

●原 著

高気圧環境下における脳循環測定システムの
開発とその改良

日沼吉孝* 大田英則**
鈴木英一* 蜂谷武憲***

はじめに

秋田脳研高気圧酸素治療室では1983年6月から高気圧治療装置(チャンパー)全体をRI管理区域とし、 ^{133}Xe を使用して高気圧環境下をも含めた脳循環(CBF)測定を行ってきた^{1)~5)}。筆者らのチャンパーは治療装置としては大型であるが¹⁾RI管理区域として十分な量の ^{133}Xe を使用するには容量、換気能力とも十分とはいえなかった。これらから1日最大使用量に制限があり、高気圧下をも含めた病態生理把握のために十分な ^{133}Xe を使用することができなかった。また高気圧酸素吸入下における測定では吸気用流量が多く必要となり(10ℓ~15ℓ/min)かつ減圧時にはこれが膨張するなどの現象のためにダグラスバッグの過拡張や ^{133}Xe トラップの効率の低下などの諸問題が浮上し解決をせまられていた。これらの諸問題に対して十分に満足できる脳循環測定システムを完成させることができたので紹介する。

 ^{133}Xe による脳循環測定システムの改良

1. 旧システムからの反省

筆者らが既に報告している脳循環測定システム¹⁾²⁾(図1)の約1年間にわたる使用経験から問題点を整理すると、①チャンパー容積が小さい(110m³)、②チャンパーの換気能力不足(720m³/hour)、③ダグラスバッグの過拡張、④ ^{133}Xe トラップの効率低下、⑤ ^{133}Xe を含んだ呼気ガスを ^{133}Xe

Xeトラップを通して排気ダクトに直接排気するために時として規制値を超える ^{133}Xe が検出される、⑥減圧時に排気ダクトなどにたまっていた ^{133}Xe が一気に排出される、などであった。

①のタンク容積を大きくすることは別の超大型タンクを造らない限り不可能であり、②の換気能力をこれ以上にすることは被験者の居住性の問題と大幅な治療装置の改善が必要となり費用の面で困難であると判断された。そこでこの換気量を補う方策としては排気ダクトの途中に希釈ファンを設けることで解決できると考えた。被験者の呼気を一時的に貯留するダグラスバッグは緩衝用として測定上必要であるとしてタンク内に設置することとした。これの過拡張に対してはタンク外に設置した吸引圧縮ポンプを用いて吸引し対処可能と考えられた。④、⑤、⑥に対しては被験者からの呼気をタンク外に設置した貯気ポンベに圧縮ポンプを使用してつめ込み、減衰を待って徐々に排気することで解決可能と判断された。

これらの反省に立脚して ^{133}Xe を含んだ呼気ガスを貯気ポンベにつめ込み減衰を待って排出する③呼気ガスつめ込み法と、希釈ファンにより換気流量の増加と ^{133}Xe の希釈をはかる④排気ガス希釈法を問題の解決策として採用することとした。

2. 新システムの開発と完成

旧システム使用経験と反省から新システムへの改造を行った(図2, 3)。

a. 呼気ガスつめ込み法

脳循環測定時に被験者から排出される ^{133}Xe を含んだ呼気ならびに酸素吸入下脳循環測定時における over flow させた酸素を緩衝用として設けたダグラスバッグに一旦回収し、除湿用シリカゲル

*秋田県立脳血管研究所高気圧酸素治療室

**秋田県立脳血管研究所脳神経外科

***秋田県立脳血管研究所放射線科

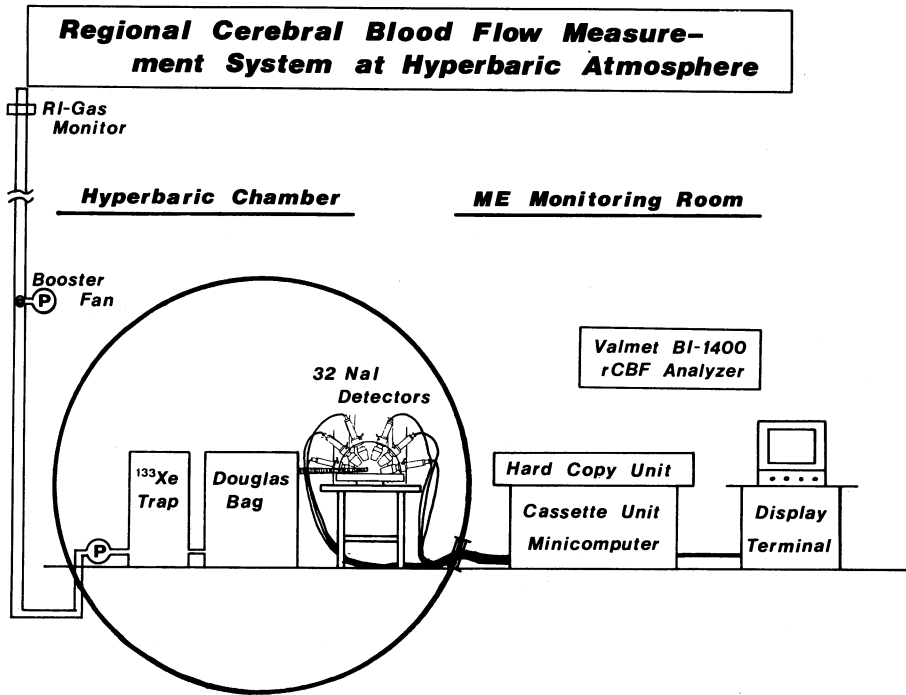


図1 改良前の脳循環測定システム²⁾

^{133}Xe トラップはタンク内におかれており、これを通した後の ^{133}Xe を含んだ呼気ガスは総排気口に直接排気されるようになっている。タンク容積も小さく、換気能力も不十分であったために諸種の問題が残った。

を通して除湿を行う。これは後で述べる貯気ポンベの湿気を少なくし、 ^{133}Xe トラップの RI 吸着効率を高める目的で設置した⁶⁾。除湿後にチャンパー外の地下に位置する配管用ピットを新たに RI 管理区域として廃棄施設室として利用し、ここに設置した高圧用コンプレッサー (OL-041B, Iwata) を用い、貯気ポンベにつめ込む方法を採用した。この貯気ポンベ(ペーパーライザー用 LP ガス容器, 昭和高压工業株) も廃棄施設室内に設置されており、容積は 1 本が 118ℓ で 2 本 1 組として使用し、計 5 組を用意した。コンプレッサーによる圧縮つめ込みは 4kg/cm² の圧力で行い、流量の調整はダグラスバッグのふくらみ具合を確認しつつダグラスバッグの排出口の所に設けた調整弁よりマニュアルで行うことにした。

つめ込んだ呼気ガスは 8 日間以上のできるだけ長期間貯留して ^{133}Xe の減衰 (^{133}Xe 半減期: 5.27 日) を待って 5ℓ/min のスピードで ^{133}Xe トラップを通した後に徐々に排気ダクトに排出する方法

とした。更に安全性を高めるために ^{133}Xe トラップは 2 組用意して交互に使用できるようにした。この ^{133}Xe トラップは富樫ら⁷⁾によって改良された大型トラップと同型のものを用いている。この呼気ガスつめ込み法の大要は図 3 に示してある。

b. 排気ガス希釈法

改良前のチャンパーの換気能力は内室 480m³/hour, 外室 240m³/hour, 合計で 720m³/hour と小さく、医療法施行規則にのっとり ^{133}Xe の使用量を増やすためには大きな障害であった。また総排気ダクトに ^{133}Xe を含んだ呼気を排気していたこともあり、時として ^{133}Xe ガスモニターの警報が鳴るような状況もあった。これらに対して排気ダクトの末端近くに大気を吹き込み希釈する希釈ファン (S2KMR-252A, SHOWA DENKI) を増設し換気量を 6,000m³/hour までに増量させた。なお、排気ダクト末端の ^{133}Xe ガスモニターには Aloka 製 MGR-341-110 を使用している。

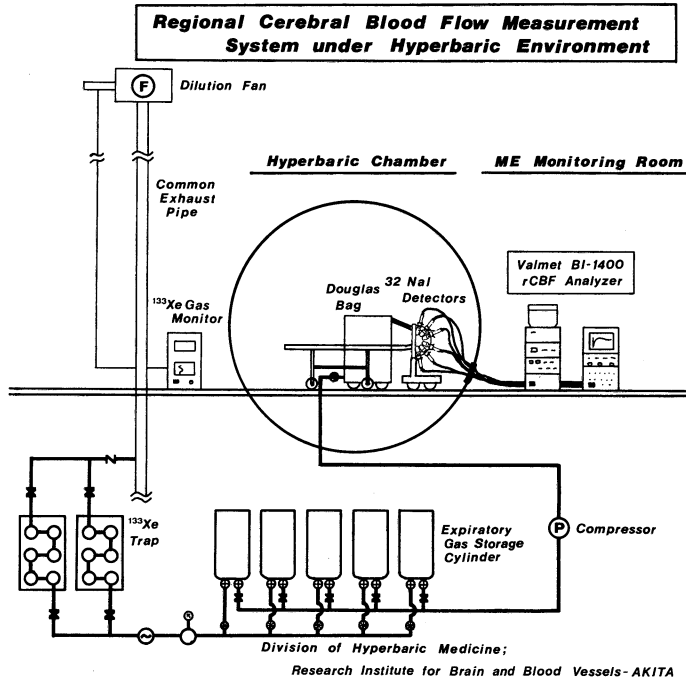


図2 改良後の脳循環測定システム

改良のポイントの一つはタンク外下部のピットを新たにRI廃棄施設とし、ここに貯気ポンペを設置しこれに ^{133}Xe を含んだ呼気ガスを貯蔵、減衰させる方法を取ったこと（呼気ガスつめ込み法）である。加えてできるだけ長期間 ^{133}Xe を減衰させた後に ^{133}Xe トラップを通して徐々に排気するとともに換気容量を増すための希釈ファンを総排気口の末端近くに造設した（希釈法）ことである。

結 果

呼気ガスつめ込み法および排気ガス希釈法を用いた改良で ^{133}Xe ガスモニターが警報を発する（つまり法的規制値を越える ^{133}Xe の排気が起こる）ことは皆無となった。これは、 ^{133}Xe を含んだ呼気を一旦貯気ポンペにため減衰を待つという呼気ガスつめ込み法の効果が大きかったためである。希釈ファンを使用すると測定時の ^{133}Xe 排気濃度が使用しない場合よりやや高値を示すという一見矛盾した結果も得られた。これは測定時にチャンパー内に漏れた（飛散した） ^{133}Xe を総排気口に強制的に吸い込むため、この換気効果により測定室（チャンパー）内の ^{133}Xe 濃度を下げるのに有効であった。希釈ファンの使用の有無にかかわ

らず ^{133}Xe ガスモニターの測定値はきわめて低値を示し法的規準を十分満足していた。

図4に脳循環測定時の、図5に貯気ポンペから ^{133}Xe トラップを通して排気した時の ^{133}Xe ガスモニターによる代表的な測定記録を示す。これらの記録は脳循環測定時に ^{133}Xe を含んだ呼気ガスマスクから漏れたような場合でも十分に規制値を満足させていることを示している（図4、下段）。また貯気ポンペから減衰を待っての排気ではガスモニターはほんのわずかな上昇を示すのみで減衰効果の大きさを如実に示している。（図5）。

この改良により ^{133}Xe の使用量は10mCi/dayから50mCi/dayとすることができた。実際にはこれ以上に増量も可能であるが臨床上の必要性から現在の量にとどめている（表1）。

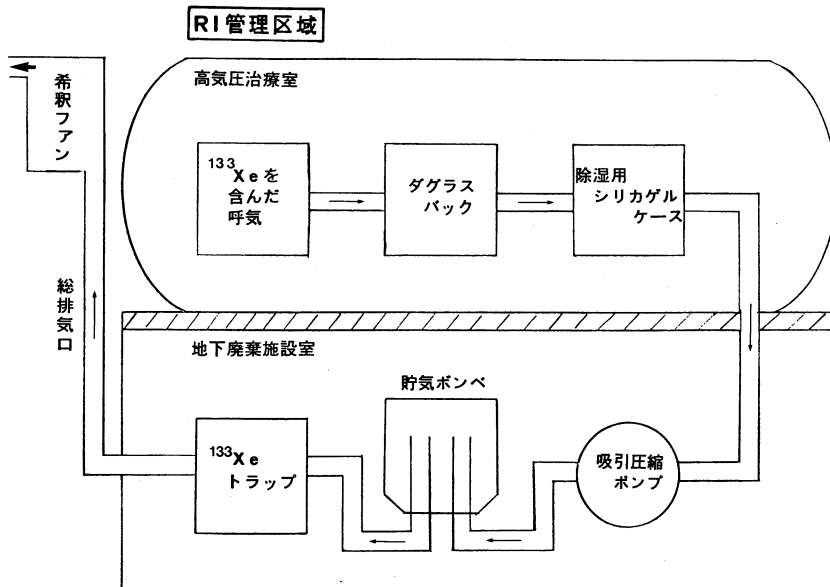


図3 改良後の脳循環測定システムと RI 管理区域

改良前はタンク内のみを RI 管理区域としていたが、改良後は地下廃棄施設室を増設した。¹³³Xe を含んだ呼気ガスは緩衝用として置かれたダグラスバックに一時的にため、これをタンク外に置いた吸引圧縮ポンプにより貯気ボンベにつめ込む方法をとっている。

考 察

高気圧環境下を含めた脳循環測定の可能な高気圧酸素治療装置の導入にあたっては、脳循環測定システムの安全性を確認するとともに、RI(¹³³Xe)を使用するので厚生省の定めた医療法施行規則による規準を満足するように事前に十分な検討を行った。そのシステム(図1)については筆者らが第18回日本高気圧環境医学会総会で紹介している¹⁾²⁾。

しかし高気圧環境下における RI を使用しての脳循環測定は筆者らが渉猟し得た範囲では²⁾ ⁸⁵Kr 動注法による Jacobson ら⁸⁾の報告のみで、これは犬の脳循環を測定したものである。高気圧環境下におけるヒトの脳循環を¹³³Xe を用いて測定するという我々の試みは日本では初めてであり、多分世界でも最初であったと思われる。このため、また日本では RI の管理および安全、排棄などの規制が非常にきびしいこともあって本稿に述べたような問題点が浮上し解決をせまられていた訳であ

る。

この諸問題に対して①呼気ガスつめ込み法および②排気ガス希釈法という二段構えの安全策を施すことで完璧に近いシステムを完成させることができた(図2~5)。

ここで測定室(高気圧治療装置の主室)と最終排気口における¹³³Xe の許容濃度の計算式を医療法施行規則第30条の26の第2項および第1項第1号に沿って示す。

a) 測定室(主室)における許容濃度

測定室における許容濃度は、告示第6条別表1の濃度の2.5倍である。よって告示第6条表1による¹³³Xe 濃度は $3 \times 10^{-6} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ であるのでこの2.5倍つまり $7.5 \times 10^{-6} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ が測定室での許容濃度となる。

測定室内¹³³Xe 濃度 = 1日最大使用量 (μCi)

$$\times \text{飛散率} \times \frac{1}{\text{室の換気量}} \times \frac{1}{8} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$$

ここで飛散率とは RI の患者や注射器などからの漏れであるが¹³³Xe 注射液が気化性であるため

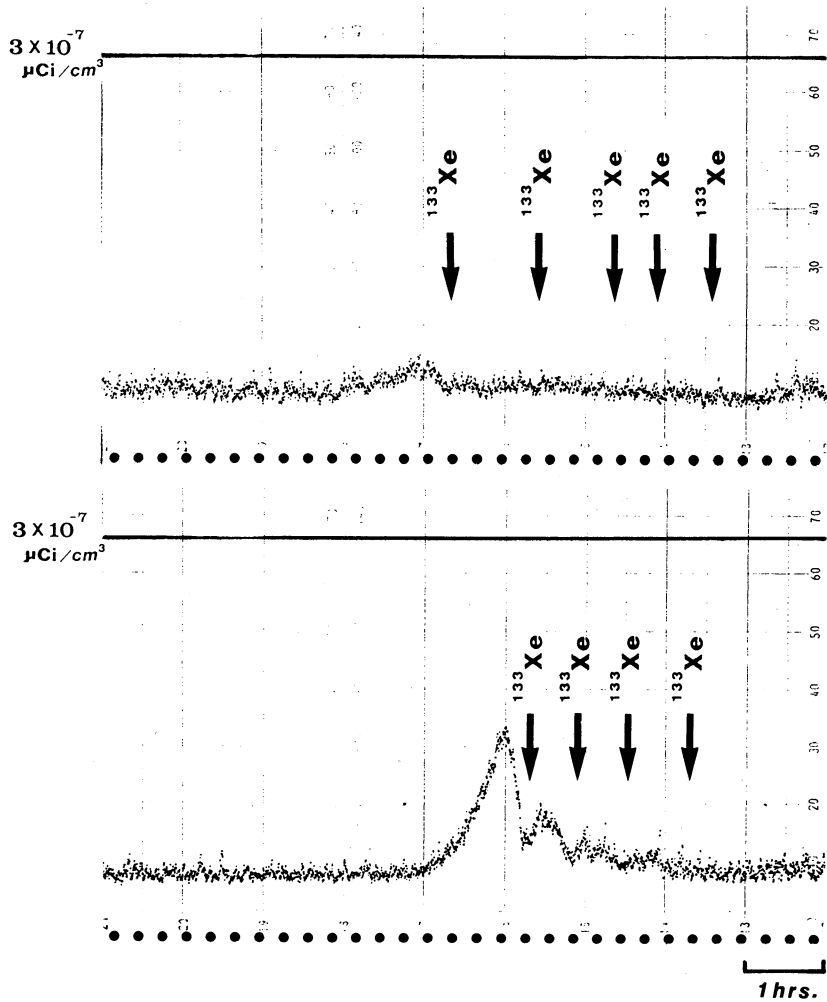


図4 改良後の¹³³Xeガスモニター記録

上段は10mCiの¹³³Xeを使用して5回の脳循環測定を行った時の記録である。5回目で¹³³Xeの飛散によると思われるほんの軽度の上昇をみるのみで、呼気ガスつめ込み法の偉力を如実に示している。

下段は¹³³Xeの飛散が大きかった時の記録である。特に4回目はマスクから¹³³Xeがもれたと思われるが、それでも法的規制値 $3 \times 10^{-7} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ を超えることはなかった。

1/10として計算している。内室の容量は 480cm^3 、換気能力は $6,000\text{m}^3/\text{hour}$ であり、8時間使用したとしての平均値が算出される。1日最大使用量を50mCi（つまり $5,000\mu\text{Ci}$ ）とすると室内の¹³³Xe濃度は

$$50,000 \times \frac{1}{10} \times \frac{1}{480 \times 10^6} \times \frac{1}{8} = 1.3 \times 10^{-6} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$$

となる。許容濃度が $7.5 \times 10^{-6} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ であるために許容濃度の割合は

$$\frac{1.3 \times 10^{-6}}{7.5 \times 10^{-6}} = 0.18 < 1$$

となって十分に規制値を満足している。

b) 最終排気口における許容濃度

排気口における許容濃度は前記の告示第6条別表1の濃度の1/10であり¹³³Xeでは

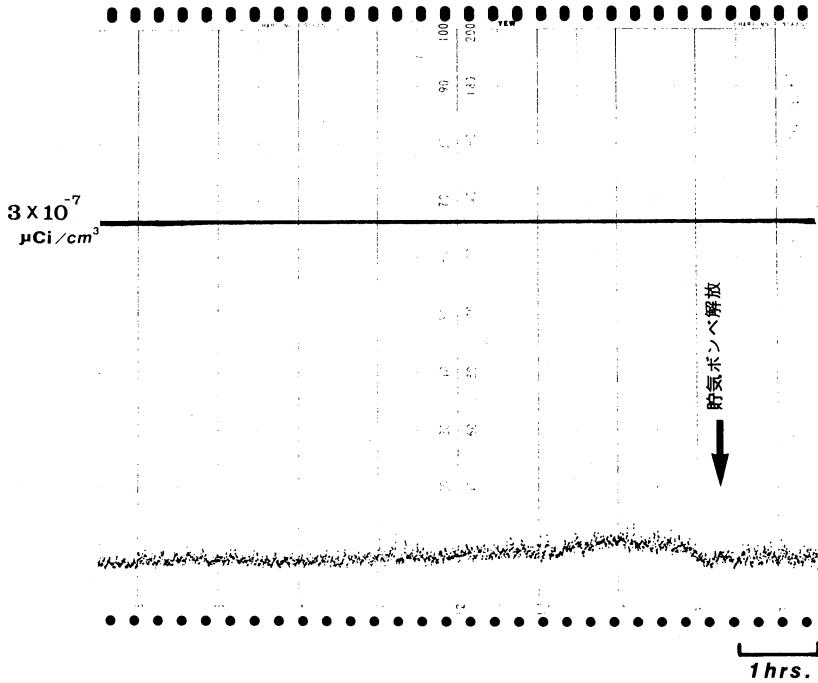


図5 貯気ボンベ開放時の¹³³Xe ガスモニター記録

¹³³Xe を貯気ボンベに 8 日間つめ込んで減衰させた後にこれを開放した時の記録である。大型の¹³³Xe トラップを通して徐々に排気しているが、モニターではほんのわずかの上昇を認めるのみである。¹³³Xe を減衰させることの大切さを示している。

$$3 \times 10^{-6} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3 \times \frac{1}{10} = 3 \times 10^{-7} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$$

となる。

ここで最終排気口での計算は新システムの使用状況として最も過酷な状態、つまり 1 日に 50mCi を使用し、8 日間貯気ボンベに貯蔵し減衰させた¹³³Xe を¹³³Xe トラップを通して同時に排気した場合の計算を示す。

$$\begin{aligned} & \text{最終排気口における } ^{133}\text{Xe 濃度} = \text{1 日最大} \\ & \text{使用量 } (\mu\text{Ci}) \times [\text{飛散率} + (1 - \text{飛散率}) \times \\ & e^{-\frac{0.693}{5.27} \times 8} \times \frac{100 - \text{トラップ能力}}{100} \\ & \times \frac{1}{\text{総排気量}} \times \frac{1}{8} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3 \end{aligned}$$

ここで 1 日最大使用量は 50mCi (50,000 μ Ci)、飛散率 1/10、¹³³Xe トラップ能力は 90%、総排気量は 6,000m³/hour であり、5.27 は¹³³Xe の半減期を示している。

よって最終排気口における¹³³Xe 濃度は

$$\begin{aligned} & 50,000 \times \left(\frac{1}{10} + \left(1 - \frac{1}{10}\right) \times e^{-\frac{0.693}{5.27} \times 8} \right) \\ & \times \frac{(100 - 90)}{100} \times \frac{1}{6,000 \times 10^6} \times \frac{1}{8} = \\ & 1.4 \times 10^{-7} \end{aligned}$$

となる。

この最終排気口における¹³³Xe 許容濃度の割合は

$$\frac{1.4 \times 10^{-7}}{3 \times 10^{-7}} = 0.47 < 1$$

と十分に法的規制濃度を満足している。

実際の脳循環測定時および貯気ボンベ開放時における¹³³Xe ガスモニターの記録を図 4 および図 5 に示してあるが、¹³³Xe を含んだ呼気ガスがマスクからかなり漏れたような場合 (図 4 下段) でもガスモニターの警報が鳴るといったことは皆無となっている。

今回の改良で高気圧治療室を RI 管理区域とし

て ^{133}Xe を使用し脳循環を測定するという高気圧環境下脳循環測定システムはほぼ完成されたといつて良い結果を得ている。この改良の経過のなかで判明したことは医療法施行規則で ^{133}Xe トラップのトラップ率を90%として計算させているが、この吸着率(トラップ率)は使用回数や頻度、湿度、あるいはトラップ内を流れる ^{133}Xe を含んだ呼気の流量とスピードなどによって大きく変化するため必ずしも一定でないということであった。 ^{133}Xe を使用する場合には ^{133}Xe トラップの設置が義務づけられているが、これを過信することは法的規制値を越えた ^{133}Xe の排気が行われることになりその効率保持のためには十分な配慮が必要である。

また結果の項でも述べたが、脳循環測定時に希釈ファンを使用した時としない時では、希釈ファンを使用しない時の方が最終排気口における ^{133}Xe 濃度が低いという結果を得ている。これは希釈ファンを使用することで測定時にマスクや注射筒から飛散した ^{133}Xe を排気口により多く吸い込むためと考えられた。この事は換気の改善により測定室内の ^{133}Xe 濃度を下げるといふ効果を示しているといえる。室内でのシンチレーションサーベイヤー(MODEL TCS-121C, Aloka)による計測でもこの事が確認された。 ^{133}Xe ガスモニターの警報を鳴らさない、つまり排気ガス規制値のみを問題とする場合には呼気ガスつめ込み法のみで十分であるが、測定室内の清浄度を保つためには希釈法も併用することが必要となる訳である。

最後に、筆者らは ^{133}Xe を使用して高気圧治療室内で高気圧環境下をも含めた脳循環測定が可能システムを完成させた訳であるが、この方法(つまり①呼気ガスつめ込み法と②排気ガス希釈法)によれば、狭いスペースで換気も不十分な立地条件であっても、 ^{133}Xe を使用するのであれば十分に医療法施行規制を満足させ得るシステム作りが可能であることを示している。今後の参考としていただければ幸いである。

ま と め

高気圧酸素治療室内において ^{133}Xe を使用して高気圧環境下をも含めた脳循環測定を行うという高気圧下脳循環測定システムを①呼気ガスつめ込み法および②排気ガス希釈法を用いて完成させ

表1 改良前後の変化

変更内容	変更前	変更後
一日最大使用 予定数量	$^{133}\text{Xe}-10\text{mCi}$	$^{133}\text{Xe}-50\text{mCi}$
貯蔵予定最大数量	$^{133}\text{Xe}-100\text{mCi}$	$^{133}\text{Xe}-200\text{mCi}$
希釈ファン増設 による総排気量	720 m ³ /hr	6000 m ³ /hr
廃棄施設の増設	—	OHPタンク室 下部に増設
年間使用予定数量	$^{133}\text{Xe}-3000\text{mCi}$	$^{133}\text{Xe}-5000\text{mCi}$

た。このシステムの完成により今後さらに高濃度酸素吸入下における病態生理の解明が脳循環の面から可能となった。

またこの方法はスペースや換気能力などが不十分のために ^{133}Xe を使用できない、つまり医療法施行規則を満足できないような施設でも十分に応用可能なシステムと考えられた。

本稿の要は第19回日本高気圧環境医学会総会、1984年10月26日、千葉、にて発表したものである。

(秋田脳研における高気圧環境下脳循環測定システムの開発と改良に御尽力いただいた川崎エンジニアリング株式会社の小村一雄氏、ならびに千代田保安株式会社の細田敏和氏には紙上をお借りして深くお礼申し上げます)

〔参 考 文 献〕

- 1) 大田英則, 日沼吉孝, 鈴木英一, 安井信之, 鈴木明文, 川村伸悟, 小村一雄: 秋田脳研に導入した大型高気圧酸素治療装置. 日高圧医誌, 19: 12-16, 1984.
- 2) 大田英則, 安井信之, 川村伸悟, 根本正史, 日沼吉孝, 鈴木英一, 菊池カヨ子: 高気圧環境下における脳循環測定. -PaO₂の脳循環に与える影響, Preliminary Report-. 日高圧医誌, 19: 17-21, 1984.
- 3) Ohta, H., Yasui, N., Tsuchida, H., Hinuma, Y., Suzuki, E. and Kikuchi, K.: Measurement of cerebral blood flow under hyperbaric oxygenation in man. -Relationship between PaO₂ and CBF-. In Proceedings of 8th. International Congress on Hyperbaric Medicine. Long Beach, California, 1984 (In Press).
- 4) Ohta, H., Yasui, N., Kawamura, S., Hinuma, Y.

- and Suzuki,E.: Choice of EIAB candidates by topographical evaluation of EEG and SEP with concomitant rCBF study under hyperbaric oxygenation, -Preliminary report-. in Cerebral Revascularization for Stroke, eds by Spetzler, R.F., Carter, L.P., Selman, W.R. and Martin, N.A., Thieme-Stratton Inc., New York, 1985, p.208-216
- 5) 大田英則, 川村伸悟, 根本正史, 北見公一, 安井信之, 日沼吉孝, 鈴木英一: 脳血管障害に対する高気圧酸素療法——その効用と限界一。日高圧医誌, 20: 掲載予定, 1985.
 - 6) 菊地透, 伊勢孝雄: 病院および医学研究施設における Xe-133 ガス使用時における放射線管理について。第36回日本放射線技術学会総会予稿集, p. 502,1980, 仙台。
 - 7) 富樫健, 杉本健, 阿波加正弘: 核医学検査用呼吸コントロール装置のガストラップの改良について, Radioisotopes,32:293-296,1983.
 - 8) Jacobson,I., Harper,A.M. and McDowell,D.G.: The effect of oxygen an 1 and 2 atomospheres on the blood flow and oxygen uptake of the cerebral cortex. Surg Gynecol Obstet, 119: 737-742,1964.