

本資料は 年 月 日付けで登録区分、
変更する。 2001. 6. 6

[技術情報室]

化学励起ヨウ素レーザーの現状

1994年3月

動力炉・核燃料開発事業団
東海事業所

この資料
製、転載、
して下さい

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184
Japan

本資料

〒

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2001

化学励起ヨウ素レーザーの現状

報告者 核燃料技術開発部 先端技術開発室 北谷文人

責任者 核燃料技術開発部 先端技術開発室 高橋武士



要 旨

目的：化学励起ヨウ素レーザーの装置及び反応過程の理論的解析の現状を調べ、その発展及び応用の可能性について考察し装置の設計製作の指針を得ることを目的とする。

概要：化学励起ヨウ素レーザーは、1978年に、初めて発振した比較的歴史の新しいレーザーである。

このレーザーの特徴は、純粋な化学反応のみでレーザー出力が得られるために、高効率で高出力なシステムが構築できることおよび、発振波長が、石英ファイバの最低損失波長に近い $1.315\mu\text{m}$ であるため、既存の石英ファイバで容易にパワー伝送が可能であることである。このレーザーは海外では、主に軍事用のレーザーとして開発されているために、工業用レーザーとしての研究は、少ない。しかし、現在用いられている工業用レーザーと比較して能力的には、遜色ないと考えられる。現在広く用いられている CO_2 レーザーと比較すれば波長が短い分だけ物質での吸収が大きいため加工などに用いる際には、効率がよく、また、ファイバ伝送が可能であるために原子力での利用のように遠隔操作での利用が主になる分野では、利用価値が大きいと考えられる。しかし、開発の歴史が浅いレーザーがあるために、実用を考える上では、まだまだ、改善しなければならない要素があり、それらを研究開発するために出力100W級の試作機を試作する。

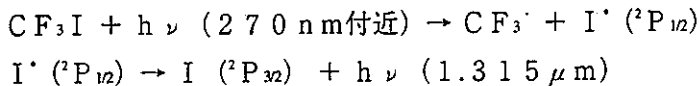
目 次

1. はじめに	1
2. 動作原理	2
2-1-1 ヨウ素の反応過程	2
2-1-2 O_2^* ($^1\Delta$) の動作しきい値濃度	3
2-2 ヨウ素の分光特性	4
3. COIL装置	5
3-1 SOG	5
3-1-1 化学反応を用いたSOGでの O_2^* ($^1\Delta$) の発生割合	6
3-1-2 種々のSOG	7
3-2 WVT	9
3-2-1 種々のWVT	9
3-3 LD	10
4. 実際の装置	11
4-1 McDemott's 1st COIL	11
4-2 McDemott's 2nd COIL	11
4-3 産業創造研究所の小型COIL	12
4-4 TRWでの軍用大出力COIL	12
5. まとめ	13

1. はじめに

最初のヨウ素レーザーは、1964年 Kasper と Pimentel によって CF_3I gas を UV 光で光解離させることによって得られた(ref.1)。これは、1938年に Porret と Goodev が CH_3I の光解離により励起ヨウ素 [$\text{I}^*(^2\text{P}_{1/2})$] が得られることを理論的に予想したことに基づいている(ref.2)。

Kasperらによって得られたレーザー反応は、次式で表わされる。

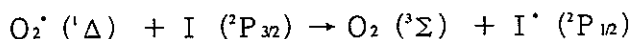


のち1965年には、他の数種類のヨウ化アルキルによってもレーザー動作が得られたが、最も高出力なレーザーは過フッ化アルキルを用いた媒質によって得られた。

ヨウ素の $\text{I}^*(^2\text{P}_{1/2}) \rightarrow \text{I} (^2\text{P}_{3/2})$ の遷移は磁気双極子遷移であり、上準位の自然放出寿命は、130 ns と長いためにエネルギーの保持能力に優れている。このため、レーザーアンプとして有利な特性を持っている。この様な光解離型ヨウ素レーザーは、大出力パルスレーザーアンプシステムとして、主に旧西独 Max-Planck 研究所において行なわれている。同研究所の ASTERIX-III は、シングルビームで数 kJ の出力で、パルス幅 sub-nsec のレーザーを回折限界のビームクオリティで高繰り返し出力が可能なレーザーである。

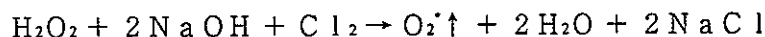
ヨウ素の励起方法としてヨウ化アルキルの光解離の他に1972年に Derrwent と Thrust により励起した O_2 よりヨウ素原子への共鳴エネルギー以上を利用する方法が提案された(ref.3)。

この反応は、次式で表わされる。



この様な方法で励起されるヨウ素レーザーは化学励起ヨウ素レーザー (CPIL Chemical Pumped Iodine Laser or COIL Chemical Oxygen-Iodine Laser) と呼ばれ1978年に McDermott らが、化学反応により得られた $\text{O}_2(^1\Delta)$ を用いてレーザー発振に成功した。(ref.4)

彼らを用いた $\text{O}_2(^1\Delta)$ の発生は、次の反応に代表されるようなアルカリ雰囲気での H_2O_2 の分解反応によって行なわれる。



このように COIL は、励起エネルギーとして外部からのエネルギーを全く必要とせず純粋な化学反応のみでレーザー出力が得られる。このため、光入力、放電、電子ビームなどの励起源としての電源設備が不要であるという利点を持つ。また、反応に用いる物質が安価で比較的取扱いが容易であるために、運転経費、設備費が少なくよいという利点もある。

また、ヨウ素レーザー一般については、その発振波長 1.315 μm は、石英系ファイバーの損失が最小となる波長に近く、既存のファイバーにより容易にパワー伝送ができるため、レーザー加工等に大きな利用価値があると考えられる。

本報告書では、以上述べたような特色を持つ、COIL の動作の理論的解析及び装置について述べる。

2. 動作原理

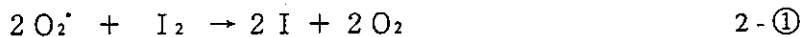
2-1 化学励起ヨウ素レーザーの動作原理

2-1-1 ヨウ素の反応過程

化学励起ヨウ素レーザーは、励起酸素分子からヨウ素原子への共鳴エネルギー移乗によるヨウ素原子の励起によって動作する。この反応機構は、3つのステップに分かれている。

1) I_2 の分解

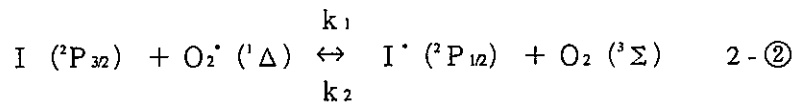
これは、次のような反応による。



この機構についてはよく解明されていないが、高励起状態の O_2^* ($^1\Sigma$) による解離、または O_2^* ($^1\Delta$) の衝突による I_2 の高振動レベル状態の形成からの解離モデルが考えられている(ref.5)。

2) I^* の生成

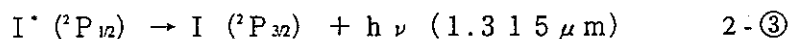
これは1)の反応で生成したヨウ素原子の励起の過程で O_2^* ($^1\Delta$) との共鳴エネルギー移乗反応による。すなわち、



この2つの1),2)のステップにより励起ヨウ素が生成される。

3) 光の放出

1),2)の反応で生々した励起ヨウ素は次の反応により光を放出する。



1),2),3)のような反応においてこれが、レーザー動作をするためには、励起ヨウ素原子の反転分布の形成が必要となる。

このさい、2-②、③式の反応において $I (^2P_{3/2})$ の反応は、 $I^* (^2P_{3/2})$ の脱励起に比べて十分に早いので励起ヨウ素原子は、反転分布を形成することができる。

しかし、②式よりわかるようにヨウ素原子と O_2^* ($^1\Delta$) との反応は可逆反応であるから、励起ヨウ素原子が、反転分布を形成するためには、ある程度以上の O_2^* ($^1\Delta$) 濃度が必要である。

2-1-2 $O_2^{\cdot} (^1\Delta)$ の動作しきい値濃度

この反転分布形成のしきい値を求めてみる。まず、化学反応の平衡状態において④式が成立する。

$$[I^{\cdot} (^2P_{1/2})] [O_2 (^3\Sigma)] / [I (^2P_{3/2})] [O_2^{\cdot} (^1\Delta)] = k_1/k_2 \quad 2-④$$

次に反転分布が形成されるためには⑤式が成立しなければならない。

$$[I^{\cdot} (^2P_{1/2})] / [I (^2P_{3/2})] \geq 1/2 \quad 2-⑤$$

ref.3によると $k_1 = 7.6 \times 10^{-11}$, $k_2 = 2.6 \times 10^{-10}$ であるから、

反転分布を形成するための必要最小限の励起酸素分子の割合は⑥式となる。

$$[O_2^{\cdot} (^1\Delta)] / [O_2 (^3\Sigma)] \geq 0.17 \quad 2-⑥$$

しかし、⑥式は、ヨウ素原子の超微細構造の影響を考慮しない値である。これを考慮するとこの値は変化して、⑦式の値をとる。

$$[O_2^{\cdot} (^1\Delta)] / [O_2 (^3\Sigma)] \geq 0.27 \quad 2-⑦$$

この値が、COILのレーザ動作のための、 $O_2^{\cdot} (^1\Delta)$ 濃度の理論的なしきい値である。

2-2 ヨウ素原子の分光特性

ここで、ヨウ素レーザーの発振波長、ゲイン、バンド幅などを決定するヨウ素のレーザー遷移の分光特性について少しふれておく。

ヨウ素原子は基底状態における電子配置は、 $5s^2 5p^2$ である。これより、P殻は部分的に満たされている。このとき、軌道角運動量量子数Lは、 $L=1$ でスピン量子数Sは、 $S=1/2$ をもつ。この2つの角運動量によりヨウ素原子は、2重項の微細構造が形成され全角運動量Jは、基底状態で $J=3/2$ 、励起状態で $J=1/2$ をとる。

すなわち、レーザー遷移は、 $^2P_{1/2} \rightarrow ^2P_{3/2} + h\nu$ ($1.315 \mu m$) となる。

この遷移は、どちらのレベルもパリティが奇であるので電子双極子遷移は禁止されるため磁気双極子遷移となる。そして、この $^2P_{1/2}$ の磁気双極子遷移確率は、低いために $^2P_{1/2}$ は、準安定状態となって大きなエネルギーストレージャーとなる。

さらに、ヨウ素のスペクトルは、核スピンと全角運動量との結合によって超微細構造に分離する。この結合の全角運動量Fは、核スピン量子数をI、LS結合によって与えられる全角運動量をJとすると、 $F=I+J, I+J-1, I+J-2, \dots, I-J$ で表わされる。ヨウ素の、安定な同位体は、 ^{127}I しかないため超微細構造への分離は安定である。 ^{127}I のスピン量子数Iは、 $5/2$ で、LS結合による全角運動量は、レーザー遷移の上準位で $J=1/2$ で、下準位で $J=3/2$ であるから、超微細構造への分離は、上準位で2つ、下準位で4つのサブレベルに分裂する。これと、選択則 $\Delta F=0$ or ± 1 を考慮すると $^2P_{1/2} \rightarrow ^2P_{3/2}$ の遷移において6本のスペクトルが得られる。

Fig. 2-1 に理論的なレベルの間隔と理論的および実験で得られたラインの位置を示す。

次に、各々のラインの遷移の相対的な強度及びA係数をTable 2-1 に示す(ref.6)。

Table 2-1

Transition $F' \rightarrow F$	3-4	3-3	3-2	2-3	2-2	2-1
Relative intensities(%)	36.5	16.3	6.2	13.0	15.2	12.3
Einstein A coefficients(s^{-1})	5.1	2.2	0.6	2.4	3.1	2.4
	total=7.9					

これより、わかるようにスペクトルの中で最も強いラインは、 $F'=3$ から $F=4$ への遷移である。これは、普通3-4ラインと呼ばれ、ヨウ素レーザー発振器より普通に放出される。

3. COIL装置

Fig. 2-2にCOIL装置の概要を示す。COILの装置は、大別して次の3つに分けられる。

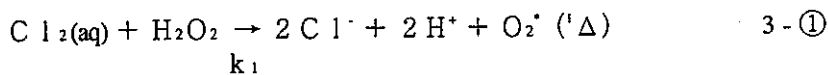
- ① 励起酸素 ($O_2^*(^1\Delta)$) 発生器 (SOG:Single Oxygen Genretor)
- ② 蒸気コールドトラップ (WVT:Water Vaper Trap)
- ③ レーザダクト (LD:Laser Duct)

この各々の装置について述べる。

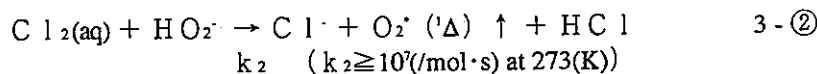
3-1 SOG

SOGは、 $O_2^*(^1\Delta)$ ジェネレーターで、ヨウ素励起のための励起酸素を発生させるための装置である。この発生方法として、 O_3 の分解、 O_2 のマイクロ波等による励起、化学反応による発生がある。この中で、 O_3 の分解、 O_2 の励起は、効率が悪いために一般的にレーザ装置のためのジェネレーターとして、化学反応を用いる。

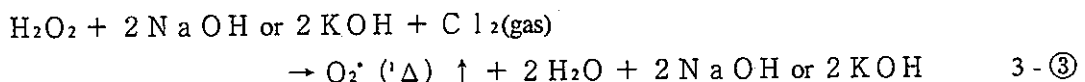
用いる化学反応で最も一般的に用いるものは、過酸化水素水の液相 Cl_2 による直接分解反応でこれは、3-①式で表わされる(ref.7)。



しかし、この反応は、非常に遅い反応であるので ($k_1=35/(\text{mol}\cdot\text{s})$ at 273(K))、3-②式で表わされるようなアルカリ雰囲気での反応を用いる。



実際の $O_2^*(^1\Delta)$ の発生には、3-③式に表わされるような H_2O_2 にNaOH or KOHを混合したアルカリ性 H_2O_2 溶液中に $Cl_2(\text{gas})$ を注入することによって行なう。



このような反応を用いた $O_2^*(^1\Delta)$ 発生器としては、Bubbler type, Atomizer type, Wetted column typeと呼ばれるものがある。2-2-1で述べたようにCOILの動作において $O_2^*(^1\Delta)$ の発生割合は、非常に重要なファクターとなる。そこで、アルカリとしてNaOHを用いた場合の $O_2^*(^1\Delta)$ の液相からの発生割合を考えてみる。

3-1-1 化学反応を用いたSOGでの $O_2^{\cdot-} (^1\Delta)$ の発生割合

化学反応を用いたSOGでの励起酸素の発生割合は、液相で H_2O_2 の反応により O_2 が発生した時点では、100%が $O_2^{\cdot-} (^1\Delta)$ であることが知られている(ref.8)。

よって、 $O_2^{\cdot-} (^1\Delta)$ の発生割合は、発生した $O_2^{\cdot-} (^1\Delta)$ の液相から気相への移動の際の失活性の割合を考えればよい。

いま、 $O_2^{\cdot-} (^1\Delta)$ の気相での割合を、 η とする。ここで、 $O_2^{\cdot-} (^1\Delta)$ が液面より、 d の距離で発生したとし、液面までの拡散の過程での失活性を考える。

このとき液面での失活性はないと仮定すると、 η は、拡散の式より3-④式で表わされる。

$$\eta = (D/d^2\alpha) \{1 - \exp(-\alpha d^2/D)\} \quad 3-④$$

但し、 α ： $O_2^{\cdot-} (^1\Delta)$ のクエンチングレート

D ： O_2 の液相での拡散定数

いま、アルカリとして $NaOH$ を考えているので、 $H_2O_2-NaOH(aq)$ の α 、 D として
 $\alpha = 0.5 \times 10^6 (s)$, $D = 5 \times 10^{-6} (cm/s)$ を用いて(ref.8)

3-④式より、

$$d = 10^{-5} (cm) \text{ とすると } \eta = 0.25$$

$$d = 10^{-6} (cm) \text{ とすると } \eta = 0.85 \quad \text{となるので、}$$

$d \leq 10^{-6} (cm)$ で O_2 が発生していれば、効率のよい励起酸素の発生ができることがわかる。

つまり、出来る限り薄い液相で $H_2O_2-Cl_2$ の反応を起こせば、SOGの効率は、上がることがわかる。

次に、先にあげた化学反応を用いた種々のSOGについて述べる。

3-1-2 種々のSOG

a) Bubbler type

この type の SOG の模式図を Fig. 3-1 に示す。

これは、アルカリ性 $\text{H}_2\text{O}_2(\text{aq})$ 中に $\text{Cl}_2(\text{gas})$ 小孔をあけたチューブまたは多孔性ガラスなどの Bubbler を通じ吹き込む事によって $\text{O}_2^{\cdot} (^{\cdot}\Delta)$ を発生させるものである。この type の SOG は、最初に McDermott らによって製作された COIL に用いられ、その後も構造及び取扱が簡単であるために、一般的に用いられている。

しかし、さきに述べたように、 O_2 の発生は、 $10^{-6}(\text{cm})$ 以下の領域で生じていないと $\text{O}_2^{\cdot} (^{\cdot}\Delta)$ の失活性が大きくなるために Bubbler type では、他の type の SOG に比べて $\text{O}_2^{\cdot} (^{\cdot}\Delta)$ の発生効率が悪くなる。また、この type の SOG は、反応済みの燃料と未反応の燃料の分離が難しいため、連続的な動作には、向かないと言う欠点がある。

b) Atomizer type

この type の SOG の模式図を Fig. 3-2 に示す。

この type の SOG は、アルカリ $\text{H}_2\text{O}_2(\text{aq})$ を小滴状にして Cl_2 と反応させ $\text{O}_2^{\cdot} (^{\cdot}\Delta)$ を発生させるものである。これにより、この type は、小滴状のアルカリ $\text{H}_2\text{O}_2(\text{aq})$ の小滴径および小滴密度を調整することで、アルカリ $\text{H}_2\text{O}_2(\text{aq})$ と Cl_2 との接触時間が、 $\text{H}_2\text{O}_2-\text{Cl}_2$ の反応時間に比べ十分に長い、 $\text{O}_2^{\cdot} (^{\cdot}\Delta)$ の失活性時間に比べ十分に短くなるように $\text{H}_2\text{O}_2-\text{Cl}_2$ 反応をコントロール出来る。このために $\text{O}_2^{\cdot} (^{\cdot}\Delta)$ の発生効率を向上できる。

また、この type の SOG は、反応後の $\text{H}_2\text{O}_2(\text{aq})$ 中の未反応の H_2O_2 をドレインとして容易に回収できるため、 H_2O_2 の利用効率が良い。またこのために、連続的な動作が容易に行えると言う利点がある。

しかし、小滴状の液体がレーザ管に入らないように液体バッフルが必要となって、ここでの $\text{O}_2^{\cdot} (^{\cdot}\Delta)$ の失活性が問題となる。

c) Wetted column type

この type の SOG の模式図を Fig. 3-3 に示す。

この type は、今まで述べた type の SOG の中では、 $\text{O}_2^{\cdot} (^{\cdot}\Delta)$ 発生効率が、最も高い。この理由は、 Cl_2 の拡散長及び $\text{O}_2^{\cdot} (^{\cdot}\Delta)$ の衝突による失活性との兼ね合いを考慮して流量及び反応管の径を調整することによって、アルカリ $\text{H}_2\text{O}_2(\text{aq})$ の膜厚の厚さをコントロールし $\text{O}_2^{\cdot} (^{\cdot}\Delta)$ の発生領域の最適化しているためである。また、ジェネレーター内の圧力と反応管長を調整し、 Cl_2 を有効に使用するようになっているためである。

この type の SOG は、 $\text{O}_2^{\cdot} (^{\cdot}\Delta)$ の発生効率が高く、また、連続動作にも有利であるが、他の type のジェネレーターに比べ構造が複雑で最適動作条件の決定が難しく、取り扱いが、多少難しいという欠点をもつ。

d) Porous pipe type

この type の SOG の模式図を Fig. 3-4 に示す。

この type は、a) で述べた、Bubber type の変形である。Bubber type の SOG の欠点としては、反応液層の厚さを制御できないために $O_2^{\cdot}(\Delta)$ の発生効率が悪い。また、反応済み燃料と未反応の燃料の分離が、できないために連続動作に向かないということがあげられる。これを補うために考えられたものである。

この構造は、多孔質グラファイトパイプ (Porous pipe) を Bubber として用いている。このパイプを回転させておき燃料をその外部に散布する。次に、パイプ内部から $Cl_2(gas)$ を注入することによって $O_2^{\cdot}(\Delta)$ を発生させる。この type の SOG は、多孔質パイプの回転数及び燃料の散布量を変化させることによって、 Cl_2 を有効に利用し、液層から気層への拡散による $O_2^{\cdot}(\Delta)$ の失活性を抑えることができる。このために、高い発生効率で $O_2^{\cdot}(\Delta)$ の生成が行える。

また、反応済みの燃料は、速やかに SOG 内部より取り除かれるために連続動作が容易である。さらに、不必要な液体が SOG 内部に長く滞在しないために H_2O 蒸気の発生が抑えられて、より高い $O_2^{\cdot}(\Delta)$ の発生効率を得られると言う特長をもつ。

3-2 WVT

WVTは、SOGで発生した励起酸素流から H_2O 蒸気などを除去する装置である。

H_2O および H_2O_2 は、励起酸素 $\text{O}_2^{\cdot}(\Delta)$ および励起ヨウ素 $\text{I}^{\cdot}({}^2\text{P}_{1/2})$ の強力なクエンチャーでありこの除去はヨウ素レーザーの高効率動作には不可欠となる。

一般にWVTには、液体窒素またはドライアイス+アルコール類の寒剤を用いたコールドトラップが使われる。コールドトラップの型としては、励起酸素のトラップ壁との衝突による失活性を抑えるために直管を用いたシェル&チューブ型のトラップを用いる。

COILを、工業的に用いる際、このコールドトラップが、動作時間や操作性を決定する要因となる。このために、長時間動作型WVTやCOILのノートラップ動作に関する研究が行なわれている。

3-2-1 種々のWVT

a) 長時間動作型WVT

川崎重工(株)が開発した長時間動作型WVTの模式図をFig. 3-5に示す。

これは、基本的にシェル&チューブ型のコールドトラップでチューブに付着した氷をチューブを回転させて爪でかきとりチューブの閉塞を防ぐようにしたものである。このコールドトラップにより川崎重工(株)では、KW級のCOILを1h以上にわたり動作させることが可能となった。このトラップの問題点としては、爪とチューブの接触によりチューブの摩耗が生じることである。

b) ノートラップ動作

慶応大学において行なわれたノートラップ動作のCOILについての模式図をFig. 3-6に示す。このシステムの基本的な考え方は、 H_2O および H_2O_2 の飽和蒸気圧がCOILの動作の許容できるところまでSOGの温度を下げて動作させるという事である(ref.9)。

このシステムは、溶液供給部、SOG、レーザーダクトの3つの部分から出来ている。溶液供給部は、PVCからできていて溶液のリザーブと冷却を行なう。溶液タンクは、外径216(mm)、長さ100(cm)のPVCパイプである。この中に、90(%) H_2O_2 3000(ml) 50(%) $\text{KOH}(\text{aq})$ 1500(ml)が入る。混合の際の発熱は、蒸発冷却により除去される。反応熱が除去された燃料は、磁気駆動ギヤポンプで溶液冷却器にはいる。この主な部分は、12本のPVCパイプからなりこのパイプは、フロン-11およびドライアイスで冷却される。溶液温度は、冷却器の滞在時間により -15°C ～ -30°C の間で可変になる。溶液供給部により冷却された燃料は、SOG中にはいる。この装置のSOGは、Porous pipe typeで2個の多孔性カーボンのbubberによって $\text{O}_2^{\cdot}(\Delta)$ を発生する。このシステムでは、 Cl_2 流量740(mmol/min)のとき最大出力87(W)であった。このとき、 $\text{H}_2\text{O}-\text{H}_2\text{O}_2$ 蒸気圧は、100(mTorr)より低くなっている。

3-3 LD

LDは、励起酸素とヨウ素蒸気を混合し、励起ヨウ素を生成しレーザ光を得る部分である。ここでは、励起ヨウ素の失活性を押えること、および、ヨウ素と酸素の均一な混合が重要となる。このために、通常LDの形状は励起ヨウ素の失活性を押えるために、流速が音速を越えないように流量からダクトハイトを決定する。しかし、近年、レーザ媒質の冷却によるゲインの向上を目指して超音速ノズルを用いたLDの研究開発が進んでいる。また、LDでは、ヨウ素と酸素の均一な混合を行うことが重要になるので、流れに対するヨウ素インジェクタの位置の決定が重要になる。

ヨウ素インジェクタの形状は、ヨウ素蒸気が均一に出て来るようにスリット、ピンホール列、櫛状などの形状をとる。励起酸素に対するヨウ素の添加量は、COILの動作に大きな影響を与えるために、インジェクタの形状も工夫する必要がある。また、ヨウ素蒸気は、凝縮しやすいために、インジェクタの目づまりに注意する必要がある。

レーザ光取り出すための光共振器は、ゲインが小さいために高反射率の鏡の組み合わせ（全反射と98~99%反射鏡）で内部鏡の共振器を組む。このような構成で問題となるのは、凝縮するヨウ素に対する鏡の保護で、このためには、共振器長を長く取り共振器中を不活性ガス（Ar, N₂）でバージする。

LDの形状は、最初は、光軸と酸素の流れが同一方向の縦流れ型であったが、酸素およびヨウ素の失活性が大きいため、すぐに光軸と流れが直交する横流れ型となって、現在動作しているCOILは、すべて横流れ型のLDを持つ。

4. 実際の装置

いままでに、製作された種々のCOILについて述べる。

4-1 M.E.McDemott's 1st COIL

M.E.McDemott らが1978年に初めて製作した装置をFig. 4-1に示す。

これは、 O_2 流が光軸方向に流れる2軸平行形である。

SOGは、Bubbler typeである。約200 (ml)の90(%) H_2O_2 に100 (ml)の6 N-N a O Hを加えた液中に1/8 (inch)のナイロンチューブにピンホールをあけた Bubblerを通じ Cl_2 を注入する。発生した $O_2^*(^1\Delta)$ は上部の $N_2(lq)$ コールドトラップを通り未反応の Cl_2 及び H_2O 蒸気が除去されレーザー管に流れ込む。 I_2 は、90 (°C)に加熱されたArバッファガスによってキャビティ中に流入する。 O_2-I_2 活性領域は、内径1 (inch)長さ70 (cm)である。レーザー管は、パイレックス製で内壁は、 $O_2^*(^1\Delta)$ の失活性を防ぐためにテフロングリスでコートされていて、gasは、管内を1500 (cm/s)の流速で流れる。共振器は、共振器長1.7 (m)で半径5 (m)と2 (m)の球面鏡による不安定共振器である。出力鏡は、Ar流によって I_2 の付着から保護されている。レーザー管内の圧力は約1 (Torr)である。これによって、約4 (mW)のレーザー出力が得られた。(ref.4)

4-2 M.E.McDemott's 2nd COIL

次に、M.E.McDemott らが4-1に続き製作した装置をFig. 4-2示す。

これが、現在のCOILの基本的な型となっている。

これは、Fig. 4-2に示すように O_2 流が光軸と垂直方向に流れる2軸直交型である。この装置のような横流れ型のレーザー管は、縦流れ型のレーザー管に比べ管壁での $O_2^*(^1\Delta)$ の失活性が少なく $O_2^*(^1\Delta)$ から $I(^2P_{3/2})$ へのエネルギーの移乗効率がよい。

この装置のSOGは、4-1と同じくBubbler typeであるが、容積は、約10倍となり、5 (l)の90(%) H_2O_2 に2 (l)の6 N-N a O Hを加え、液中に多孔質ガラスの Bubblerを通じ Cl_2 を注入する。この際、過酸化水素とアルカリの混合は、発熱反応であり発生器内の温度が、60 (°C)を越えると H_2O_2 分解が、激しくなり危険であるために、混合の際発生器内を真空に引きことにより蒸発冷却で溶液を冷却する。この操作を行うことで、動作中の液温は、30 (°C)を越えないようになる。 Cl_2 の流量は、この実験では、0.03 (mol/s)で $O_2^*(^1\Delta)$ の発生を行なっている。発生した $O_2^*(^1\Delta)$ は、 $N_2(lq)$ 冷却のコールドトラップを通じレーザー管はいる。このとき、 $O_2^*(^1\Delta)$ の割合は、コールドトラップの出口で $a^1\Delta \rightarrow x^3\Sigma$ の発光 (1270nm)を測定し決定した。その結果、キャビティ内の全圧1 (Torr)のとき $O_2^*(^1\Delta)$ の割合は、約35(%)であった。装置の形状は、レーザー管本体は、7.6 (cm)径のパイプから50×2.54 (cm)の矩形のダクトへだんだん広がっていく形をしていて、終端は、1.5 cm 径のパイプで真空ポンプにつながっている。レーザー管内壁は、 $O_2^*(^1\Delta)$ の失活性とI原子の再結合を抑えるためにシリコングリスでコートされている。レーザーミラーは流れの領域から左右につきでたチューブに取り付けられている。共振器にもちいるミラーは、フロントミラーで98.3 (%)の反射率をもつ曲率半径5 (m)の球面鏡で、リアミラーは、99.9 (%)以上の反射率をもつ平面鏡である。共振器長は1.36 (m)でミラーチューブ中はミラー保護のためAr gasでパージしてある。

このレーザ装置の出力は100(W)で3(min)連続動作した。そのエネルギー引き出し効率はミラーの Out cupul が最適化されていないが15(%)であった(ref.10)。

4.3 産業創造研究所の小型COIL

次に日本(産業創造研究所(旧)工業開発研究所)において製作された装置についてFig.4-3示す。この装置の特徴としては、SOGの動作において35(%) H_2O_2 を用いることである。一般に用いる H_2O_2 は80~90(%)の高濃度である。これは、 H_2O 蒸気は、 O_2^* (Δ)および I^* ($^2P_{1/2}$)の強力なクエンチャーであるために H_2O 蒸気圧を出来る限り抑えるためである。しかし、高濃度 H_2O_2 の使用はコストおよび安全面で問題がある。このため、低濃度 H_2O_2 の O_2^* (Δ)ジェネレーターは、利用価値が高い。

この装置の、SOGは、Bubber typeでBubberは1/4(inch)テフロンチューブに直径0.5(mm)の小孔をあけたもので燃料は、35(%) H_2O_2 2700(cc)中に50(%)NaOH 250(cc)を混合したものをもちいる。このとき混合液は発熱するためにCl₂バブルを行う前に低温の N_2 (gas)によりバブルをおこない、液温を253(K)までに冷却し H_2O_2 の分解を防ぎ表面よりの H_2O 蒸発を抑える。WVTは、シェル&チューブ型でエタノール+ドライアイスの寒剤で冷却される6本の直径3.6mmのパイレックスに直管よりなる。レーザダクトは、ルーサイト製で幅35(cm)、高さ2(cm)でレーザダクトの中央に、 I_2 インジェクターとして0.5(mm)径の小孔が5(mm)間隔に開いた1/4(inch)径のCu管が通っている。共振器は、共振器長が、60(cm)で共振器中心が I_2 インジェクターの1.5(cm)下流にあり、5(m)の曲率半径をもつ全反射鏡と99(%)の反射率をもつ平面鏡で構成されている。使用する排気ポンプは、3000(l/min)の排気能力をもつもので、排気速度は、レーザダクト内で約30(l/s)である。

このCOILシステムは、1(h)連続運転が可能である。この動作中に、SOGにNaOH(aq)を3回加え、WVTのドライアイスを1回入れ換える。連続運転時間の限界は、WVTが氷で狭窄するまでの時間によって決まる。

このシステムは、最大出力、40(W)で、最高効率、20.7(%)で動作する(ref.11)。

4.4 TRWでの軍用高出力COIL

次に、高出力のシステムとしてTRWにおいて製作されたシステムをFig.4-4示す。

このシステムも横流れ型のレーザダクトを持ちBubber typeのSOGで O_2^* (Δ)を発生させる。SOGの動作は、4(kg)の90(%) H_2O_2 に9(kg)の45(%)KOH(aq)を混合して-5(°C)まで冷却して行なう。発生した O_2^* (Δ)は、Freon(R-11)を用いた-60(°C)のコールドトラップを通じてレーザダクトへ入る。レーザダクトは、5×60(cm)の径で、反射鏡は、Cu基板上に誘電体多層膜をコートした99.5(%)の反射率を持つ水冷式のものを用いている。ガスフローは、音速を越えないように、しかし、できるだけ早くして、フローパスを、短く取り O_2^* (Δ)失活性を抑える。このシステムは、最大出力1.08KW、最高効率14.9(%)で動作する(ref.12)。

5. まとめ

COILの動作原理および実際動作している装置についての調査を行った。COILは、化学変換効率で20%以上の高効率で動作しファイバーで高エネルギー伝送可能な近赤外光を発生するレーザーである。これより、COILは、本体を管理区域内に置くことなしに電線同様に光ファイバーにより高エネルギーの導入が可能である。このために、高放射線下での光エネルギーの利用を考える際に、既存のCO₂レーザーやYAGレーザーに比べ非常に良い特性を持ったレーザーといえる。しかし、発明からの歴史が浅いためと軍用に研究されていたために、基礎的動作特性および工業用としての視点からの研究開発があまりなされていない。そのために、このレーザーの原子力への適応するためには、このレーザーの基礎的な動作特性を掌握を行い、工業的な視点からの装置開発が必要となる。このために、小型の試験機を試作し基本的な装置の動作特性を把握する必要がある。

Reference

- ref.1 J.V.V.Kasper,G.C.Pimentel Appl.Phys.Lett. 5,231,(1964)
- ref.2 D.Porret,C.F.Goodeve Proc.R.Soc.London A165,31 (1938)
- ref.3 R.G.Derrwent B.A.Thraust Faraday Discuss.Chem.Soc.53,162 (1972)
- ref.4 W.E.McDermott etc. Appl.Phys.Lett.32,469 (1978)
- ref.5 R.F.Heidner III C.E.Gardner etc. J.Phys.Chem.87,2348 (1983)
- ref.6 G.Brederlow K.J.Witte "The High-Power Iodine Laser"
- ref.7 R.J.Richardson etc. J.Appl.Phys. 52,4962 (1981)
- ref.8 A.M.Held etc. J.Am.Chem.Soc. 100,5732 (1978)
- ref.9 K.Takehisa,T.Kikuchi,T.Uchiyama J.Appl.Phys.63,1785 (1988)
- ref.10 D.J.Benard,W.E.McDermott etc. Appl.Phys.Lett. 34,40 (1979)
- ref.11 S.Yoshida,T.Fujioka etc. Appl.Phys.Lett. 51,1490 (1987)
- ref.12 W.E.McDermott 1982 CLIO

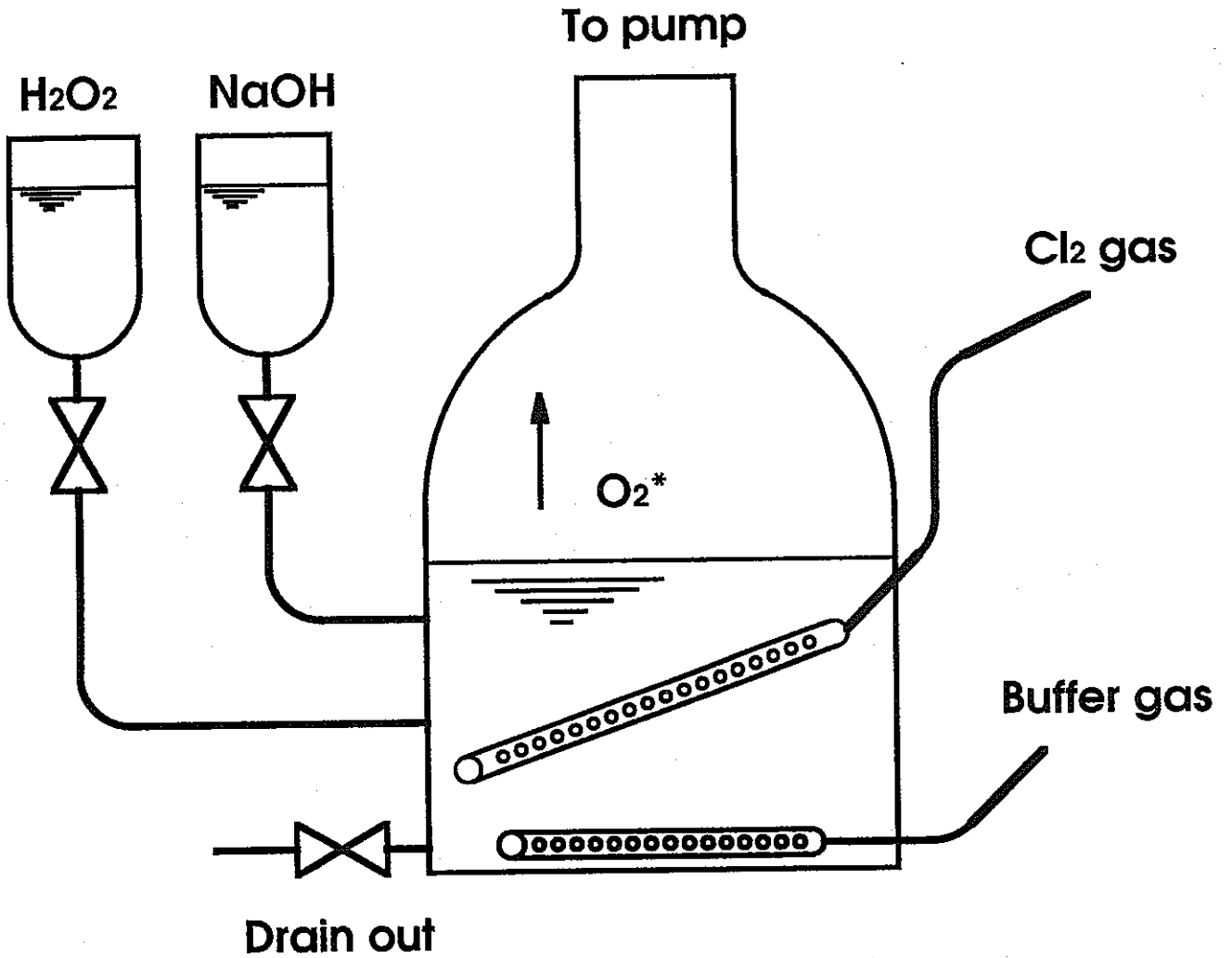


Fig.3-1 Bubbler type SOG模式图

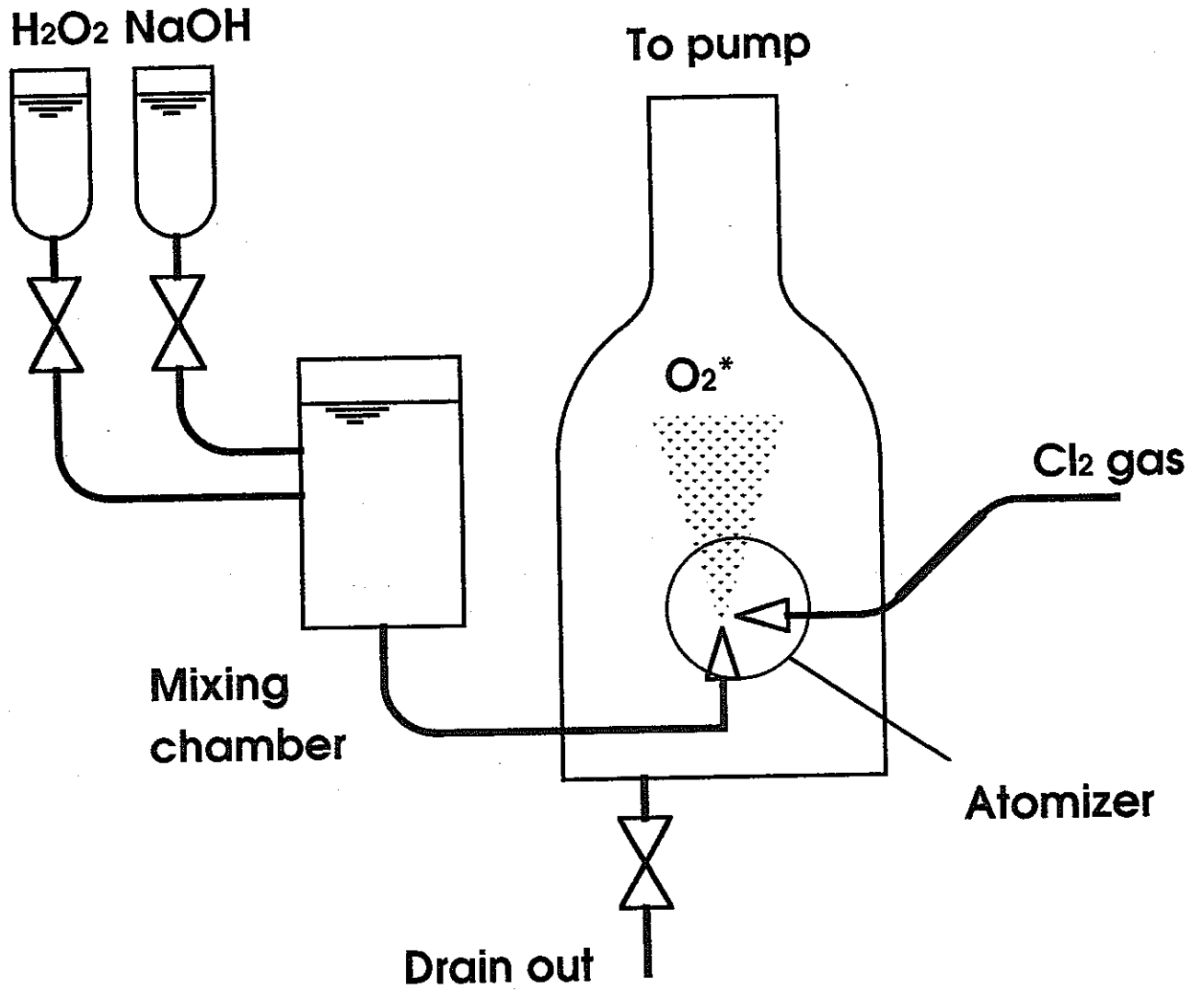


Fig.3-2 Atomizer type SOG模式图

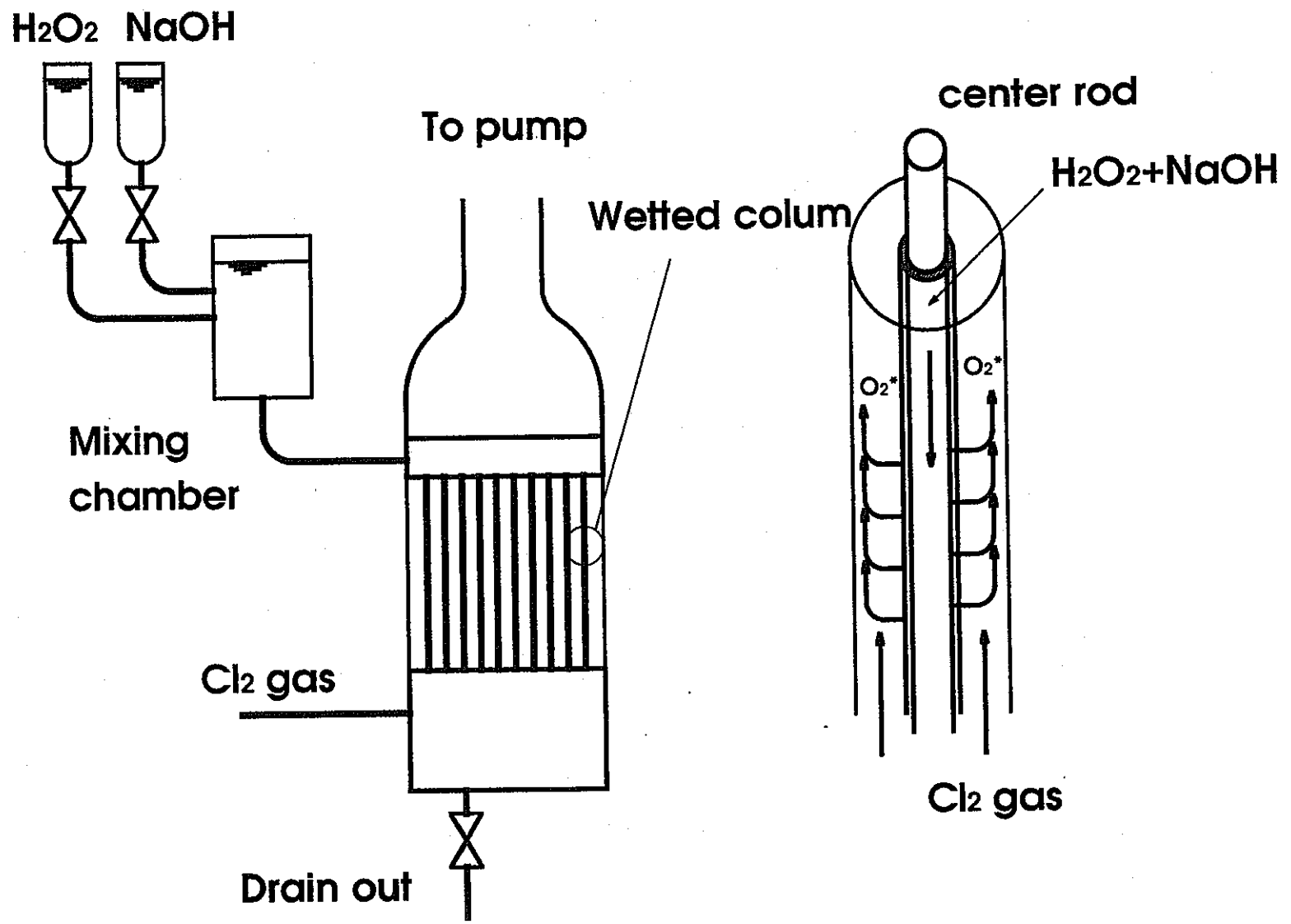


Fig 3-3 Wetted colum type SOG模式图

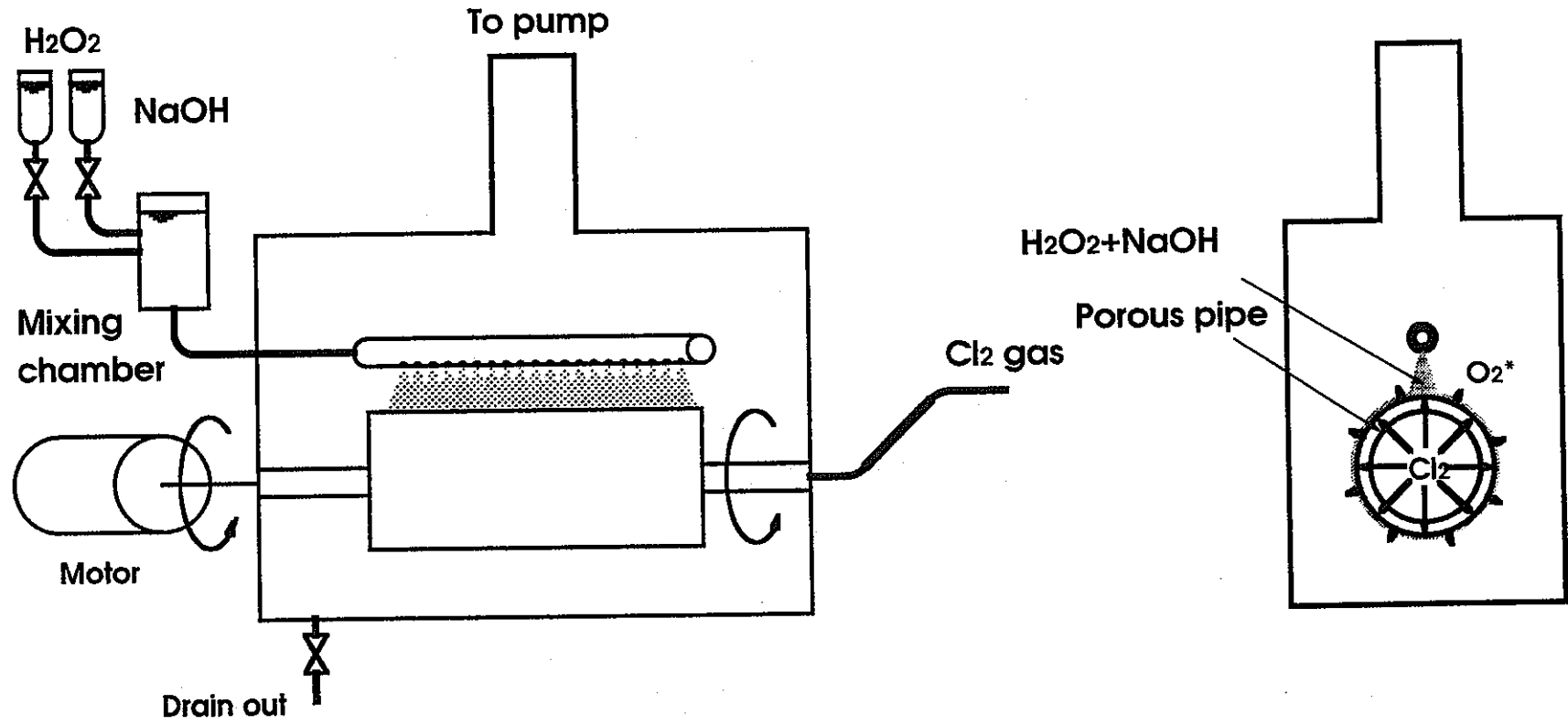


Fig.3-4 Porous pipe type SOG模式图

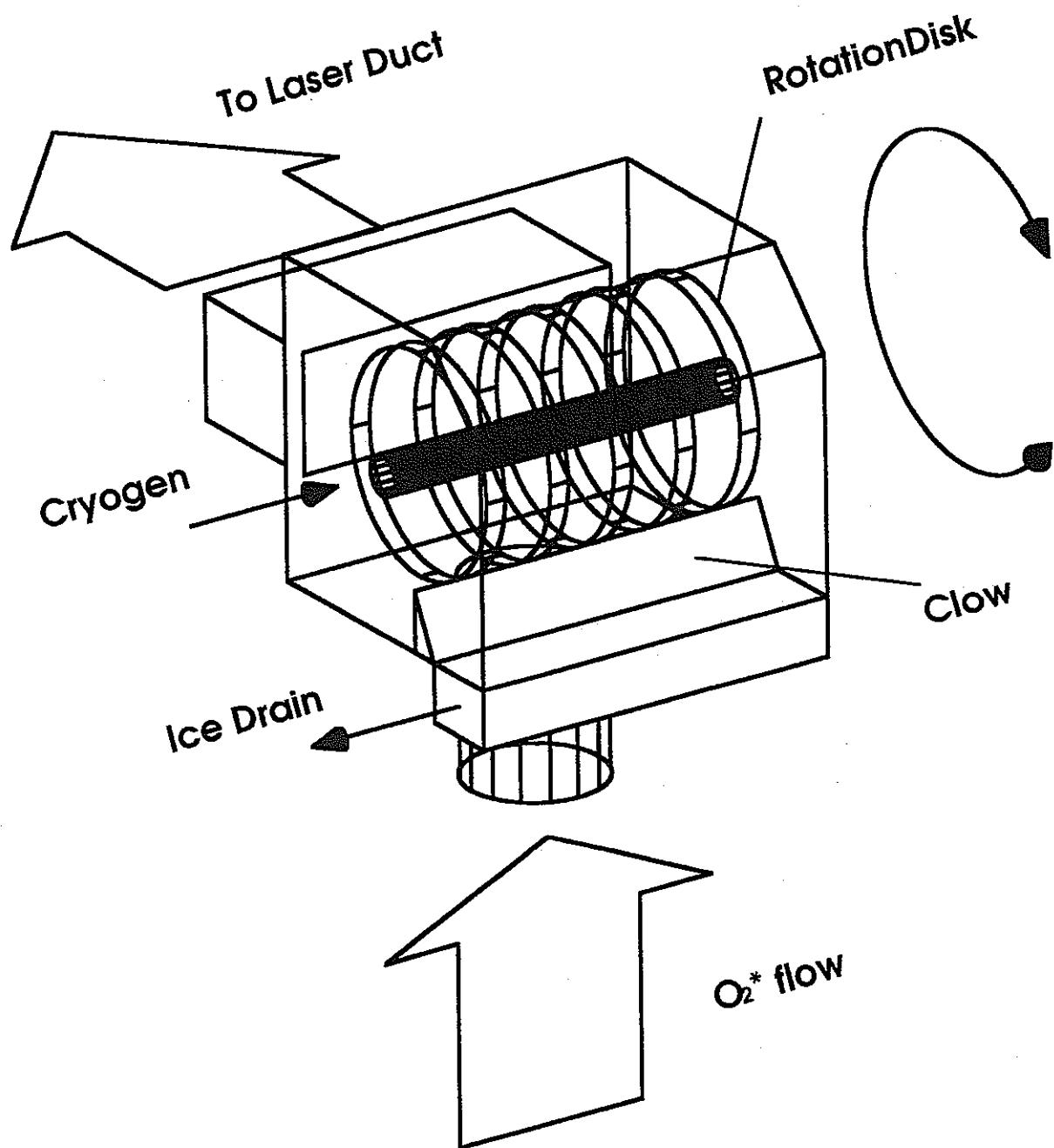
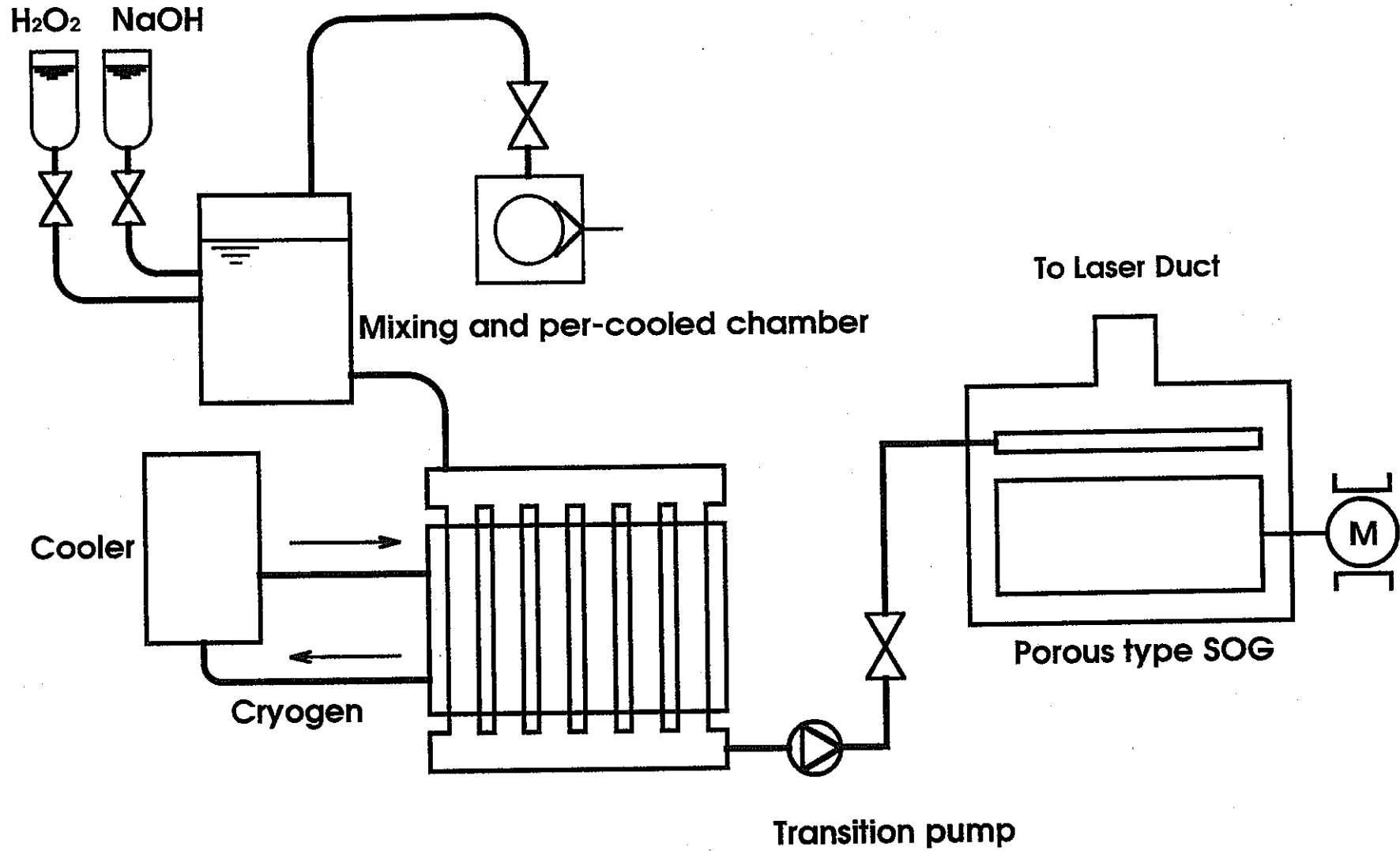


Fig.3-5 長時間動作 WVT模式図



-19-

Fig.3-6 No-trap operation COIL模式图

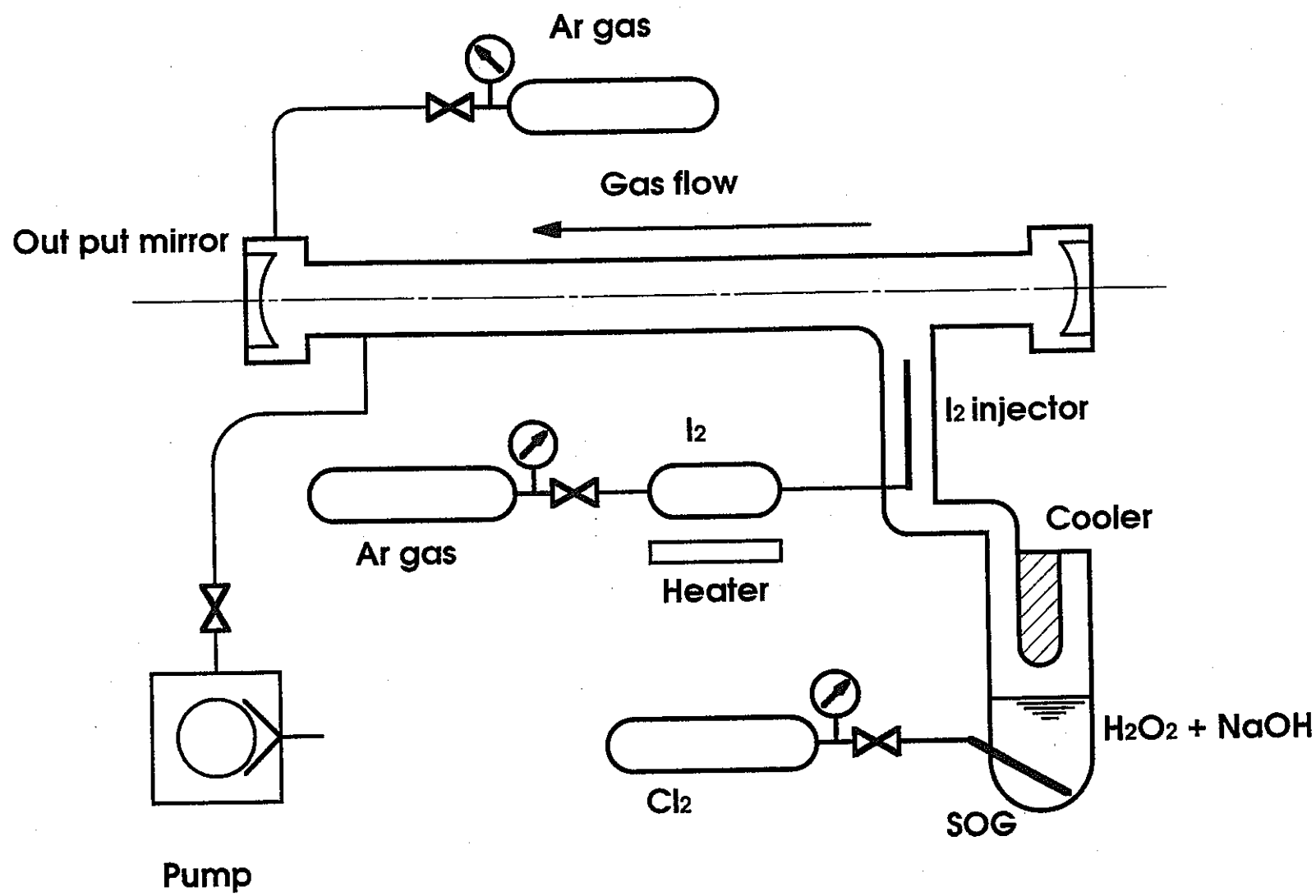


Fig.4-1 McDemott's 1st COIL模式图

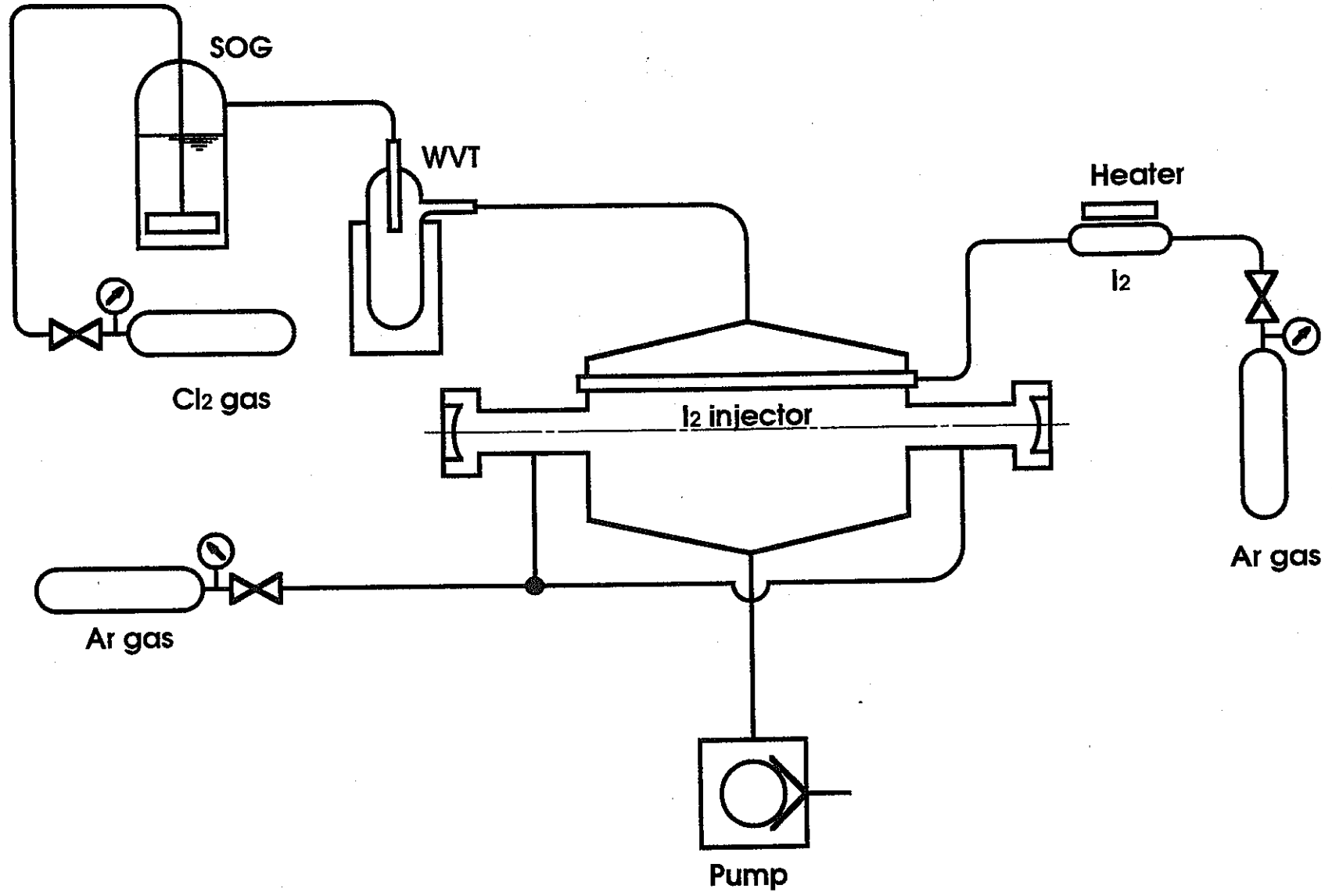


Fig.4-2 McDemott's 2nd COIL 模式图