

COVID-19治療の最終手段

呼吸補助を目的としたRespiratory ECMO

“ V-V ECMO ”

長崎みなとメディカルセンター臨床工学部

塚野 雅幸

Mail: [m.tsukano17@gmail.com](mailto:m.tsukano17@gmail.com)

ECMOとは

ECMO

Extracorporeal Membrane Oxygenation

体外式膜型人工肺



血液を**脱血** 体外で**ガス交換**

血液を体外に取り出すこと

血液を**送血** **肺や心臓**を補助する

血液を体外に戻すこと

# V-V ECMOの意味と基本モード

基本モード

脱血する場所

送血する場所

☒ V-A ECMO (PCPS)

呼吸・循環を補助する

☒ V-V ECMO (Respiratory ECMO)

呼吸を補助する

# V-V ECMO

V-V ECMOは、肺が何らかの原因により機能不全となった場合に**呼吸機能を代行**し原疾患治療の時間稼ぎを行うためのものです。V-V ECMOを導入したからといって肺が良くなるわけではありません。またこの戦略は**長期の補助**が必要となる。それにより、DIC様の病態や出血合併症が生じやすく管理が特に難しい。

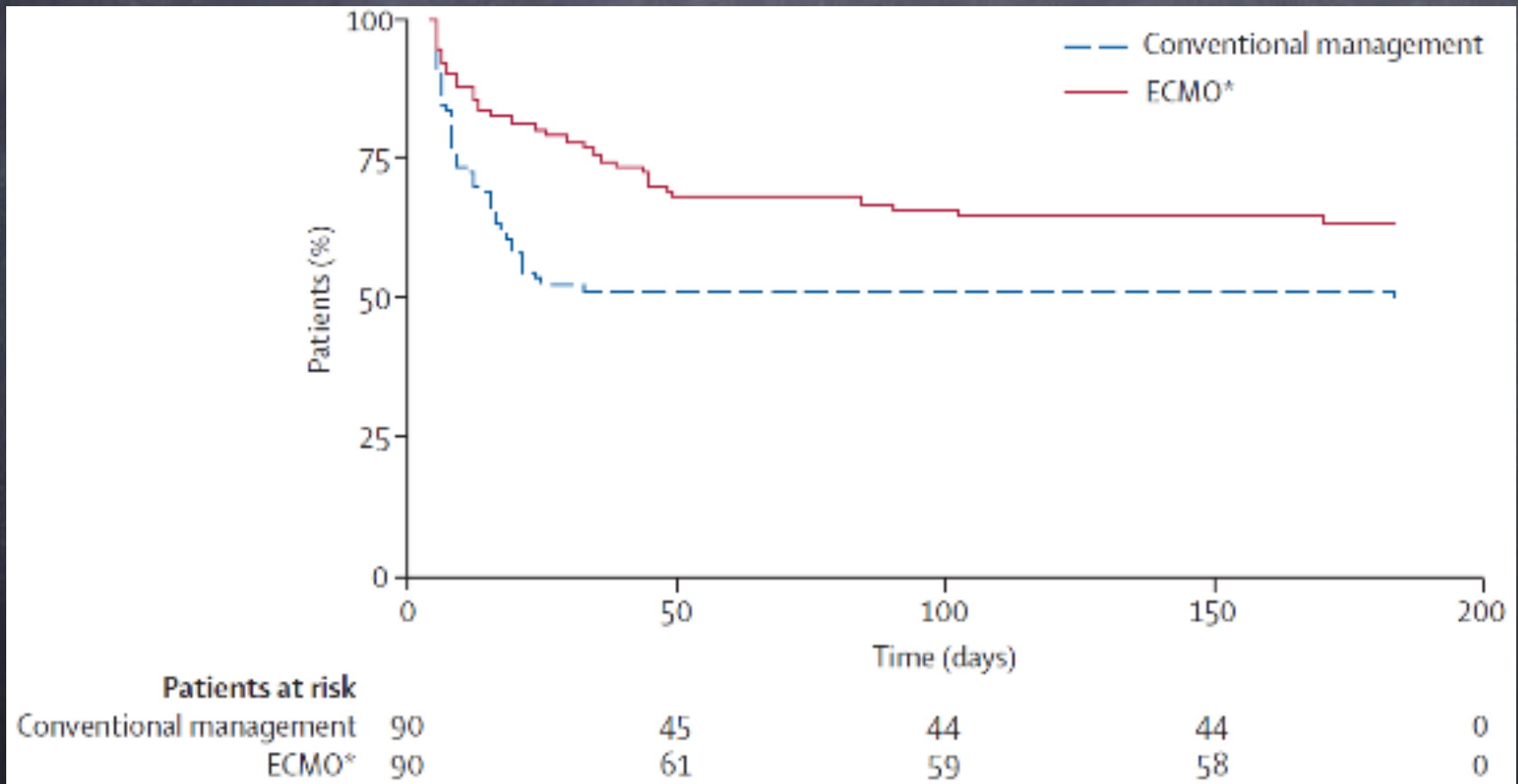
|       |                 |    |         |
|-------|-----------------|----|---------|
| アウトカム | ECMO使用日数 (日)    | 12 | (9-21)  |
|       | ECMO生存離脱, n (%) | 18 | (67)    |
|       | 人工呼吸日数 (日)      | 20 | (14-31) |
|       | 人工呼吸生存離脱, n (%) | 11 | (44)    |
|       | 入院日数 (日)        | 29 | (21-38) |
|       | 死亡, n (%)       | 2  | (8)     |

Data are expressed as n (%) or median (IQR)

<日本COVID-19対策ECMOnet対応症例からのデータ> ※全例ではない

# V-V ECMOをなぜ実施するようになったか

重症呼吸不全に対して、従来の人工呼吸管理より **ECMOのほうが予後が良好**であったとの報告がある。(CEASAR)



Efficacy and economic assessment of conventional ventilatory support versus extracorporeal membrane oxygenation for severe adult respiratory failure (CESAR): a multicentre randomised controlled trial.

# V-V ECMOの適応疾患

ウイルス性肺炎（SARS、インフルエンザ肺炎、**COVID-19**）

細菌性肺炎

ニューモシスチス肺炎

術後、外傷によるARDS

敗血症によるARDS

いずれも肺機能が**可逆性**であること

# COVID-19による重症呼吸不全 ECMO治療状況

2020年4月20日集計

日本COVID-19対策ECMOnet

日本集中治療医学会

日本救急医学会

日本呼吸療法医学会

これまでのECMO 治療患者 90 名

ECMO 治療終了 52 名

そのうち

回復 35 名 (67%)

死亡 17 名 (33%)

治療継続中 38 名

気管挿管からECMOに至るまでの重症化速度が速い（気管挿管から  
ECMO実施までの平均期間は**2日間**）

# V-V ECMOの適応病態

## 積極的な適応

PEEP10cmH<sub>2</sub>OでP/F<100で進行性に悪化

適切な呼吸器設定でも代償できない呼吸性ア

シドーシス(Ph<7.15)

Murray Score  $\geq 3$

COVID-19では  
低酸素血症のわりにコンプライアンス  
は保たれる？

COVID-19では遅い

**P/F<200**でも導入検討

## Murray Score

| 項目                                              | 点数      |
|-------------------------------------------------|---------|
| 胸部レントゲンスコア                                      |         |
| 肺水腫: 全体の0%                                      | 0       |
| 全体の25%                                          | 1       |
| 全体の50%                                          | 2       |
| 全体の75%                                          | 3       |
| 全肺野                                             | 4       |
| 低酸素スコア                                          |         |
| PaO <sub>2</sub> /FiO <sub>2</sub> : $\geq 300$ | 0       |
| 225-299                                         | 1       |
| 175-224                                         | 2       |
| 100-174                                         | 3       |
| <100                                            | 4       |
| PEEP スコア                                        |         |
| PEEP: <5 cmH <sub>2</sub> O                     | 0       |
| 6-8 cmH <sub>2</sub> O                          | 1       |
| 9-11 cmH <sub>2</sub> O                         | 2       |
| 12-14 cmH <sub>2</sub> O                        | 3       |
| $\geq 15$ cmH <sub>2</sub> O                    | 4       |
| コンプライアンススコア                                     |         |
| コンプライアンス: $\geq 80$ ml/cmH <sub>2</sub> O       | 0       |
| 60-79 ml/cmH <sub>2</sub> O                     | 1       |
| 40-59 ml/cmH <sub>2</sub> O                     | 2       |
| 20-39 ml/cmH <sub>2</sub> O                     | 3       |
| <19 ml/cmH <sub>2</sub> O                       | 4       |
| 各項目の合計点を採用した項目の数で除した点数                          |         |
| 肺障害なし                                           | 0       |
| 軽度～中等度の肺障害                                      | 0.1-2.5 |
| 重度の肺障害                                          | >2.5    |

# V-V ECMOの相対的禁忌

7日間以上の高圧換気（プラトー圧30 cmH<sub>2</sub>O以上）

7日以上の高濃度酸素投与（80%以上）

ECMOによる利益が見込めない状態や臓器不全の状態

抗凝固療法が行えない状態

慢性心不全、慢性呼吸不全

年齢70歳以上

年齢については施設ごとで基準を設けるべき

# V-V ECMOで使用する材料

回路



脱血カニューレ



Size: 22Fr、24Fr

送血カニューレ

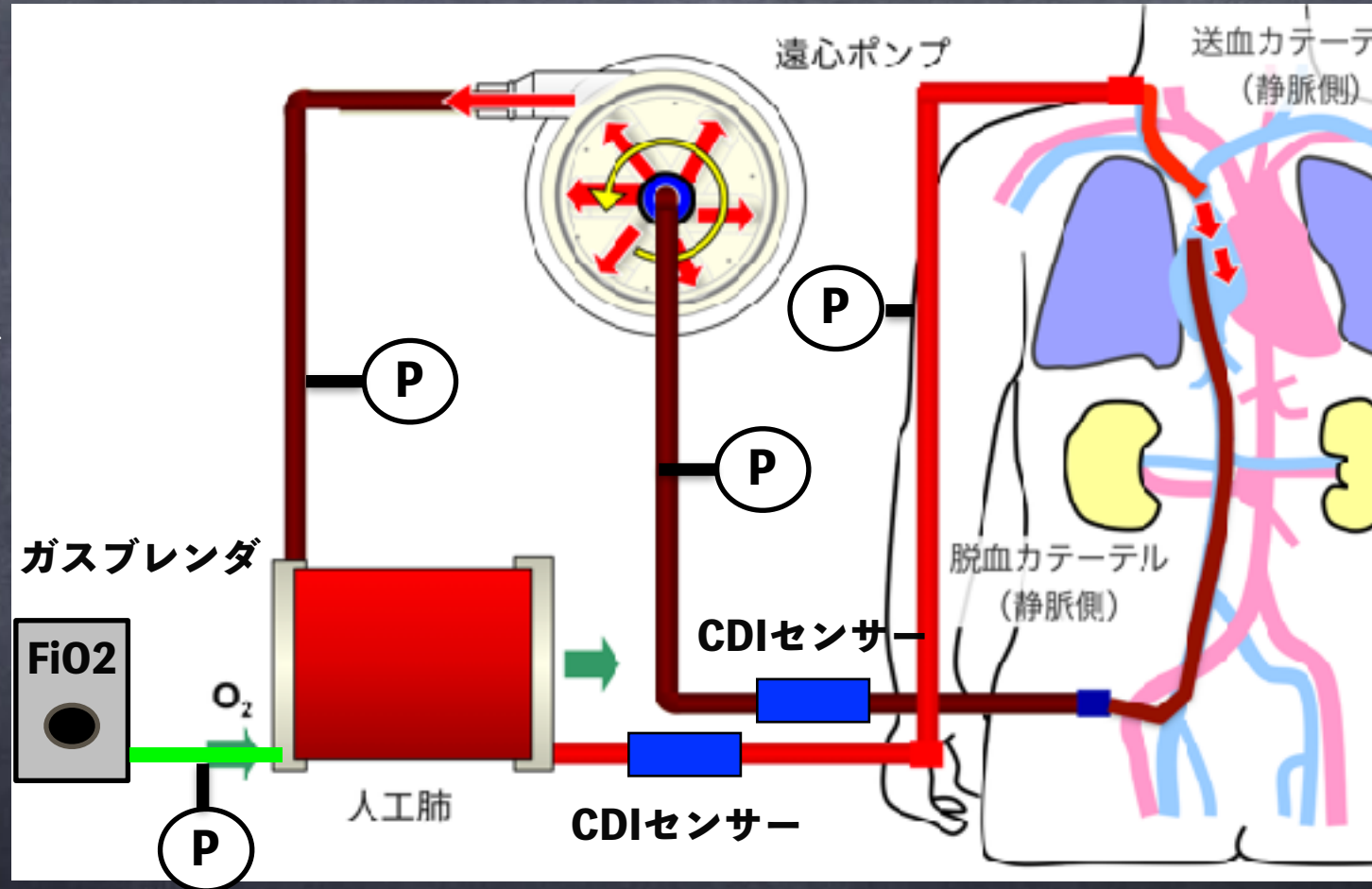


Size: 18Fr、20Fr

**V-A ECMO(PCPS)で使用する材料で実施可能**

# 回路構成

- ✓遠心ポンプ
- ✓人工肺
- ✓ガスブレンダ
- ✓圧モニター
- ✓CDIモニター



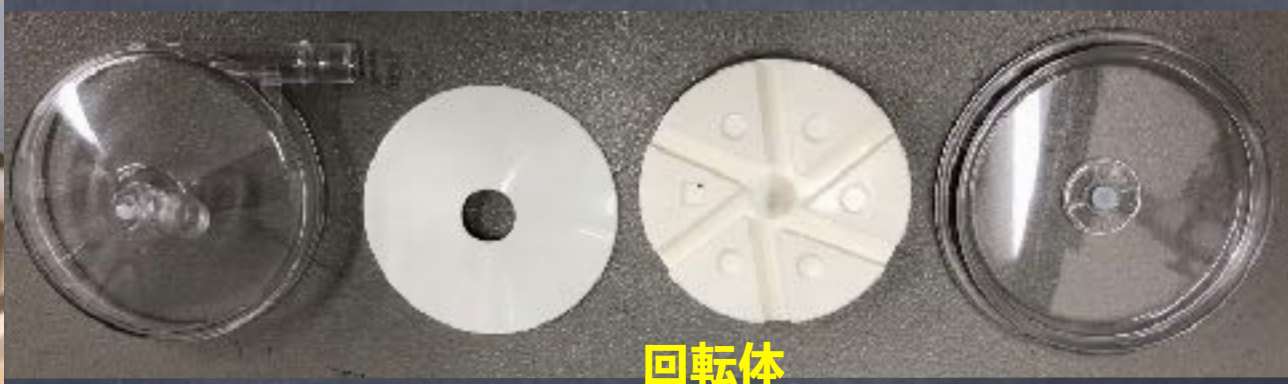
CDI: 体外循環用血液ガス分析装置

# 遠心ポンプ

回転による遠心力を利用し圧力差を発生させ血液を送り出すポンプ



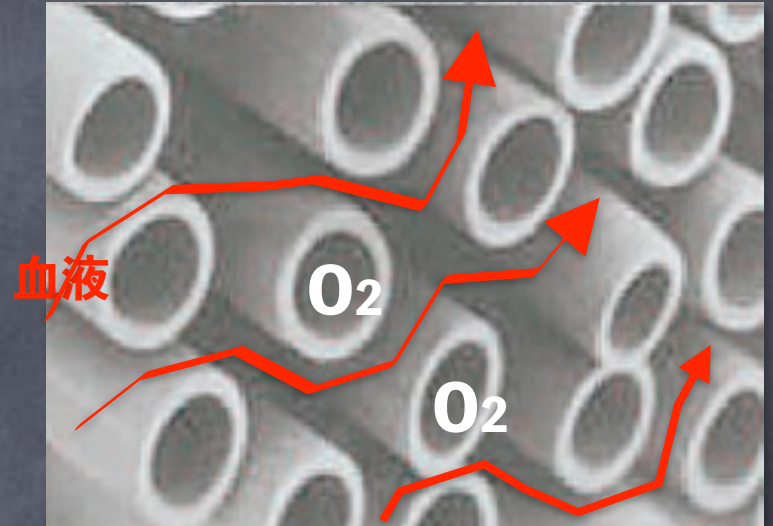
内部構造



ポンプ内には生体適合性に優れたコーティングが施されており  
抗血栓性に優れる 約2週間は使用可能

血液の状態次第ではもっと短い場合もある

# 人工肺



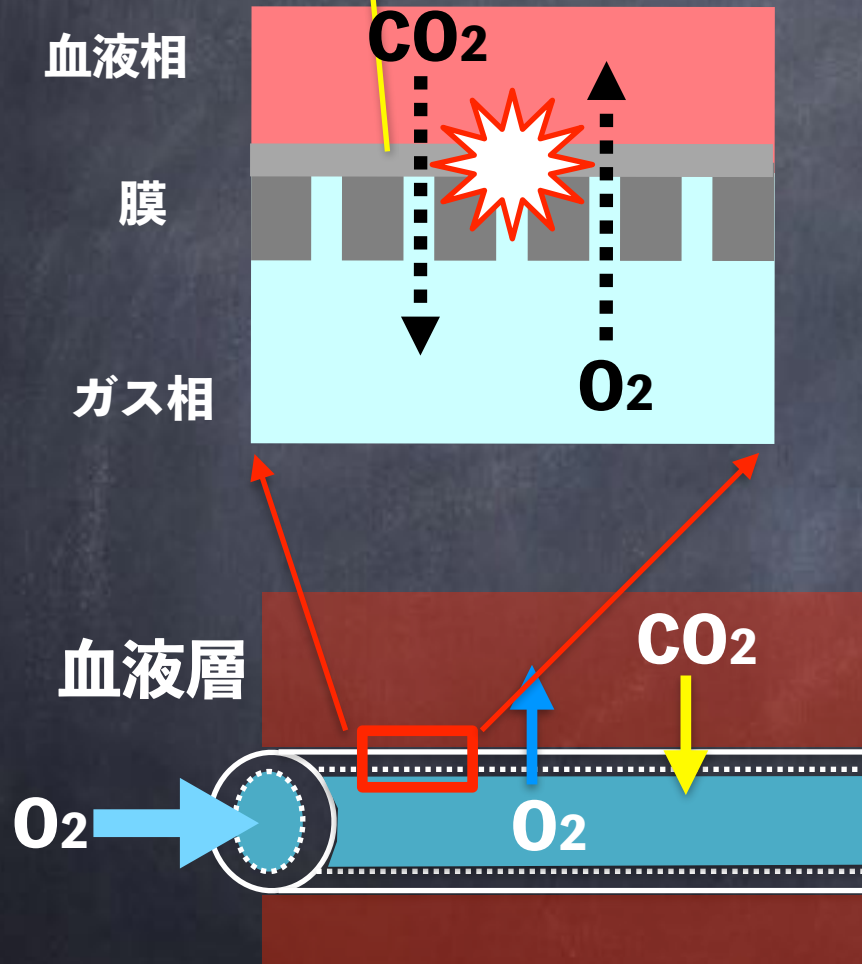
拡散の原理によりガス交換を行う

遠心ポンプ同様、約2週間は使用可能

血液の状態次第ではもっと短い場合もある

# 長期に使用すると…

膜表面の劣化



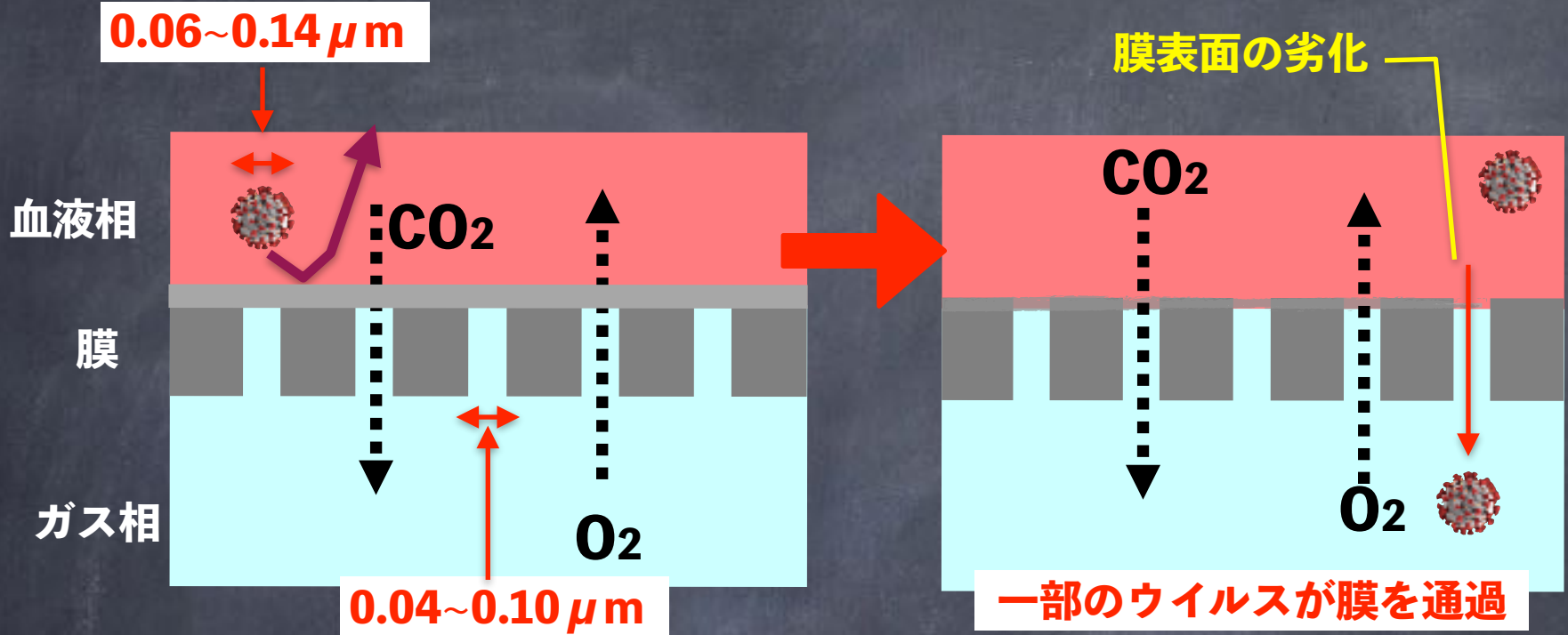
※プラズマリークの動画

# COVID-19での注意点



プラズマリークからのPCR検査**陽性**反応  
エアロゾル発生の危険性

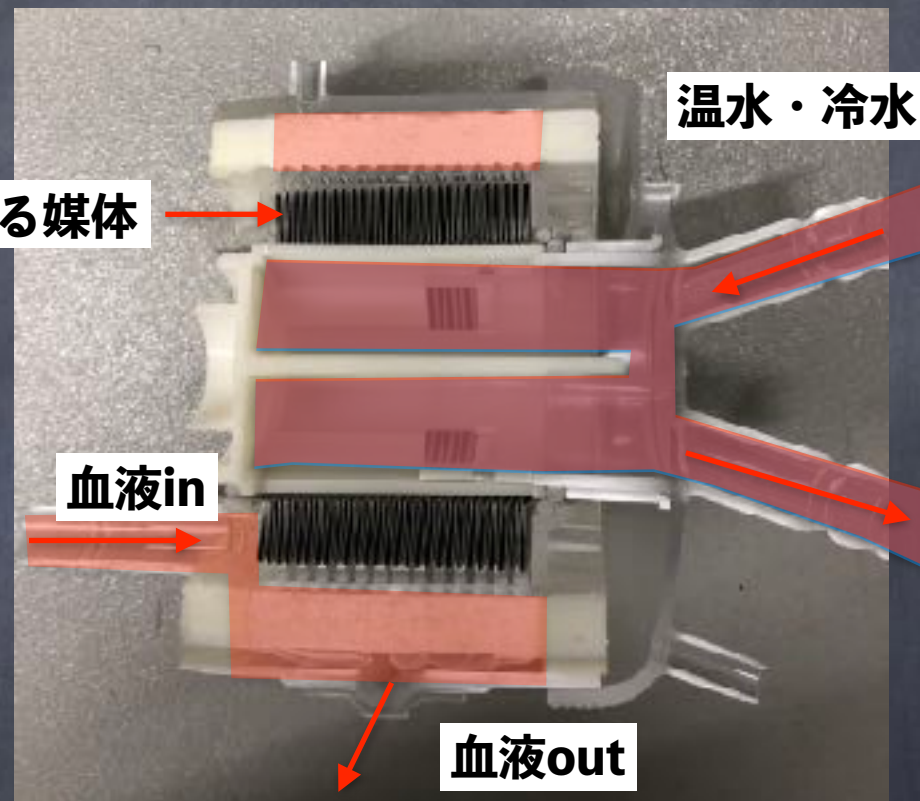
# 長期に使用すると…



感染源となる可能性

当院では**1週間**で  
回路交換を検討

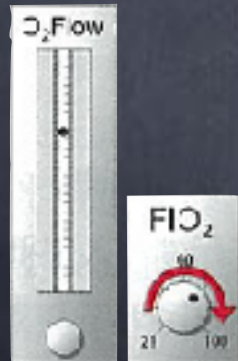
# 人工肺のもう一つの役割：体温コントロール



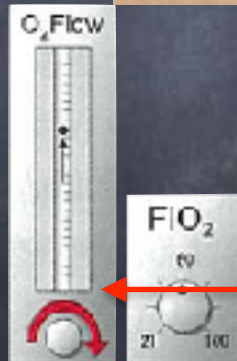
体温コントロール  
も同時に行なっている

# ガスブレンダ

血液中の酸素分圧、二酸化炭素分圧を調整する

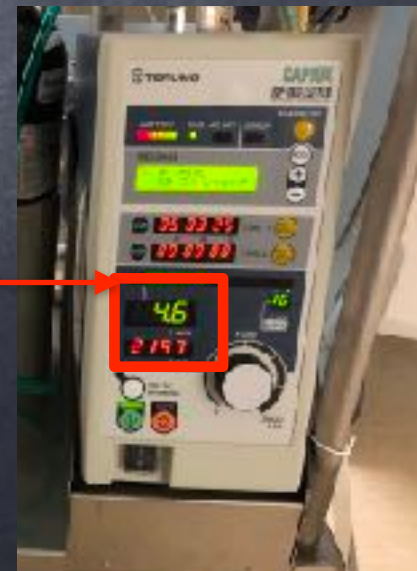


動脈血酸素分圧を調節

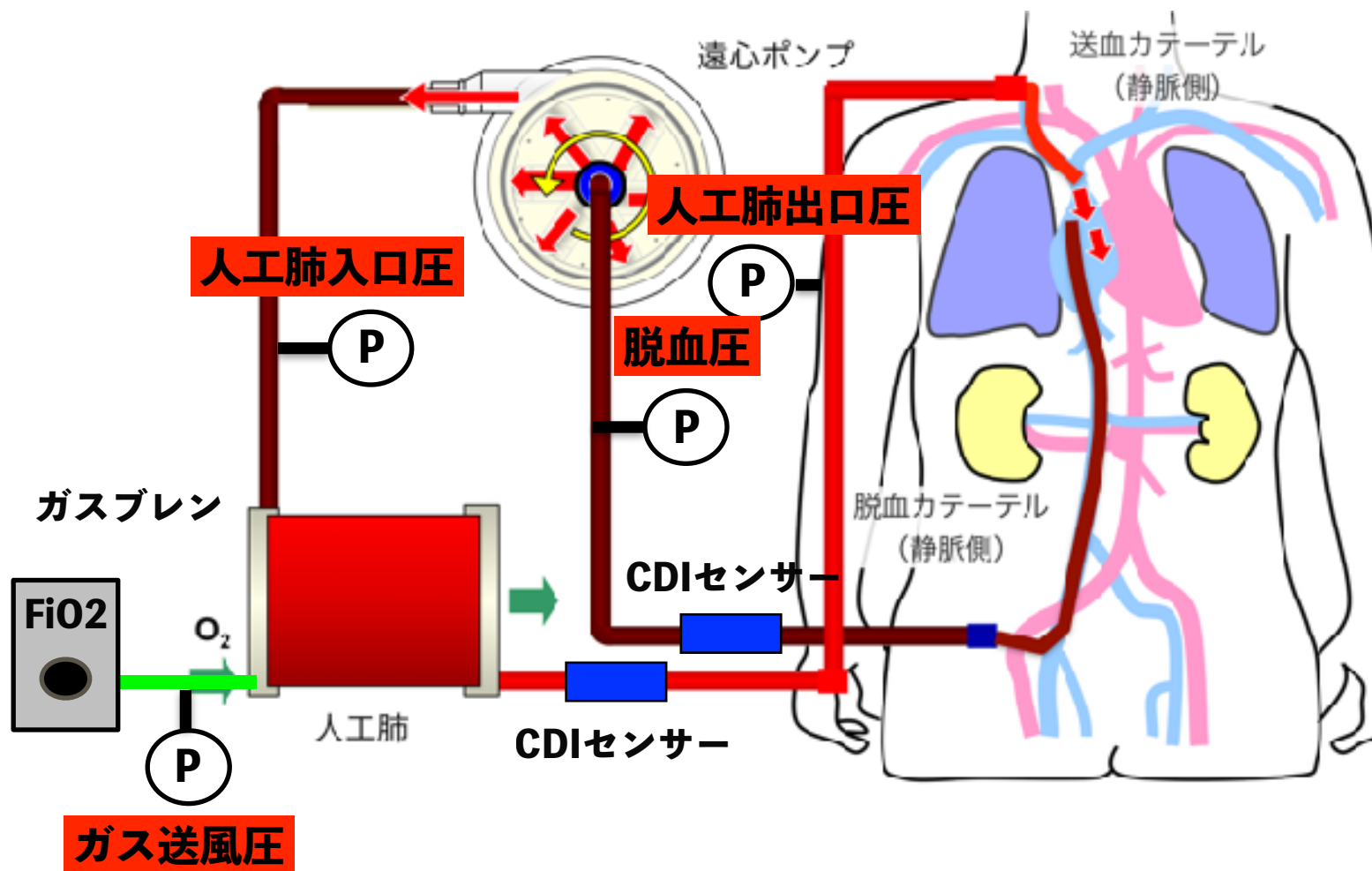


二酸化炭素分圧を調節

Pump流量の  
**50~100%**  
の流量に設定する



# 回路内圧測定が推奨されている



# 流量・回路内圧の変化からわかること

| 流量                                                                                | 人工肺入口圧                                                                            | 人工肺出口圧                                                                            | 脱血圧                                                                                | 原因                                    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|
|  |  |  |  | 脱血不良（循環血液量不足・脱血力<br>カニューレ/チューブの折れ曲がり） |

対処法：循環血液量減少の場合 ⇒ 輸液負荷・輸血施行

脱血力カニューレ等の折れ曲がりの場合 ⇒ 回路キックの解除/カニューレの固定位置調整

| 流量                                                                                | 人工肺入口圧                                                                            | 人工肺出口圧                                                                            | 脱血圧                                                                                | 原因                                       |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|
|  |  |  |  | 送血不良（血圧上昇・先端位置不良<br>送血力カニューレ/チューブの折れ曲がり） |

対処法：血圧低下の場合 ⇒ systolicで100mmHg以上なら昇圧剤の減量

送血力カニューレ等の位置不良や折れ曲がりの場合 ⇒ 回路キックの解除/カニューレの固定位置調整

| 流量                                                                                | 人工肺入口圧                                                                            | 人工肺出口圧                                                                            | 脱血圧                                                                                | 原因     |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|--------|
|  |  |  |  | 人工肺の凝血 |

対処法：人工肺の凝血の場合 ⇒ 人工肺単体交換 or ECMO回路全交換（ほんとにどがてら！）

| 流量                                                                                 | 人工肺入口圧                                                                             | 人工肺出口圧                                                                             | 脱血圧                                                                                 | 原因                             |
|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|
|  |  |  |  | 送血回路の異常<br>（カニューレ/コネクタ抜け・回路亀裂） |

対処法：カニューレ/コネクタ抜けの場合 ⇒ 送血力カニューレの再挿入（胸骨圧迫併用）

回路亀裂の場合 ⇒ 亀裂部の補修/部分 or 全回路交換

| 送風圧                                                                                 | 原因                       |
|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|
|  | 血漿リーク・ウェットラング<br>ガスライン屈曲 |

対処法：血漿リーク・ウェットラング ⇒ 人工肺交換

ガスライン屈曲 ⇒ ガスラインキック解除

| 送風圧                                                                                   | 原因           |
|---------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
|  | 送風停止・ガスライン外れ |

対処法：送風停止 ⇒ 流量増加

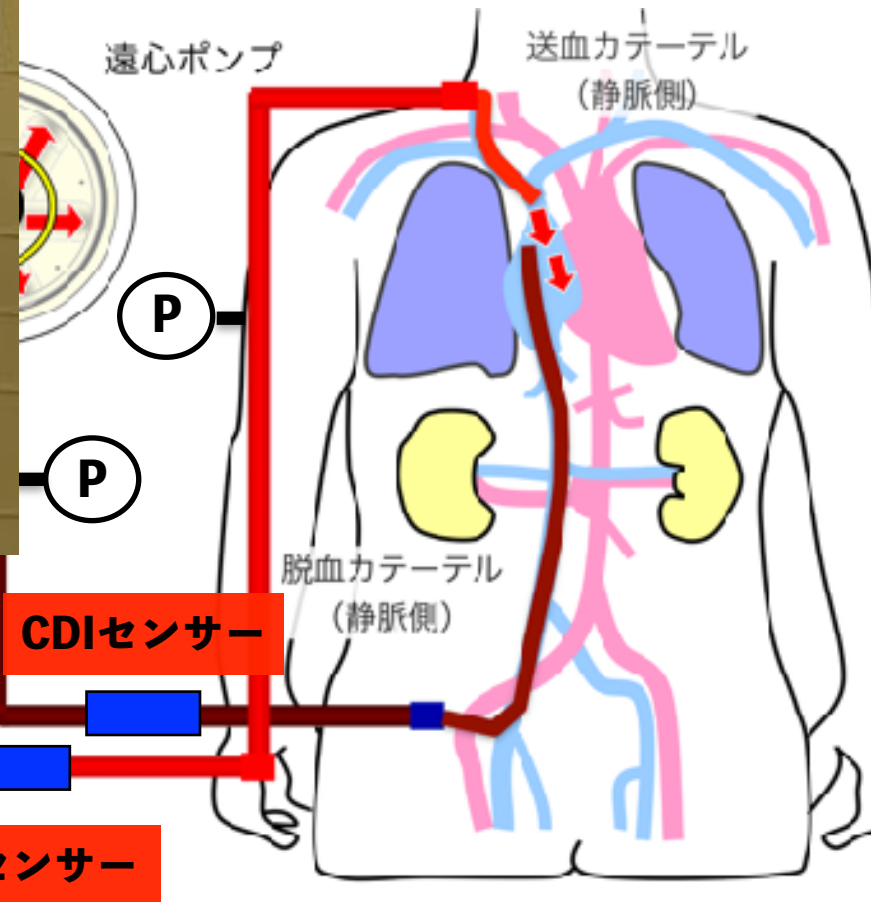
ガスライン外れ ⇒ ガスライン再接続

# CDIモニター

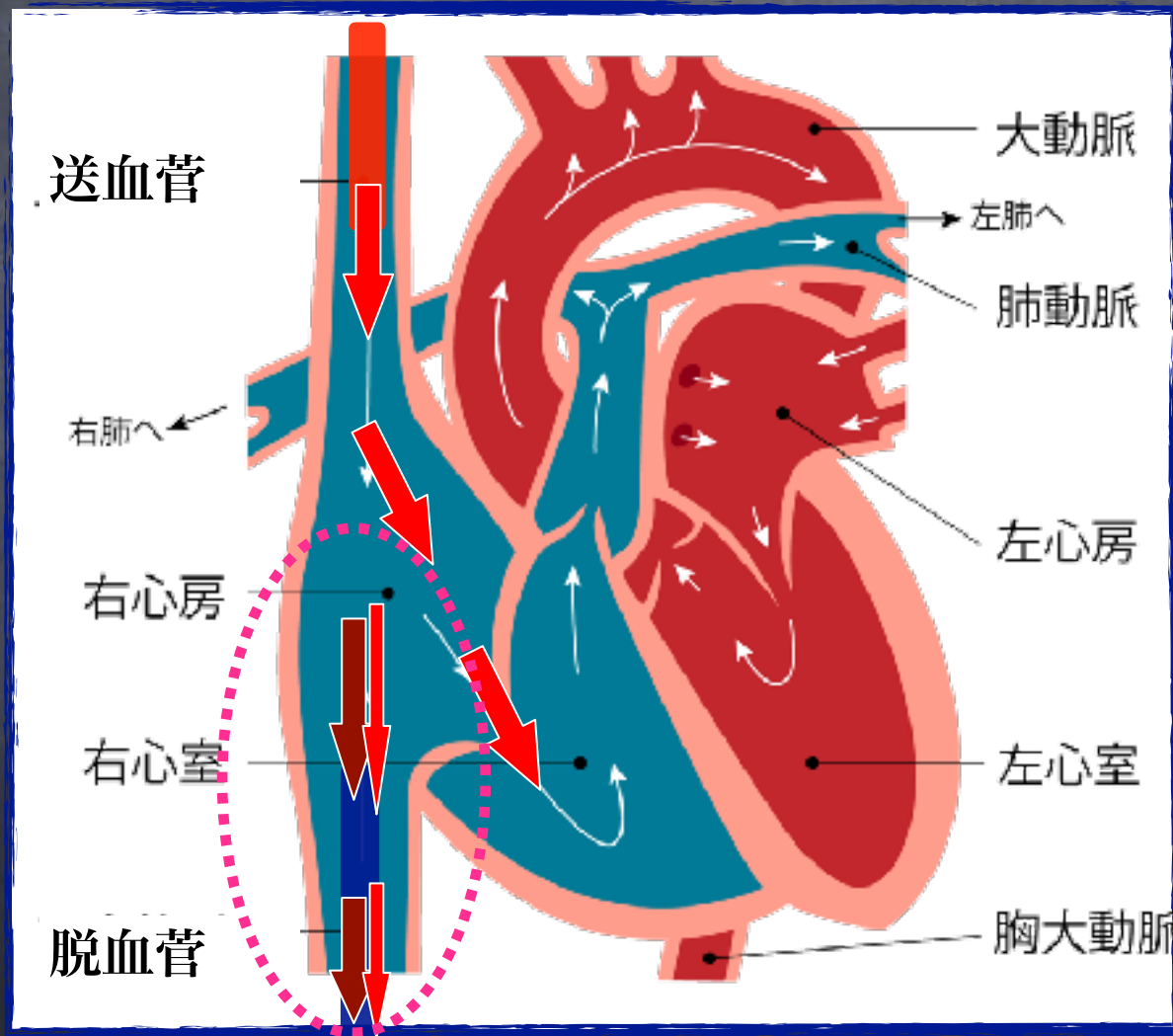
# 連続血液ガス測定

CDI: 体外循環用血液ガス分析装置

連続モニタできる項目



# V-V ECMOでは必ず リサキュレーション（再循環）が起こる



# CDIモニター的重要性

## リサキュレーション（再循環）率を計算



$$R = \frac{cSvO_2 - SvO_2}{1 - SvO_2}$$

リサキュレーション率(R) = **0.3 ~ 0.5**が理想

上がる要因：カニューレの**位置**、**頻脈** **Af**などには要注意

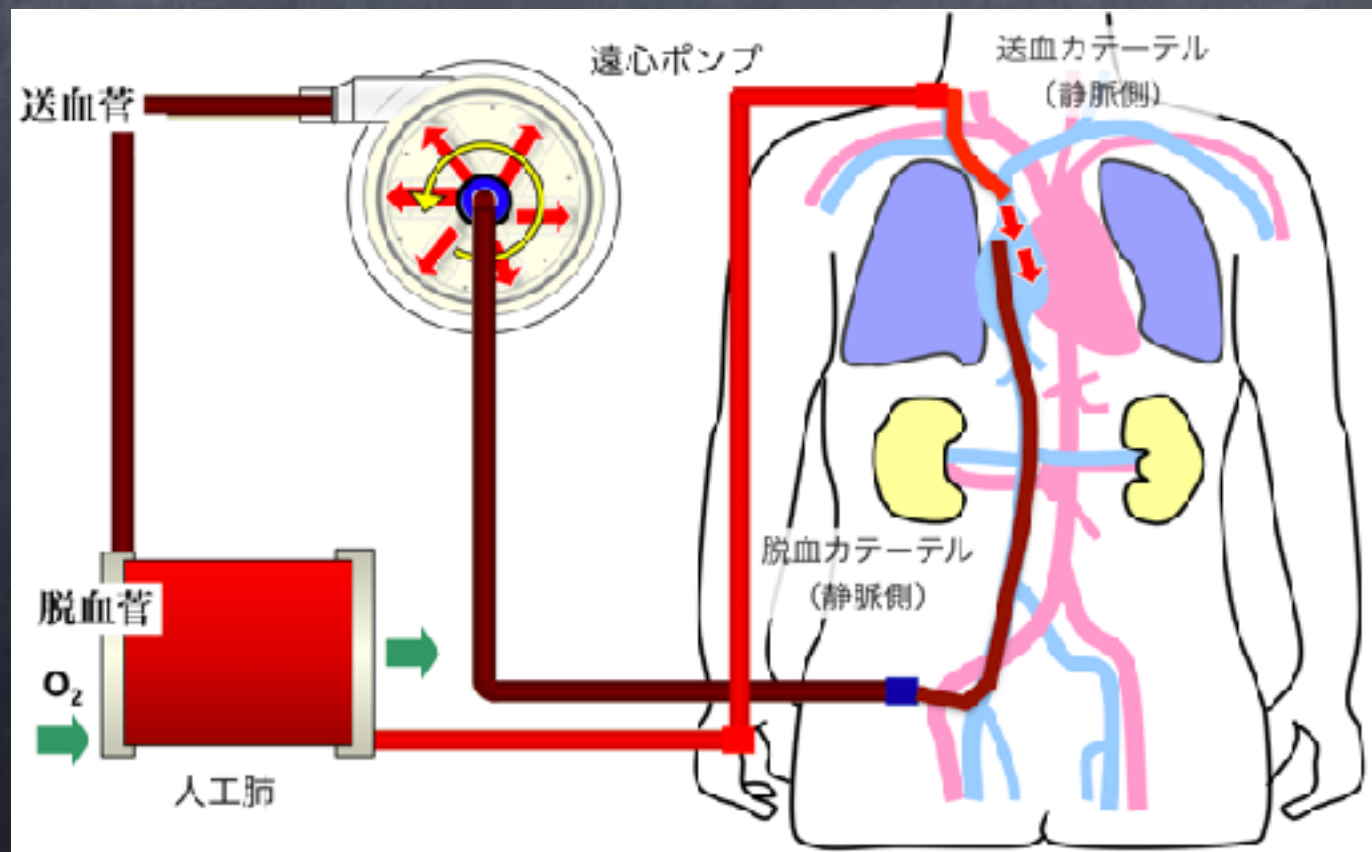
# V-V ECMOのアプローチ

大腿静脈経由—右房脱血

内頸静脈経由—上大静脈送血



他にも組み合わせはあるが最もリサキュレーションが少ないと言われている



# V-V ECMOを成功させる重要なこと

V-V ECMOでは“いかにPUMP流量をとるかが成功のカギ”となる。自己肺での酸素化・換気を全てECMOで代用できれば**究極のLung rest**が可能です。

目標のPUMP流量

**60-80ml/Kg/min**

**60Kgの人なら1分間に3600~4800mlの血液流量が必要**



Extracorporeal Life Support Organization (ELSO)

Guidelines for Adult Respiratory Failure

目標流量を達成させるポイント

脱血カニューレのサイズ

脱血カニューレを留置する場所

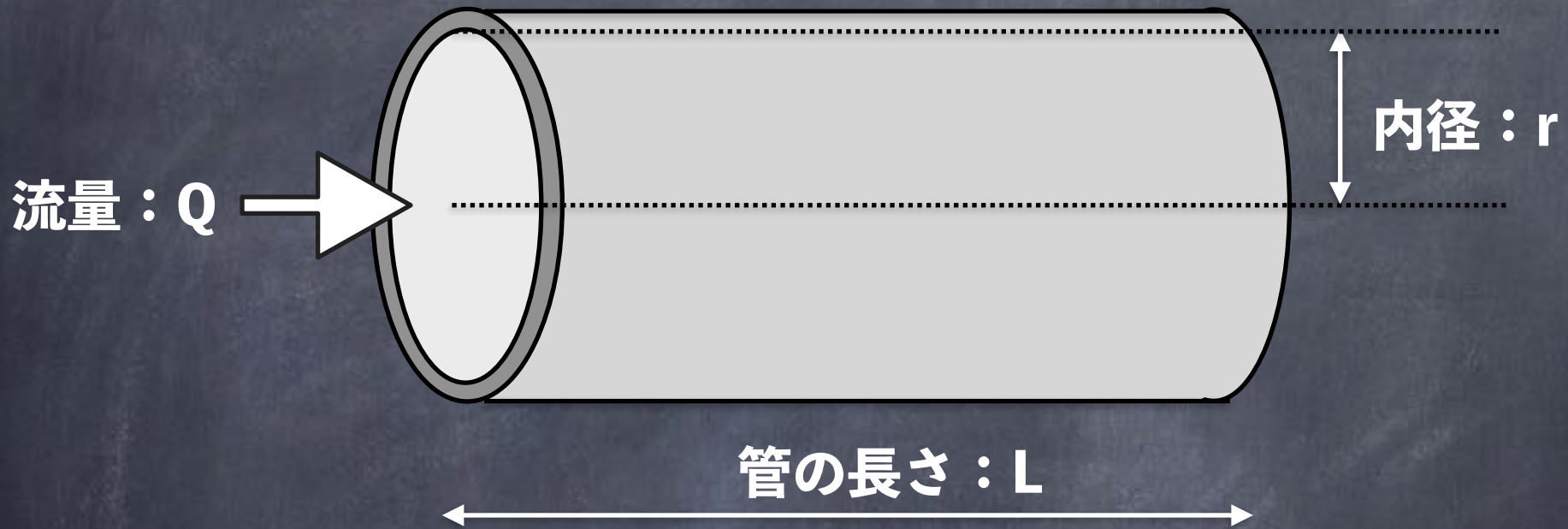
その他に送血カニューレのサイズや回路の長さ、血液の粘性などにも影響を受ける。

# カニニューレのサイズ選択

圧力 :  $P1$

圧力損失 :  $P1-P2$

圧力 :  $P2$

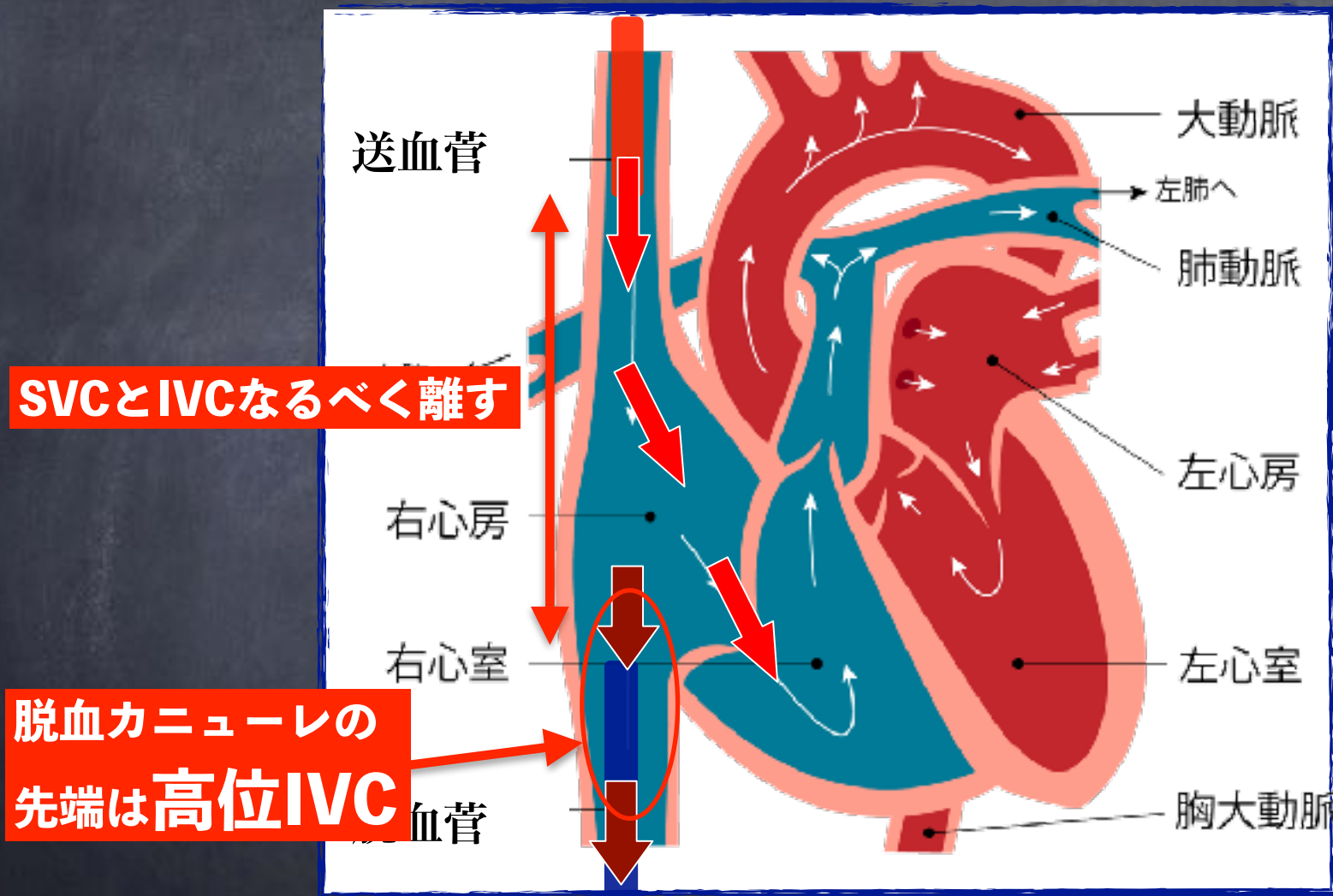


ハーゲンポアズイユの式

$$\text{流量 : } Q = \frac{r^4 \times 4\pi (P1-P2)}{8 \times L \times n}$$

脱血カニニューレは内径が大きければ大きいほど良い！

# 理想的な位置は？



教科書的にはこう書かれているはず

# 脱血カニューレの特徴

カニューレにサイドホールが配置されている。種類により様々

泉工医科工業 PCKC-V

サイドホール数：70

ゲティンゲ HLS

サイドホール数：20

Edwarzes VFEM

サイドホール数：44

TERUMO キャピオックス

サイドホール数：10

使用するカニューレによって留置場所が異なる

# 脱血カニューレ特性

※動画

先端部にはほとんど陰圧がかかっていない

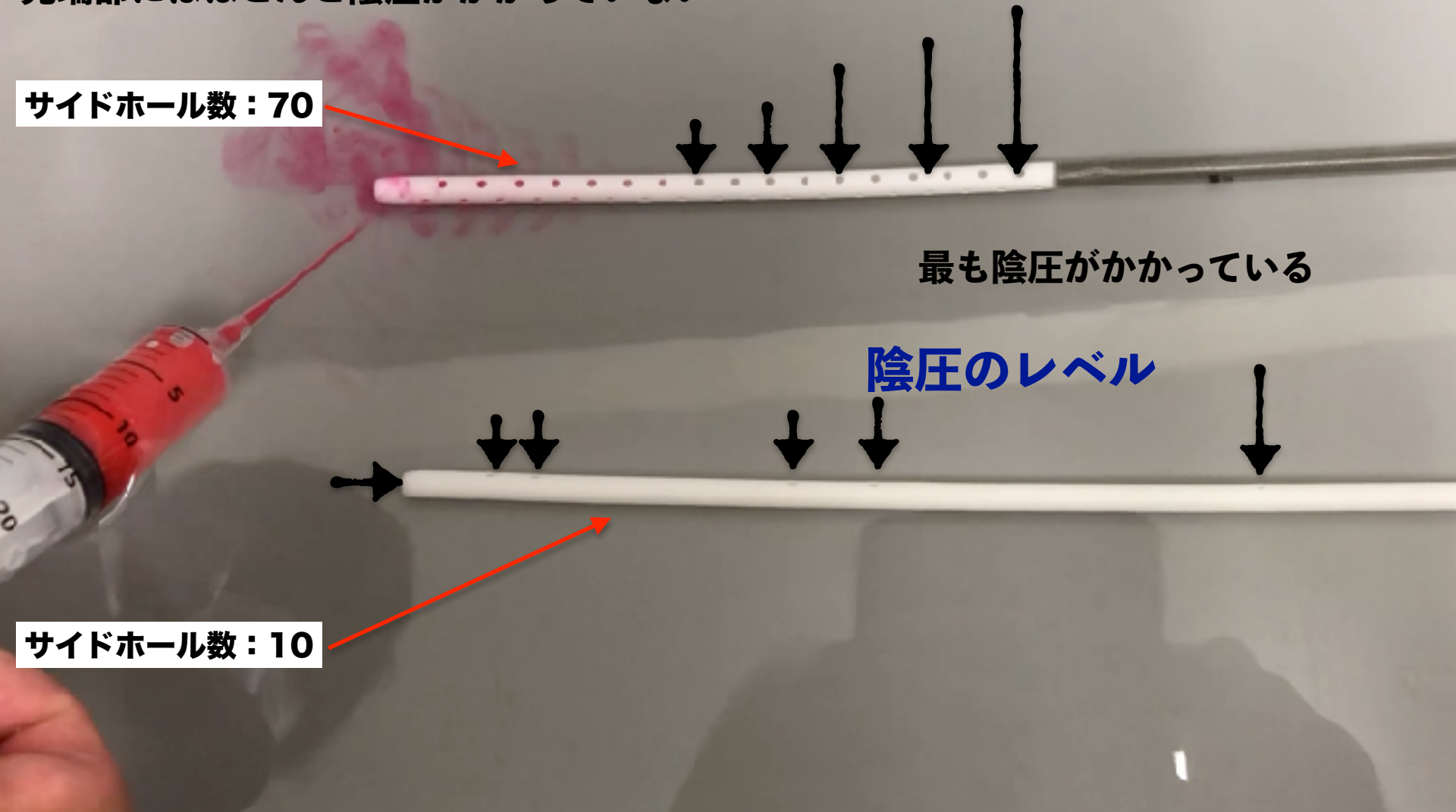
陰圧のレベル

サイドホール数：70

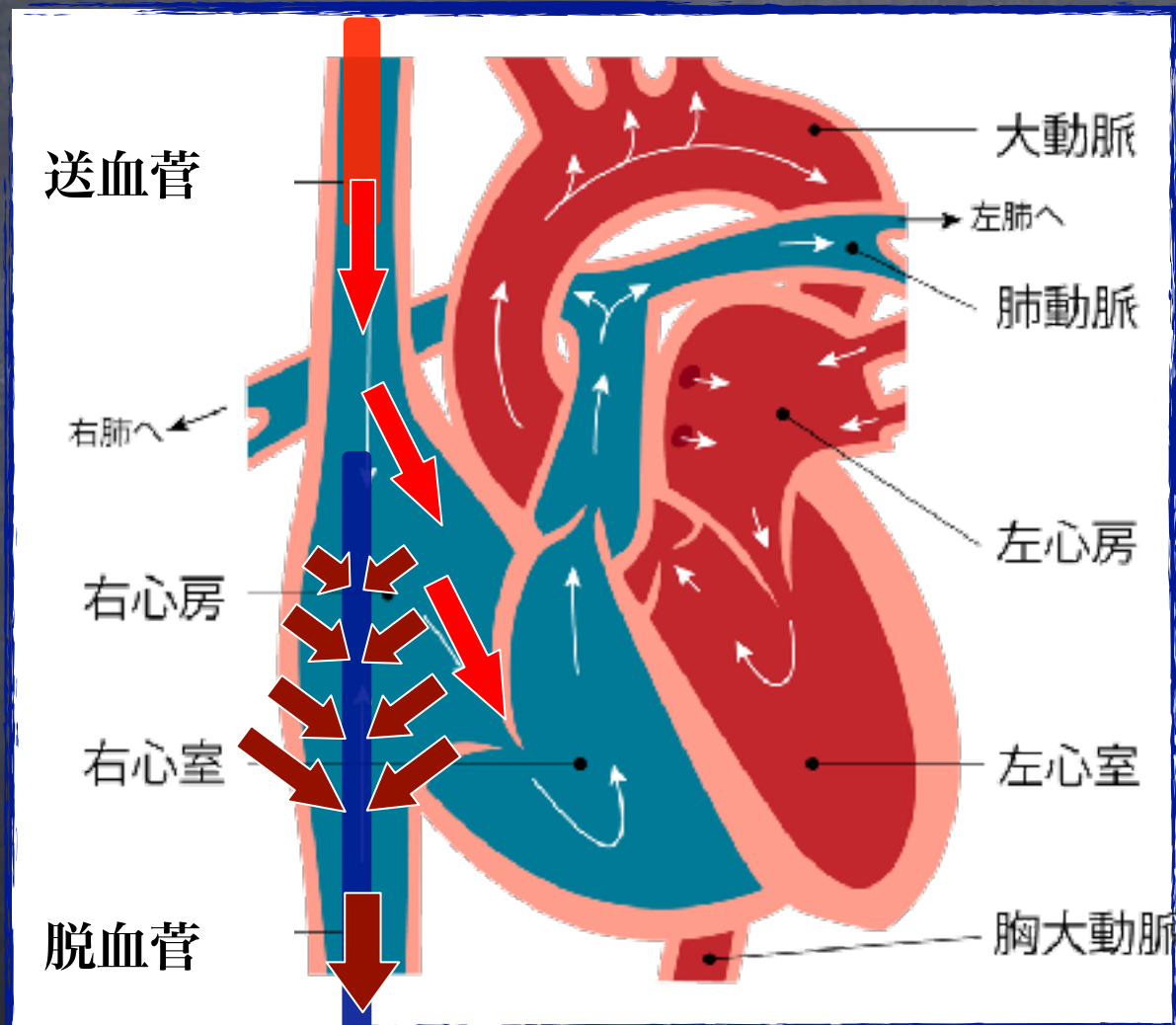
最も陰圧がかかっている

陰圧のレベル

サイドホール数：10



# サイドホールが多い脱血カニューレは先端をSVC直下 リサキュレーション（再循環）を心配する必要は理論上無い



その時の条件（ポンプ流量など）によってもリサキュレーションの程度は異なるので回してから考える

# 実臨床でのポジショニングの決め方

脱血カニューレをできるだけ深く（SVC直下）に挿入しPUMP ON



リサキュレーション率を評価しながらカニューレの位置調整

$$R = \frac{cSvO_2 - SvO_2}{1 - SvO_2}$$

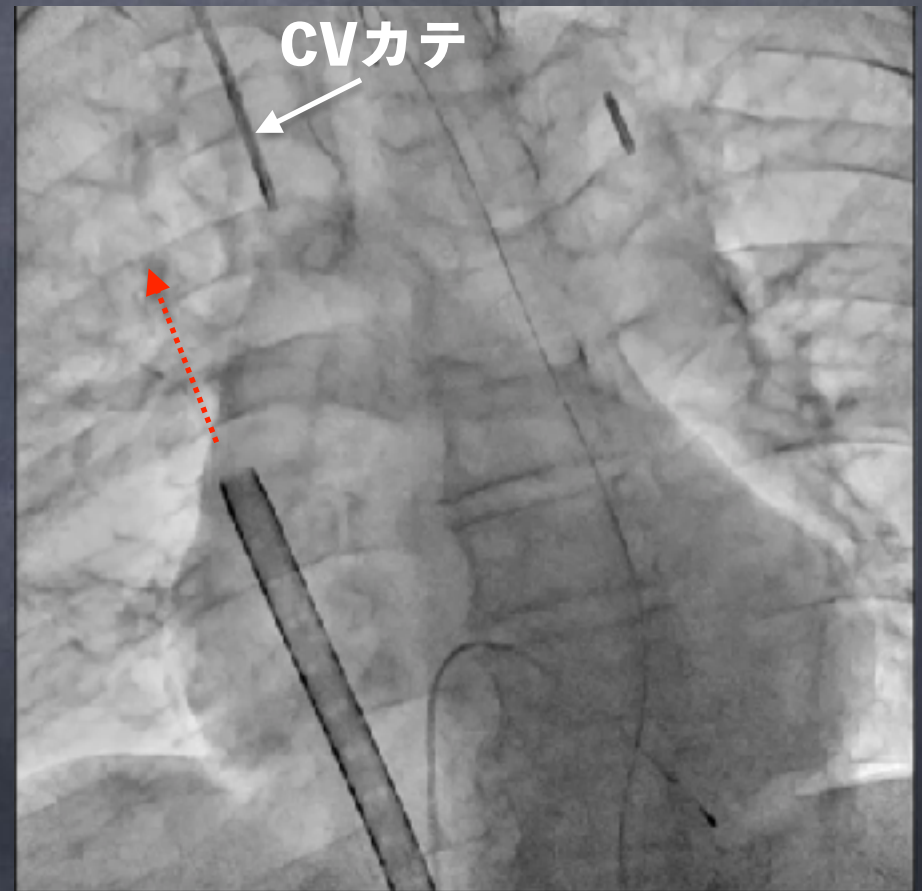
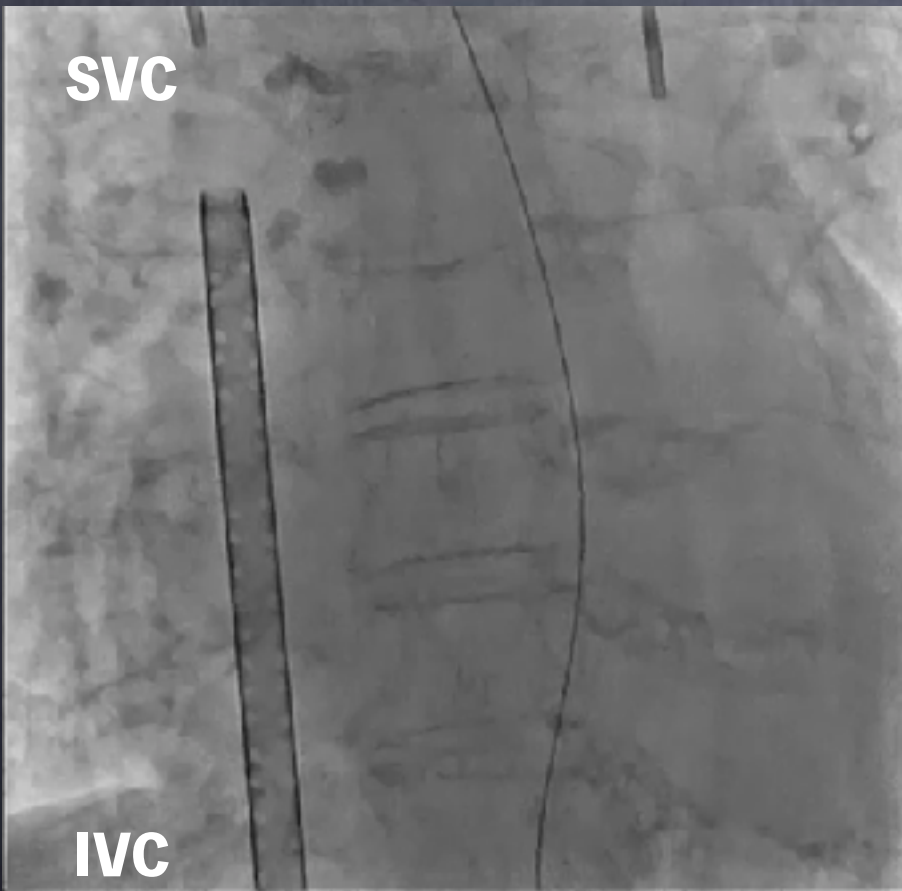
リサキュレーション率(R) = **0.3 ~ 0.5**

位置調整はカニューレを**引**いて合わる方が安全

太いカニューレを押して合わせるのは危険

# カニューレ挿入時の注意点

走行によってはSVC直下まで上げれない場合もある



これ以上押し込むと穿孔のリスクが高い

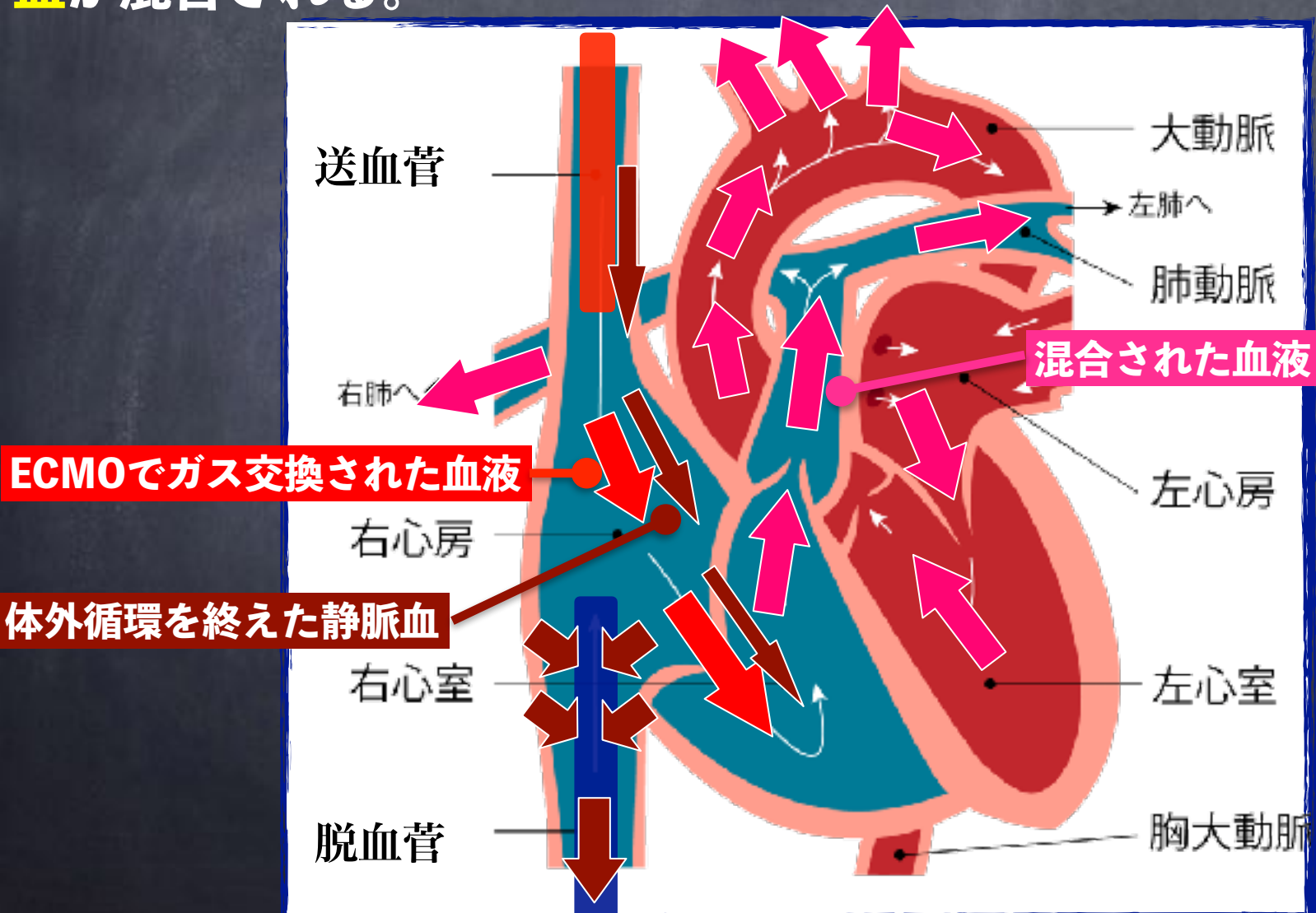
**右心房内を進めるときは透視下が安全**

# 重要：酸素供給バランスについて

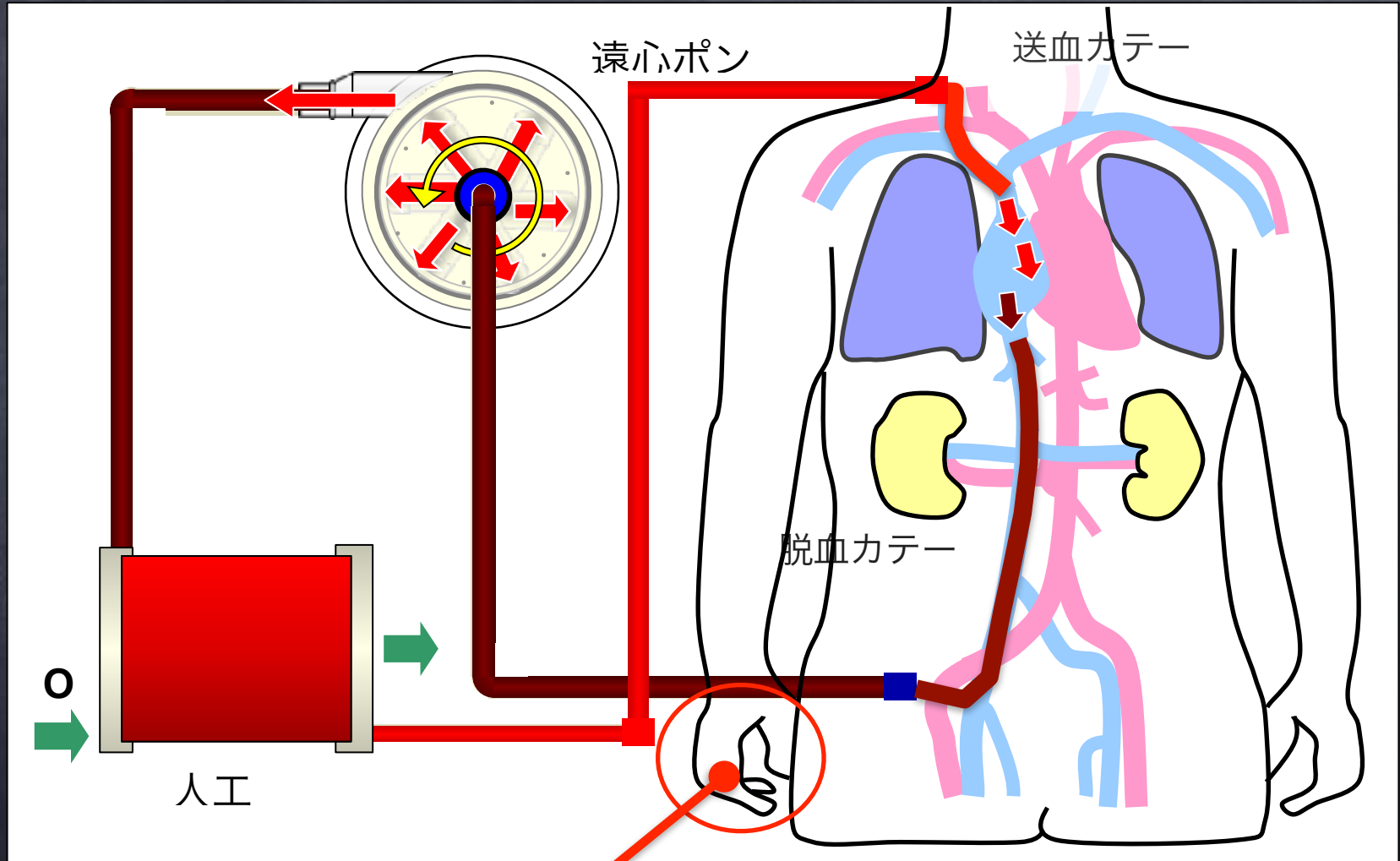
VV ECMOで酸素化しても

**SO<sub>2</sub>**は100%とならない

静脈脱血－静脈送血ではすべての静脈血を酸素化できるわけではない、**ECMOでガス交換された血液と体循環を終えた静脈血が混合される。**



# V-V ECMO導入後、右手のSpO<sub>2</sub>の値が80~85%



SpO<sub>2</sub>=80~85%

# SpO<sub>2</sub> : 80% !?



人工呼吸器の酸素濃度(FiO<sub>2</sub>)を上げる？



**SpO<sub>2</sub>:80% FiO<sub>2</sub>を上げる必要ありますか？**

**酸素の需要と供給のバランスが成立して  
いれば上げる必要はない**

# 人工呼吸器はLung rest設定を厳守

$\text{FiO}_2 < 40\%$

$\text{PIP} < 20\text{cmH}_2\text{O}$

$\text{PEEP} < 10\text{cmH}_2\text{O}$

呼吸回数  $< 10$



この設定を我慢できないとECMOは成功しにくい

**SpO<sub>2</sub>:80% FiO<sub>2</sub> を上げる必要ありますか？**

## 酸素の**需要**と**供給**のバランス

体重：60kg、Hb：12、CO(Pump)：4l/min、SO<sub>2</sub>:100%

成人の酸素消費量=3~5ml/kg/min

酸素消費量：60×3=180ml/min **約200ml/min**

鎮静すればもっと消費量は低く保てる。ECMO中の鎮静は重要

酸素供給量=1.34×SO<sub>2</sub>×Hb×CO×10

酸素供給量：1.34×1.0×12×4×10=643ml/min

# 酸素の**需要**と**供給**のバランス

酸素消費量 :  $3 \times 60 = 180 \text{ ml/min}$  約  $200 \text{ ml/min}$

消費量に対して**3倍**の供給量



酸素供給量 :  $1.34 \times 1.0 \times 12 \times 4 \times 10 = 643 \text{ ml/min}$

この時の $\text{SpO}_2$ : **80%**

大丈夫なのか？

# 酸素消費量に対して酸素供給量が2倍以下になると 嫌気性代謝が始まる

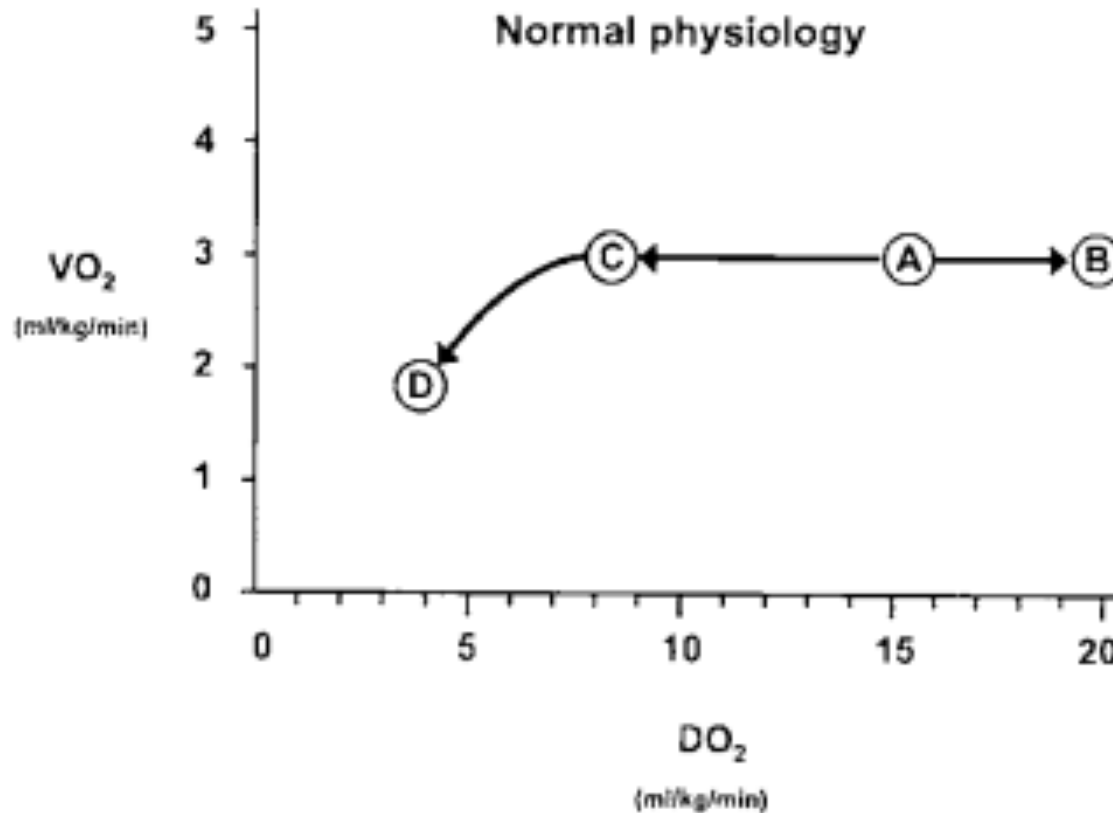


図 2.3 正常な酸素消費量 ( $VO_2$ ) と酸素運搬量 ( $DO_2$ ) との関係

ECMO中、酸素供給量は消費量の **3倍以上** で管理

# 酸素の**需要**と**供給**のバランス

**酸素消費量** :  $3 \times 60 = 180 \text{ml/min}$  約  $200 \text{ml/min}$

消費量に対して**3倍**の供給量

**酸素供給量** :  $1.34 \times 1.0 \times 12 \times 4 \times 10 = 643 \text{ml/min}$

この時のSpO<sub>2</sub>:80%

問題なし！

# SpO2 : 80% !?



人工呼吸器の酸素濃度(FiO2)を上げる？

酸素の需給バランスがとれていればSpO2 : 80  
でも酸素濃度は上げない。



V-V ECMO中は**SpO2:80~85%** で管理し変化量をモニタ  
することが重要、SpO2: 80%を下回るようであれば原因を検索

酸素供給量をあげたいときは人工呼吸器設定ではなく..

$$\text{酸素供給量} = 1.34 \times \text{SO}_2 \times \text{Hb} \times \text{CO} \times 10$$

(Pump flow)

十分な酸素供給量を得るには**Hb**、**CO**が非常に重要  
(Pump flow)

輸血を行い**Hb 11g/dl 以上**を目指す管理が必要

**CO**が下がっている場合は**Pump流量**を上げる

常に嫌気性代謝になっていないか**Lac**を監視する

# 鎮静薬について

鎮静薬は、人工肺や回路への吸着を考慮し使用する必要がある

☑ **プロポフォール**は人工肺に吸着し血症リークの原因となるため推奨されない

Lemaitre F, Hasni N, Leprince P, et al: Propofol, midazolam, vancomycin and cyclosporine therapeutic drug monitoring in extracorporeal membrane oxygenation circuits primed with whole human blood. Critical Care **19**: 40, 2015

☑ **デクスメデトメジン**は回路に吸着するため通常よりも多い量を要することもある

Wagner D, Pasko D, Phillips K, et al: In vitro clearance of dexmedetomidine in extracorporeal membrane oxygenation. Perfusion **28**: 40-6, 2013

☑ **フェンタニル**も回路に吸着されるため、**モルヒネ**の方が安定して使用可能

Shekar K, Roberts JA, McDonald CI, et al: Sequestration of drugs in the circuit may lead to therapeutic failure during extracorporeal membrane oxygenation. Crit Care **16**: R194, 2012

**V-V ECMOは心機能に問題ないことが前提**

**エコーを用いて心機能も確認すべき**

**必要であればカテコラミンで管理**

# V-V ECMO中に心機能が下がる理由

☑️ サイトカインストームによる心機能低下

☑️ プラスバランスによる心嚢水貯留

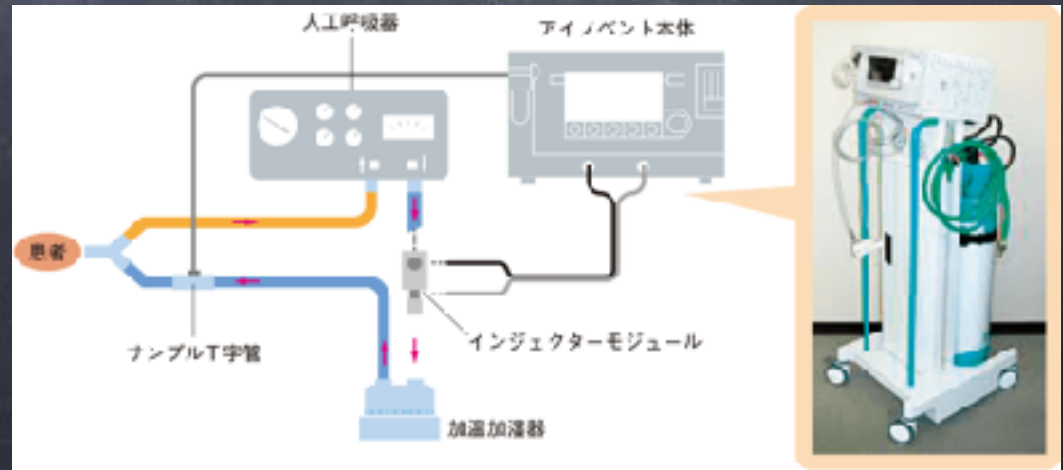
(マイナスバランスを目標に管理する 利尿など)

☑️ Af

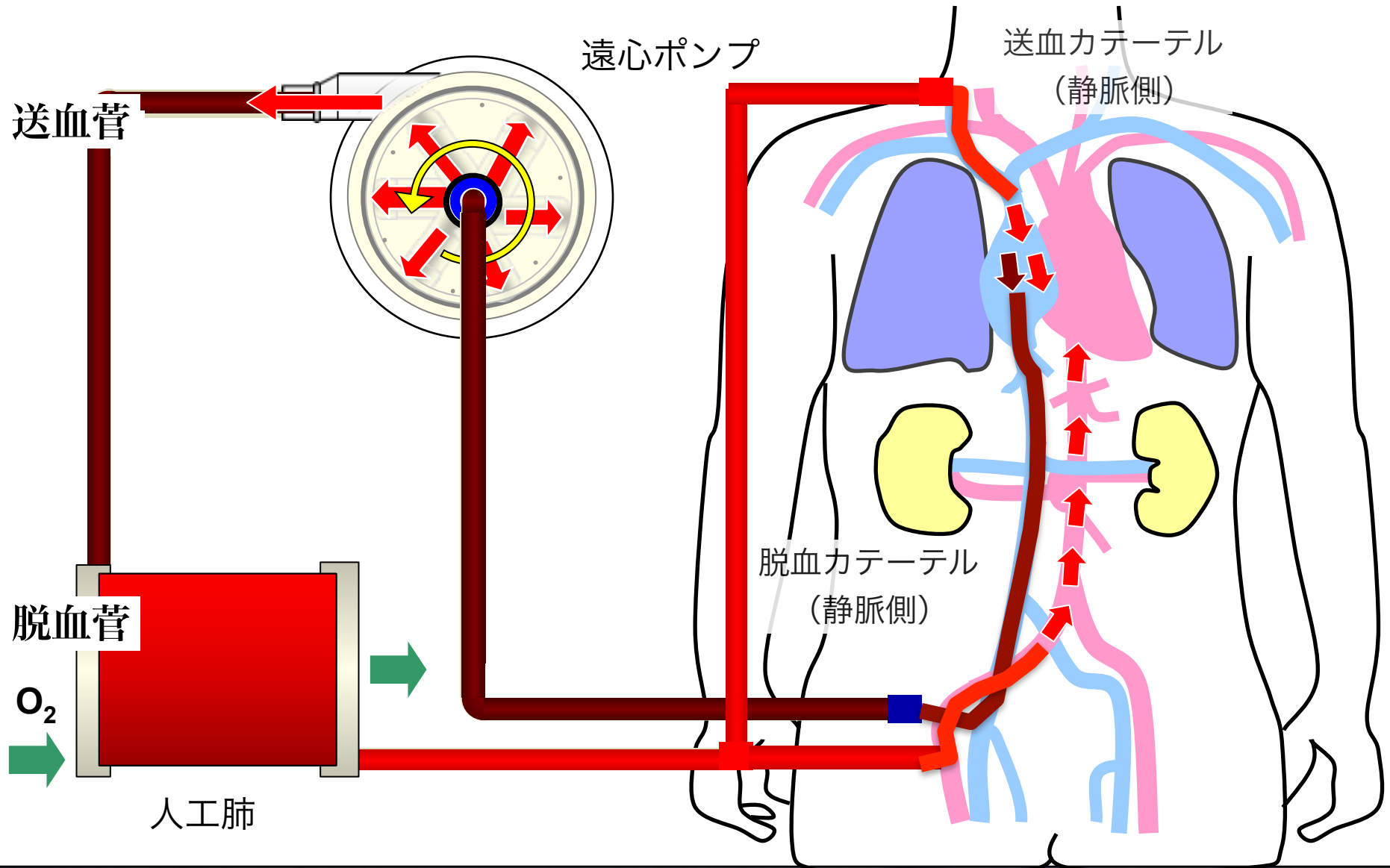
☑️ 肺高血圧症からの右心不全

(低酸素血漿による肺動脈攣縮と鑑別が必要)

肺高血圧症に対してNO療法で対処



# 心機能が保てない場合は、V-VA ECMOを考慮



# 局所的な酸素代謝モニタリングも推奨

regional oxygen saturation (rSO<sub>2</sub>) of  
blood in the brain



INVOS

SvO<sub>2</sub> を用いた管理では局所的な desaturation を検知できないため、**局所的な酸素代謝量**をモニタすることを推奨

McDaniel LB, Zwischenberger JB, Kramer GC, et al.: Mixed venous oxygen saturation during cardiopulmonary bypass poorly predicts regional venous saturation. Anesth Analg, 80(3);466-472, 1995.