In: Saleem Abdulrauf, editor. Cerebral revascularization: Techniques in Extracranial-to-Intracranial Bypass Surgery. Philadelphia: Elsevier; 2011: p. 45-56.
36. Tarr RW, Jungreis CA, Horton JA, Pentheny S, Sekhar LN, Sen C, et al. Complications of preoperative balloon test occlusion of the internal carotid arteries: Experience in 300 cases. Skull Base Surg 1991; 1(4):240-4.
37. Origitano TC, Al-Mefty O, Leonetti JP, DeMonte F, Reichman OH. Vascular considerations and complications in cranial base surgery. Neurosurgery 1994;35(3):351-62.
38. Lawton MT, Hamilton MG, Morcos JJ, Spetzler RF. Revascularization and aneurysm surgery: current techniques, indications, and outcome. Neurosurgery 1996;38(1):83-92.
39. Javedan SP, Deshmukh VR, Spetzler RF, Zabramski JM. The role of cerebral revascularization in patients with intracranial aneurysms. Neurosurg Clin N Am 2001;12(3):541-55.
40. Sekhar LN, Kalavakonda C. Saphenous vein grafts in the management of skull base tumors and aneurysms. Operative techniques in Neurosurgery 1999;2(3):129-41
41. Liu JK, Kan P, Karwande SV, Couldwell WT. Conduits for cerebrovascular bypass and lessons learned from the cardiovascular experience. Neurosurg Focus 2003;14(3):e3.
42. Matsukawa H, Tanikawa R, Kamiyama H, Tsuboi T, Noda K, Ota N, et al. Risk factors for neurological worsening and symptomatic watershed infarction in internal carotid artery aneurysm treated by extracranial-intracranial bypass using radial artery graft. J Neurosurg 2016;125(2):239-46.
43. Matsukawa H, Tanikawa R, Kamiyama H, Tsuboi T, Noda K, Ota N, et al. Risk Factors for Low-Flow Related Ischemic Complications and Neurologic Worsening in Patients with Complex Internal Carotid Artery Aneurysm Treated by Extracranial to Intracranial High-Flow Bypass. World Neurosurg 2016;85:49-55.
44. Ota N, Goehre F, Miyazaki T, Kinoshita Y, Matsukawa H, Yanagisawa T, et al. Bypass revascularization applied to the posterior cerebral artery. World Neurosurg 2016;96:460-472.
45. Matsukawa H, Tanikawa R, Kamiyama H, Tsuboi T, Noda K, Ota N, et al. The Valveless Saphenous Vein Graft Technique for EC-IC High-Flow Bypass: Technical Note. World Neurosurg 2016;87:35-8.
46. Sekhar LN, Bucur SD, Bank WO, Wright DC. Venous and arterial bypass grafts for difficult tumors, aneurysms, and occlusive vascular lesions: evolution of surgical treatment and improved graft results. Neurosurgery 1999;44:1207-23.
47. Kivelev J, Tanikawa R, Noda K, Hernesniemi J, Niemel_ M, Takizawa K, et al. Open surgery for recurrent intracranial aneurysms. Techniques and long-term outcomes. World Neurosurg 2016;96:1-9.
48. Ishikawa T, Kamiyama H, Kobayashi N, Tanikawa R, Takizawa K, Kazumata K. Experience from "double-insurance bypass." Surgical results and additional techniques to achieve complex aneurysm surgery in a safer manner. Surg Neurol 2005;63(5):485-90.
49. Hongo K, Horiuchi T, Nitta J, Tanaka Y, Tada T, Kobayashi S. Double-insurance bypass for internal carotid artery aneurysm surgery. Neurosurgery 2003;52(3):597-602.
50. Takahashi JC, Murao K, Iihara K, Nonaka Y, Taki J, Nagata I, et al. Successful "blind-alley" formation with bypass surgery for a partially thrombosed giant basilar artery tip aneurysm refractory to upper basilar artery obliteration. Case report. J Neurosurg 2007;106:484-7.
51. Miyamoto S, Funaki T, Iihara K, Takahashi JC. Successful obliteration and shrinkage of giant partially

thrombosed basilar artery aneurysms through a tailored flow reduction strategy with bypass surgery. J Neurosurg 2011;114:1028-36.

52. Shimizu H, Endo H, Inoue T, Fijimura M, Matsumoto Y, Tominaga T. Surgical treatment of internal carotid artery aneurysms requiring strategic selective clipping or parent artery occlusion/flow alteration. Jpn J Neurosurg 2014;23:721-8.
53. Murakami K, Shimizu H, Matsumoto Y, Tominaga T. Acute ischemic complications after therapeutic parent artery occlusion with revascularization for complex internal carotid artery aneurysms. Surg Neurol 2009;71(4):434-41.
54. Sato K, Yamada M, Abe K, Oka H, Kurata A, Fujii K. Tailored flow alteration treatment for intracranial internal carotid artery aneurysms: strategy beyond parent artery occlusion with bypass. Case report. Neurol Med Chir (Tokyo) 2012;52(4):213-6.
55. Kazumata K, Nakayama N, Nakamura T, Kamiyama H, Terasaka S, Houkin K. Changing treatment strategy from clipping to radial artery graft bypass and parent artery sacrifice in patients with ruptured blister-like internal carotid artery aneurysms. Neurosurgery 2014;10 Suppl 1:66-72; discussion 73.
56. Yamao Y, Takahashi JC, Satow T, Iihara K, Miyamoto S. Successful flow reduction surgery for a ruptured true posterior communicating artery aneurysm caused by the common carotid artery ligation for epistaxis. Surg Neurol Int 2014;5(Suppl 14):S501-5.
57. Grand W, Hopkins LN, Siddiqui AH, Mocco J. Vasculature of the Brain and Cranial Base: Variations in clinical anatomy. 2nd ed. New York:Thieme;2016.
58. Yang K, Park JC, Ahn JS, Kwon DH, Kwun BD, Kim CJ. Characteristics and outcomes of varied treatment modalities for partially thrombosed intracranial aneurysms: a review of 35 cases. Acta Neurochir (Wien) 2014;156(9):1669-75.
59. van Rooij SB, Bechan RS, Markenstein JE, Sluzewski M, van Rooij WJ. The donut sign: a new angiographic sign for partially thrombosed aneurysms with flow-induced intraluminal thrombus. Interv Neuroradiol 2014;20(1):55-9.
60. Bederson JB. Hemodynamics and pathophysiology of giant intracranial aneurysms. In: Awad IA, Barrow DL, editors. Giant intracranial aneurysms. Illinois: Park Ridge; 1995. p.13-22.
61. Rhoton AL Jr. The supratentorial arteries. Neurosurgery 2002;51(4 Suppl):S53-120.