

床邊超音波在心臟驟停病患復甦後照護的應用

許家瑀¹、連琬菁醫師^{2,3} /¹台大醫學院醫學系、
²台大醫院急診醫學部、³台大醫學院急診醫學科

Abstract

Background

心臟驟停是急重症醫護團隊相當重視的課題，近年來因心臟救命術的推廣及生命之鏈(chain of survival)的精進，心臟驟停後回復自發性循環的比例亦隨之提升，然而復甦後照護以及評估病人的神經學預後仍是該類病患處置一大挑戰，現今可用之評估工具多半需轉運病患至特定檢查室方能進行，這類病患轉運中所面臨之風險仍須審慎評估。

現今床邊超音波已被廣泛應用在臨床醫學領域的各個面向，在今年發表之 European Resuscitation Council Guidelines^[1] 亦建議可用於協助診斷心臟驟停的病因，然而超音波具有可以反覆操作、低輻射性及可在床邊執行，不啻為一可用於心臟驟停病患復甦後照護之工具。

本文將探討床邊超音波在心臟驟停的病人復甦後照護的階段之應用，期望透過文獻整理了解目前超音波的應用及限制，並討論未來可以發展之面向。

Methods

文獻回顧。

Results

這篇文章根據 European Resuscitation Council and European Society of Intensive Care (ERC-ESICM) 在 2021 年提出的 post-resuscitation care guideline^[2]，討論復甦後照護的各個階段中床邊超音波能夠提供醫師哪些幫助。在協助診斷心臟驟停病因的部分，目前較多研究著墨於利用超音波診斷心因性心臟驟停、創傷或非創傷性失血，以及呼吸系統的病灶，腦部超音波雖然被建議列入 e-FAST 中^[3]，然而操作仍具專科性並未普及，亦較少討論其在心臟驟停病人中的角色；在加護病房中，超音波可作為治療導引的一部分（包含協助設定呼吸器、評估輸液反應性、即時追蹤治療效果等），未來或許能夠發展以超音波評估神經學預後，以及以超音波評估器官捐贈的技術。

Conclusion

超音波在心臟驟停的病人身上有許多可應用面向，從協助急救、判斷心臟驟停病因，一直到後續復甦後照護都有其角色。目前還有許多未開發領域可以探討超音波是否相較於其他檢查方式有其優勢，又或者超音波可能延誤後續處置。另外，超音波準確度與操作者的技術相關，操作者須經過訓

練後才有良好的操作效能，復甦後照護的超音波訓練課程將會是決定復甦後照護中超音波應用價值的一大重點。

前言

心肺復甦急救在近年越來越受到重視，也提高了重新建立自發性循環（return of spontaneous circulation，ROSC）的比例，但需要後續高品質的復甦後醫療照護才能降低病患在急救後恢復期的死亡率，讓病人擁有較好的預後。American Heart Association（AHA）也將心臟驟停後照護加入生命之鏈^[4,5]，強調復甦後醫療照護的重要性。

病人在 ROSC 後往往還處於不穩定的狀態，又或者在進入加護病房後身上有許多導線、管路。如果能透過超音波取代某些檢查，或是透過超音波來決定病人是否需要進行後續檢查，或許能夠提升醫療決策的即時性，並避免不必要的移動病人。另一方面，超音波的檢查是否能夠協助進行病人神經學的預後判斷，也是可以發展的方向。

超音波在近年的臨床醫學領域中所扮演的角色越來越多元，除了各個專科在正式的檢查室中透過超音波進行檢查及

診斷之外，point-of-care ultrasonography (PoCUS) 也成為臨床上決定治療方針的重要參考。在急重症醫學當中，超音波可輔助急救、診斷、處置導引、治療監測等，如 US-CAB protocol^[6]提出利用超音波協助 CPR 急救過程，這樣的概念也已被 American Heart Association (AHA) 加入 Advanced Cardiac Life Support (ACLS) guide-lines^[7]當中，而 FAST protocol^[8]、BLUE protocol^[9]、RUSH protocol^[10]則顯示超音波能夠協助醫師進行即時的鑑別診斷，從而影響後續的治療決策。

根據 European Resuscitation Council and European Society of Intensive Care (ERC-ESICM) 在 2021 年提出的 post-resuscitation care guideline^[2]，復甦後醫療照護可以分成三大方向：即時治療、診斷、以及優化復原，以下根據這篇臨床指引的部分原則，整理並討論在復甦後醫療照護的各個環節是否已有相關的床邊超音波應用，或者是否能期待未來發展相關的床邊超音波技術。

材料與方法 文獻回顧。

結果

Immediate post-resuscitation care

ERC-ESICM guideline：

- Post-resuscitation care is started immediately after sustained ROSC, regardless of location.^[2]

討論：

- Immediate post-resuscitation care 是以 ABC（呼吸道、呼吸、循環）以及溫度控制為主軸。除了溫度控制之外，前面提過將超音波應用在 CPR 的 US-CAB protocol^[6]可以持續應用在此。
- US-C 利用 subxiphoid 4-chamber view 確認心臟收縮力，同時辨認心臟驟停的原因，並可引導治療。另外亦可在進行 US-C 時一併觀察下腔靜脈直徑，以評估體液狀態。^[11]
- US-A 藉 air-mucosa interface 及 comet-tail artifact 的數量區分氣管插管及食道插管。^[11]
- US-B 利用 lung sliding sign 確認插管後是雙側肺通氣或是單側，且可避免傳統上使用聽診器確認肺通氣會受到吵雜環境影響的缺點。^[11]
- Guidelines 中提到復甦後照護應該「無論地點」，在 ROSC 後立刻開始^[2]。超音波的便攜性（例如手持式超音波）無疑與這樣的準則不謀而合。

Diagnosis of cause of cardiac arrest

ERC-ESICM guideline：

- If there is clinical (e.g., hemodynamic instability) or EKG evidence of myocardial ischemia, undertake coronary angiography first. This is followed by CT brain and/or CT pulmonary angiography

if coronary angiography fails to identify causative lesions.^[2]

- If there are signs or symptoms pre-arrest suggesting a neurological or respiratory cause, perform a CT brain and/or a CT pulmonary angiogram.^[2]
- Cardiac causes of out-of-hospital cardiac arrest (OHCA) have been studied extensively in the last few decades; conversely, little is known about non-cardiac causes. Early identification of a respiratory or neurological cause would enable transfer of the patient to a specialized ICU for optimal care.^[2]

討論：

- 早在 2008 年，Hernandez, Shuler 就已提出 C.A.U.S.E protocol^[12]，將心臟驟停分成心律不整性心臟驟停及非心律不整性心臟驟停，並利用超音波進行非心律不整性心臟驟停的病因評估，包含低血容、嚴重肺栓塞、心包填塞，以及氣胸。
- Chen, Callaway (2018)^[13]將心臟驟停的病因分成 14 種，並提出相對應的診斷流程（按照順序分別為病史詢問、心電圖、實驗室檢查、心導管、胸腔影像檢查、心臟超音波、電腦斷層血管攝影（排除肺栓塞）、腦部電腦斷層或核磁共振、心臟核磁共振、藥物篩檢）。在 14 種病因當中，某些病因是能

夠透過超音波協助進行診斷的，以下分別列舉。

- **心因性心臟驟停：**

共有急性冠心症、心肌病變導致的心律不整、右心室衰竭、左心室衰竭、結構性心臟病、先天性心律不整等六項^[13]。可透過心電圖、心導管、影像學檢查來進行鑑別診斷。

Focused cardiac ultrasound (FoCUS)^[14]在急重症中越來越被廣泛應用，其觀測重點包含 **left ventricle dimensions and systolic function**、**right ventricular systolic function**、**volume status**、**pericardial effusion and tamponade physiology**、**gross signs of chronic heart disease**、**gross valvular abnormalities**，及 **large intracardiac masses**，可以應用在心臟驟停的病人身上。Elfwén, Hildebrand (2019)^[15]曾研究 **FoCUS shortly after ROSC** 是否可以協助判斷病患後續進行緊急冠狀動脈血管攝影或是胸部電腦斷層的必要性。他們的研究發現在因為 **regional wall motion abnormalities (RWMA)** 而決定進行緊急冠狀動脈血管攝影的病人當中，只有約半數發現冠狀動脈病灶；他們另外發現肺栓塞的病人大都都會同時觀察到 **right ventricular dilation and pressure overload**，應避免在只有 **right ventricular**

dilation 且尚無肺栓塞診斷的病人身上給予血栓溶解劑。整體而言，**FOCUS shortly after ROSC** 的準確性還需進一步提升。

事實上，詳盡的心臟超音波本來就在 **Chen, Callaway** 提出的心臟驟停病因診斷流程當中^[13]。但或許在 **ROSC** 後的初期，非心臟專科醫師便可以透過 **PoCUS** 來對病人的心臟功能進行初步判斷，縮短後續照會專科醫師及治療介入的時間。

- **非心因性心臟驟停：**

共有呼吸衰竭、中毒、上呼吸道阻塞、代謝失調、分配性休克、非創傷性失血、創傷、神經系統受損等八項^[13]。其中代謝失調及毒物造成的心臟驟停多需要病史及實驗室數據來進行診斷，其餘六項則存在著超音波的應用空間。

BLUE protocol^[9]作為呼吸衰竭的超音波診斷方式已經行之有年，歸納出 **artifacts (A-lines, B-lines)**、**lung sliding**、**alveolar consolidation and/or pleural effusion**、**lung point**、**deep vein thrombosis** 及 **posterolateral alveolar and/or pleural syn-drome (PLAPS)** 等各種超音波現象的有無如何對應氣胸、肺水腫、慢性肺阻塞性肺疾或是氣喘發作、肺栓塞和肺炎等診斷。

上呼吸道阻塞不只是心臟驟停時需要排除的病

因之一，同時也關乎治療過程是否會面臨困難插管的狀況。雖然在文獻搜索的過程中並未找到直接利用超音波診斷上呼吸道阻塞的研究，但是有許多論文在討論如何利用超音波進行困難插管的預測^[16-20]，而這也是判斷病人是否有上呼吸道阻塞最重要的目的之一——交由經驗豐富的醫師進行插管、即時準備插管失敗的替代方案（如使用影像喉頭鏡），甚至是進行環甲膜切開術或是氣管切開術，以確保呼吸道的建立。困難插管的超音波預測指標如 **the inability to visualize the hyoid bone under sublingual ultrasound**^[17]、**hyomental distance ratio under submandibular ultra-sound**^[18]、**greater measurements of anterior neck soft tissue**^[19] or **distance from skin to epiglottis at the level of the thyrohyoid membrane**^[20]。需要注意的是，以上提及的超音波預測困難插管指標不一定是在急診場域進行的研究，有些是麻醉科醫師在手術前執行，故這些預測方式是否能夠快速評估、容易學習，會是超音波預測困難插管能否應用在急救及復甦後照護的一大重點。另一方面，如果要在臺灣應用這些預測指標，勢必需要進一步的研究以根據臺灣人的體型得出適當的預測標準。最重要的是，上述的預測指標是基於病人的上呼

吸道解剖構造進行困難插管的評估，而不是用來評估上呼吸道阻塞等情況（其成因及表現可能相當多變），故 PoCUS 究竟是否適合用來判斷上呼吸道阻塞仍需進一步討論。

無論是非創傷性失血或是創傷，都能夠利用 FAST（或是 eFAST）^[8] 的概念評估腹腔內、胸腔內、心包膜內是否有液體累積，評估失血狀況並決定後續處置（例如是否需要手術介入）。另一方面，RUSH protocol^[10]結合了 eFAST^[8] 的概念，從 pump、tank、pipe 三個面向進行休克病人的鑑別診斷。

根據 Hubner, Meron (2014)^[21]，在神經系統疾病當中，最常造成心臟驟停的病因是蜘蛛膜下腔出血（sub-arachnoid hemorrhage, SAH），其他還有顱內出血（intracerebral hemorrhage, ICH）、癲癇發作、缺血性中風等。達到 ROSC 的比例在 SAH 及癲癇發作病人中較多，而在 ICH 及缺血性中風病人中較少。臨床上要鑑別出神經性心臟驟停的病患有着相當的難度，病患不一定會有神經學症狀，經常是在神經學症狀出現、或是其他病因已逐一排除後才會進行腦部影像學檢查。Transcranial color-coded duplex-sonography (TCCD or TCCS) 可以透過 homogenous hyperechoic

lesion 及血管阻塞的有無區分缺血性中風及 ICH^[22]，對於 SAH 的應用則是追蹤（血管痙攣、cerebral autoregulation 等）大於診斷^[23]。Robba, Goffi (2019)^[3] 提出將腦部超音波納入多重系統創傷病患的 e-FAST 評估中，利用 TCCD、transcranial Doppler ultrasonography (TCD) 及 optic nerve sheath diameter (ONSD) 評估病人的顱內壓、顱內血流，以及腦內病灶（例如是否出現中線偏移或是顱內出血等）。對心臟驟停的病人常規進行腦部超音波是否能及早發現病人的神經學病灶、及早介入治療，從而改善神經學預後？應該廣泛應用於所有心臟驟停病人，還是選擇特定族群（如無明顯心因性心臟驟停證據，或有創傷史、有神經學症狀等等）？——腦部超音波對於鑑別神經性心臟驟停病人的應用尚有許多可以討論及研究的空間，然而腦部超音波具有專科性，目前仍不易普及。

Airway and breathing Airway management after return of spontaneous circulation

ERC-ESICM guideline：

- Airway and ventilation support should continue after ROSC is achieved.^[2]
- Patients who remain comatose following ROSC, or who have another clinical indication for sedation and mechanical ventilation,

should have their trachea intubated if this has not been done already during CPR.^[2]

- Tracheal intubation should be performed only by experienced operators who have a high success rate.^[2]
- Correct placement of the tracheal tube must be confirmed with waveform capnography.^[2]

討論：

- 如前面所述，上呼吸道超音波可以用來預測困難插管^[16-20]，故可以導引插管的準備（是否需要找更具經驗的醫師、是否需要準備影像喉頭鏡等等）。
- 二氧化碳壓力波形監測是目前公認評估氣管內管是否成功置入的最佳標準，AHA 也將此應用加入 ACLS 的建議之中^[5]。然而，二氧化碳壓力波形監測也有其缺點。首先，並非所有急診場域都有二氧化碳壓力波形監測可供使用；再者，Long, Koyfman (2017)^[24] 提出許多病生理情況都可能影響 end-tidal CO₂ (EtCO₂)，例如 EtCO₂ 可能受心臟驟停的病因所影響。T.R.U.E. protocol^[25] 發現超音波利用 air-mucosa interface 及 comet-tail artifact 的數量區分氣管或食道插管的準確性與二氧化碳壓力波形監測不相上下，而此種超音波應用也已被 ACLS 列入建議當中^[26]。
- 肺部超音波還可以用 lung

sliding sign 來確認氣管內管是否因放置不當而造成只有單邊肺部通氣^[6, 11, 27]。

Control of ventilation

ERC-ESICM guideline :

- Use a lung-protective ventilation strategy aiming for a tidal volume of 6-8 mL/kg ideal body weight.^[2]
- Acute respiratory distress syndrome (ARDS) is not uncommon in cardiac arrest patients and is associated with worse outcomes.^[2]

討論：

- Mojoli, Bouhemad (2019)^[28] 已整理過肺部超音波在重症醫學的應用價值。
- 急性呼吸窘迫症候群 (ARDS) 和復甦後照護的不良預後有關，而超音波可以用來評估 ARDS 病患的 aeration。肺部超音波 (lung ultrasound, LUS) score^[29] 利用 A-line 及 B-line 的數量或是 tissue-like pattern 的出現判定失去通氣的程度並分成 0-3 分，每半胸分成六個區域，各自可得到 regional LUS score，再加總可得到 global LUS score。研究發現，regional and global LUS scores are strongly correlated to CT assessment of lung tissue density^[30]，使得 LUS 可作為 ARDS 病人接受評估、處置及監測治療效果的優良工具。
- 俯臥通氣 (prone position, PP) 是 ARDS 病人常接受的處置，期望能夠改善預

後，而 LUS 可以預測哪一群病人更能夠因 PP 而受惠。Prat, Guinard (2016)^[31] 利用 LUS score 進行評估，結果顯示 bilateral anterobasal normal aeration 能夠預測 oxygenation improvement in PP。

- 已有許多團隊在討論肺部超音波是否能作為通氣設定的輔助工具，特別是在吐氣末正壓 (positive end-expiratory pressure, PEEP) 的部分。目前 LUS 是否能應用在 PEEP-induced lung recruitment in ARDS patients 仍有爭議，Bouhemad, Brisson (2011)^[32] 將 LUS 和 pressure-volume curve 進行比較，認為 LUS 能夠作為評估肺泡再擴張的工具，但 Chiumello, Mongodi (2018)^[30] 比較 LUS 和電腦斷層評估肺泡再擴張的能力，並反駁了以 LUS 足以評估 PEEP-induced lung recruitment 的論點。會有這樣的差異主要是因為兩個研究對於肺泡再擴張的定義有所不同。
- LUS 也可即時檢查是否有呼吸器相關併發症的出現，例如肋膜積水、氣胸等等。
- 超音波也可以預測脫離呼吸器的預後 (意即拔管後呼吸窘迫)。根據 Soummer, Perber (2012)^[29]， ≥ 17 的 LUS score 和拔管後呼吸窘迫高度相關。Silva, Ait Aissa (2017)^[33] 則發現在 LUS

score 的四種分數中，severe loss of aeration (LUS score = 2) 和拔管後呼吸窘迫最相關。另外研究發現，橫膈膜超音波可透過 diaphragmatic excursion or diaphragmatic thickness fraction 的觀察預測病患脫離呼吸器的預後^[34-40]，但目前尚未有診斷閾值的共識。

Circulation

Coronary reperfusion

ERC-ESICM guideline :

- Emergent cardiac catheterization laboratory evaluation (and immediate percutaneous coronary intervention if required) should be performed in adult patients with ROSC after cardiac arrest of suspected cardiac origin with ST-elevation on the EKG.^[2]
- In patients with ROSC after OHCA without ST-elevation on the EKG, emergent cardiac catheterization laboratory evaluation should be considered if there is an estimated high probability of acute coronary occlusion (e.g., patients with hemodynamic and/or electrical instability).^[2]

討論：

- 利用超音波進行缺血性心臟病的診斷^[41] 雖並非常規但也十分重要，詳細且完整的評估需要多種超音波工具的協力 (例如

2-dimensional echocardiography、pulsed wave Doppler、continuous wave Doppler、trans-esophageal echocardiography、tissue Doppler imaging、3-dimensional echocardiography 等等)，且需要心臟專科醫師操作。

- 即便如此，myocardial wall motion 依然是超音波評估缺血性心臟病的核心原則，也因為如此，前面所提到的 FoCUS^[14]即可評估 RWMA 及 left ventricular ejection fraction，而 Elfwén, Hildebrand (2019)^[15]認為在心臟驟停病患在回復自主心跳後 FoCUS 能夠作為一個輔助診察工具，協助判斷心電圖缺乏 ST 段升高的病人是否需要接受心導管介入術。
- 除此之外，在急診或是復甦後照護場域，還有可能藉由床邊超音波發現和缺血性心臟疾病相關的其他證據。例如 Portugueses, Abdulla (2020)在一篇 case report^[42]中分享了他們在急診中利用 PoCUS 診斷了 post-myocardial infarction ventricular septal rupture 的經驗。保持對缺血性心臟病及其機械性併發症的警覺心，有機會讓病人更早接受專科的評估及後續治療。

Hemodynamic monitoring and management

ERC-ESICM guideline：

- All patients should be monitored with an arterial

line for continuous blood pressure measurements, and it is reasonable to monitor cardiac output in hemodynamically unstable patients.^[2]

- Perform early (as soon as possible) echocardiography in all patients to detect any underlying cardiac pathology and quantify the degree of myocardial dysfunction.^[2]
- Maintain perfusion with fluids, noradrenaline and/or dobutamine, depending on individual patient need for intravascular volume, vasoconstriction or inotropy.^[2]

討論：

- Laher, Watermeyer (2017)^[43]整理了各種血液動力學監測 (hemodynamic monitoring, HDM) 技術，並比較它們預測輸液反應性的可靠程度以及討論它們是否適用於急診場域。在所有的 HDM 當中，Laher, Watermeyer 特別強調超音波在急診的應用價值，並建議臨床評估合併超音波診察在多數情況下應作為急診團隊評估病人的血液動力學的第一步。
- 超音波評估 HDM 的方式有許多種，主要可以分成兩種 bedside maneuvers：(1) respiratory variation, (2) passive leg raising。Respiratory variation

maneuver 的 ultrasound measurements 如 peak aortic flow velocity^[44]、IVC diameter^[45]、superior vena cava collapsibility^[46]、aortic blood flow^[47]等。其共同特徵是只適用於機械通氣的病患，且不適用於心律不整者。另外，除了下腔靜脈之外，其他三者都是以經食道超音波進行觀察。Passive leg raising maneuver 的 ultrasound measurements 如 stroke volume index^[48]、carotid blood flow^[49]、corrected carotid artery flow time^[50]等。這些指標可以應用在自發性呼吸的病人但多數依然不適用於心律不整的病患。另外，passive leg raising maneuver 並不適用於腹內高壓^[51]、穿壓力襪，或是多重創傷的病人。

- 從 ROSC 銜接到 ICU 的過程中，超音波可以作為 HDM 的一種方式。
- 目前 ICU 用於評估輸液反應性的方式有非常多種，每種方式都有各自的限制及優勢，可以參考 Jalil and Cavallazzi (2018)^[52]所提出的流程圖，依照臨床場景選擇適當的輸液反應性評估方式。

General intensive care management

討論：

Volpicelli, Mayo (2020)^[53]曾整理過 PoCUS 在加護病房的應用。PoCUS 在加護病房當中有諸多應用價值，包含前述預測脫離呼吸器預後、觀察呼

吸器併發症等等；ERC-ESICM guideline 建議心臟驟停病人應預防深部靜脈栓塞^[2]，而 PoCUS 也可以即時觀察病人有無肺栓塞（如 engorged right ventricle 及 D-shaped left ventricle），或是深部靜脈栓塞（incomplete compressibility of the veins）的跡象；另外，PoCUS 也可以指引侵入性治療（例如 venous access、胸腔穿刺術、腹腔穿刺術）的進行，或是評估病人的輸液反應性。

另一方面，雖然腦部超音波（brain ultra-sonography, BUS）目前並未常規地在 ICU 中被使用，卻有其發展潛力。Robba, Goffi (2019)^[3]和 Rasulo and Bertuetti (2019)^[54]曾對於 BUS 的應用價值進行過詳細的整理。目前 BUS 主要可以分成兩種——transcranial Doppler ultrasonography (TCD)及 transcranial color-coded duplex-sonography (TCCD or TCCS)。TCD 透過腦血管的血流模式，可以獲得 peak systolic flow velocity (FVs)、end-diastolic velocity (FVd)、mean velocity (FVm)、pulsatility index (PI)等等數據，進而評估腦血流（cerebral blood flow, CBF）、顱內壓（intracranial pressure, ICP）、cerebral auto-regulation 等等。TCCD 則可以直接識別腦內構造，並利用 color Doppler 及解剖位置辨認顱內動脈，更精確的獲得 FVs、FVd、FVm、PI 等數據，讓腦部解剖構造及功能可以被同時觀察。BUS 可在床邊非侵入性、低輻射性的評估中線偏移、水腦、顱內壓等。非侵入

性顱內壓（noninvasive ICP, nICP）的評估方式有許多種，在使用 TCD/TCCD 的情形下，可以透過 PI、noninvasive cerebral perfusion pressure、或 mathematical models 進行 nICP 的評估，目前有臨床試驗在進行 TCD-derived nICP monitoring methods 和 invasive ICP measurement 的比較^[55]。另一種 nICP 評估方式是利用 optic nerve sheath 和腦脊髓液相通的特性，以視神經超音波測量 optic nerve sheath diameter (ONSD) 3 mm after the globe^[56]。即便目前 BUS 仍無法取代侵入性顱內壓監測技術及其它影像學檢查，但 BUS 在未來的發展及成熟是可以被期待的。如前面所提到，最常造成神經性心臟驟停的病因是 SAH，其他還有 ICH、癲癇、缺血性中風等^[21]。達到 ROSC 的比例在 SAH 及癲癇病人中較多，而在 ICH 及缺血性中風病人中較少。其中癲癇病人的神經學預後比 SAH 患者好，SAH 患者能夠存活到出院的比例則相當低。血管痙攣和 SAH 的高死亡率及後遺症有相當大的關係，透過 BUS 計算 Lindegaard Ratio ($LR = FVm \text{ of MCA} \text{ divided by } FVm \text{ of ICA}$)^[23, 57]， $LR > 3$ 時代表有血管痙攣，可以再透過 FVm of MCA 的數值區分其嚴重程度。Rasulo and Bertuetti (2019)^[54]建議 SAH 的病人應該以一天兩次到兩天一次的頻率以 TCCD 進行 cerebral blood flow velocity (CBFV)的監測，以評估是否需要其他的影像檢查或是治療。

BUS 除了可以區分 ICH 和

缺血性中風^[22]之外也可以用來追蹤。舉例而言，第三腦室中線偏移的程度和顱內血塊體積相關，重複進行 TCCS 可以評估血塊體積變化的情形，也可以用作預後評估^[58]。在缺血性中風的病人身上，TCD 可以評估血管再通的情形、評估預後，甚至是利用 microembolic signals 預測未來復發的可能性^[59]。

BUS 在神經重症有其應用價值是非常直觀的，但 Robba, Goffi (2019)^[3]提出將其應用在一般加護病房的想法，其中針對 post-cardiac arrest syndrome 的應用主要聚焦在顱內壓監測的部分，這我們會在下一個段落進行討論。

加護單位的醫師應該根據病人的病因及臨床變化，靈活使用超音波協助判斷病情、決定治療方向、評估治療效果，充分發揮超音波其高機動性的特徵。

Prognostication 討論：

ERC-ESICM guideline 建議 comatose patient with Glasgow Motor Score ≤ 3 at ≥ 72 hr after ROSC 應該利用多種方式去評估神經學預後，這些方式包含臨床檢查(pupillary and corneal reflex, status myoclonus), 電生理學 (N20 SSEP wave, highly malignant EEG), 生物指標 (neuron-specific enolase) and 影像學（電腦斷層或核磁共振）等。同時應注意這些評估不可受鎮靜藥物或其他干擾因子的影響^[2]。

BUS 可以用來診斷腦死。腦死時的腦內變化主要是腦內循環停止 (cerebral circulatory arrest, CCA)，這是因顱內壓上升超過舒張壓所導致，而 BUS 便是藉由觀測 CCA 來辨認腦死。

Ducrocq, Hassler (1998)^[60] 提出了 TCD 對腦內循環停止的診斷標準。CCA 的腦血流波形有四個隨時間變化的模式：(1) 在顱內壓上升的過程中，FVd 會隨之下降，當顱內壓相當於舒張壓，此時 FVd = 0。(2) 隨著顱內壓更上升，FVd 會再次出現，但方向與原先相反，形成 oscillating flow。(3) 顱內壓更上升、血流隨之減少，使得波形只能看到短暫的 systolic spike。(4) 無血流訊號。腦死的診斷是建立在雙側顱內動脈 (通常是 MCA) 有 oscillating flow or systolic spike，再經由雙側顱外動脈 (internal carotid artery or vertebral artery) 的確認。American Academy of Neurology 則認為以 TCD 診斷腦死時前循環和後循環都應進行檢查^[61]。

既然 BUS 足以診斷腦死，那麼或許也能夠利用 BUS 進行神經學預後不良的預測。舉例而言，在顱內壓上升、FVd 下降的過程中，是否能夠找到一個閾值來判斷神經學預後？或者說既然顱內壓的上升在 CCA 扮演重要的角色，那麼各種 nICP 的測量方式能否找到適當的 nICP 閾值來預測不良的神經學預後？根據 Sinha and Parnia (2017)^[62]的整理，目前 TCD 對於腦血流的評估是否能應用於

神經學預後預測尚未有明確答案。而另一方面，已有不少研究在探討 ONSD 在心臟驟停的病人中與神經學預後的關聯性^[63-66]，其判斷不良預後的 ONSD 閾值落在 5.11-6.7 mm 之間。關於 PoCUS 在神經學預後評估的應用，尚待更多研究及討論。有鑒於超音波對腦壓、腦部循環的評估不會受到鎮靜藥物等混淆因素的影響，腦部超音波或許可以成為神經學預後評估的一大利器。

Organ donation

ERC-ESICM guideline：

- Organ donation should be considered in those who have achieved ROSC and who fulfill neurological criteria for death.[2]
- In comatose ventilated patients who do not fulfil neurological criteria for death, if a decision to start end-of-life care and withdrawal of life support is made, organ donation should be considered for when circulatory arrest occurs.[2]

討論：

- 超音波可判斷腦死，且也有機會應用於判斷神經學預後，故或許可以及早確認病人及家屬的捐贈意願，並縮短後續器官捐贈準備工作的時長。
- Lebovitz, Tabbutt (2016)^[67] 提出利用 LUS 評估腦死病人是否能進行肺臟捐贈的想法。LUS 已被證實能夠

評估許多種肺部病灶，而在他們的研究中，LUS 被用來評估 lung sliding、A or B profile、consolidation、or pleural fluid，他們並發現 LUS 對於肺部病灶的診斷敏感性高於 AP view chest X-ray；而 LUS 相對於 CT，則能夠避免病人被過度移動，以防病人因為移動而影響其通氣設定，甚至造成 lung derecruitment、氣管內管移位等情況發生。同時，無論是做 AP view chest X-ray 或是電腦斷層，都需要等待影像科醫師進行判讀，但 LUS 在經驗豐富的操作者之操作下可以馬上判斷腦死病人有無肺部病灶。

- 目前利用超音波進行器官捐贈評估的研究還不夠多，這或許是未來能夠發展的其中一個方向。如果超音波進行器官捐贈的評估可以廣泛應用於各個器官，則未來捐贈者接受評估時或許不需再被過度移動；如果超音波進行器官捐贈的評估無法廣泛應用於各個器官，則或許可以有有限的利用在只想捐贈部分器官的個案。

Discussion

面對心臟驟停的病患，PoCUS 已被提出可應用在 CPR 急救階段以及病因診斷的部分。這篇文獻回顧想探討的是 PoCUS 對於心臟驟停病人的應用是否能持續延伸到復甦後照護，甚至協助預後判斷。這篇文章以 ERC-ESICM

guideline 對於復甦後照護的建議為基礎，討論在復甦後照護的各個階段目前超音波有什麼發展成果。在 **immediate post-resuscitation care** 的部分，基本上可以視作 **US-CAB protocol**^[6, 11] 的延伸，用超音波確認插管是否成功，以及即時檢查心臟驟停病因並引導治療方式；在 **diagnosis of cause of cardiac arrest** 的階段，我們整理了更詳盡的過去研究，提醒醫師 **PoCUS** 不只能協助排除心因性心臟驟停，也能夠觀察是否有呼吸衰竭、上呼吸道阻塞、創傷或非創傷性失血，甚至是檢查神經系統病灶。

在呼吸道和呼吸的部分，**PoCUS** 可以預測病人是否可能困難插管、確認插管成功、協助設定呼吸器、觀察呼吸器相關併發症、預測脫離呼吸器的預後；在循環的部分，**PoCUS** 可以作為診斷心血管疾病的一項輔助工具、可以即時觀察是否發生缺血性心臟疾病的機械性併發症，另外也可以利用超音波進行輸液反應性的預測。

在一般加護病房中，超音波可以隨時按照病人病情的發展進行檢查、指引治療計畫、指引侵入性治療、評估治療效果等，具有高度的機動性；在預後評估的部分，**BUS** 可以診斷腦死，也或許可以找到適當的標準值來及早預測不良的神經學預後，讓醫療團隊可以和家屬討論是否撤除維生醫療、是否有意願進行器官捐贈等等；在器官捐贈的部分，目前已經有團隊指出可以利用超音波評估腦死病人的肺臟是否適合捐贈，或許未來可以發展 **PoCUS** 在各種器官捐贈上的應用價值，以避免捐贈者在進行檢查時被過多的移動，造成氣管內管移位等不良影響。

PoCUS 具有即時、方便、便宜、無輻射等優點，在心臟驟停病人身上有許多應用價值，但它也有許多限制。首先，超音波準確度與操作者的技術相關，許多 **protocol** 都已利用明確的超音波診斷標準來讓操作者之間的經驗差距減少、學習更為容易，而新提出的超音波應用也應朝這方面努力，才能

體現 **PoCUS** 的價值。再者，復甦後照護當中，超音波並非協助診斷、改變治療方針的唯一選擇，在各個選擇當中，超音波的敏感性及特異性和其他選擇相比究竟有沒有更大的優勢？超音波能否取代某些選擇又或者只能作為一種輔助工具？超音波的應用能否改善病人的預後或至少能夠符合「不傷害」的原則，不造成診斷及治療的延誤？這些題目都需要更多實證醫學研究，來確認床邊超音波應用的可行性。最後，復甦後急救的病人常接受一些特殊的治療，例如體溫管理等，這些治療會不會造成什麼生理變化進而影響超音波的判讀、**protocol** 當中的超音波標準值是否適用於這類的病人，也是可以討論的方向。

Conclusion

PoCUS 在心臟驟停病人復甦後急救已有部分應用價值，但仍有許多未發展或是未成熟的應用面向，等待專家們進行研究和探討。

表一

Cardiac and vessel US SLAX/PLAX/P SAX/A4CH/SI VC/TEE/...	Heart contractility	LV dimensions and systolic function, RV systolic function	
	Cardiac tamponade	Pericardial effusion, right chamber collapse	
	Massive PE	An engorged RV with a flattened LV	
	Hypovolemia	Flattened RV and LV, flat IVC (diameter < 5 mm or collapsed)	
	Hemodynamic	Respiratory variation	Passive leg raising
		(1) Δ aortic blood flow > 18% (TEE) (2) Δ peak aortic blood flow velocity > 12% (TEE) (3) Δ IVC diameter > 12% (SIVC)	(1) Δ velocity time integral of aortic blood flow or Δ stroke volume index > 12.5% (apical 5-chamber view, PLAX) (2) Δ carotid blood flow > 20%

		(4) SVC collapsibility > 36% (TEE)	(3) Increased carotid corrected flow time > 7 ms
	Aortic aneurysm	(1) Thoracic and abdominal aorta: outer wall to outer wall > 3 cm (Sliding from subxiphoid to the umbilicus) (2) Iliac arteries: outer wall to outer wall > 1.5 cm	
	Aortic dissection	Aortic root, aortic arch, thoracic and abdominal aorta (suprasternal and parasternal view, + sliding from subxiphoid to the umbilicus): proximal aortic root dilation > 3.8 cm, aortic intimal flap	
	DVT	Femoral & popliteal veins: incomplete compression of the veins (Scanning down from the inguinal ligament and popliteal fossa)	
LUS Upper and lower part of bilateral anterior/lateral /posterolateral chest wall	Pulmonary edema	Lung sliding sign (+), B profile	
	PE	Lung sliding (+), A profile, DVT (+)	
	COPD or asthma	Lung sliding sign (+), A profile, DVT (-), PLAP (-)	
	Pneumonia	(1) Lung sliding sign (+), A profile, DVT (-), PLAP (+) (2) Any lung sliding, A/B or C profile (3) Lung sliding sign (-), B' profile	
	Pneumothorax	Lung sliding sign (-), A lines (+), B lines (-), lung point (+)	
	LUS score	LUS score is measured in 6 regions per hemithorax (upper and lower parts of anterior, lateral and posterior areas), sum of points is between 0-36 (1) Normal aeration (score 0): lung sliding (+), A lines or ≤ 2 B lines (2) Moderate loss of lung aeration (score 1): ≥ 3 B lines (3) Severe loss of aeration (score 2): coalescent B lines (4) Lung consolidation (score 3): tissue pattern	
Airway US	Difficult intubation prediction	(1) Sublingual ultrasound: inability to visualize the hyoid bone (2) Submandibular ultrasound: hyomental distance ratio (neutral position/head extension) (3) Anterior neck soft tissue at the thyrohyoid membrane level (4) Distance from skin to epiglottis > 27.5 mm at the thyrohyoid membrane level	
	Intubation confirmation	US-A: anterior neck superior to the suprasternal notch	US-B
		Tracheal intubation: 1 air-mucosa interface with 1 comet-tail artifact Esophageal intubation: 2 air mucosa interfaces	One-lung intubation Pneumothorax
Diaphragm US	Diaphragmatic excursion	The distance between the highest and lowest point of the diaphragm in the M-mode (Right mid-axillary line and left posterior axillary line)	
	Diaphragm thickening fraction	(end-inspiration thickness - end-expiration thickness)/end-expiration thickness (At the right mid-axillary line, between 8 th -10 th rib spaces)	
Abdominal US	Pathologic fluid	(1) RUQ: hepatorenal recess, diaphragm and right inferior hemithorax (posterior to the mid-axillary line between the 8 th -11 th rib spaces) (2) LUQ: splenorenal recess, diaphragm and left inferior hemithorax (along the posterior axillary line between the 6 th -9 th rib spaces) (3) Suprapubic: rectovesical space in men and pouch of Douglas and vesico-uterine pouches in women (Immediately cephalad	

		to the pubic symphysis) (4)
Brain and optic nerve US Transtempora l/transorbital/tr ansoccipital/ ...	ICH	Homogenous hyperechoic mass lesion (+)
	Ischemic stroke	Homogenous mass lesion (-), vessel occlusion (+) Microemboli signals (MES): duration 300 ms, amplitude 3 dB higher than the background blood flow signal, typically unidirectional and occur randomly within the cardiac cycle. *Injection of gaseous contrast and detection of MES under TCD indicates patent foramen ovale (right-to-left shunt)
	Midline shift	Difference of distance between the 3 rd ventricle to bilateral temporal bone divided by 2
	Hydrocephalus	Width of the third or lateral ventricle
	nICP evaluation	TCD: based-on PI, nCPP, or mathematical models ONSD
	Vasospasm	LR = FVm of MCA/FVm of ICA (1) LR < 3: hyperdynamic flow (2) LR 3-6, FVm of MCA 120-149 cm/s: mild vasospasm (3) LR 3-6, FVm of MCA 150-199 cm/s: moderate vasospasm (4) LR > 6, FVm of MCA > 200 cm/s: severe vasospasm
	Brain death (cerebral circulatory arrest)	Cerebral blood flow pattern changes as described below, should be observed in bilateral intracranial anterior & posterior circulation, and confirmed in extracranial arteries (ICA or vertebral artery) (1) Decreased FVd: FVd = 0 as ICP = diastolic BP (2) Oscillating flow: as ICP ≥ systolic BP (3) Systolic spikes (4) No flow signals

表二

Stage	Ultrasound findings		
Immediate post-resuscitation care	US-CAB	US-C	Heart contractility Cause of cardiac arrest: cardiac tamponade, massive PE, hypovolemia
		US-A	Tracheal intubation: 1 air-mucosa interface with 1 comet-tail artifact Esophageal intubation: 2 air mucosa interfaces
		US-B	One-lung intubation Pneumothorax
Diagnosis of cause of cardiac arrest	C.A.U.S.E For non- arrhythmogenic cardiac arrest	Cardiac tamponade, massive PE, hypovolemia Pneumothorax	
	FoCUS for cardiac causes	Heart contractility, pericardial effusion/cardiac tamponade, hypovolemia Gross signs of chronic heart disease or valvular abnormalities, large intracardiac masses	
	BLUE For respiratory failure	Pulmonary edema, PE, COPD or asthma, pneumonia, pneumothorax	
	Airway ultrasound		
	eFAST for trauma or non-traumatic exsanguination	Pathologic fluid (RUQ, LUQ, pericardium, suprapubic) Pneumothorax	

	RUSH for shock patients	The pump	Pericardial effusion, heart contractility, massive PE
		The tank	IVC size and respiratory dynamics eFAST Pulmonary edema
		The pipes	Abdominal and thoracic aortic aneurysm Aortic dissection (aortic root, aortic arch, thoracic and abdominal aorta) DVT (Femoral and popliteal veins)
	BUS May be added into eFAST for multisystem trauma	nICP	Brain anatomy assessment: e.g., midline shift, ICH, acute ischemic stroke
Airway and breathing	US-A/B	Intubation confirmation	
	Airway US	Difficult intubation prediction	
	LUS score	Monitoring aeration, ventilator-associated complication, ... Prediction of oxygenation improvement in PP: bilateral anterobasal normal aeration Prediction of postextubation distress: LUS score ≥ 17 at the end of the spontaneous breathing trial	
	Diaphragm US	Weaning outcome prediction: diaphragmatic excursion, diaphragm thickening fraction	
Circulation	FoCUS	For assessment of the need for PCI in patients without ST-elevation	
	Hemodynamic techniques	Respiratory variation: aortic blood flow, IVC diameter, SVC collapsibility Passive leg raising: aortic blood flow, carotid blood flow	
General intensive care	BUS for neurocritical care monitoring	(1) SAH: evaluation of vasospasm (2) Ischemic stroke: diagnosis, recanalization, detection of microemboli (higher risk of recurrence) (3) ICH: midline shift, hematoma expansion	
Prognostication and organ donation	BUS	(1) Brain death diagnosis (2) nICP monitoring	
	LUS score	Lung sliding, A or B profile, consolidation, pleural fluid lung sliding 、 A or B profile 、 consolidation 、 or pleural fluid	

A4CH: apical four-chamber, BP: blood pressure, BUS: brain ultrasonography, CSF: cerebrospinal fluid, DVT: deep vein thrombosis, FVd: diastolic flow velocity, FVm: mean flow velocity, ICA: internal carotid artery, ICH: intracerebral hemorrhage, ICP: intracranial pressure (nICP: noninvasive ICP measurement), IVC: inferior vena cava, LR: Lindegaard ratio, LUS: lung ultrasound, LV: left ventricle, MCA: middle cerebral artery, ONSD: optic nerve sheath diameter, PE: pulmonary embolism, PLAP: posterolateral alveolar and/or pleural syndrome, PLAX: parasternal long axis, PP: prone position, PSAX: parasternal short axis, RV: right ventricle, SIVC: subcostal inferior vena cava, SAH: subarachnoid hemorrhage, SLAX: subcostal/subxiphoid long axis, SVC: superior vena cava

References

1. Perkins, G.D., et al., European Resuscitation Council Guidelines 2021: Executive summary. Resuscitation, 2021. 161: p. 1-60.

2. Nolan, J.P., et al., European Resuscitation Council and European Society of Intensive Care Medicine guidelines 2021: post-resuscitation care. *Intensive Care Medicine*, 2021. 47(4): p. 369-421.
3. Robba, C., et al., Brain ultrasonography: methodology, basic and advanced principles and clinical applications. A narrative review. *Intensive Care Medicine*, 2019. 45(7): p. 913-927.
4. Kronick, S.L., et al., Part 4: Systems of Care and Continuous Quality Improvement. *Circulation*, 2015. 132(18_suppl_2): p. S397-S413.
5. Panchal, A.R., et al., Part 3: Adult Basic and Advanced Life Support: 2020 American Heart Association Guidelines for Cardiopulmonary Resuscitation and Emergency Cardiovascular Care. *Circulation*, 2020. 142(16_suppl_2): p. S366-S468.
6. Lien, W.C., et al., US-CAB protocol for ultrasonographic evaluation during cardiopulmonary resuscitation: Validation and potential impact. *Resuscitation*, 2018. 127: p. 125-131.
7. Merchant, R.M., et al., Part 1: Executive Summary: 2020 American Heart Association Guidelines for Cardiopulmonary Resuscitation and Emergency Cardiovascular Care. *Circulation*, 2020. 142(16_suppl_2): p. S337-S357.
8. Bloom, B.A. and R.C. Gibbons, Focused Assessment with Sonography for Trauma, in *StatPearls*. 2021, StatPearls Publishing: Treasure Island (FL).
9. Lichtenstein, D.A. and G.A. Mezière, Relevance of Lung Ultrasound in the Diagnosis of Acute Respiratory Failure*: The BLUE Protocol. *Chest*, 2008. 134(1): p. 117-125.
10. Perera, P., et al., The RUSH exam: Rapid Ultrasound in SHock in the evaluation of the critically ill. *Emerg Med Clin North Am*, 2010. 28(1): p. 29-56, vii.
11. Lien, W.-C., et al., A novel US-CAB protocol for ultrasonographic evaluation during cardiopulmonary resuscitation. *Resuscitation*, 2017. 115: p. e1-e2.
12. Hernandez, C., et al., C.A.U.S.E.: Cardiac arrest ultra-sound exam—A better approach to managing patients in primary non-arrhythmogenic cardiac arrest. *Resuscitation*, 2008. 76(2): p. 198-206.
13. Chen, N., et al., Arrest etiology among patients resuscitated from cardiac arrest. *Resuscitation*, 2018. 130: p. 33-40.
14. Via, G., et al., International evidence-based recommendations for focused cardiac ultrasound. *J Am Soc Echocardiogr*, 2014. 27(7): p. 683.e1-683.e33.
15. Elfwén, L., et al., Focused cardiac ultrasound after return of spontaneous circulation in cardiac-arrest patients. *Resuscitation*, 2019. 142: p. 16-22.
16. Adi, O., et al., Usage of airway ultrasound as an assessment and prediction tool of a difficult airway management. *The American Journal of Emergency Medicine*, 2021. 42: p. 263.e1-263.e4.
17. Hui, C.M. and B.C. Tsui, Sublingual ultrasound as an assessment method for predicting difficult intubation: a pilot study. *Anaesthesia*, 2014. 69(4): p. 314-319.
18. Wojtczak, J.A., Submandibular Sonography. *Journal of Ultrasound in Medicine*, 2012. 31(4): p. 523-528.

19. Adhikari, S., et al., Pilot Study to Determine the Utility of Point-of-care Ultrasound in the Assessment of Difficult Laryngoscopy. *Academic Emergency Medicine*, 2011. 18(7): p. 754-758.
20. Pinto, J., et al., Predicting difficult laryngoscopy using ultrasound measurement of distance from skin to epiglottis. *Journal of Critical Care*, 2016. 33: p. 26-31.
21. Hubner, P., et al., Neurologic Causes of Cardiac Arrest and Outcomes. *The Journal of Emergency Medicine*, 2014. 47(6): p. 660-667.
22. Maurer, M., et al., Differentiation Between Intracerebral Hemorrhage and Ischemic Stroke by Transcranial Color-Coded Duplex-Sonography. *Stroke*, 1998. 29(12): p. 2563-2567.
23. Robba, C., et al., Transcranial Doppler: a stethoscope for the brain-neurocritical care use. *Journal of Neuroscience Research*, 2018. 96(4): p. 720-730.
24. Long, B., A. Koyfman, and M.A. Vivirito, Capnography in the Emergency Department: A Review of Uses, Waveforms, and Limitations. *The Journal of Emergency Medicine*, 2017. 53(6): p. 829-842.
25. Chou, H.C., et al., Tracheal rapid ultrasound exam (T.R.U.E.) for confirming endotracheal tube placement during emergency intubation. *Resuscitation*, 2011. 82(10): p. 1279-84.
26. Neumar, R.W., et al., Part 1: Executive Summary. *Circulation*, 2015. 132(18_suppl_2): p. S315-S367.
27. Weaver, B., M. Lyon, and M. Blaivas, Confirmation of Endotracheal Tube Placement after Intubation Using the Ultrasound Sliding Lung Sign. *Academic Emergency Medicine*, 2006. 13(3): p. 239-244.
28. Mojoli, F., et al., Lung Ultrasound for Critically Ill Patients. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 2019. 199(6): p. 701-714.
29. Soummer, A., et al., Ultrasound assessment of lung aeration loss during a successful weaning trial predicts postextubation distress*. *Critical Care Medicine*, 2012. 40(7): p. 2064-2072.
30. Chiumello, D., et al., Assessment of Lung Aeration and Recruitment by CT Scan and Ultrasound in Acute Respiratory Distress Syndrome Patients*. *Critical Care Medicine*, 2018. 46(11): p. 1761-1768.
31. Prat, G., et al., Can lung ultrasonography predict prone positioning response in acute respiratory distress syndrome patients? *Journal of Critical Care*, 2016. 32: p. 36-41.
32. Bouhemad, B., et al., Bedside Ultrasound Assessment of Positive End-Expiratory Pressure-induced Lung Recruitment. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 2011. 183(3): p. 341-347.
33. Silva, S., et al., Combined Thoracic Ultrasound Assessment during a Successful Weaning Trial Predicts Postextubation Distress. *Anesthesiology*, 2017. 127(4): p. 666-674.
34. Qian, Z., et al., Ultrasound assessment of diaphragmatic dysfunction as a predictor of weaning outcome from mechanical ventilation: a systematic review and meta-analysis. *BMJ Open*, 2018. 8(9): p. e021189.

35. Jiang, J.-R., et al., Ultrasonographic Evaluation of Liver/Spleen Movements and Extubation Outcome. *Chest*, 2004. 126(1): p. 179-185.
36. Kim, W.Y., et al., Diaphragm dysfunction assessed by ultrasonography: Influence on weaning from mechanical ventilation*. *Critical Care Medicine*, 2011. 39(12): p. 2627-2630.
37. DiNino, E., et al., Diaphragm ultrasound as a predictor of successful extubation from mechanical ventilation. *Thorax*, 2014. 69(5): p. 431-435.
38. Ferrari, G., et al., Diaphragm ultrasound as a new index of discontinuation from mechanical ventilation. *Critical Ultrasound Journal*, 2014. 6(1): p. 8.
39. Spadaro, S., et al., Can diaphragmatic ultrasonography performed during the T-tube trial predict weaning failure? The role of diaphragmatic rapid shallow breathing index. *Critical Care*, 2016. 20(1): p. 305.
40. Farghaly, S. and A.A. Hasan, Diaphragm ultrasound as a new method to predict extubation outcome in mechanically ventilated patients. *Australian Critical Care*, 2017. 30(1): p. 37-43.
41. Leischik, R., et al., Echocardiographic assessment of myocardial ischemia. *Annals of translational medicine*, 2016. 4(13): p. 259-259.
42. Portuguese, A.J., et al., A Case Report: Point-of-care Ultrasound in the Diagnosis of Post-Myocardial Infarction Ventricular Septal Rupture. *Clinical practice and cases in emergency medicine*, 2020. 4(3): p. 407-410.
43. Laher, A.E., et al., A review of hemodynamic monitoring techniques, methods and devices for the emergency physician. *The American Journal of Emergency Medicine*, 2017. 35(9): p. 1335-1347.
44. Feissel, M., et al., Respiratory Changes in Aortic Blood Velocity as an Indicator of Fluid Responsiveness in Ventilated Patients With Septic Shock. *Chest*, 2001. 119(3): p. 867-873.
45. Feissel, M., et al., The respiratory variation in inferior vena cava diameter as a guide to fluid therapy. *Intensive Care Medicine*, 2004. 30(9): p. 1834-1837.
46. Vieillard-Baron, A., et al., Superior vena caval collapsibility as a gauge of volume status in ventilated septic patients. *Intensive Care Medicine*, 2004. 30(9): p. 1734-1739.
47. Monnet, X., et al., Esophageal Doppler monitoring predicts fluid responsiveness in critically ill ventilated patients. *Intensive Care Medicine*, 2005. 31(9): p. 1195-1201.
48. Lamia, B., et al., Echocardiographic prediction of volume responsiveness in critically ill patients with spontaneously breathing activity. *Intensive Care Medicine*, 2007. 33(7): p. 1125-1132.
49. Marik, P.E., et al., The Use of Bioreactance and Carotid Doppler to Determine Volume Responsiveness and Blood Flow Redistribution Following Passive Leg Raising in Hemodynamically Unstable Patients. *Chest*, 2013. 143(2): p. 364-370.
50. Barjaktarevic, I., et al., Ultrasound Assessment of the Change in Carotid Corrected Flow Time in Fluid Responsiveness in Undifferentiated Shock. *Critical Care Medicine*, 2018. 46(11): p. e1040-e1046.

51. Mahjoub, Y., et al., The passive leg-raising maneuver cannot accurately predict fluid responsiveness in patients with intra-abdominal hypertension*. *Critical Care Medicine*, 2010. 38(9): p. 1824-1829.
52. Jalil, B.A. and R. Cavallazzi, Predicting fluid responsiveness: A review of literature and a guide for the clinician. *The American Journal of Emergency Medicine*, 2018. 36(11): p. 2093-2102.
53. Volpicelli, G., P. Mayo, and S. Rovida, Focus on ultrasound in intensive care. *Intensive Care Medicine*, 2020. 46(6): p. 1258-1260.
54. Rasulo, F.A. and R. Bertuetti, Transcranial Doppler and Optic Nerve Sonography. *Journal of Cardiothoracic and Vascular Anesthesia*, 2019. 33: p. S38-S52.
55. Rasulo, F.A. Invasive Versus Non Invasive Measurement of Intracranial Pressure in Brain Injury Trial (IMPRESSIT). July 31, 2022 (Estimated Study Completion Date); Available from: <https://clinicaltrials.gov/ct2/show/NCT02322970?term=IMPRESSIT&cond=IMPRESSIT&rank=1>.
56. Hansen, H.-C. and K. Helmke, Validation of the optic nerve sheath response to changing cerebrospinal fluid pressure: ultrasound findings during intrathecal infusion tests. *Journal of Neurosurgery*, 1997. 87(1): p. 34-40.
57. Lindegaard, K.F., et al., Cerebral vasospasm after subarachnoid haemorrhage investigated by means of transcranial Doppler ultrasound. *Acta Neurochir Suppl (Wien)*, 1988. 42: p. 81-4.
58. Tang, S.-C., et al., Third Ventricle Midline Shift Due to Spontaneous Supratentorial Intracerebral Hemorrhage Evaluated by Transcranial Color-Coded Sonography. *Journal of Ultrasound in Medicine*, 2006. 25(2): p. 203-209.
59. Sarkar, S., et al., Role of transcranial Doppler ultrasonography in stroke. *Postgraduate Medical Journal*, 2007. 83(985): p. 683-689.
60. Ducrocq, X., et al., Consensus opinion on diagnosis of cerebral circulatory arrest using Doppler-sonography: Task Force Group on cerebral death of the Neurosonology Research Group of the World Federation of Neurology. *Journal of the Neurological Sciences*, 1998. 159(2): p. 145-150.
61. Wijdicks, E.F.M., et al., Evidence-based guideline update: Determining brain death in adults. Report of the Quality Standards Subcommittee of the American Academy of Neurology, 2010. 74(23): p. 1911-1918.
62. Sinha, N. and S. Parnia, Monitoring the Brain After Cardiac Arrest: a New Era. *Current Neurology and Neuroscience Reports*, 2017. 17(8): p. 62.
63. Ertl, M., et al., Transorbital Sonography for Early Prognostication of Hypoxic-Ischemic Encephalopathy After Cardiac Arrest. *Journal of Neuroimaging*, 2018. 28(5): p. 542-548.
64. Ueda, T., et al., Sonographic Optic Nerve Sheath Diameter: A Simple and Rapid Tool to Assess the Neurologic Prognosis After Cardiac Arrest. *Journal of Neuroimaging*, 2015. 25(6): p. 927-930.
65. You, Y., et al., Relationship between time related serum albumin concentration, optic nerve sheath diameter, cerebrospinal fluid pressure, and neurological prognosis in cardiac arrest survivors. *Resuscitation*, 2018. 131: p. 42-47.

66. Chelly, J., et al., The optic nerve sheath diameter as a useful tool for early prediction of outcome after cardiac arrest: A prospective pilot study. *Resuscitation*, 2016. 103: p. 7-13.
67. Lebovitz, D.J., et al., Lung Ultrasound Utility in the Management of the