



GE HealthCare

全身麻酔中の 肺リクルートメント手技自動化の意義

東邦大学医療センター大橋病院 麻酔科 小竹良文先生



リクルートメント手技とは完全または部分的に虚脱した肺胞を拡張させるために意図的に経肺圧を増加させる手技であり、重症呼吸不全症例において酸素化およびコンプライアンスを改善させるうえで有用性が示されている¹。最近は全身麻酔中でもリクルートメント施行を推奨する意見が多い²。

【健常人であっても全身麻酔中に肺リクルートメントが必要な理由】

1 健常人であっても全身麻酔中には無気肺が生じやすいため

全身麻酔中には図1に示したように無気肺を生じる因子が複数存在する³。肺保護換気が一般的になる以前にCTで評価した報告では全身麻酔後には89%の症例に無気肺が認められている⁴。

2 肺保護換気では換気量を制限するため、さらに無気肺が生じやすくなめため

従来、術中は実体重あたり10ml/kg程度の換気量が用いられてきたが、この背景の一つとしてPEEP付加が一般的ではなく、吸気時に虚脱肺胞を拡張させる意図もあったものと考えられる。一方、ARDS症例における人工呼吸関連肺障害が注目されて以来、低一回換気量が術後合併症のリスクを低下させるとする報告が多い⁵。低一回換気量は無気肺形成のリスク因子であり、なんらかの対策が必要となる。

麻酔中の無気肺の原因

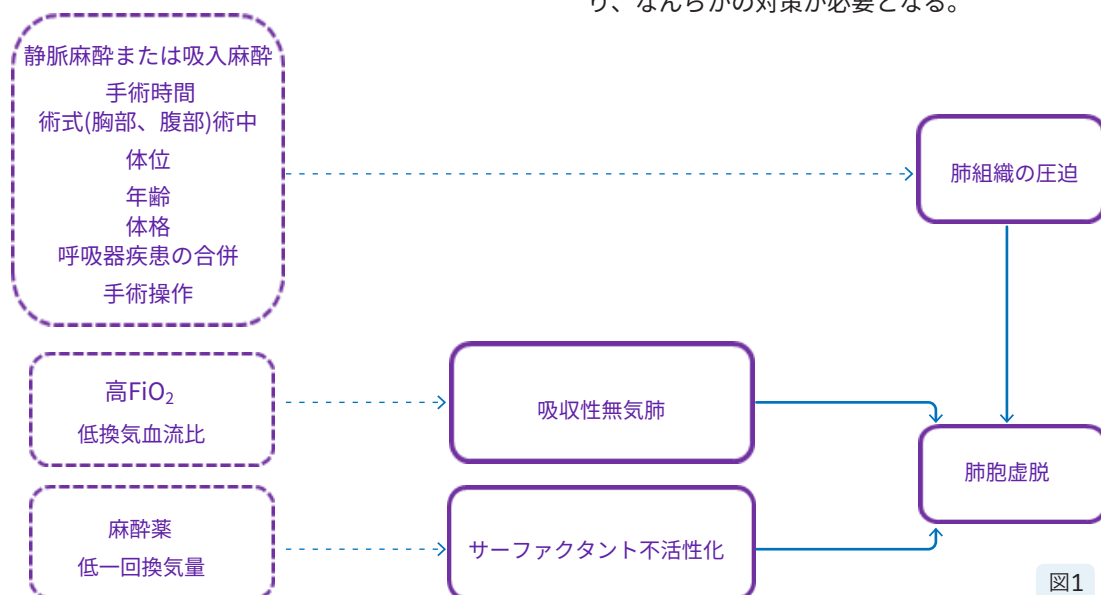


図1

Duggan M, Kavanagh BP. Pulmonary atelectasis: a pathogenic perioperative entity. *Anesthesiology* 2005;102:838-54. を参考に作成。

3 虚脱肺胞を再拡張するためには高い圧を必要とするため

虚脱肺胞が拡張する圧と拡張肺胞が虚脱する圧が異なり、拡張時には高い圧を必要とする（波瀾現象、ヒステレシス）。残気量から全肺容量までの圧と容量の関係を図示すると図2青の曲線となる⁶。一回換気中の圧と容量の関係もこの曲線上を移動すると考えられており、リクルートメント手技なしでPEEP10cmH₂Oを付加した状態で行われる一回換気の圧容量関係は図中赤で示したループとなる。ここでリクルートメント手技を行い、全肺容量まで拡張させると、その後の一回換気は圧容量曲線の呼気相に沿って移動することとなる。従って、リクルートメント手技施行後に同じPEEP10cmH₂Oを付加した状態では図中緑で示したループとなる。この2つのループの相違点は呼気終末時の肺容量（機能的残気量）およびループの長軸の角度で示されるコンプライアンスであり、いずれもリクルートメント施行後で高値をとる。全肺容量までの拡張に必要な圧は非肥満患者で40mH₂O、

肥満患者で40～50cmH₂Oと考えられており⁷、リクルートメント手技に関する報告ではこの程度の圧を持続的に付加するプロトコルが用いられていることが多い。

静肺圧容量曲線とリクルートメント前後での圧容量ループの関係

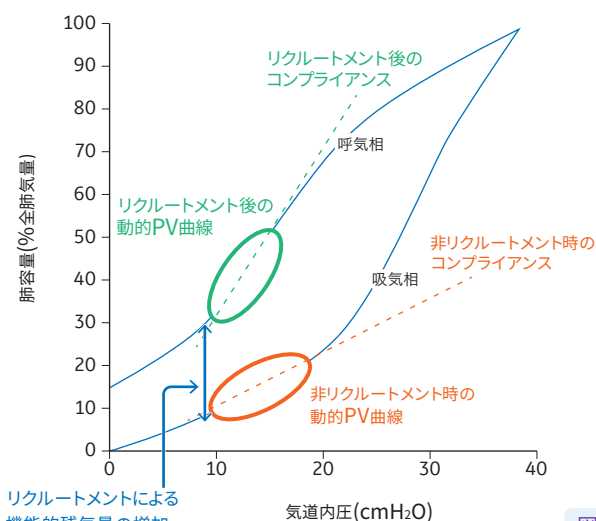


図2

Pelosi P, Brusasco C, Gama de Abreu M: Mechanical ventilation during general anesthesia, Principles and practice of mechanical ventilation, 3rd edition. Edited by Tobin MJ. New York, McGraw Hill Medical, pp 597-627を参考に作成。

【全身麻酔中の肺リクルートメントにメリット】

肺リクルートメントによるメリットは無気肺形成に由来するデメリットを拮抗できる点であるといえよう。無気肺形成に由来するデメリットとしては以下の点が挙げられる^{3,8}。

- 1 一回の換気において肺胞の虚脱—再拡張が生じ、いわゆる atelectraumaが発生する。
- 2 虚脱肺胞を再拡張するためには高い圧が必要であり、結果として肺のコンプライアンスが低下する。指標としてはプラトー圧の変化で評価されることが多い。
- 3 換気血流不均等の増加、肺シャント増加によって酸素化が低下する。酸素化低下に対しては多くの場合、吸入酸素濃度を増加させることによって対応することから、高濃度酸素濃度由来する肺障害のリスクが増加する、高濃度酸素吸入に由来する吸収性無気肺のリスクが増加する、などの問題点が生じる。
- 4 虚脱していない肺胞に換気が集中し、CO₂の排泄効率が低下

する。客観的な指標としては死腔率の増加で評価している報告が多い。肺全体で考えると適切な換気量であっても局所的には過伸展が生じるリスクがあり、いわゆる volutrauma のリスクが増加する。

- 5 atelectrauma および volutrauma は肺での炎症反応を増幅させ (biotrauma)、全身性炎症反応を増悪させる。実際に ARDS のバイオマーカーとして注目されている分子のひとつに可溶性 RAGE (soluble form of the receptor for advanced glycation end-product, sRAGE) があり、この分子は biotrauma のメディエーターとしても機能している可能性がある。Jaboudon らは ARDS 患者においてリクルートメント手技が血中 sRAGE 濃度および酸素化を改善させることを報告している⁹。この結果は無気肺が biotrauma の増悪因子の一つであることを示唆している。



【全身麻酔中の肺リクルートメントに関するエビデンス】

1 一側肺換気および肥満減量手術

これらの症例は無気肺が容易に形成されるとともに、無気肺形成に伴うデメリットが著明な症例であり、リクルートメント手技の有用性が示されやすいと予想される。実際に一側側肺換気^{10,11}、肥満減量手術¹²において、リクルートメント手技施行の有無のみで比較した結果、術中のプラト-圧、酸素化、死腔率に有意差をもって改善が認められている。

2 開腹手術

一側肺換気および肥満減量手術とは異なり、低一回換気量、PEEP付加と組み合わせた肺保護換気の一環としてリクルートメント手技の効果を検証した報告が多いとともに、評価指標として術後の合併症に注目した研究が多い。代表的なランダム化比較試験の概要および結果を表1に示した^{13 14 15}。このうちPROVHILO trialにおいて高PEEPおよびリクルートメント手技の有用性は示されておらず、リクルートメント手技の有用性を疑問視する意見もある⁷。しかし、PROVHILO trialではPEEPおよびリクルートメント設定が過剰なため低血圧の頻度が増加した可能性が否定できず、最適な設定は両群の間であると考えている。さらに最近のメタ解析でも肺保護換気による予後改善には低一回換気量、PEEP付加、リクルートメント手技のすべての適応を考慮すべきであると結論されており¹⁶、リクルートメント手技が開腹手術の予後改善に関与するというエビデンスは存在するといって差し支えないであろう。

開腹手術における肺保護換気に関する代表的なランダム化比較試験

	IMPROVE study	Severgnini study	PROVHILO trial
比較対象	肺保護換気群と従来型呼吸管理群を比較	肺保護換気群と従来型呼吸管理群を比較	肺保護換気の構成要素のうちPEEPレベルとリクルートメント手技の有無を比較
吸入酸素濃度設定	原則50%以下とし、SpO ₂ >95%を維持	40%	原則40%以上とし、SpO ₂ >92%を維持
一回換気量設定	予測体重換算で6-8ml/kg	理想体重換算で7ml/kg	予測体重換算で8ml/kg
PEEP設定	6-8cmH ₂ O	10cmH ₂ O	PEEP 2cmH ₂ O、リクルートメント手技なし vs. PEEP 12cmH ₂ O、リクルートメント併用で比較
リクルートメント手技の プロトコール	30cmH ₂ O CPAP, 30sec	PEEP一定、吸気時間7.5secの従量式換気で一回換気量を7→11→15ml/kgと漸増、プラト-圧30cmH ₂ Oで終了	PEEP一定、吸気時間7.5secの従量式換気で一回換気量を8→12→16ml/kgと漸増、プラト-圧30cmH ₂ Oで終了
PetCO ₂ 目標	35-40mmHg	30-40mmHg	35-45mmHg
肺保護換気群でのoutcome	POD 7までの合併症発生率、呼吸管理の頻度減少。在院期間短縮。	術後肺酸素化、肺機能改善、pulmonary infection score減少	POD5までの合併症発生率に有意差なし。highPEEP群で低血圧発生頻度増加。

POD: post operative days

表1

【全身麻酔中の肺リクルートメント施行のタイミング】

肺リクルートメントは虚脱肺胞を再拡張させる手技であり、従来は虚脱肺胞に由来する酸素化の低下を来した時点で施行することが一般的であった。一方、最近では虚脱肺胞が生じやすい操作を行った直後に予防的に行うことを推奨する意見が多い。具体的には気管挿管直後、体位変換等で一時的に呼吸回路

との接続を解除した直後、気管内吸引直後などのタイミングでの施行が推奨されている。さらに積極的に肺保護換気を適用する場合、一回換気量を制限する必要がある、無気肺形成のリスクがさらに増大することから、30～45分毎の施行を推奨する意見も増加している²。

【麻酔器を用いた肺リクルートメントの自動化】

GEヘルスケア社製の麻酔器の一部には肺リクルートメントを自動的に施行する機能が装備されている。手動による肺リクルートメント手技と比較して、自動化した肺リクルートメント手技のメリットとしては

- 1 操作がきわめて簡単であり、麻酔担当者に負担をかけることなく施行できる。
- 2 一定したプロトコルでの施行が可能であり、施行者によるばらつきが少ない。
- 3 用手的なリクルートメント手技では終了直後からPEEPを付加する事が困難であるのに対して、自動的なリクルートメント手技では終了後直ちに設定したPEEPを付加することが可能である、などの点が挙げられよう。

同機能は従圧式の換気モードの応用であり、Severgnini study¹⁴やPROVHILO trial¹⁵で用いられたようなPEEP一定、換気量漸増のプロトコルは適用できないが、従圧式換気に基づく肺リクルートメント手技のプログラミンが可能である。IMPROVE study¹³のプロトコルあるいは中山が推奨するCPAP 30cmH₂O、10秒間などのリクルートメント手技¹⁷を行う場合はVital Capacityを選択し、より複雑なプロトコルを用いる場合はCyclingを選択する。さらにそれぞれの条件を複数設定し、そこから選択することが可能である。

1 演者の施設における設定

演者の施設では駆動圧一定PEEP漸増プロトコルを用いている。ただし、より低圧、短時間でのリクルートメント手技で肺胞の拡張が得られるとする報告¹⁸がある点とPROVHILO trialのプロトコルが過剰であったため副作用が増加した可能性を重視して、各プロセスあたりの呼吸数を3回と少なく設定している。この結果、一回のリクルートメント手技に要する時間は1分強であり、より頻回の施行に適した設定となっているものと考えている(図3)。前述したようにリクルートメント手技の自動化のメリットの一つはリクルートメント手技終了と通常の人工呼吸再開の間のPEEP喪失を防げる点であり、「PEEP on 終了」の項目で適切なPEEPを設定しておくことが望ましい。

演者の施設で用いているcyclingプロトコル

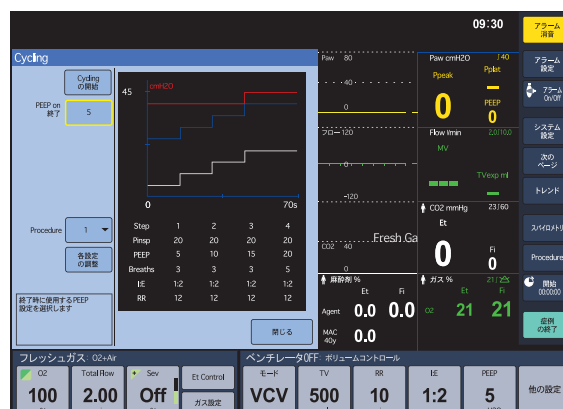


図3



2 演者の施設における実際の施行方法

演者の施設ではリクルートメント手技の効果を直ちに判定する手段として肺メカニクスの改善を用いており、具体的にはリクルートメント手技施行前後の呼吸ループの形状を比較している。本項では評価方法を含めて実際の施行方法を紹介する。

A 施行前の準備

i 血行動態の最適化

リクルートメント手技の主な問題点は胸腔内圧上昇に伴う静脈還流の低下、心拍出量および血圧の低下である。既報では静脈還流の低下に対抗しうる程度の輸液負荷を行っておくことが推奨されている。加えて演者の印象では本来の呼吸器コンプライアンスが高い症例に高PEEPを長時間負荷するプロトコルを用いた場合に循環系への影響が著明に見られる傾向があるように思われる。この点では簡略化プロトコルの方が血行動態への影響が少ないと推察される。

ii 麻酔深度および筋弛緩状態の評価

既報には記載がないが、希にリクルートメント手技施行中にバックギングを生じる場合がある。この現象も30秒～40秒のバイタルキャパシティ手技の際に多く、簡略化したサイクリングプロトコルでは少ない印象を受ける。腹腔鏡手術、血管操作などの際に施行する場合は麻薬性鎮痛薬、神経筋遮断薬の増量、追加も考慮しておきたい。

iii カフリークの確認および新鮮ガス流量の一時的調節

気管チューブカフ周囲のリークがある症例、呼吸器コンプライアンスの良好な症例に対して高い気道内圧を付加するプロトコルを適用すると回路内ガスが不足し、プロトコル通りの施行が不可能となる場合があり得る。この場合は安全機構としてプログラムが中断され、それまでの設定で換気が再開される。この現象を回避するためには、気管チューブカフ圧を適切に設定すること、および低流量での麻酔管理を行っている場合は新鮮ガス流量を一時的に増加させることが有効である。

B 対照ループ波形の保存

GEヘルスケア社製の麻酔器の一部では気道内圧、換気量、呼吸器コンプライアンスなどの数値トレンドを参照することが可能であり、これらの経時的変化によってもリクルートメント手技の効果を判断することが可能である。さらにループ波形の保存および比較も可能であり、著者の施設では気道内圧・換気量(PV)ループの波形変化を重視している。従量式換気でコンプライアンスが低下した場合、気道内圧曲線の傾きが増加し、PVループの吸気フェーズはx軸方向に偏位し、傾きが低下する。一方、従圧式換気でコンプライアンスが低下した場合は、吸気フェーズの初期相には変化がないが、気道内圧が設定値に達した後の換気量の増加が低下するため、PVループの高さが減少する。施行直後のPVループと比較するためにここで保存しておく。保存時の時間とともに5つのループ波形が保存されるため、参照する際には便利である。

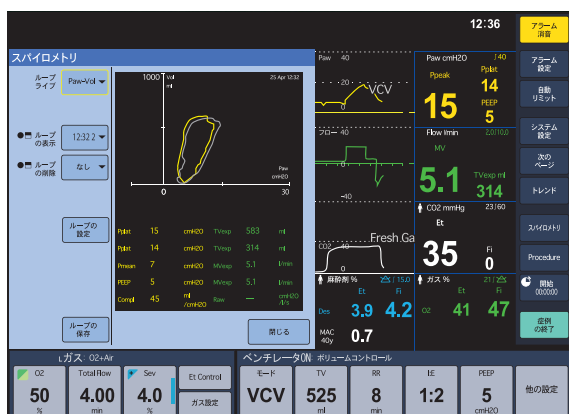
C リクルートメント手技の施行

当施設では駆動圧一定PEEP漸増プロトコルを用いているためProcedureメニューからVital capacityを選択し、画面上部の開始ボタンを選択することで自動的に施行される。

【ループ波形の比較による効果判定】

リクルートメント手技により呼吸器コンプライアンスが改善した場合は対照ループの項で述べたのと逆の変化、すなわち従量式換気ではy軸方向の傾斜が増大し(図4)、従圧式換気ではPVループの高さが増加する。換気モードとして従圧式換気を用いていた場合は、リクルートメント手技による呼吸器コンプライアンスの改善により、意図しない一回換気量の増加を来す

従量式換気中のリクルートメント手技によるコンプライアンスの改善



コンプライアンスの改善により施行後のPVループ(黄色)のy軸方向の傾斜が増加している。

図4

換気量保証従圧式換気(PCV-VG)中のリクルートメント手技によるコンプライアンスの改善



コンプライアンスの改善に追従して駆動圧が低下し、施行後のPVループ(黄色)がy軸マイナス側へ移動している。

図5



まとめ

リクルートメント手技によって肺酸化とコンプライアンスの改善が可能である。

- ☐ 一側肺手術、肥満減量手術ではリクルートメント手技施行により、術中の肺酸化、コンプライアンス、換気効率が改善する。開腹手術でも低一回換気量、PEEP付加およびリクルートメント手技からなる肺保護戦略が術後の予後を改善することが示されている。ただし、過剰に積極的なプロトコルの使用は推奨できない。
- ☐ 演者の施設では簡略化した駆動圧一定、PEEP漸増プロトコルによるCycling機能を用いてリクルートメント手技を施行している。

*本資料に掲載されている内容は、弊社が保証するものではありません。

参考文献

1. Suzumura EA, Amato MB, Cavalcanti AB: Understanding recruitment maneuvers. Intensive Care Med 2016; 42: 908-11
2. Futier E, Marret E, Jaber S: Perioperative positive pressure ventilation: an integrated approach to improve pulmonary care. Anesthesiology 2014; 121: 400-8
3. Duggan M, Kavanagh BP: Pulmonary atelectasis: a pathogenic perioperative entity. Anesthesiology 2005; 102: 838-54
4. Lundquist H, Hedenstierna G, Strandberg A, Tokics L, Brismar B: CT-assessment of dependent lung densities in man during general anaesthesia. Acta Radiol 1995; 36: 626-32
5. Ladha K, Vidal Melo MF, McLean DJ, Wanderer JP, Grabitz SD, Kurth T, Eikermann M: Intraoperative protective mechanical ventilation and risk of postoperative respiratory complications: hospital based registry study. BMJ 2015; 351: h3646
6. Pelosi P, Brusasco C, Gama de Abreu M: Mechanical ventilation during general anesthesia, Principles and practice of mechanical ventilation, 3rd edition. Edited by Tobin MJ. New York, McGraw Hill Medical, pp 597-627
7. Guldner A, Kiss T, Serpa Neto A, Hemmes SN, Canet J, Spieth PM, Rocco PR, Schultz MJ, Pelosi P, Gama de Abreu M: Intraoperative Protective Mechanical Ventilation for Prevention of Postoperative Pulmonary Complications: A Comprehensive Review of the Role of Tidal Volume, Positive End-expiratory Pressure, and Lung Recruitment Maneuvers. Anesthesiology 2015; 123: 692-713
8. Slutsky AS, Ranieri VM: Ventilator-induced lung injury. N Engl J Med 2013; 369: 2126-36
9. Jabaudon M, Hamroun N, Roszyk L, Guerin R, Bazin JE, Sapin V, Pereira B, Constantin JM: Effects of a recruitment maneuver on plasma levels of soluble RAGE in patients with diffuse acute respiratory distress syndrome: a prospective randomized crossover study. Intensive Care Med 2015; 41: 846-55
10. Unzueta C, Tusman G, Suarez-Sipmann F, Bohm S, Moral V: Alveolar recruitment improves ventilation during thoracic surgery: a randomized controlled trial. Br J Anaesth 2012; 108: 517-24
11. Ferrando C, Mugarra A, Gutierrez A, Carbonell JA, Garcia M, Soro M, Tusman G, Belda FJ: Setting individualized positive end-expiratory Pressure level with a positive end-expiratory Pressure decrement trial after a recruitment maneuver improves oxygenation and lung mechanics during one-lung ventilation. Anesth Analg 2014; 118: 657-65
12. Futier E, Constantin JM, Polisi P, Chanques G, Kwiatkowski F, Jaber S, Bazin JE: Intraoperative recruitment maneuver reverses detrimental pneumoperitoneum-induced respiratory effects in healthy weight and obese patients undergoing laparoscopy. Anesthesiology 2010; 113: 1310-9
13. Futier E, Constantin JM, Paugam-Burtz C, Pascal J, Eurin M, Neuschwander A, Marret E, Beaussier M, Gutton C, Lefrant JY, Allaouchiche B, Verzilli D, Leone M, De Jong A, Bazin JE, Pereira B, Jaber S: A trial of intraoperative low-tidal-volume ventilation in abdominal surgery. N Engl J Med 2013; 369: 428-37
14. Severgnini P, Selmo G, Lanza C, Chiesa A, Frigerio A, Bucuzzi A, Dionigi G, Novario R, Gregoret C, de Abreu MG, Schultz MJ, Jaber S, Futier E, Chiaranda M, Pelosi P: Protective mechanical ventilation during general anesthesia for open abdominal surgery improves postoperative pulmonary function. Anesthesiology 2013; 118: 1307-21
15. Hemmes SN, Gama de Abreu M, Pelosi P, Schultz MJ: High versus low positive end-expiratory pressure during general anaesthesia for open abdominal surgery (PROVHILO trial): a multicentre randomised controlled trial. Lancet 2014; 384: 495-503
16. Yang D, Grant MC, Stone A, Wu CL, Wick EC: A Meta-analysis of Intraoperative Ventilation Strategies to Prevent Pulmonary Complications: Is Low Tidal Volume Alone Sufficient to Protect Healthy Lungs? Ann Surg 2016; 263: 881-7
17. 中山 禎人: 麻酔中の肺胞リクルートメント手技 基礎と実践. 臨床麻酔 2016; 40: 21-29
18. Rothen HU, Neumann P, Berglund JE, Valtysson J, Magnusson A, Hedenstierna G: Dynamics of re-expansion of atelectasis during general anaesthesia. Br J Anaesth 1999; 82: 551-6



Carestation 600 シリーズ
B650 モニタ搭載例



Carestation 750 シリーズ
Canvas シリーズ モニタ搭載例



エイシス CS2
Canvas シリーズ モニタ搭載例

＊本資料に掲載されている内容は、使用者の感想であり、仕様値として弊社が保証するものではありません。

販売名称: Carestation 600 シリーズ 医療機器承認番号: 22700BZX00422000
販売名称: エイシス 医療機器承認番号: 21900BZX00741000

販売名称: Carestation 750 シリーズ
販売名称: Tec7 気化器 セボフルレン
販売名称: Tec7 気化器 イソフルレン

販売名称: CARESCAPE ベッドサイド モニタ シリーズ
販売名称: Tec800 シリーズ 気化器 セボフルレン
販売名称: Tec800 シリーズ 気化器 イソフルレン
販売名称: CARESCAPE ベッドサイド モニタ Canvas シリーズ
販売名称: CARESCAPE ONE モニター

医療機器承認番号: 30200BZX00223000
医療機器承認番号: 21500BZY00166000
医療機器承認番号: 21500BZY00167000
医療機器承認番号: 231ADBZX00011000
医療機器承認番号: 23000BZX00190000
医療機器承認番号: 23000BZX00189000
医療機器承認番号: 305ADBZX00092000
医療機器承認番号: 231ADBZX00022000

製造販売業者名: GEヘルスケア・ジャパン株式会社

記載内容は、お断りなく変更する場合がありますのでご了承ください。

© 2024 GE HealthCare. GE is a trademark of General Electric Company used under trademark license.

Rev.1.3 201243 Bulletin N16A1

JB10620JA