

JAERI-M  
84-083

高温ガス冷却炉ヘリウム技術の現状

1984年5月

戸根 弘人・岡本 芳三

JAERI-M レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の問合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村 日本原子力研究所内）で複写による実費領布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Section, Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, -Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1984

---

編集兼発行 日本原子力研究所  
印刷 日立高速印刷株式会社

高温ガス冷却炉ヘリウム技術の現状

日本原子力研究所東海研究所高温工学部

戸根 弘人・岡本 芳三

(1984年4月13日受理)

高温ガス冷却炉のヘリウム技術は、その寿命期間にわたって原子炉構造部材の健全性を維持し、ヘリウムガス冷却材中の化学的雰囲気を制御し、更に1次ヘリウムガス冷却系の放射能を低減するために重要である。高温ガス冷却炉及びヘリウムガスループのヘリウム技術の重要な分野であるヘリウムガス純化、メイクアップシステム及びガス分析装置等について調査した。ヘリウム技術の現状を把握し、今後のヘリウム技術開発の資料とするため、その調査結果をまとめた。

Present Status on Helium Technology of HTGR

Hirohito TONE and Yoshizo OKAMOTO  
Department of High Temperature Engineering,  
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received April 13, 1984)

Helium technology on HTGR to keep integrity of the reactor structural materials over its life period, to control chemical atmosphere in the coolant helium and to decline radioactivity in the primary system, is important affairs.

Details of each systems on helium purification, make-up and gas analysis, which occupy important section of the technology, are surveyed in the case of HTGRs and helium gas loops.

Present status of the helium technology rounded off consequence of the survey is described in this paper.

Keywords: HTGR, Gas Loop, Helium Technology, Purification, Make-up,  
Gas Analysis.

## 目 次

1. まえがき.....	1
2. ヘリウムガス純化及びメイクアップの目的 .....	1
3. ヘリウムガス純化の方法 .....	2
4. 高温ガス冷却炉及びガスループの純化系 .....	14
5. 高温ガス冷却炉のメイクアップ系 .....	28
6. 高温ガス冷却炉の不純物発生源 .....	33
7. HENDEL の不純物ガス濃度 .....	37
8. 高温ガス冷却炉の分析計 .....	39
文 献 .....	44

## CONTENTS

1. Introduction .....	1
2. Purposes of purification and make-up .....	1
3. Methods for helium gas purification .....	2
4. Purification systems of HTGRs and gas loops .....	14
5. Make-up systems of HTGRs .....	28
6. Impurity generation in HTGR .....	33
7. Impurity concentrations .....	37
8. Gas analyzers used in HTGR .....	39
References .....	44

## 1. ま え が き

高温の核熱エネルギーを供給する高温ガス冷却炉が各国で研究、開発され、すでにアメリカ及び西ドイツにおいては、発電炉として稼働している。我が国においても、エネルギー多消費産業である化学工業、製鉄産業の高温熱源の役目を有する多目的高温ガス実験炉の開発試験が実施されている。高温ガス冷却炉のヘリウムガス冷却材の管理、取り扱い及びガス分析等のヘリウム技術は使用期間中における高温ガス炉の健全性を維持するための重要な技術である。本資料はすでに建設され、稼働している高温ガス冷却炉及びガスループのヘリウム技術に関する現状をまとめ、今後のヘリウム技術開発の資料とすることを目的とする。

## 2. ヘリウムガス純化及びメイクアップの目的

高温ガス冷却炉（HTGR）のヘリウムガス冷却材には不純物ガス及び放射性物質が存在する。不純物ガスとして、 $H_2O$ 、 $CO$ 、 $CH_4$ 、 $N_2$ 、 $O_2$ 、 $CO_2$ 、 $H_2$ などが存在し、放射性物質として、 $I_2$ 、 $Kr$ 、 $Xe$ 、 ${}^3T$ などのガス状放射性物質及び腐食生成物の放射化などによって生じた固体状の放射性物質が存在する。

不純物ガスの発生源は燃料交換時などの空気の漏れ込み、内部断熱材、グラファイトなどからの放出ガス、コンプレッサーオイルの漏れ込みとその分解生成物などである。放射性物質のうちトリチウムは燃料からも発生するが、大部分は ${}^3He$ 及びグラファイト中の $Li$ が発生源である。

これら、ヘリウムガス冷却材中の不純物ガス等によって生じる問題点は、

- i) 金属材料の高温酸化
- ii) 金属材料の脱炭及び侵炭
- iii) 炉心黒鉛のバーンオフ
- iv) 中間熱交換器内のカーボンディポジション
- v) 1次系放射能レベルの増加

などである。

従って、ヘリウムガス純化の目的は、ヘリウムガス中の不純物ガスを除去することによって上記の問題点を解決し、高温ガス冷却炉の使用期間中における構成部材の物理的、化学的劣化を低減し、高温ガス冷却炉の健全性を維持することである。次に、ヘリウムガスメイクアップ系の目的はヘリウムガス冷却材の貯蔵、供給及び回収が主目的であるが、更に、ヘリウムガス冷却系の圧力制御の目的も有している。

## 1. ま え が き

高温の核熱エネルギーを供給する高温ガス冷却炉が各国で研究、開発され、すでにアメリカ及び西ドイツにおいては、発電炉として稼働している。我が国においても、エネルギー多消費産業である化学工業、製鉄産業の高温熱源の役目を有する多目的高温ガス実験炉の開発試験が実施されている。高温ガス冷却炉のヘリウムガス冷却材の管理、取り扱い及びガス分析等のヘリウム技術は使用期間中における高温ガス炉の健全性を維持するための重要な技術である。本資料はすでに建設され、稼働している高温ガス冷却炉及びガスループのヘリウム技術に関する現状をまとめ、今後のヘリウム技術開発の資料とすることを目的とする。

## 2. ヘリウムガス純化及びメイクアップの目的

高温ガス冷却炉 (HTGR) のヘリウムガス冷却材には不純物ガス及び放射性物質が存在する。不純物ガスとして、 $H_2O$ ,  $CO$ ,  $CH_4$ ,  $N_2$ ,  $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $H_2$  などが存在し、放射性物質として、 $I_2$ ,  $Kr$ ,  $Xe$ ,  ${}^3T$  などのガス状放射性物質及び腐食生成物の放射化などによって生じた固体状の放射性物質が存在する。

不純物ガスの発生源は燃料交換時などの空気の漏れ込み、内部断熱材、グラファイトなどからの放出ガス、コンプレッサーオイルの漏れ込みとその分解生成物などである。放射性物質のうちトリチウムは燃料からも発生するが、大部分は  ${}^3He$  及びグラファイト中の  $Li$  が発生源である。

これら、ヘリウムガス冷却材中の不純物ガス等によって生じる問題点は、

- i) 金属材料の高温酸化
- ii) 金属材料の脱炭及び侵炭
- iii) 炉心黒鉛のバーンオフ
- iv) 中間熱交換器内のカーボンディポジション
- v) 1次系放射能レベルの増加

などである。

従って、ヘリウムガス純化の目的は、ヘリウムガス中の不純物ガスを除去することによって上記の問題点を解決し、高温ガス冷却炉の使用期間中における構成部材の物理的、化学的劣化を低減し、高温ガス冷却炉の健全性を維持することである。次に、ヘリウムガスメイクアップ系の目的はヘリウムガス冷却材の貯蔵、供給及び回収が主目的であるが、更に、ヘリウムガス冷却系の圧力制御の目的も有している。

### 3. ヘリウムガス純化の方法

ヘリウムガスの純化，すなわち，不純物ガスの除去方法として一般に使用されている方法に，金属ゲッター方式，吸着，膜分離などがある。金属ゲッター方式は小形の容器又はキャプセル内のヘリウムガス純化に使用され，チタンやジルコニウムなどの活性な金属を高温で不純物ガスと反応させて除去する。吸着法は高温ガス冷却炉，ヘリウムガスループなど大容量のヘリウムガス純化に主として用いられ，ガス吸着剤で不純物ガスを吸着除去する。膜分離法はガス透過機能を有する高分子膜を用いてガスを分離精製する。原子力分野における膜分離はウラン濃縮，Kr，Xeなどの放射性ガス分離などで1部実用化されているが，ヘリウムガス冷却材の純化への応用についてはまだその例を見ない。しかし，多目的高温ガス実験炉の熱利用系において，スチームリホームのプロセスガス中の水素分離にプリズムセパレーターの使用が検討されている。

次に高温ガス冷却炉のヘリウムガス純化に使用されている各不純物ガス除去の概要を示す。

#### (1) 水分の除去

ガス中の水分除去には種々な方法があるが，高温ガス冷却炉のヘリウムガス冷却材の水分除去にはシリカゲル，活性アルミナ及びモレキュラーシープ（合成ゼオライト）などの吸着剤が使用される。これらの吸着材は水の吸着容量が大きく，吸着速度も早いため多量のガス処理に適している。吸着剤の特性をTable 3.1に示す。これらの吸着剤のうち，高価ではあるが安定性，製品の質が均一，低い蒸気圧における吸着容量が大きい，などの理由でモレキュラーシープが最も優れている。Fig. 3.1に25℃における水の等温吸着曲線を示す。水の蒸気圧が1mmHg以下ではモレキュラーシープの吸着量は他に比べて非常に大きい。

#### (2) 炭酸ガス

ヘリウムガス中の炭酸ガスは除去しにくいガスの1つである。カセイソーダ，アンモニアなどのアルカリ水溶液によって吸収除去できるが高温ガス冷却炉のヘリウムガス純化に適用するには技術的困難が伴う。高温ガス冷却炉では，炭酸ガスの除去にモレキュラーシープによる吸着，又は液体窒素温度における凝縮が使用されている。凝縮による除去は炭酸ガスの固化（昇華温度-78.5℃）による流路閉そくなどの問題点がある。このため，モレキュラーシープによって水と炭酸ガスを同時に吸着除去する方法が主に使用されているが，炭酸ガスの吸着量は水分に比べて約 $\frac{1}{5}$ と小さいため，モレキュラーシープベッドの容量が大きくなる。Fig. 3.2に炭酸ガスの等温吸着線を示す。

#### (3) 1酸化炭素の除去

1酸化炭素は室温でモレキュラーシープ，活性炭に吸着されるが，等温吸着量は小さい。1酸化炭素の沸点は-192℃であるため液体窒素温度（-196℃）の活性炭に良く吸着される。Fig. 3.3にモレキュラーシープ5Aによる1酸化炭素による等温吸着線を示す。<sup>5)</sup>

#### (4) メタンの除去

活性炭やモレキュラーシープによって吸着されるが，室温附近での吸着量は小さい。このた



め、液体窒素温度の活性炭による深冷吸着で除去する。Fig. 3.4に活性炭によるメタンの等温吸着線を示す。

#### (5) 窒素の除去

窒素は化学的に不活性なガスであるため、他のガスに比べて除去しにくい。窒素ガスを化学的に除去するにはCa, Ti, Zrなどの活性な金属ゲッターと高温で反応させ、金属窒化物として除去する。金属ゲッターによる窒素の除去は真空装置内のガス除去等に利用されている。大量のガス処理には、 $-196^{\circ}\text{C}$ の活性炭による物理吸着で除去する。Fig. 3.5に活性炭による窒素の等温吸着線を示す。また、Fig. 3.6にモレキュラーシーブによる窒素の等温吸着線を示す。

#### (6) 酸素の除去

酸素は活性なガスであるため、化学反応の利用、吸収、吸着によって除去し得る。高純度ガス中の酸素の除去には、金属銅と反応させ酸化銅として除去する方法、水素が共存する場合にはパラジウム触媒を用い酸素-水素反応で水に変えたのち水をモレキュラーシーブで除去する方法及び活性炭による深冷吸着除去などの方法がある。

Fig. 3.7にモレキュラーシーブによる酸素の等温吸着線を示す。

#### (7) 水素の除去

水素の除去方法としては、金属による吸蔵、水素の燃焼、膜分離などがある。水素吸蔵合金として代表的なものはパラジウム及びチタンであるが、近年、サンシャイン計画等の関連で、低い温度で機能する水素吸蔵合金が種々と開発されている。これらを大別すると、Ti-Fe系合金、Ti-Ni系合金、La-Ni系合金、Fe-V系合金などがある。Fig. 3.8<sup>7)</sup>及びFig. 3.9にチタンホイールによる重水素、トリチウムの平衡吸収曲線を示す。また、空塔速度 $12\text{ cm/sec}$ 、ヘリウム圧力30気圧、温度 $400^{\circ}\text{C}$ におけるチタンスポンジベッドの動的な水素吸収曲線<sup>8)</sup>をFig. 3.10に示す。次に、 $300^{\circ}\text{C}$ の酸化銅触媒層で水素を燃焼し、水に変えてモレキュラーシーブで除去する方法も実用化され高温ガス冷却炉で使用されている。この場合、水素燃焼の酸素は酸化銅から供給される。酸素が共存する場合には、 $60^{\circ}\text{C}$ から $150^{\circ}\text{C}$ のパラジウム触媒による酸水素反応で水に変えて除去する<sup>24)</sup>この方法はトリチウムの除去等に利用されている。

#### (8) アルゴン、クリプトン、ゼノンの除去

これらのガスはいずれも不活性ガスである。クリプトン、ゼノンは核分裂生成物として高温ガス冷却炉の1次系に存在し、その放射能レベルを決める要因となる。アルゴンは空気中からの漏れ込みが主で、原子炉内で $^{41}\text{Ar}$ を生成し1次系放射能レベル上昇の要因になる。これらの不活性ガスの除去には活性炭又はモレキュラーシーブによる深冷吸着が使用される。アルゴン、Kr, Xeの等温吸着線をFig. 3.11, Fig. 3.12, Fig. 3.13に示す。

#### (9) 放射性ヨウ素の除去

ガス中の放射性ヨウ素は活性炭で効率良く吸着除去できる。高温ガス冷却炉1次系ヘリウムガス冷却材中の放射性ヨウ素は比較的高い温度( $300^{\circ}\text{C}$ ~ $400^{\circ}\text{C}$ )のプレチャコールフィルターで除去される。Fig. 3.14に活性炭による $100^{\circ}\text{C}$ から $400^{\circ}\text{C}$ の温度範囲の等圧平衡吸着量を示す。<sup>9)</sup>

#### (10) 気体の膜分離

以前より、高分子膜が気体を選択的に透過することは知られていた。近年、各種の高分子膜が開発され、この高分子膜による気体の分離技術が省エネルギー的観点からも関心をもたれ、

技術開発並びに工業的利用が1段と進んでいる。原子炉施設におけるガスの膜分離技術の応用の代表的なものはウラン濃縮とクリプトン放出低減化プラントである。また、天然ガス中のヘリウムガスの回収にも膜分離が利用されている。しかし、高純度ヘリウムガスの純化に膜分離が利用された例はなく、今後の研究課題である。Table 3.2に高分子膜の気体透過係数を示す。<sup>10)</sup> 透過係数とは厚さ1cmの膜を単位時間、単位断面積及び単位圧力差当たり透過するガス量である。透過係数は膜の気体の透過性能の目安となるものであるが、実際の膜の透過速度を示すものではない。現実の膜には厚さがあり、透過係数が小さくても、厚さの薄い膜が製作できれば透過速度が大きくなる。

Fig. 3.15にプリズム・セパレーター(モンサント社の商標)を示す。<sup>10)</sup> プリズム・セパレーターでは、モンサント社自身が開発した特殊な複合膜が使用されている。複合膜は外径が0.1mmから1mm程度の中空系状に成型されている。無数の中空系は束ねられてパイプ状の圧力容器に組み込まれてモジュールとなり、図のように直立した状態で使用される。プリズム・セパレーターの標準モジュールには、外径8inのものと4inの2種類があり長さは共に約3mである。最高使用圧力は150気圧である。多目的高温ガス冷却炉熱利用系において、スチームリホルマーの生成ガスからの水素ガス分離用として使用が検討されている。

Table 3.1 水分吸着剤の性質<sup>1)</sup>

	使用温度 °C	吸着度 (重量%)	除去下限 (露点)	再生温度 °C	粒子の安定性	特 長
シリカゲル	20~40	10~20	-70°C (0.002mmHg)	150~250	破碎しやすい	低 価 格
活性アルミナ	0~30	12~14	<-70°C (0.002mmHg)	180~320	安定性良い	低い蒸気圧の吸着 容量が小さい。
M.S-5A	0~100	18~22	<-70°C (0.002mmHg)	220~330	安定性良い	低い蒸気圧の吸着 容量が大きい。

Table 3.2 高分子膜の気体透過係数, 気体透過係数比<sup>10)</sup>

膜	温度 (°C)	透過係数 $P \times 10^{10} \left( \frac{\text{cm}^3(\text{STP})\text{cm}}{\text{cm}^2 \cdot \text{sec} \cdot \text{cmHg}} \right)$				拡散係数 $D \times 10^7 \left( \frac{\text{cm}^2}{\text{sec}} \right)$				透過係数比		
		He	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	He	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	P <sub>O<sub>2</sub></sub> / P <sub>N<sub>2</sub></sub>	P <sub>CO<sub>2</sub></sub> / P <sub>N<sub>2</sub></sub>	P <sub>He</sub> / P <sub>N<sub>2</sub></sub>
ポリジメチルシロキサン	20	216	1,120	352	181	600	189	189	123	1.94	6.19	1.19
天然ゴム	25	—	154	23.4	9.5	216	12.5	17.3	11.7	2.46	16.2	—
ポリブタジエン	25	—	138	19.0	6.45	—	10.5	15.0	11.0	2.95	21.4	—
エチルセルロース	25	53.4	113	14.7	4.43	22	5.65	6.4	2.33	3.31	25.6	12.0
エチレン-酢酸ビニル共重合体 (酢酸ビニル 13.8 モル%)	25	16.5	57	8.0	2.9	50	6.7	8.6	5.3	2.76	19.7	5.69
ポリエチレン (低密度)	25	4.93	12.6	2.89	0.97	68	3.72	4.6	3.20	2.98	13.0	5.08
ポリスチレン	20	16.7	10.0	2.01	0.315	75	30	22	3.0	6.38	31.7	53.0
ブチルゴム	25	8.42	5.18	1.30	0.325	—	10.5	15.0	11.0	4.0	15.9	25.9
ポリカーボネート	25	19	8.0	1.4	0.3	—	0.048	0.21	—	4.7	26.7	63.3
ニトロセルロース	25	6.9	2.12	1.95	0.116	4.3	0.221	1.5	0.193	16.8	18.3	59.5
ポリエチレン (高密度)	25	1.14	3.62	0.41	0.143	30.7	1.24	1.70	0.93	2.87	25.3	7.97
エチレン-ビニルアルコール共重合体 (ビニルアルコール 13.8 モル%)	25	2.28	1.38	0.33	0.08	7.7	0.36	0.73	0.21	4.13	17.3	28.5
ポリ酢酸ビニル	20	9.32	0.676	0.225	0.032	—	—	—	—	7.03	21.1	—
ポリ塩化ビニル	25	2.20	0.149	0.044	0.0115	1.74	0.0125	0.044	0.010	3.83	13.0	191
酢酸セルロース	22	13.6	—	0.43	0.14	—	—	—	—	3.0	—	97.1
ナイロン6	30	—	0.16	0.038	0.010	—	—	—	—	3.8	16.0	—
ポリアクリロニトリル	20	0.44	0.012	0.0018	0.0009	—	—	—	—	2.0	13.3	488
ポリ塩化ビニルデン	20	0.109	0.0014	0.00046	0.00012	—	—	—	—	3.8	11.7	908
ポリビニルアルコール	20	0.0033	0.00048	0.00052	0.00045	—	—	—	—	1.1	1.16	7.3

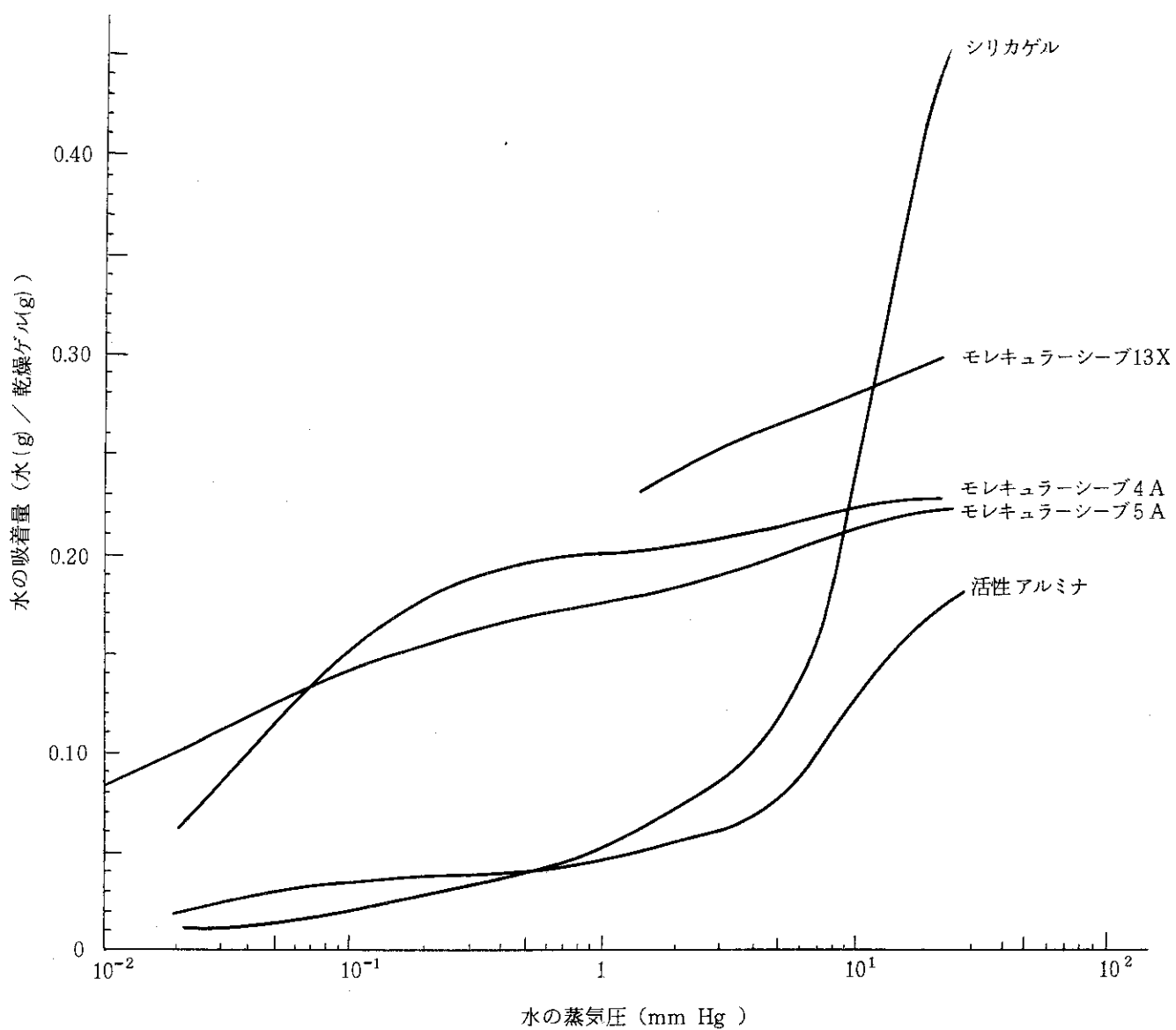


Fig.3.1 各種吸着剤による水の25℃における吸着<sup>1)</sup>

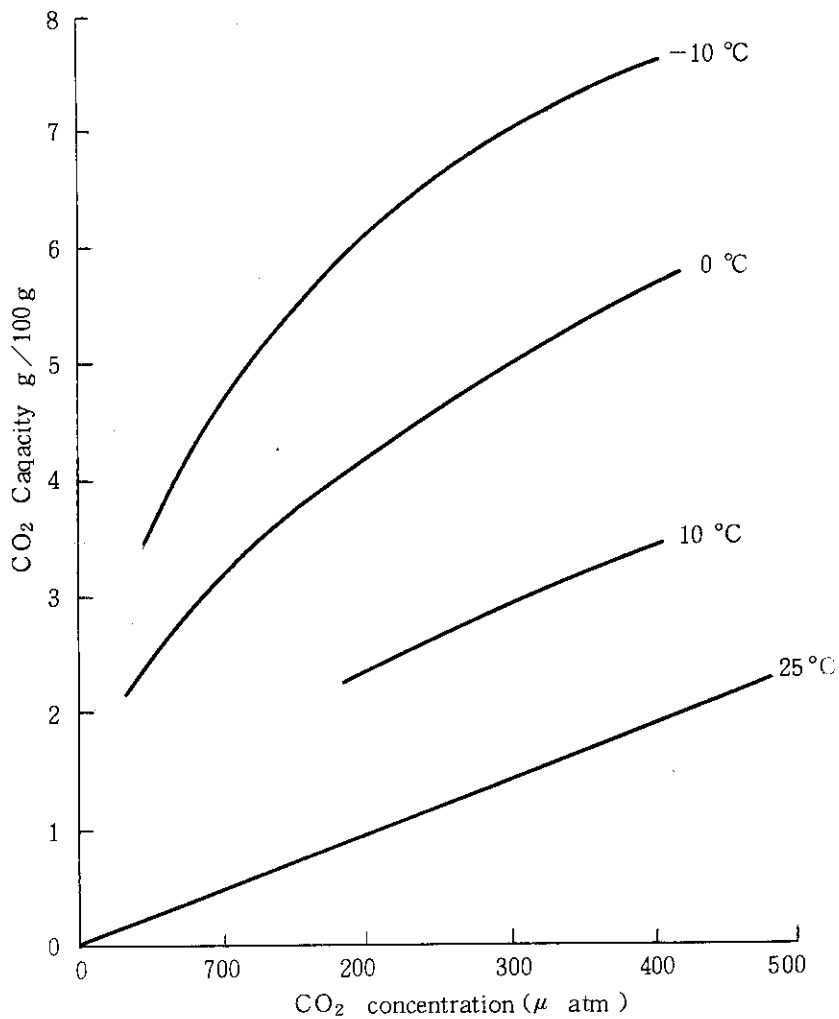


Fig.3.2 モレキュラーシープによるCO<sub>2</sub>の等温吸着線<sup>2)</sup>

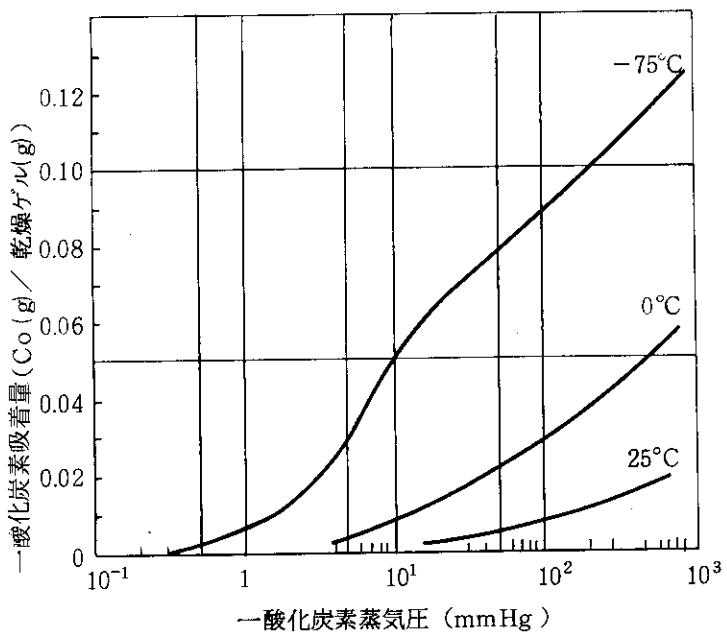


Fig.3.3 モレキュラーシープ5Aによる1酸化炭素の等温吸着<sup>5)</sup>

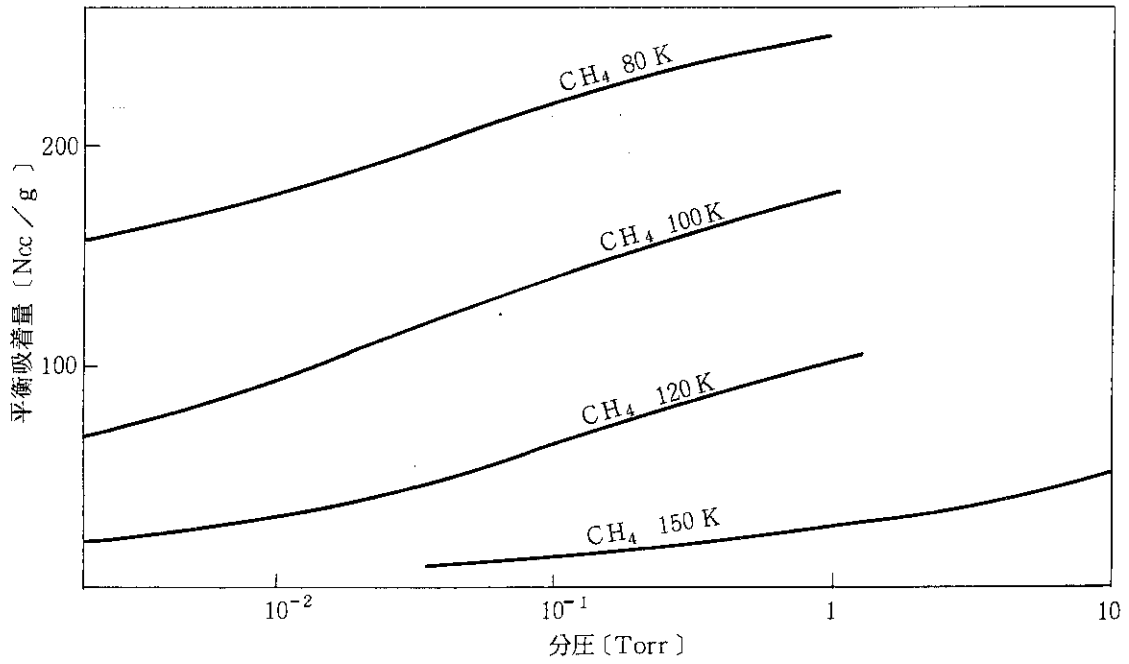


Fig. 3.4 活性炭によるメタンの等温吸着線<sup>3)</sup>

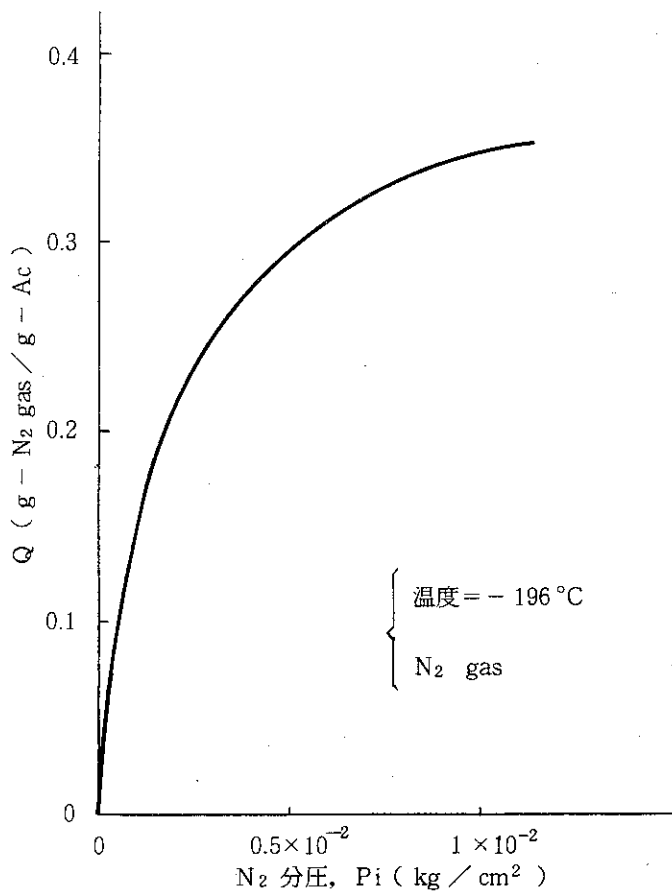


Fig. 3.5 活性炭によるN<sub>2</sub>の等温吸着線例

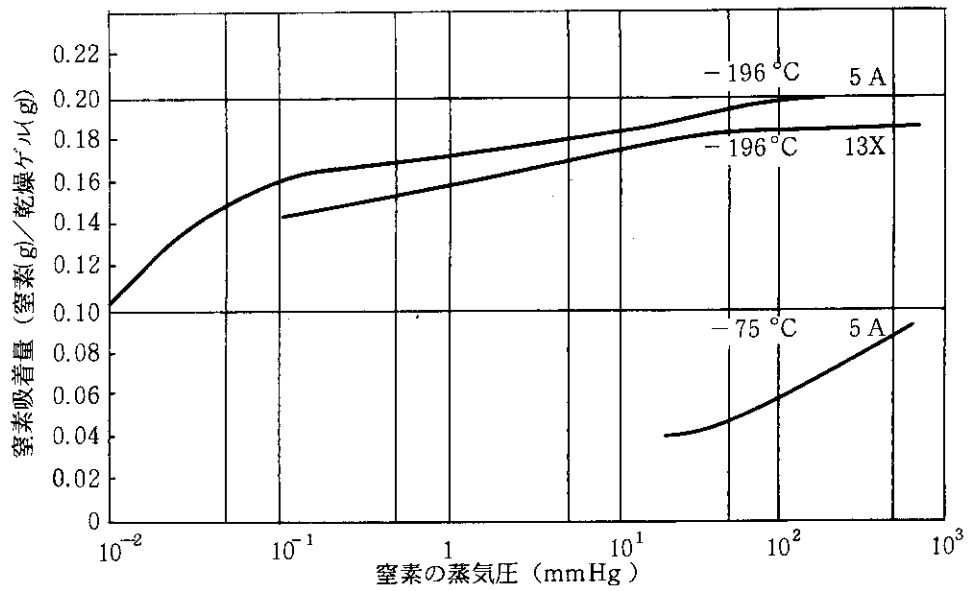


Fig. 3.6 モレキュラーシープによる窒素の等温吸着<sup>5)</sup>

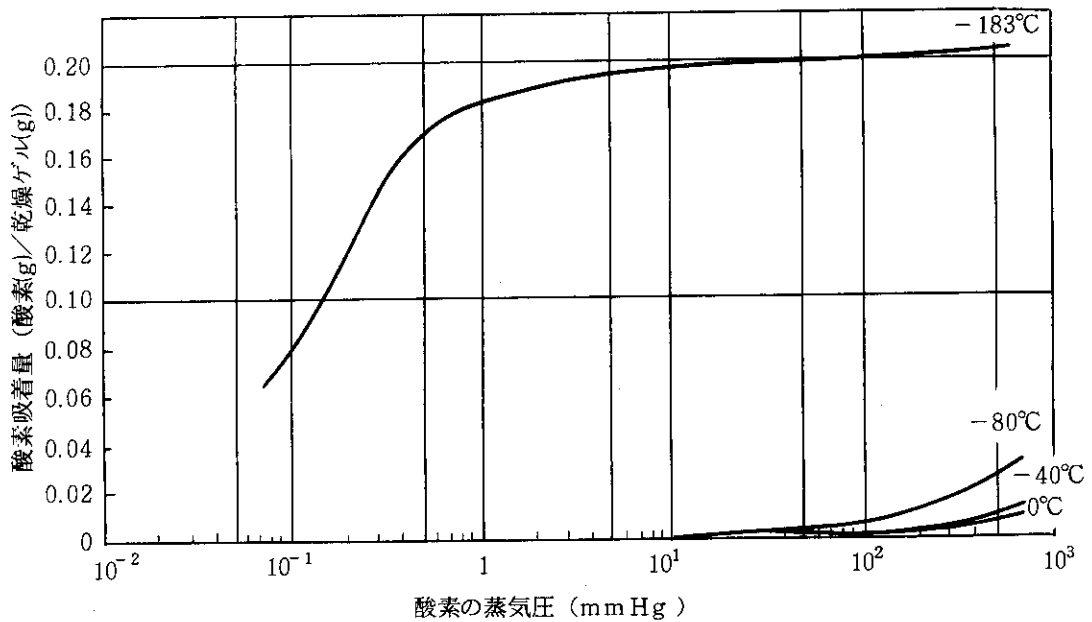


Fig. 3.7 モレキュラーシープによる酸素の等温吸着<sup>6)</sup>

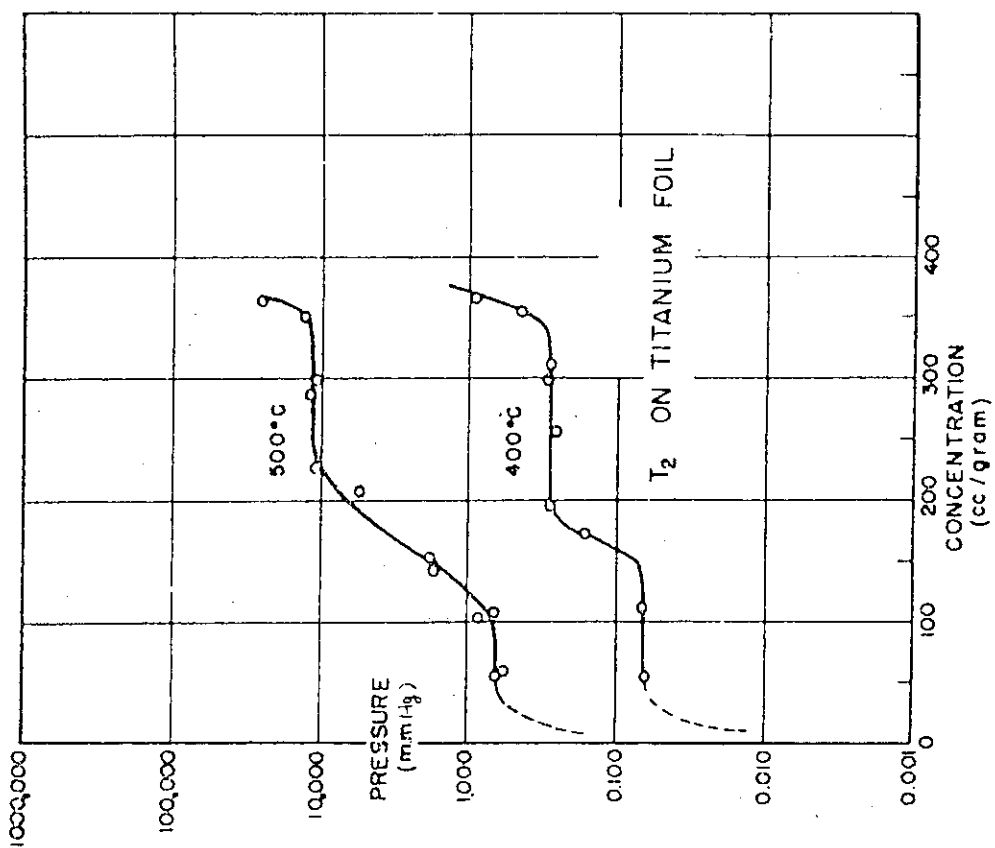


Fig. 3.9 チタンに対するトリチウムの平衡吸収曲線<sup>7)</sup>

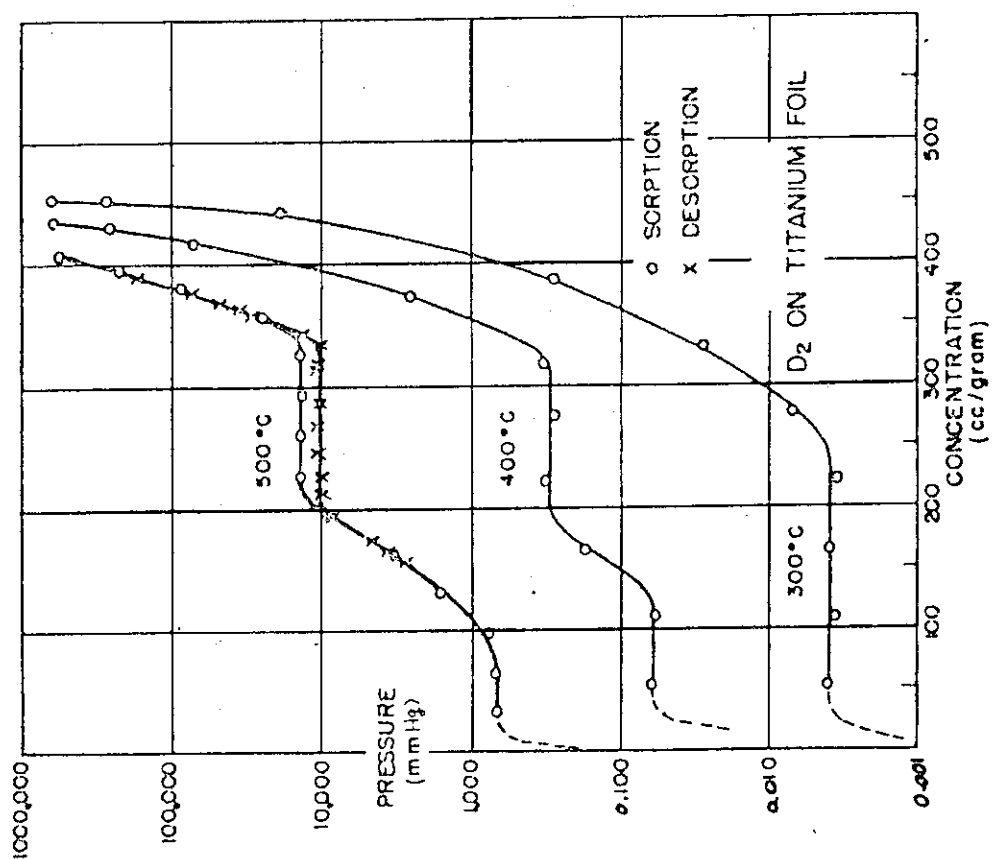


Fig. 3.8 チタンに対する重水素の平衡吸収曲線<sup>7)</sup>



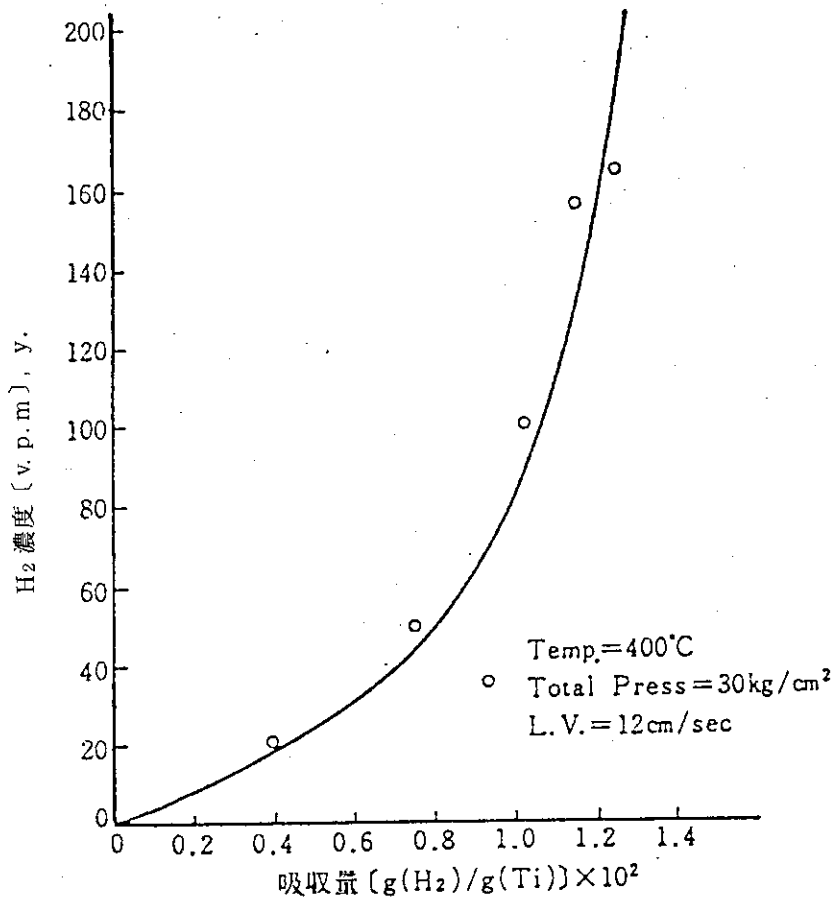


Fig. 3.10 チタンスポンジに対する水素の動的吸収曲線<sup>8)</sup>

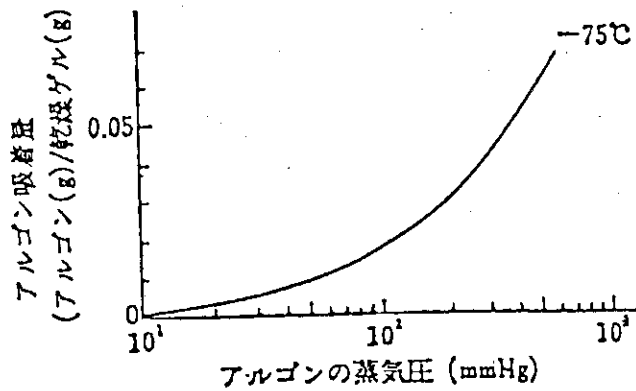


Fig. 3.11 モレキュラーシープ5Aによるアルゴンの等温吸着<sup>5)</sup>

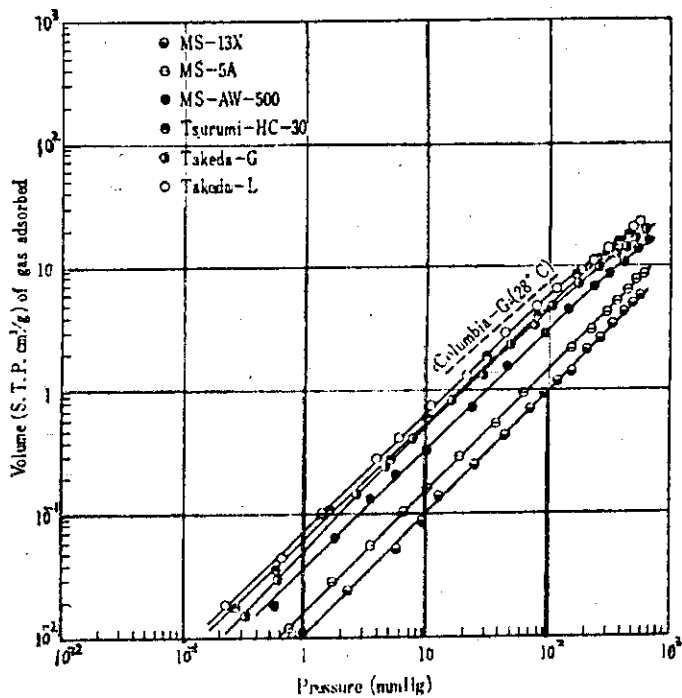


Fig. 3.12 Kr の等温吸着線 (25°C)<sup>26)</sup>

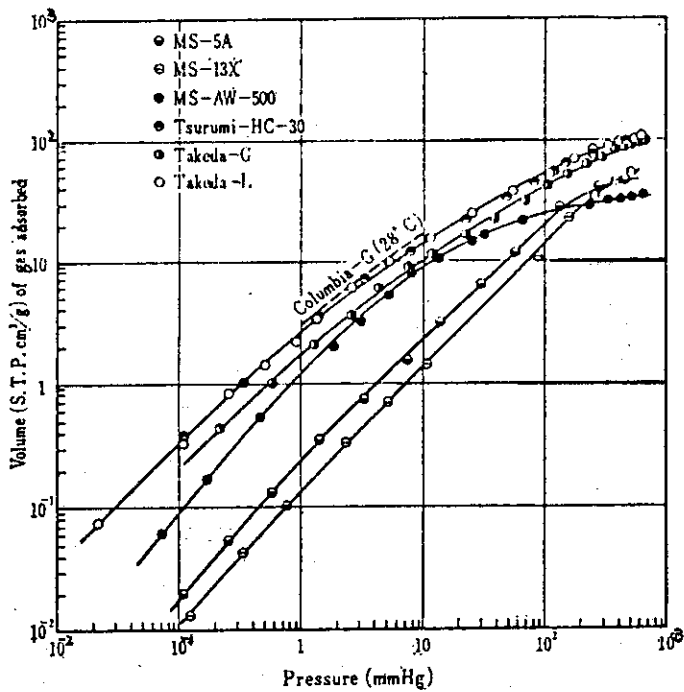


Fig. 3.13 Xe の等温吸着線 (25°C)<sup>26)</sup>

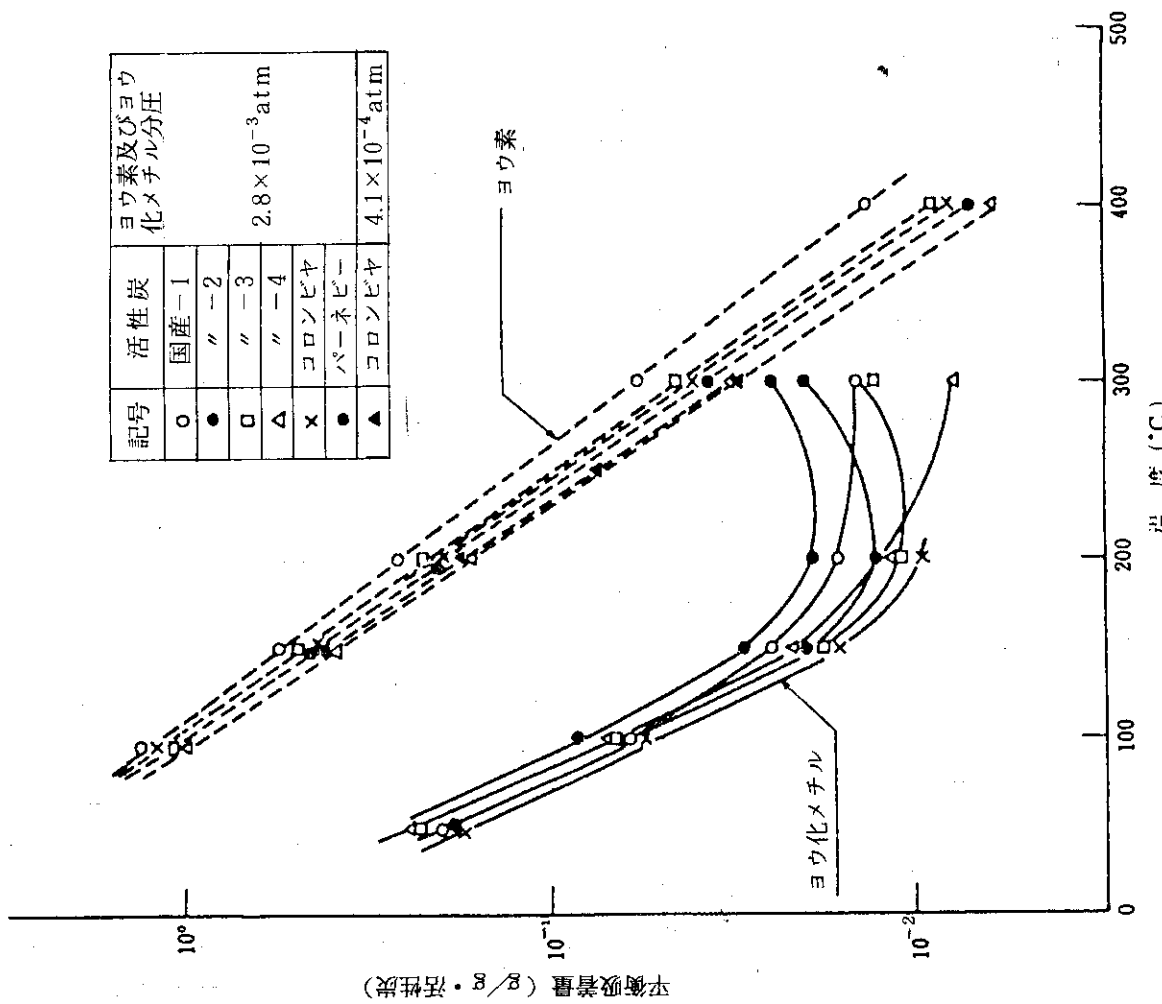


Fig. 3.14 ヨウ素及びヨウ化メチルの等圧吸着曲線<sup>9)</sup>

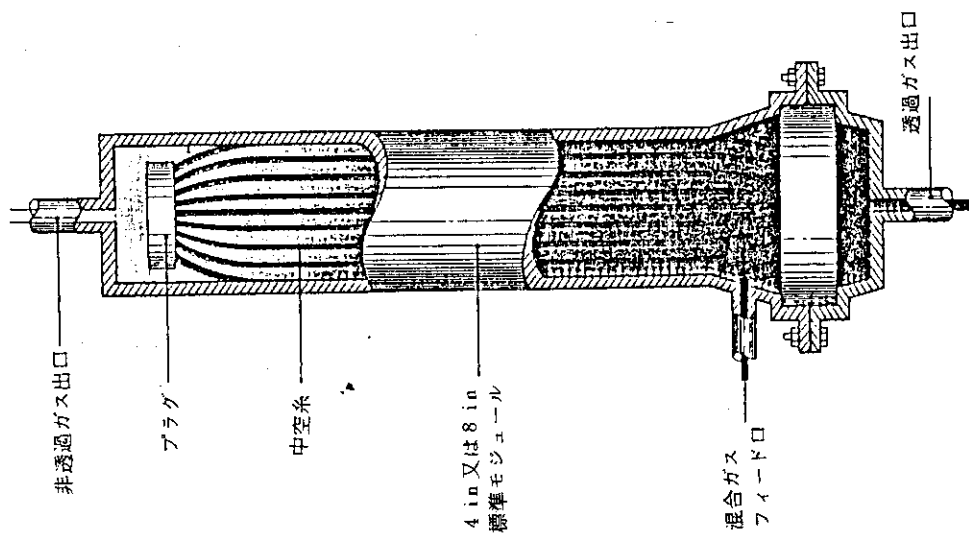


Fig. 3.15 プリズム・セパレーター基本フロー<sup>10)</sup>

## 4. 高温ガス冷却炉及びガスループの純化系

### (1) 純化系の機能

高温ガス冷却炉のヘリウムガス純化系は2つの機能を有している。

- i) 冷却材中の核分裂生成物の除去
- ii) 冷却材中の化学的不純物の除去

しかし、被覆粒子燃料の発達に伴い、核分裂生成ガスの放出量の減少が期待されるため、炉心における $H_2O$ 、 $CO$ 、 $H_2$ 、 $CO_2$ 等化学的不純物と高温グラファイトとの反応を最小に保つため、不純物ガスを除去することが主要な機能となっている。

また、高温ガス冷却炉の運転操作上から純化系の機能を見ると、ヘリウム循環機のシール部、コントロールロッド駆動部、計装機器部への高純度ヘリウムガスの供給源としての機能も有している。

核分裂生成物の除去については、長半減期の希ガス核種( $Kr$ 、 $Xe$ 、 $I_2$ )及びトリチウムの除去機能が要求される。

### (2) Dragon 炉の純化系

Dragon 炉では、炉心のFPガスはパージヘリウムガスによって黒鉛スリーブ内部より連続的にパージされ、炉心から取り出される。次いで冷却器でパージガスの温度を下げ、凝縮性FPを除去し、更に沃素トラップ(チャコール)で沃素を除去し、デイレイベッド(チャコールベッド)に導かれる。デイレイベッドで $Kr$ に対して15時間、 $Xe$ に対して200時間の減衰を行ったのち純化系に送られる。

Dragonの純化系をFig. 4.1に示す。Dragon炉の純化系は酸化銅ベッド、凝縮器、デイレイベッド、コールドチャコールベッドから構成されている。酸化銅ベッドで $CO$ 、 $H_2$ は酸化されて $CO_2$ 、 $H_2O$ となり、凝縮器(フリーザー)で凝縮除去される。次に、液体窒素冷却のデイレイベッドに導かれ $Kr$ 、 $Xe$ の放射能が除去され、コールドチャコールトラップに入る。このコールドチャコールトラップで、 $^{85}Kr$ 、非放射性 $Kr$ 、 $Xe$ 及び $CH_4$ 、 $N_2$ が除去される。純化されたヘリウムガスは120気圧に加圧されたのち、1次系又はメイクアップ系の貯蔵タンクへ戻される。トラップの再生は、再生用加熱ヘリウムガスによって加熱、再生される。このとき発生する放射性廃ガスはダンプタンクへ貯蔵される。

### (3) AVRの純化系

AVRの純化系はフィルター、放射性ガス除去系、非放射性ガス除去系から構成されている。AVRの純化系をFig. 4.2に示す。純化系に導かれた $1000\text{Nm}^3/\text{hr}$ のヘリウムガスは砂利層から成るフィルターでごみが除かれたのち、 $950\text{Nm}^3/\text{hr}$ が1次系に戻される。残りの $50\text{Nm}^3/\text{hr}$ のヘリウムガスが放射性ガス除去系、非放射性ガス除去系へ送られる。放射性ガス除去系は4段階より構成され、第1段は水分除去(モレキュラーシーブ)、第2段は液体窒素冷却の $Kr$ 、 $Xe$ のデイレイベッド、第3段はモレキュラーシーブベッドで $Xe$ と $CO_2$ の除去、第4段はコールドチャコールベッドで $Kr$ 、 $N_2$ の除去が行われる。次に、ヘリウムガスは非放射性ガス除去系へ

送られ、ここで、 $H_2$ 、 $CO$ を酸化し $H_2O$ 、 $CO_2$ として凝縮除去器により除去したのち1次系に戻される。

#### (4) ピーチボトム炉の純化系

ピーチボトム炉の純化系をFig. 4.3, Fig. 4.4に示す。ピーチボトム炉の純化系は、設計の時点で被覆燃料粒子に関する十分なデータが得られていなかったため、燃料要素からのパーズFPガスを除去し、1次ヘリウムガス冷却材のFPガスをコントロールする目的で設計された。燃料棒パーズラインのヘリウムガスは363 kg/hrで純化系に供給され、コンデンサートラップ(金属性FPの除去)、水冷却ダイレイベッド(放射性Kr, Xeの減衰)を通り蒸気発生器パーズラインからのヘリウムガスと合流してフロン冷却の低温ダイレイベッドに入る。この低温ダイレイベッドで放射性のKr, Xeを十分に減衰したのち、その1部をコールドトラップに流し $N_2$ 、 $CH_4$ 、Kr, Xeなどを除去して1次冷却系に戻される。90 kg/hrの蒸気発生器パーズラインのヘリウムガスはプレートアウトトラップでヨウ素、金属性FPを除去したのち、酸化銅ベッドで $H_2$ 、 $CO$ を酸化し $H_2O$ 、 $CO_2$ に変て除去する。純化系を流れる全ヘリウムガス453 kg/hrのうち7%(32 kg/hr)のヘリウムガスがコールドトラップを流れ、残りの93%はコールドトラップを通らずに1次系に戻される。

#### (5) フォートセントブレン炉の純化系

フォートセントブレン炉では、被覆燃料粒子としてTRISOが使用され、FPガスの放出量の減少が予想されたので、純化系は化学的不純物の除去を目的に設計された。フォートセントブレン炉の純化系をFig. 4.5に示す。ヘリウムガス純化系はFPガス及び水素以外の化学的不純物を除去する部分と、水素除去を目的とする部分から構成されている。FP及び化学的不純物を除去する部分はフィルター、モレキュラーシーブベッド、コールドチャコールベッドから構成される。フィルターでヘリウムガス中のごみ、凝縮性FP、ヨウ素を除去する。モレキュラーシーブベッドで水分、 $CO_2$ を除去し、コールドチャコールベッドでKr, Xeなどの放射性ガス、 $N_2$ 、 $O_2$ 、 $CO$ 、 $CH_4$ などを除去する。最後に残った水素及びトリチウムはチタンスポンジベッドで除去される。再生は加熱ヘリウムガスを循環させて行う。吸着塔に吸着されている不純物ガスは加熱ヘリウムでフラッシュアウトされ、放射性廃棄ガス処理施設へベントされる。

#### (6) THTR-300の純化系

THTR-300の純化系をFig. 4.6に示す。<sup>16)</sup>純化系はフィルター、ダイレイベッド(活性炭)、酸化銅ベッド、モレキュラーシーブベッド、コールドトラップなどから構成される。純化系流量は $3000 Nm^3/hr$ で、これは純化半減期11時間に相当する。ヘリウムガス冷却材中の推定不純物ガス濃度は $H_2O$ 、 $O_2 < 0.1 v.p.m.$  :  $CO$ 、 $CO_2 < 0.5 vpm$  :  $NH_3$ 、 $CH_4 < 1 v.p.m.$  :  $H_2 < 4 vpm$  :  $N_2 < 10 vpm$  : Kr, Xe  $< 0.1 Ci/Nm^3$ である。THTR-300にはアンモニア注入システムが設けられている。原子炉を長期間停止する場合、ガス圧によって42本の制御棒をLong-Stroke Drive(運転中はShort-Stroke Drive)で燃料内(ペブルベッド)に挿入する。このとき、制御棒と燃料要素間のフリクションを減少させるため炉心にアンモニアを注入する。炉心に注入されたアンモニア分子がグラファイト表面に吸着して薄いアンモニアの膜を形成するためグラファイトと金属のフリクションが減少する。水やベンゼンなどの分子も同様の性質を有している。運転時のヘリウムガス中のアンモニア濃度は1 v.p.m.以下である。また、純化系出口のヘ

リウムガスの1部は主循環機ラビリンスのシールガスとして供給される。

#### (7) 多目的高温ガス実験炉の純化系

多目的高温ガス実験炉には、1次ヘリウムガス純化系と2次ヘリウムガス純化系が設けられている。これら各純化系の概要を説明する。

##### (A) 1次ヘリウムガス純化系

主な構成機器はダストセパレータ、チラー（冷却器）、プレチャコールトラップ、No.1モレキュラーシーブトラップ（No.1MSトラップ）、No.2モレキュラーシーブトラップ（No.2MSトラップ）、コールドトラップ、チタンスポンジトラップ、No.1再生系、No.2再生系及びチタン再生系である。このうち、プレチャコールトラップ及びチタンスポンジトラップは高温で使用し、No.1MSトラップ、No.2MSトラップ及びコールドトラップは低温で使用される。No.1再生系はNo.1MSトラップの再生装置、No.2再生系はNo.2MSトラップ及びコールドトラップの再生装置、チタン再生系はチタンスポンジトラップの再生装置である。No.1及びNo.2再生系はそれぞれ再生系循環機、加熱器、真空ポンプ等より構成され、各トラップを昇温した後真空ポンプによって減圧排気することにより再生する。再生廃ガスは気体廃棄物として処理される。チタン再生系は純化系運転中、チタンスポンジトラップが破過したとき、再生するための装置である。チタン再生系の運転はチタンスポンジトラップの入口、出口に設けられたサンプリングポートから送られる分析ガスを測定し、トラップ出口ガス温度がトラップ入口濃度の5%に達したとき実施する。

再生時のチタンスポンジトラップの圧力は $0.5 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$ 、温度は $650^\circ\text{C}$ である。トリチウム回収用チタンスポンジトラップは $450^\circ\text{C}$ で運転され、ガス中に含まれる $\text{H}_2$ , Tを吸収する。チタンスポンジトラップの再生及びヘリウムガスの回収が終了した後、トリチウム回収用チタンスポンジトラップを取り外し固体廃棄物処理系で貯蔵し、新規のトリチウム回収用チタンスポンジトラップと交換する。

##### (B) 2次ヘリウムガス純化系

主な構成機器は酸化銅反応塔、常温トラップ（MSトラップ）、コールドトラップ等である。1次及び2次のヘリウムガス純化系の主な相異点は水素及びトリチウムの除去、処理方法である。2次ヘリウムガス中のトリチウム濃度は低いので水素及びトリチウムを酸化銅反応塔で酸化し、 $\text{H}_2\text{O}$ 及びHTOに変った後、常温トラップで捕集する。この常温トラップは再生使用するため、トリチウム水（HTO）は液体廃棄物として処理される。

#### (8) ガスループの純化系

ガスループのうち、ここで取り上げたGAIL及びOGL-1は炉内ループ、HENDELは炉外ループである。GAIL<sup>17)</sup>はGE社のGETRに設置されたガスループでピーチボトム炉の燃料照射試験のため設置された。GAILの純化系をFig. 4.7に示す。GAILの純化系はチャコールトラップ（2基）、酸化銅ベッド、凝縮トラップ（液体窒素による水、 $\text{CO}_2$ のトラップ）、コールドチャコールトラップで構成され、照射燃料のスweepガスを純化する。

OGL-1の純化系をFig. 4.8に示す。<sup>27)</sup> OGL-1はJMTRに設置されているガスループでその純化系の構成はフォートセントブレン炉と同様で水素、トリチウムの除去にチタンスポンジベッドを使用している。次にヘンデルの純化系をFig. 4.9に示す。HENDELの純化系は酸化銅ベッド、モレキュラーシーブベッド、コールドチャコールベッドから構成されている。モレキュラ

ーシーブベッドはフロン冷凍機で10℃に維持され、水分、CO<sub>2</sub>の吸着容量の増加と、液体窒素使用量の節約（使用量約100ℓ/hr）を図っている。Table 4.1に高温ガス炉、ガスループのヘリウムガス純化系の比較表を示す。各原子炉の純化半減期を見ると、THTR-300が11時間で最も長く、実験炉の純化半減期が0.83時間で最も短い。

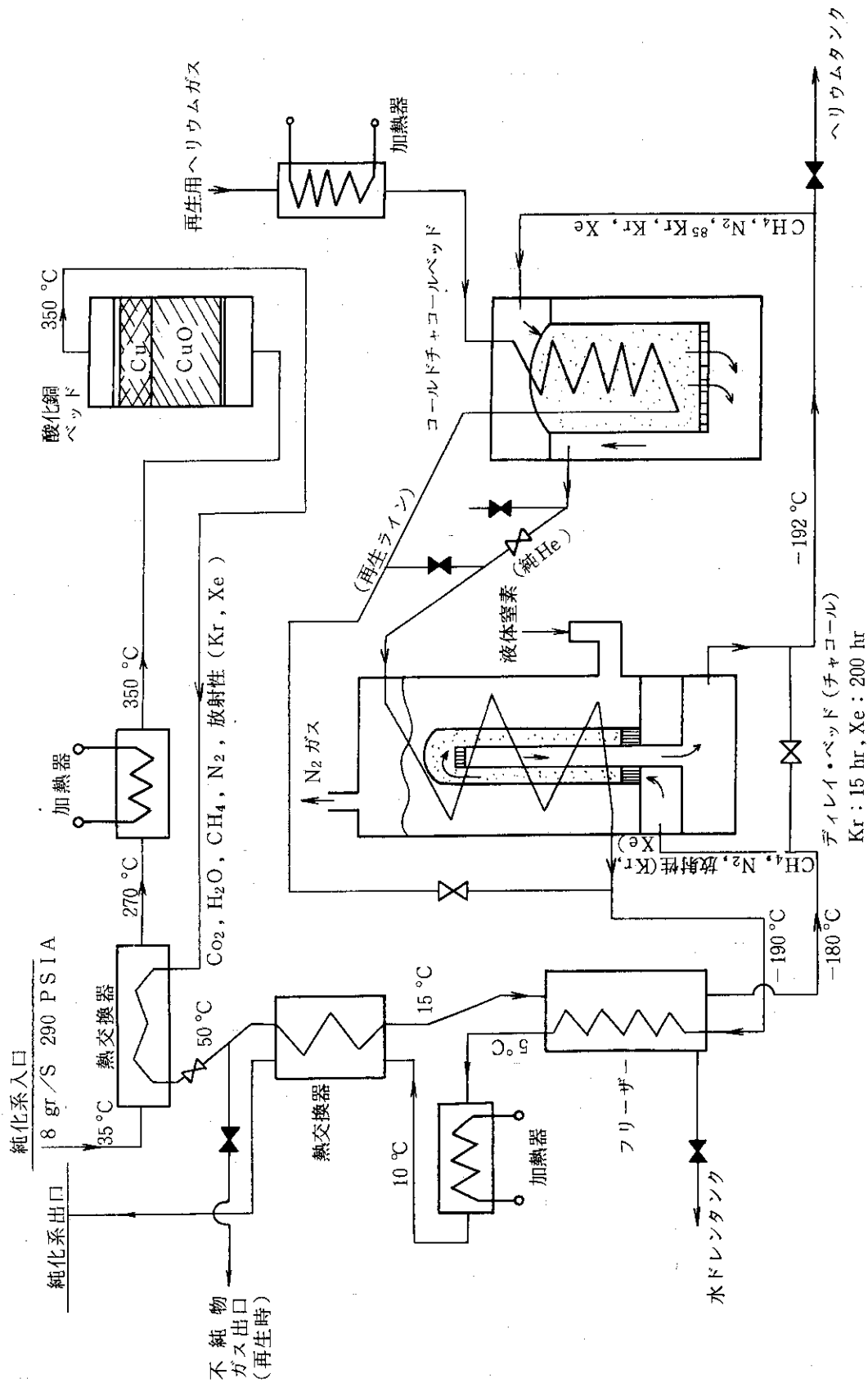


Fig. 4.1 Dragon 炉のヘリウム純化系<sup>11)</sup>



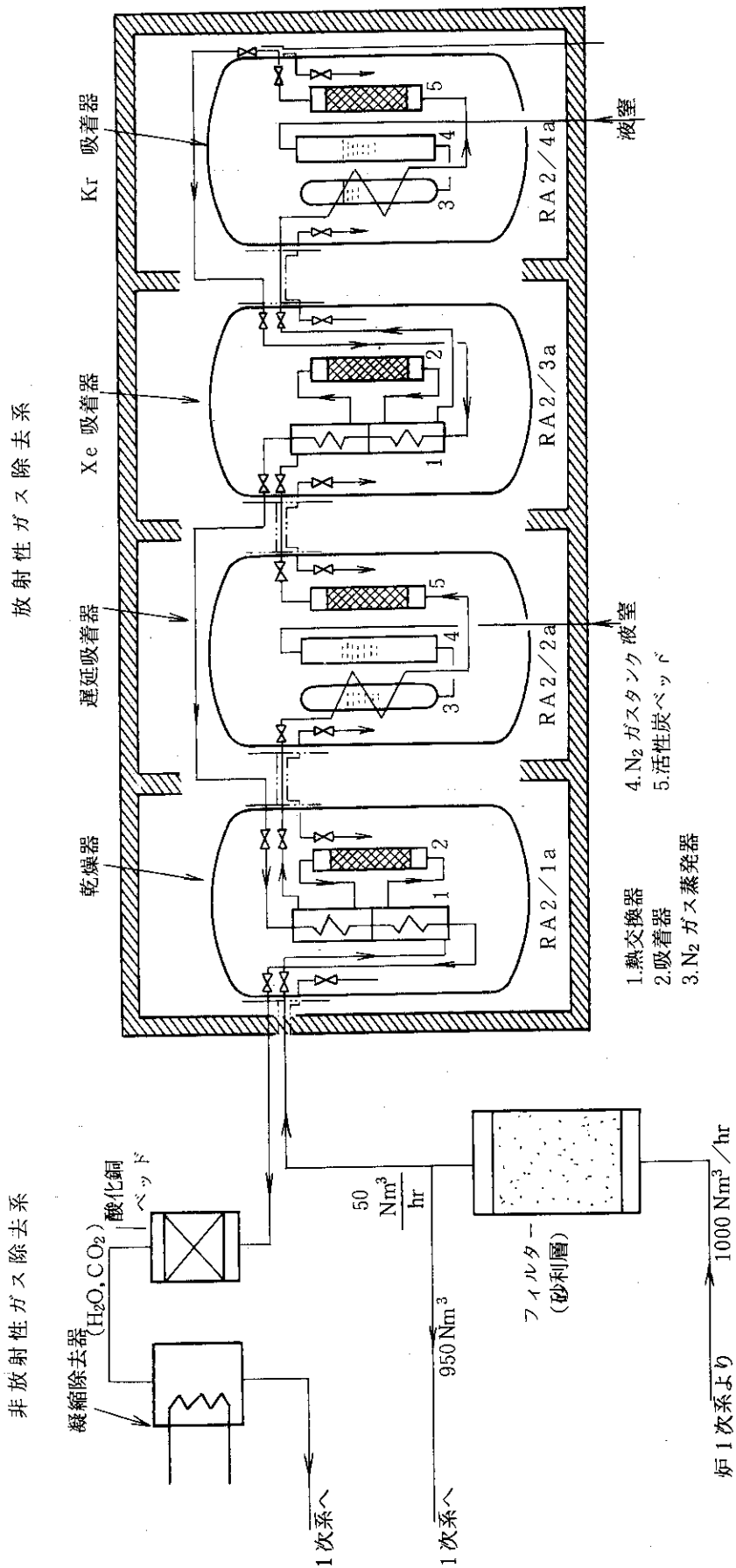


Fig. 4.2 AVR 炉の純化系<sup>12)</sup>

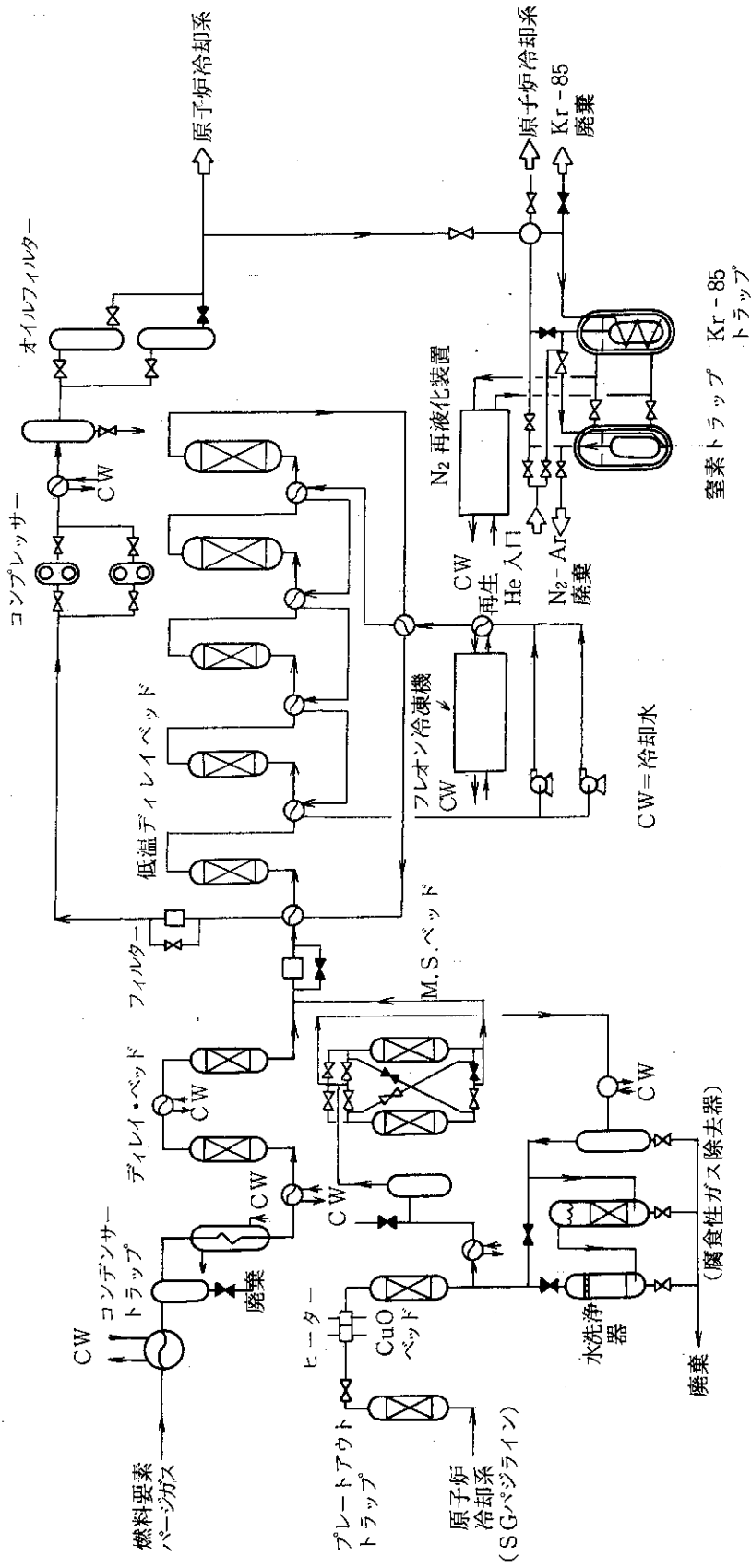
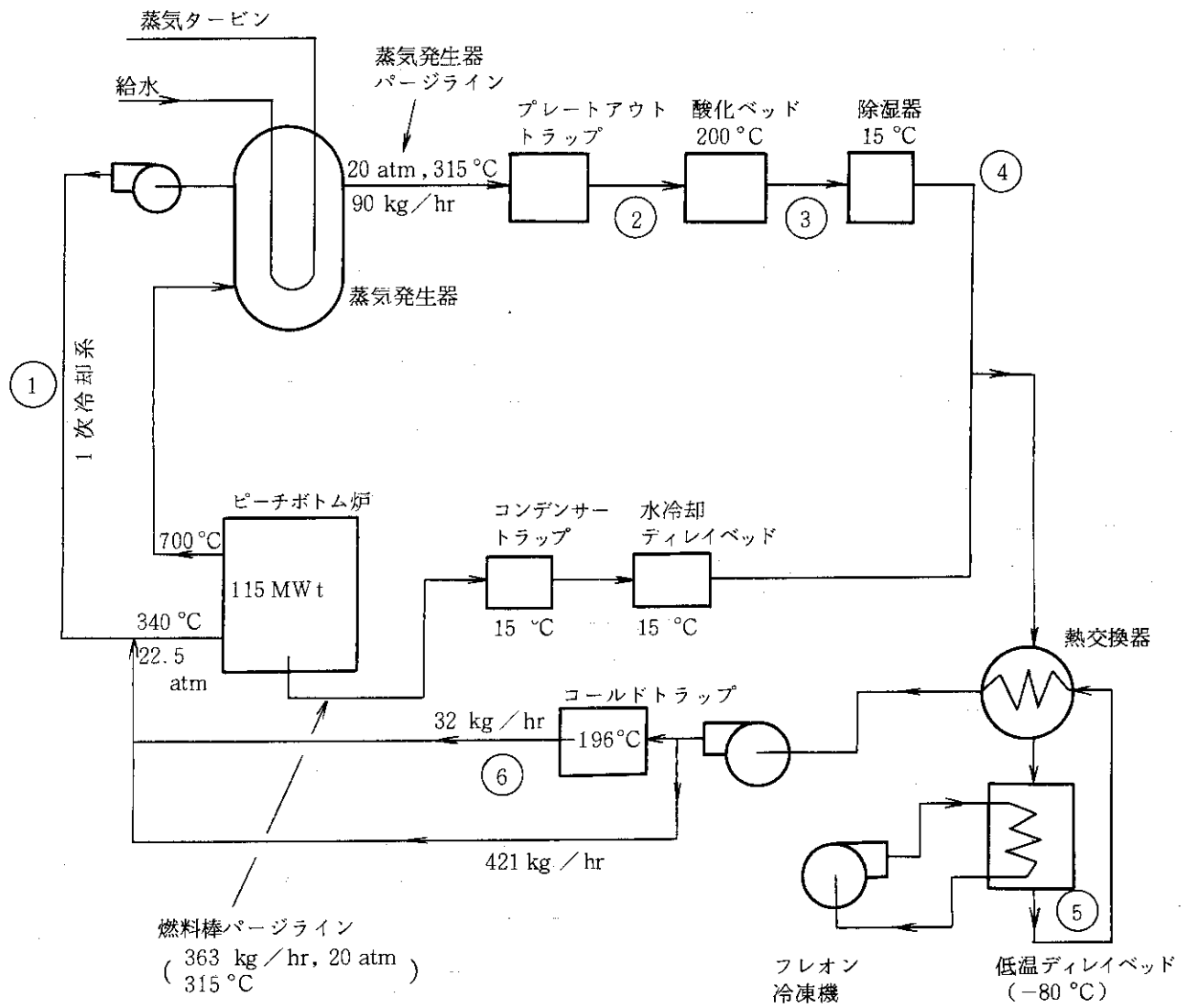
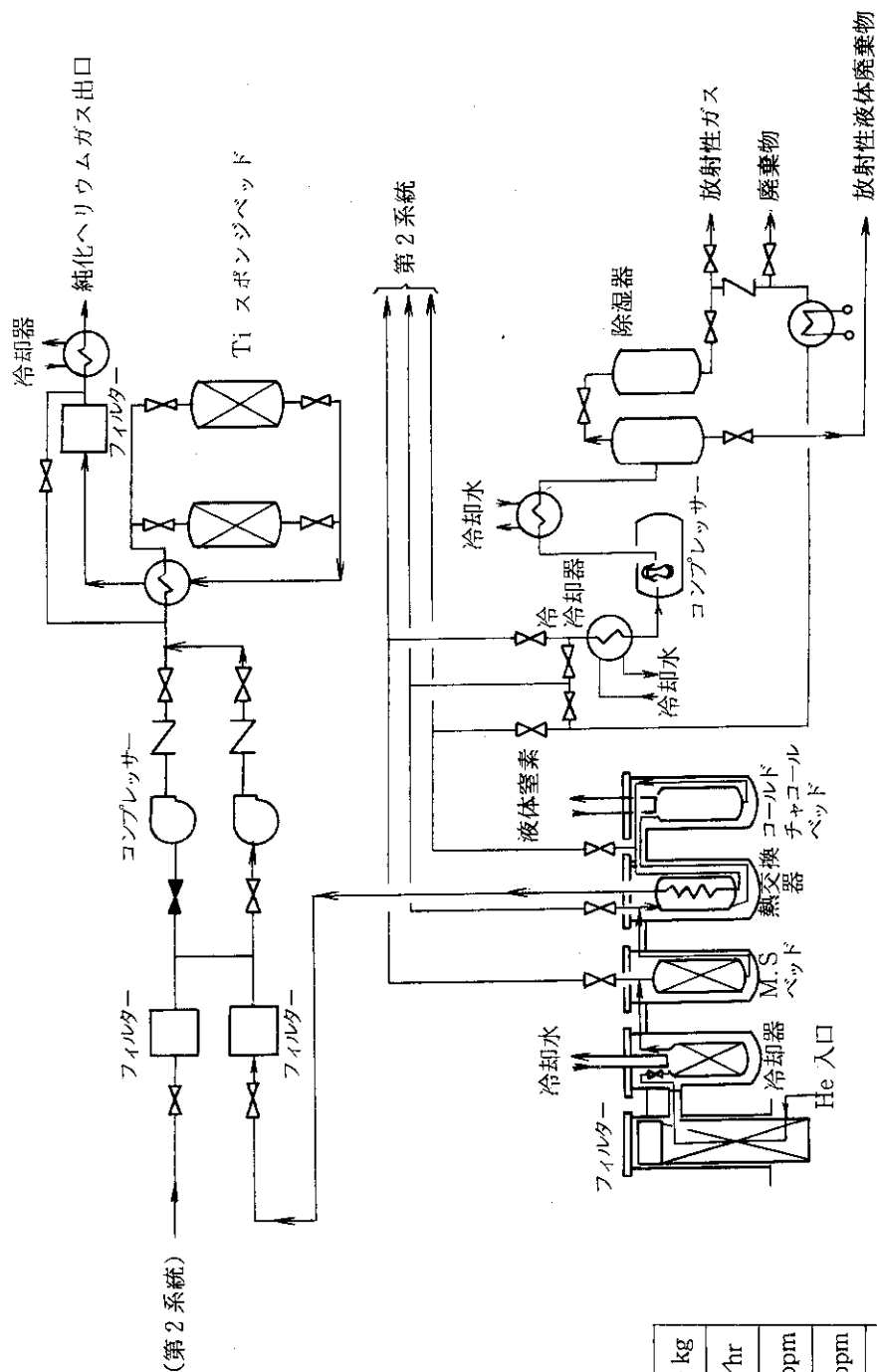


Fig. 4.3 Peach Bottom 炉のヘリウム純化系<sup>13)14)</sup>



Sample Point	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	O <sub>2</sub> -Ar	N <sub>2</sub>	CO	CH <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> O
① Main coolant	0	11	0.3	0.6	1.1	1.0	< 1.0
制限値	2	10	0	10	10	2	1
② Oxidizer inlet	0	11	0.3	0.6	1.1	1.0	15
③ Oxidizer outlet	1.1	0	0.3	0.6	0	1.0	26
④ Dehydrator outlet	0	0	0.3	0.6	0	1.0	< 0.2
⑤ 1st LTDB outlet	0.2	-	0.3	0.6	1.1	1.0	< 0.2
⑥ LN <sub>2</sub> outlet	0	-	0.2	0.2	0	0	-

Fig. 4.4 ピーチボトム炉の不純物ガス濃度<sup>13), 14)</sup>



1次系 He インベントリ-	3650 kg
精製系流量	424 kg/hr
一次系不純物	
H <sub>2</sub>	10 ppm
N <sub>2</sub>	10 ppm
CH <sub>4</sub>	1 ppm
H <sub>2</sub> O+CO + CO <sub>2</sub>	10 ppm

Fig. 4.5 ヘリウムガス純化系 (フォートセントブレント炉)<sup>15)</sup>

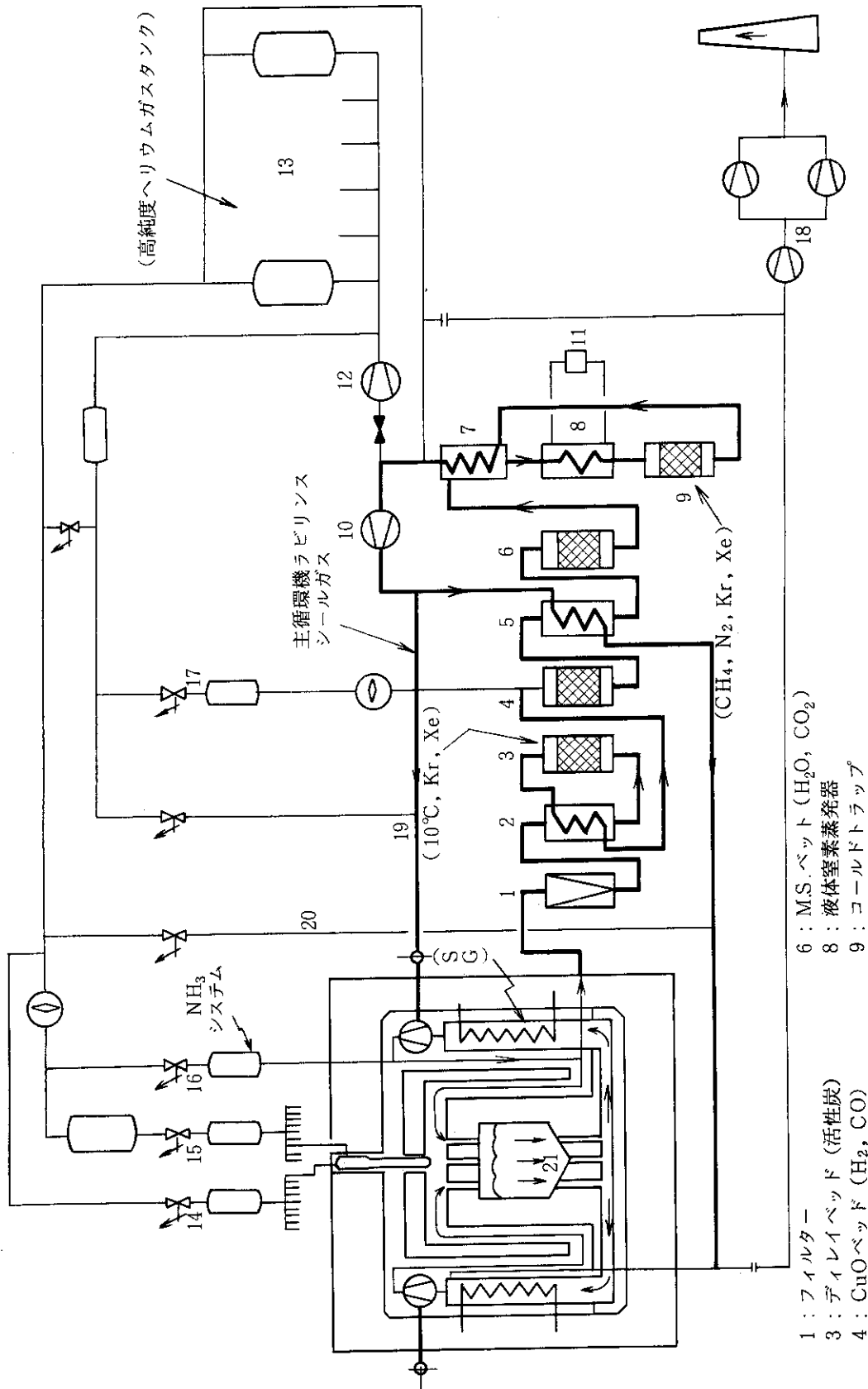


Fig. 4.6 THT R - 300 の純化系<sup>16)</sup>

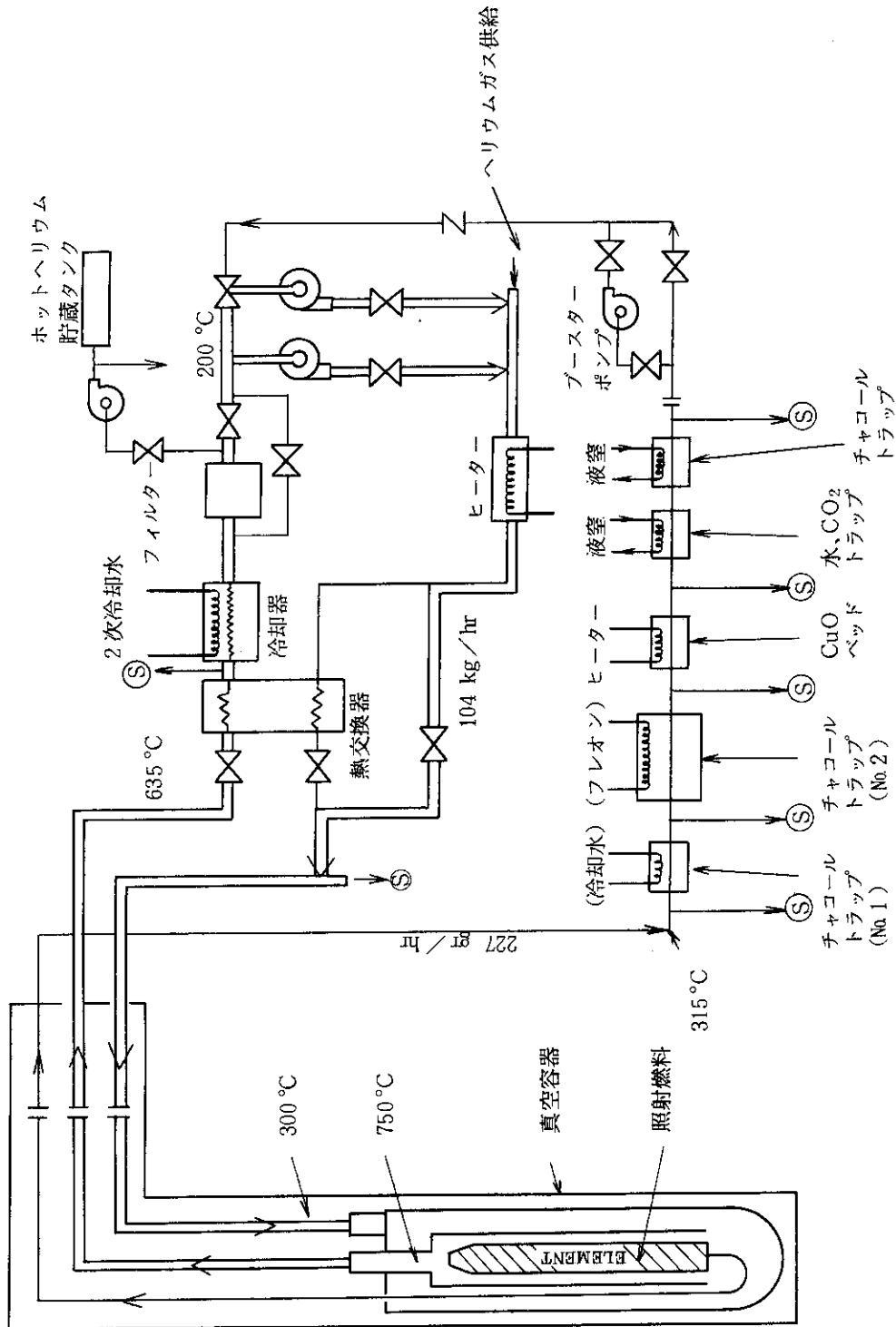


Fig. 4.7 GENERAL ATOMIC IN-PILE LOOP (GAIL)<sup>17)</sup>

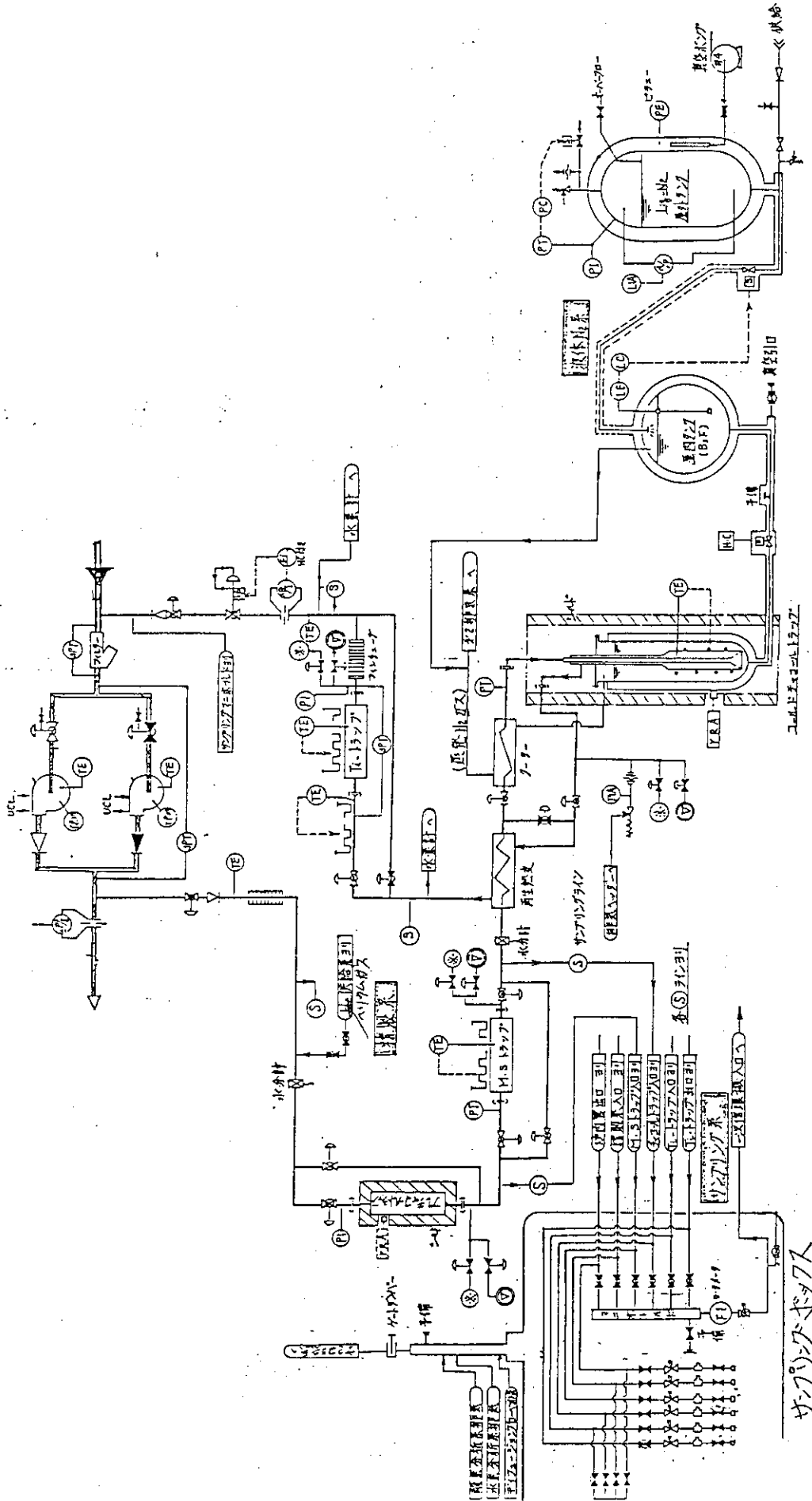


Fig. 4.8 OGL - 1 純化系 27)

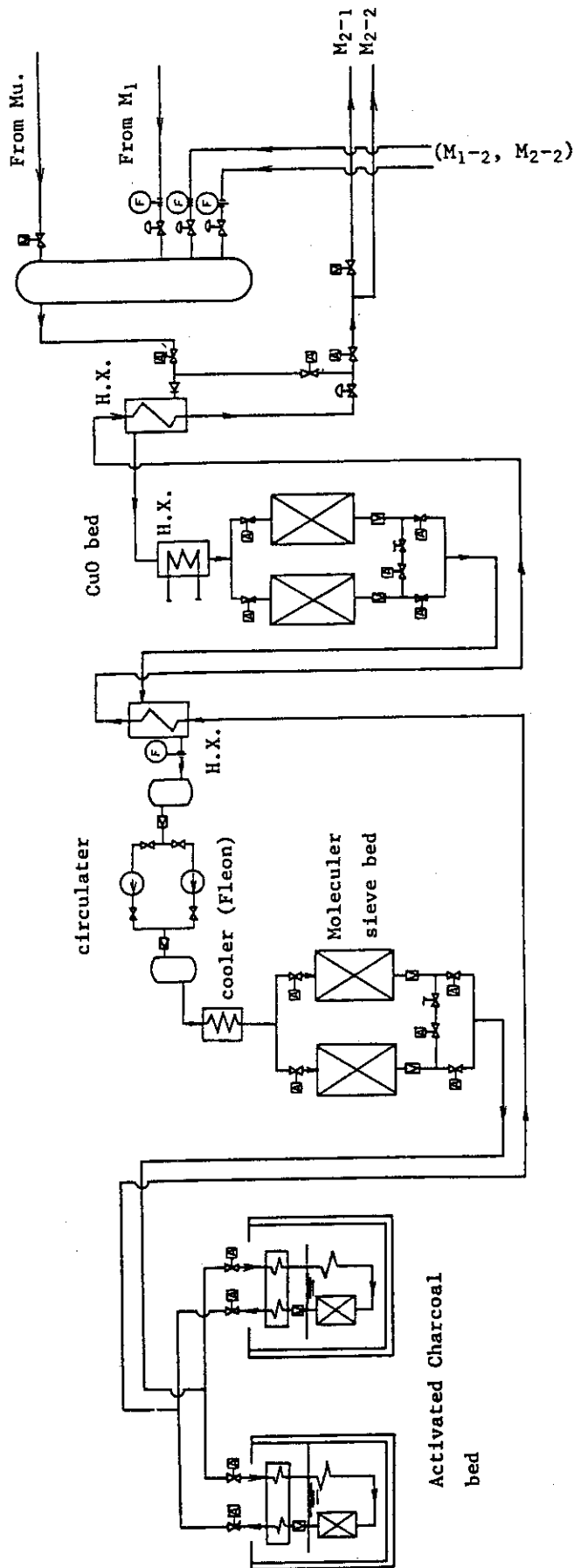


Fig. 4.9 HENDEL 純化系<sup>20)</sup>



Table 4.1 高温ガス冷却炉，ガスループのヘリウムガス純化系の比較<sup>11,12,13,14,15,16,17,20,21)</sup>

	熱出力 (MWt)	圧力 (MPa)	1次系流量 (kg/sec)	純化系流量 (kg/sec)	1次系ヘリウムガス インベントリ(kg)	1次系温度 (°C)	1次系ループ S・Gの数量	純化系構成機器	純化半減 期(hr)
A V R	49	1	13.6	0.05 (フィルターの のみ) 0.0025	—	出) 850 入) 200	1	デイレイベッド コールドトラップ 酸化銅，凝縮器	—
Dragon	20	2	9.62	0.008	134	出) 750 入) 350	6(S.G)	酸化銅，コールドトラップ デイレイベッド フリーザー	3.2
Peach Bottom	115.5	2.4	55.7	0.1(燃料棒) 0.025(S.G)	408	出) 728 入) 340	2	酸化銅，M.S. ベッド コールドトラップ デイレイベッド	3.1
Fort. St. Vrain	842	4.9	433	0.12	3650	出) 785 入) 400	2	M.S. ベッド コールドトラップ Tiトラップ	6
THTR-300	750	4	295	0.15	8397	出) 750 入) 260	6(S.G)	デイレイベッド 酸化銅，M.S. ベッド コールドトラップ	11
原研，多目的高温 ガス実験炉	50	4	16	0.24	1041	出) 950 入) 400	2	M.S. ベッド コールドトラップ チタントラップ	0.83
HENDEL	10	4	(M <sub>2</sub> ) 4 (M <sub>1</sub> ) 0.4	0.1	1071 (6000Nm <sup>3</sup> )	(最高) 1,000°C	—	酸化銅 M.S. ベッド コールドトラップ	2
OGL-1	135 (KW)	3	0.1	0.001	9.4 (53Nm <sup>3</sup> )	(max) 1,000°C	1	プレチャコールドトラップ M.S. ベッド，コールドトラップ チタントラップ	1.8
GAIL	75 (KW)	2.4	0.028	0.06 (g/s)	—	(max) 750	1	プレチャコールドトラップ， 酸化銅 コールドトラップ	—

## 5. 高温ガス冷却炉のメイクアップ系

高温ガス冷却炉のヘリウムガスメイクアップ系の主な機能は次のとおりである。

- i) HTGR のヘリウムガスインベントリーに対応する貯蔵容量
- ii) 1次冷却系と貯蔵タンク間のヘリウムガスインベントリーの加圧、減圧及び輸送
- iii) HTGR の種々のパージ操作に対する高圧純化ヘリウムガスの供給
- iv) 燃料交換、メンテナンス時の1次系ヘリウムガスの回収、貯蔵
- v) 純化系を通しての1次系ヘリウムガスの回収

Fig. 5.1 にフォートセントブレン炉のメイクアップ系のフローシートを示す。<sup>15)</sup>系はヘリウムガスコンプレッサー、油セパレーター、ヘリウムガス貯蔵タンク及び高圧ヘリウムガス供給タンクから構成されており、ヘリウムガス純化系に接続されている。メイクアップ系は燃料交換時、メンテナンス時には、1次系を減圧してヘリウムガスを回収し、起動時には1次系を6時間で加圧できる。ヘリウムガスの回収は常に純化系を通し、これによって放射性ガスを除去し、メイクアップ系を非放射性物質を取り扱う系としている。

Fig. 5.2 にHENDEL のメイクアップ系を示す。HENDEL のメイクアップ系はレシーバタンク、主圧縮機、不純物トラップ、高圧ポンベ(3基)、低圧ポンベ(3基)、供給及び回収ヘッダーから構成されている。高圧及び低圧ポンベは共に最高使用圧力150気圧のヘリウムガスポンベで、1基の貯蔵能力は $1050\text{Nm}^3$ 、合計 $6300\text{Nm}^3$ である。

メイクアップ系はマザーループ( $M_1$ ,  $M_2$ )及び精製系( $M_p$ )と供給、回収ヘッダーを介して配管、弁類で接続されている。高、低圧ポンベのヘリウムガスは調節弁及び供給ヘッダーを経て $M_1$ ,  $M_2$ ,  $M_p$  の各系に供給される。 $M_1$ ,  $M_2$  系の昇温、圧力変動時の回収ヘリウムガスは回収ヘッダー、冷却器を経て $3\text{m}^3$ のレシーバタンクに1時貯蔵される。レシーバタンクと高、低圧ポンベ間に設置された主圧縮機によってレシーバタンク内のヘリウムガスは150気圧に加圧されて、高圧ポンベ又は低圧ポンベのいずれかに貯蔵される。低圧ポンベが空の場合には、レシーバタンクから直接低圧ポンベにヘリウムガスを移送できる。また、低圧ポンベのヘリウムガスをレシーバタンクを経由して主圧縮機で高圧ポンベに充てんすることもできる。

次に、THTR-300のメイクアップ系をFig. 5.3に示す。<sup>16)</sup>メイクアップ系には使用圧力14MPa、容量約 $20\text{m}^3$ の貯蔵タンクが21基設置され合計 $60000\text{Nm}^3$ のヘリウムガスが貯蔵できる。1次冷却系のヘリウムガスの回収は純化系を通して、放射性及び非放射性不純物ガスを除いたのち、ピストン式コンプレッサーで貯蔵タンクに移送する。1次系のヘリウムガスを40気圧から1気圧まで減圧して回収するのに50時間を要する。貯蔵タンクのヘリウムガスは制御棒駆動用、アンモニア注入用、及び燃料装荷-取り出し時のパージ・ヘリウムガス用として供給される。フォートセントブレン炉及びTHTR-300のメイクアップ系に共通する点は、1次系からのヘリウムガスの回収はすべて純化系を経由し、メイクアップ系の放射能をできるだけ低減するように考慮されていることである。Table 5.1にメイクアップ系の比較表を示す。

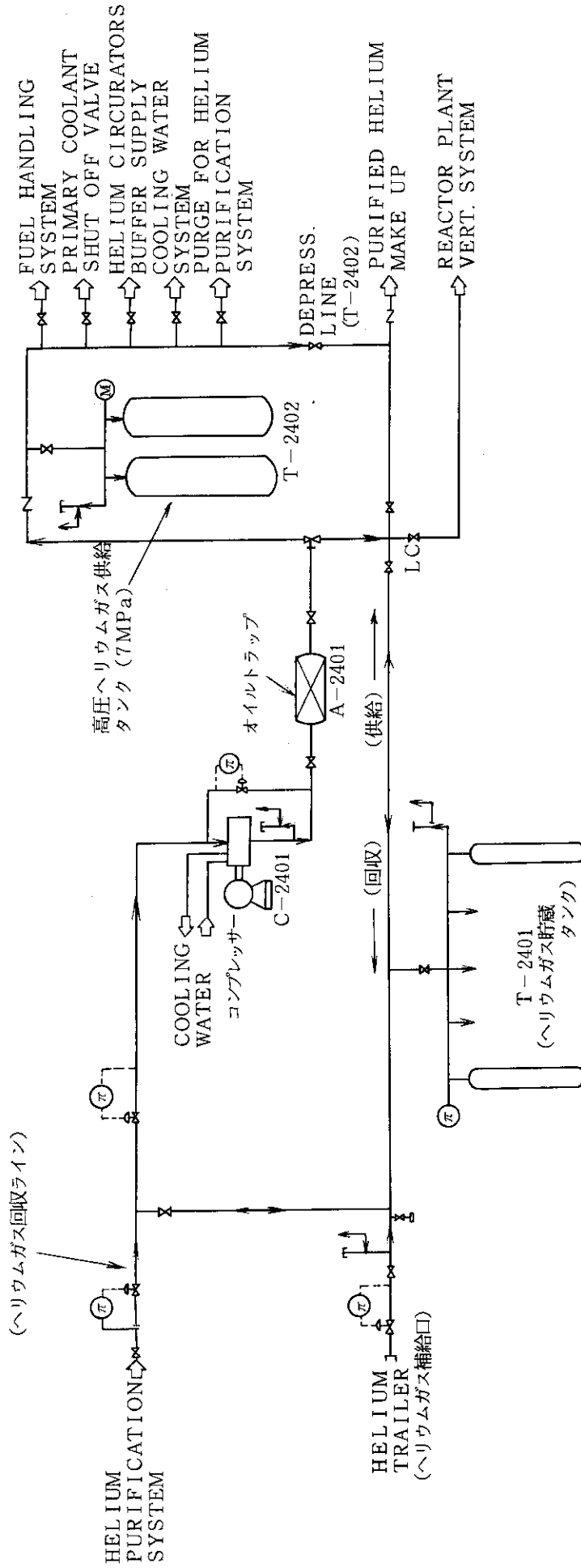


Fig. 5.1 FORT.S.T.VRAINのメイクアップ系<sup>15)</sup>

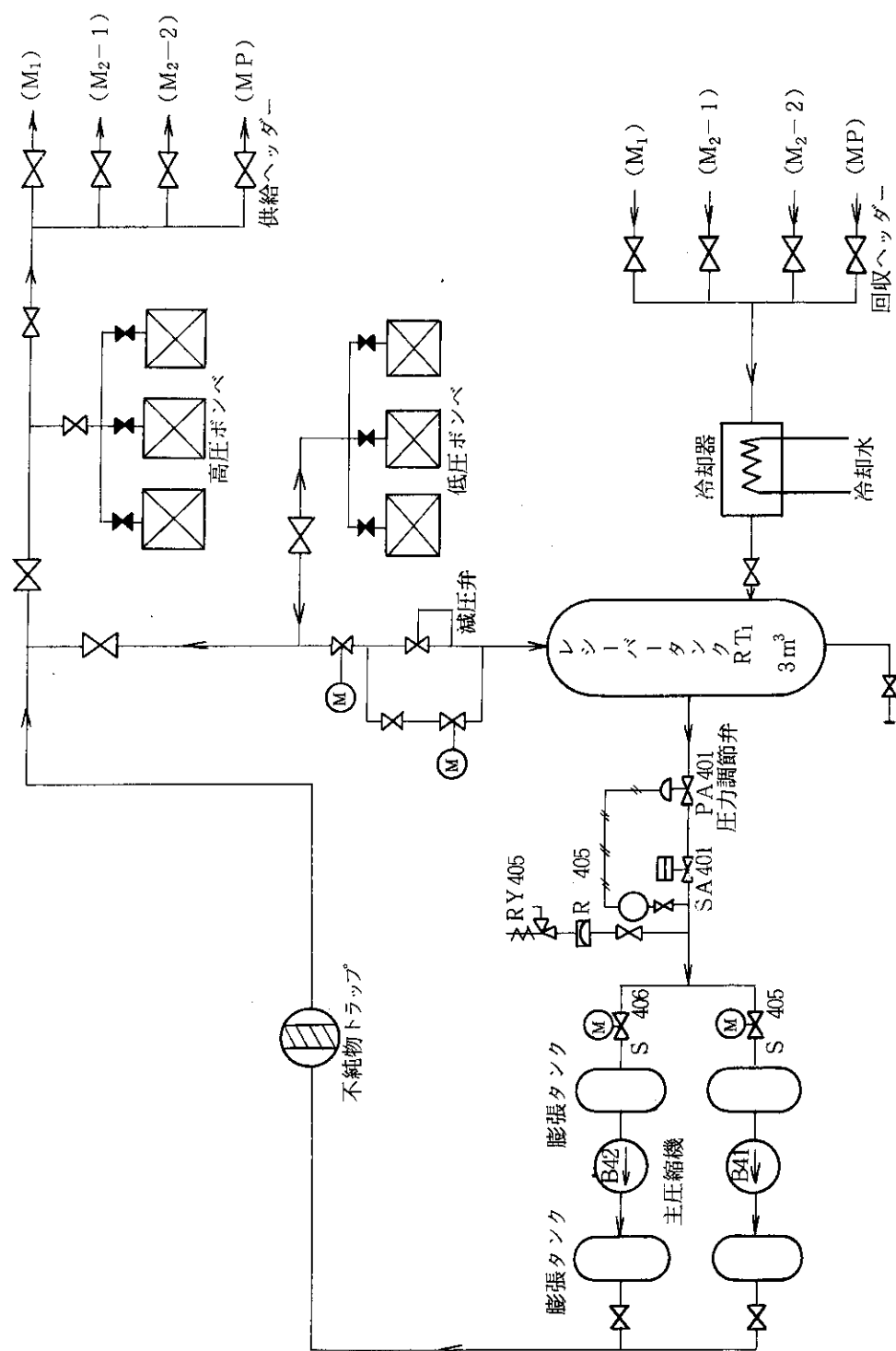
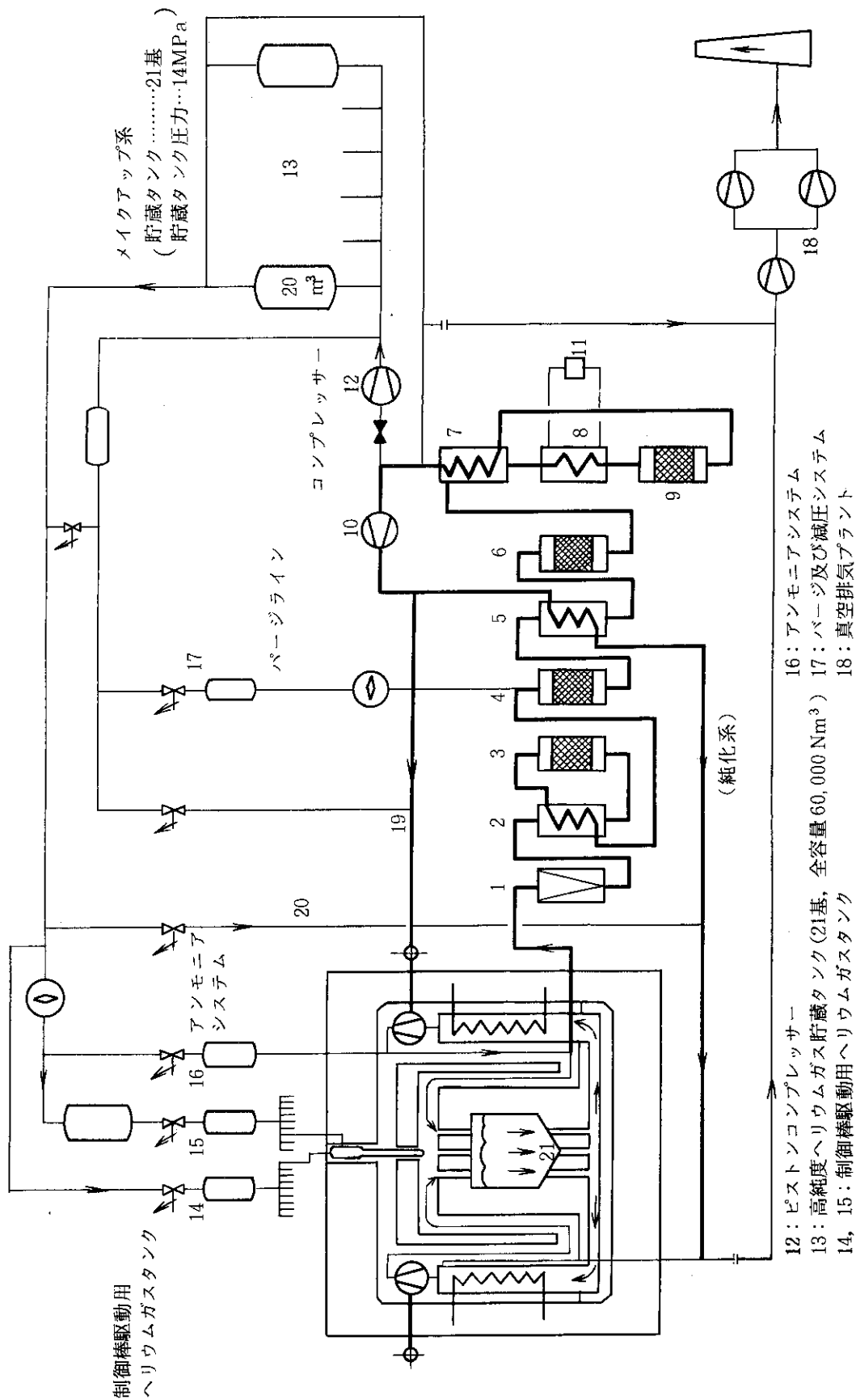


Fig 5. 2 HEDELのメイクアップ系<sup>20)</sup>



12: ピストンコンプレッサー  
 13: 高純度ヘリウムガス貯蔵タンク (21基, 全容量 60,000 Nm<sup>3</sup>)  
 14, 15: 制御棒駆動用ヘリウムガスタンク  
 16: アンモニアシステム  
 17: パージ及び減圧システム  
 18: 真空排気プラント

Fig. 5.3 THTR-300のメイクアップ系<sup>6)</sup>

Table 5.1 高温ガス冷却炉，ガスループのメイクアップ系比較表<sup>(15)(16)(20)</sup>

HTGR, Loop	熱出力 (MWT)	1次系圧力 (MPa)	1次系ヘリウム ガスインベント (kg)	メイクアップ系			その他
				貯蔵タンク (基)	全貯蔵量 (Nm <sup>3</sup> )	構成機器	
Fort St. Vrain	842	4.9	3650	1 式	約27000	コンプレッサー，油セパレーター，ヘリウム貯蔵タンク，高圧ヘリウムガス，供給タンク	加圧時間 6時間
THTR-300	750	4	8397 (47000Nm <sup>3</sup> )	2 1	60000	コンプレッサー，貯蔵タンク，パーシシステム，制御棒駆動ヘリウムガスタンク，アンモニアシステム	回収時間 50時間
原研，多目的高温ガス実験炉	50	4	1041	ダンク 1式 圧力調整 タンク 1式	10600 (1901kg)	ダンク設備，圧力調整設備	回収時間 5時間
HENDEL	10	4	1071 (6000Nm <sup>3</sup> )	6	6300	コンプレッサー，レシーバータンク，高圧ボンベ，低圧ボンベ，冷却器供給ヘッダー，回収ヘッダー	加圧時間 12時間
OGL-1	135 (KW)	3	9.4 (53Nm <sup>3</sup> )	(7m <sup>3</sup> ボンベ) 約20	140	ヘリウムボンベ，供給ヘッダー，排気系デイレイベッド，放蓄タンク	回収システム なし

## 6. 高温ガス冷却炉の不純物発生源について

高温ガス冷却炉の不純物ガス発生源として、次のような場合が考えられる。

- (1) 放射性物質
  - i) 燃料からのFP 放出
  - ii) 構造材料の放射化
- (2) 化学的不純物
  - i) グラファイト及び構成部材からのガス放出
  - ii) 保守及び燃料交換時における空気の混入
  - iii) 蒸気発生器からの水の混入
  - iv) ヘリウムガス循環機の潤滑剤の混入
  - v) 炉心構成部材と不純物ガスの反応

AVR, ピーチボトム炉は共に油潤滑によるガス循環機が使用されているため、油の分解によって生じたと推定される $H_2$ ,  $CH_4$ の濃度が他の炉にくらべて高い。これに対して、ガスベアリング方式のガス循環機を用いているDragon炉では、これらのガス濃度は低い。水素を例にとると、ピーチボトム炉で10vpm, AVRで5~15vpmであるのに対して、Dragon炉の水素濃度は1v.p.m.である。また、 $CH_4$ について見ると、AVRが0.2~1v.p.m., ピーチボトムが1v.p.m.であるのに対して、Dragon炉では0.15v.p.m.である。フォートセントブレン炉では水潤滑のガス循環機(4台)が使用され、蒸気発生器も2基設置されているので、1次系ヘリウム冷却材への水の漏れ込み量を0.09gr/hrと仮定して純化系が設計されている。In-pile LoopのOGL-1はガスベアリングのヘリウムガス循環機を使用しているため水素濃度0.5~1v.p.m.,  $CH_4$ 濃度が0.01~0.5v.p.m.と低い。

次に、高温ガス冷却炉では大量のグラファイトを炉心構成部材として使用し、高温配管部ではセラミックファイバー系の内部断熱材を使用しているため、これらも不純物ガスの主な発生源となる。原研で行ったセラミックファイバー系断熱材〔 $Al_2O_3$  45%,  $SiO_2$  52%, 金属酸化物( $Fe_2O_3$ ,  $NiO$ ,  $MgO$ ) 3%〕及び原子炉級ギルソナイト系グラファイト(灰分 30ppm以下)のガス放出の実験結果をのべる<sup>18)</sup> Fig. 6.1は200°Cから1000°Cまでセラミックファイバゼをヘリウムガス中で加熱したときの発生ガス量を示している。ガス発生量は500°C付近から急激に増加し、700°Cから800°Cに達するとガス発生量は減少する。ガス発生量が最も多いのは水素である。次に、グラファイトを1000°Cまで加熱したときのガス発生量をFig. 6.2に示す。グラファイトの場合、水素の発生量が最も多く、次がCOである。L.G.Overholserらの行った高純度グラファイトからの放出ガス測定結果も原研の結果と同様の傾向を示し、水素が最も多く、次がCOであった。<sup>25)</sup> Table 6.1にセラミックファイバー及びグラファイトからの全ガス発生量及び発生比率を示した。水素発生量はセラミックファイバーで42.6%, グラファイトで69%に達し、他のガスにくらべて非常に発生量が多い。次に、セラミックファイバーをステップ状に加熱した場合の水分の発生状態をFig. 6.3に示す。約100°Cのステップ状に加熱すると水分発生

量は急激に増加してピークに達した後、約2時間で発生量は減衰する。

次に原子炉構成部材の金属表面からのガス放出について述べる。金属表面からのガス放出速度は表面仕上げ、表面処理、酸化被膜の状態などで異なる。ステンレス鋼の表面酸化層を除去するとガス放出が減少することから、吸着ガスの大部分が表面酸化層に集中していることが分かる。しかし、ステンレス鋼からの水素ガス放出については金属内部に固溶している水素ガスが大部分を占めている。すなわち、ステンレス鋼に固溶している水素が拡散によって放出される。Table 6.2にステンレス鋼を150°Cに加熱したときのガス放出速度を示す。<sup>19)</sup>



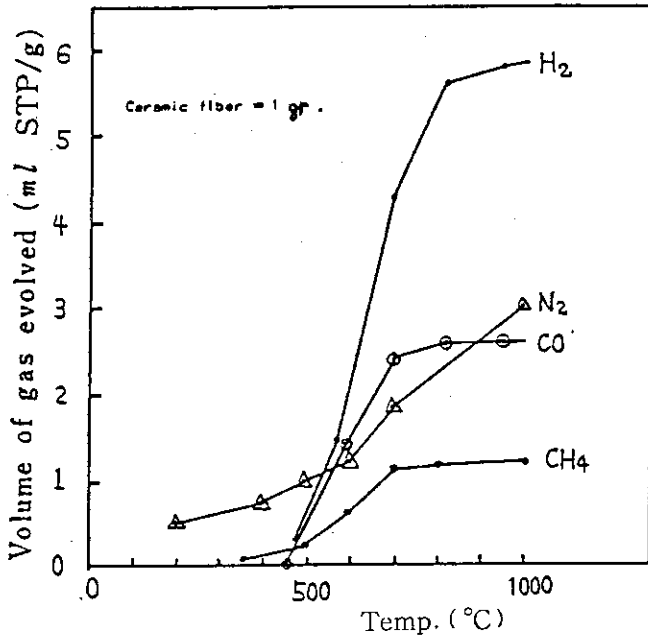


Fig. 6.1 セラミックファイバーからの発生ガス量<sup>18)</sup>

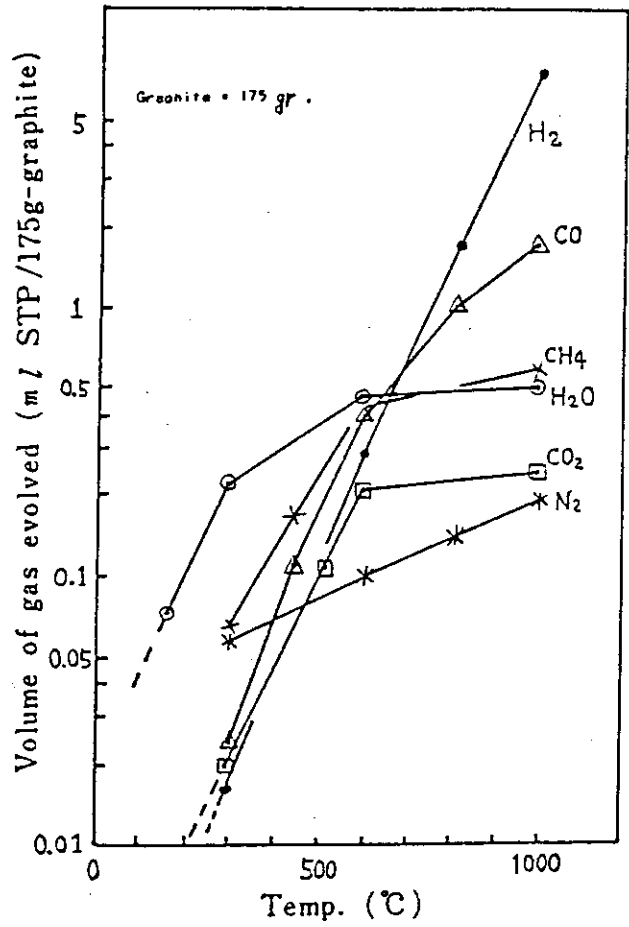


Fig. 6.2 グラファイトからの発生ガス量<sup>18)</sup>

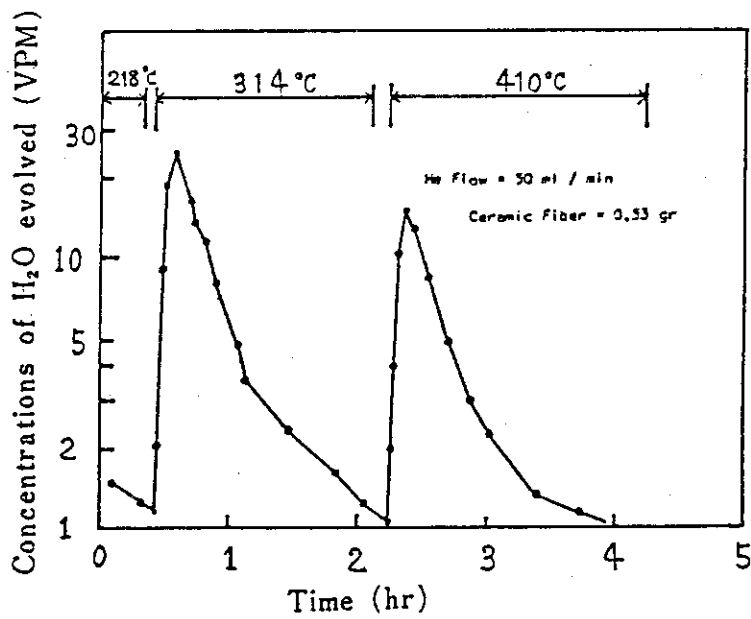


Fig. 6.3 ステップ状温度変化による発生ガス量(水分)<sup>18)</sup>

Table 6.1 グラファイト及びセラミックファイバーからの発生ガス量<sup>18)</sup>  
(200°Cから1000°Cに加熱)

材 料	発生量 全発生量 ml/g*	H <sub>2</sub> O (%)	CO <sub>2</sub> (%)	CO (%)	H <sub>2</sub> (%)	CH <sub>4</sub> (%)	O <sub>2</sub> (%)	N <sub>2</sub> (%)
セラミックファイバー	13.6	0.58	3.3	19	42.6	8.8	2.7	22.8
グラファイト	$6.08 \times 10^{-2}$	4.8	2.6	16	69	5.6	—	2

\* ml は標準状態

Table 6.2 ステンレス鋼からのガス放出速度(150°C加熱)<sup>19)</sup>

ガ ス	加熱直後 ( Torr-ℓ/cm <sup>2</sup> ・sec )	13時間後 ( Torr-ℓ/cm <sup>2</sup> ・sec )
H <sub>2</sub> O	$5 \times 10^{-9}$	$1 \times 10^{-10}$
CO	$2 \times 10^{-9}$	$1 \times 10^{-10}$
CO <sub>2</sub>	$3 \times 10^{-11}$	$2 \times 10^{-12}$
O <sub>2</sub>	$6 \times 10^{-12}$	$5 \times 10^{-13}$
N <sub>2</sub>	$1.5 \times 10^{-9}$	$9 \times 10^{-11}$
CH <sub>4</sub>	$3 \times 10^{-10}$	$2 \times 10^{-11}$
H <sub>2</sub>	$1 \times 10^{-9}$	$3 \times 10^{-9}$

## 7. H E N D E L の不純物ガス濃度

HENDEL 不純物ガス濃度の許容値は 10v.p.m. である。HENDEL の第1サイクルから第5サイクルの不純物ガス濃度は許容値以下となっている。Table 7.1 に各不純物ガス濃度の測定値を示す。水は水分計による測定値で、他の不純物ガスはガスクロマトグラフによる分析値である。比較資料として、高温ガス冷却炉及び他のガスループの不純物ガス濃度を Table 7.2 に示す。

Table 7.1 HENDEL (M<sub>2</sub>+Aグループ)の不純物ガス濃度 (注<sup>2</sup>)

不純物ガス 運転サイクル	(単位: V Pm)									
	H <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	PH <sub>2</sub> / PH <sub>2</sub> O	P <sub>CO</sub> / P <sub>CO<sub>2</sub></sub>	
第1サイクル	0.5 ~ 3	0.1 ~ 0.7	0.2 ~ 2.8	-	-	-	< 0.01			
第2サイクル	0.03 ~ 3	0.04 ~ 0.5	0.05 ~ 1	0.02 ~ 0.5	0.2 ~ 3.5	0.01 ~ 1	< 0.01			
第3サイクル	0.05 ~ 2	0.5 ~ 1.4	1 ~ 3	0 ~ 1.4	0 ~ 0.8	0 ~ 2.2	-			
第5サイクル	0.1 ~ 1	0.3 ~ 0.8	0.7 ~ 4	0.1 ~ 0.5	0.1 ~ 0.5	0.1 ~ 0.2	< 0.01	> 30	> 10	

注) 1. 第4サイクルは分析計不調  
 第3サイクルはT1-s試験部出口を測定  
 2. 所内資料による。

Table 7.2 HTGR及びガスグループの不純物ガス濃度<sup>(11), (13), (23)</sup>

不純物ガス 原子炉, ループ	(単位: V Pm)									
	H <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	PH <sub>2</sub> / PH <sub>2</sub> O	P <sub>CO</sub> / P <sub>CO<sub>2</sub></sub>	
Dragon	0.3	-	0.05	0.04	0.2	< 0.02	0.05	> 20	> 30	
A V R	5 ~ 15	-	< 0.5 ~ 5	< 0.2 ~ 1	20 ~ 50	5 ~ 15	< 1	> 100	3.5	
Peach Bottom	9	-	0.5	0.6	0.5	< 0.1	< 0.5	> 230	> 11	
O G L - 1	0.2 ~ 4	0.1 ~ 0.8	0.005 ~ 1	0.002 ~ 0.3	0.002 ~ 0.3	0.005 ~ 0.08	0.03 ~ 0.1	15	3	
原研 B ガス <sup>(*)</sup>	200	< 1	< 5	5	100	2	1	200	50	
Fort St. Vrain <sup>(**)</sup>	5.0	0	3.8	0.52	5.4	1.7	0.5	10	3.2	

(\*) 1) 耐熱合金試験用標準ガス,  $\frac{(H_2)}{(CO)} \frac{(CO_2)}{(H_2O)} = 4$ , 弱酸化性  
 (\*\*) 2) 67% power.

## 8. 高温ガス冷却炉の分析計

### (i) 水分計

G A の設計したピーチボトム炉及びフォートセントブレン炉ではヘリウムガス冷却材中の水分濃度を 1 p.p.m. 以下に保つように製作された。高温下のグラファイトは水分によって腐食され、水素及び CO を発生する。ピーチボトム炉及びフォートセントブレン炉の蒸気発生器の 2 次側の蒸気圧力 (175 気圧) は 1 次側のヘリウムガス圧力 (49 気圧) より高い。このため蒸気発生器のリーク部分を通して水が 1 次ヘリウムガス冷却材に混入する可能性がある。このため、十分に信頼できる水分計を 1 次系に設置し、ヘリウムガス中の水分濃度を測定し、同時にこの信号を原子炉のアラーム及びスクラム系に入れる必要があった。このため、G A では数種の水分計について検討を行った。

#### (A) ピーチボトム炉の水分計

2 本のロジウム電極を 5 酸化リン ( $P_2O_5$ ) でコーティングし、この電極間に直流電圧を掛ける。ガス中の水分が  $P_2O_5$  に吸収されると、電解が起こる。この電解電流を測定してガス中の水分濃度を測定する。しかし、1 p.p.m. 以下の水分濃度測定は困難であった。(Beckman 社、CEC 社製)

水分濃度のスクラム設定点は 200 v.p.m. で、原子炉制御室のパネルには Moisture High Level Meter の指示計が設置されている。指示計の最高目盛は 1000 v.p.m. であった。

#### (B) フォートセントブレン炉の水分計<sup>22,23)</sup>

フォートセントブレン炉の 1 次系には 2 系統のループがあり、各ループは 6 基のモジュール型蒸気発生器と 2 基のヘリウムガス循環機から構成されている。定常運転時の 1 次系への水分漏れ込み量は蒸気発生器より 18 gr/hr、仮想事故時には蒸気発生器のチューブ破断によって 272kg の水が漏れ込むと想定している。この水分によって、炉心部のグラファイト及び可燃性毒物として炉心部に設置されているボロンカーバイト ( $B_4C$ ) が高温酸化され損傷をうける。ボロンカーバイトは酸化され  $B_2O_3$  (酸化ボロン) に変化し、この酸化ボロンはヘリウムガス冷却材によって炉心外に移動する。更に、多量の水分漏れ込みが蒸気発生器内で起こると炉心構造部材を損傷し、1 次系圧力の急激な増加をもたらす。このため、ヘリウムガス冷却材中の水分の増加及びチューブ破断を起こした蒸気発生器の検出を行うため、フォートセントブレン炉ではミラー型水分計が合計 8 台設置されている。ミラー型水分計の原理を Fig. 8.1 に示す。ミラー冷却用の液体窒素及びヒーターで、ミラー温度を水分の露点温度に維持する。ミラーに光源より光を当て、ミラー面で反射した光をポトダイオードで測定する。光はファイバークラスによってミラー上に導かれる。ミラーは磨かれたロジウム金属のプレートで製作されている。このミラー面にノズルから 1 次ヘリウムガスを吸き付け、水分濃度がミラー温度の露点を超えると、ミラー表面が結露してくもるため光の反射量が減少する。この反射光量の減少を検知してヘリウムガス中の水分濃度を測定する。ミラー温度の制御システムには 2 つの方式があり、第 1 のシステムは定常運転時に使用され、直接ミラー温度を

制御するシステムである。ミラー軸にミラーヒーターが組み込まれ、この軸の先端は液体窒素内に設置されている。液体窒素でミラーを冷却し、ミラーヒーターをサーボ制御してミラー温度を設定値に維持する。第2のシステムは原子炉トリップ後に使用されるもので、水分計は指示又は追跡モードとなる。追跡モードでは、ミラー温度は冷却材中の水分レベルを追跡するため自動的に変えられる。蒸気発生器内の水分漏れ込み事故によって原子炉がトリップしたとき、1次系の水分濃度の増加が予想されるため水分計は追跡モードとなる。追跡モードでは反射光増幅器の信号をフィードバックし、反射光量が減少するとミラー温度を上げてミラー表面の水分を気化して反射光量を増加させる。反射光量の増加によって、今度はミラー温度を下げるように制御し、再びミラー表面に水分を結露させる。このときのミラー温度がヘリウムガス冷却材の露点である。ミラー型水分計はメンテナンスを容易にするため、PCRVR 外面に設置されている。フォートセントブレン炉の水分計8台のうち、6台が低レベル用、残りの2台が高レベル用である。8台のサンプリングラインの流路長さは同じ長さとなっているので、応答時間はほぼ同じである。サンプルガス流量は $66\text{Ncm}^3/\text{sec}$ であるが、この流量ではサンプリングヘッダーから水分計までの距離が長過ぎて、時間遅れが長くなる。このため、バイパスラインを設けてサンプリングラインのガス流量を増加させ、応答時間の短縮を図っている。サンプリングラインのフローシートをFig. 8.2に示す。6台の低レベル用水分計は定常運転時100v.p.m.のトリップレベルに設定され、これらのトリップ信号は2 out of 3となっている(各ループに1組設置)。2台の高レベル用水分計は500v.p.m.でトリップするよう設定され、低レベル用水分計のバックアップ装置として使用される。この500v.p.m.の水分濃度は定常運転時、蒸気発生器に $9\text{kg/hr}$ の水分漏れ込みがあるとき数時間で達する濃度である。フォートセントブレン炉の設計ベースでの水分漏れ込みは16000 v.p.m.と予想されている。水分モニターシステムによって、100v.p.m.(又は、500v.p.m.)で原子炉がトリップすると、プラント保護システムが作動し、漏れのある蒸気発生器を分離し、漏れ込む水、及び蒸気をダンプタンクに落とすことができるようになっている。このプラント保護システムは、原子炉トリップ、循環機停止、ループへの給水停止でも作動する。また、3台の低レベル用水分計が破損すると、原子炉がトリップするようになっている。多量の水分の漏れ込みによって、PCRVRに過大な圧力が加わるとPCRVRの圧力検知器の信号で安全弁が作動する。設計ベースの水分漏れ込みを想定しても、水分モニターシステムによる原子炉トリップによって、次の3つの重要な安全動作を取ることが可能である。

- (1) PCRVRの安全弁作動を防ぐことができる。
- (2) 燃料要素の酸化を1%以下におさえることができる。
- (3) PCRVRの圧力トリップが起こる前に原子炉トリップを開始する。

前にも述べたが、水分モニターシステムの設計上の重要な機能は水漏れが生じたループを識別し、分離することである。設計ベースの水の漏れ込みが起こったとき、PCRVRの安全弁が作動するまでの時間は100%出力で207sである。同じく、燃料要素の酸化が1%に達するまでの時間は850sである。また、原子炉の圧力高のトリップが作動するまでの時間は約100sである。フォートセントブレン炉の水分モニターシステムによる原子炉トリップ時間は上記のいずれのトリップ時間よりも短いため、水分モニターシステムの安全動作機能は十分に

発揮される。次に、フォートセントブレン炉にはEG&G社の水分計も設置されているが、この出力はプラント保護システムには接続されていない。

(C) OGL-1 及びHENDELの水分計

OGL-1にはSHAW水分計が設置されている。この水分計の原理は、酸化アルミ膜に水分を吸収させ、水分吸収量によって変化する電気容量を測定し、ガス中の水分濃度を測定する。SHAW水分計の測定範囲は露点で $-80^{\circ}\text{C}$  (0.54 v.p.m.) から $-20^{\circ}\text{C}$  (1000 v.p.m.) である。SHAW水分計のセンサーをFig. 8.3に示す。HENDELの水分計はMichell水分計であるが、原理及び測定範囲はSHAW水分計と同じである。これらの水分計は応答速度が比較的速く(40秒から240秒、水分濃度によって異なる。)、センサーの汚れに対しても指示は安定しているが、測定開始前及び測定中に校正する必要がある。

(ii) 他の分析計

ピーチボトム炉では、 $\text{CO}$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{O}_2$ 、 $\text{N}_2$ の分析にガスクロマトグラフを使用している。また、酸素分析にジルコニアを用いたセラミック式酸素分析計も使用されている。OGL-1の分析計は高感度ガスクロマトグラフ(放射線イオン化検出器)及び電気化学式酸素計である。OGL-1にはサンプリングボックスが設置されており、ヘリウムガスを採取し他の分析計で測定することができる。

HENDELの分析計は高感度ガスクロマトグラフ(グロー放電式イオン化検出器)及び電気化学式酸素計である。酸素計は1 p.p.m. から1000 p.p.m. まで測定レンジの切換が可能であるが、100 p.p.m. 以下のレンジで使用すると、零点のドリフトが大きい。

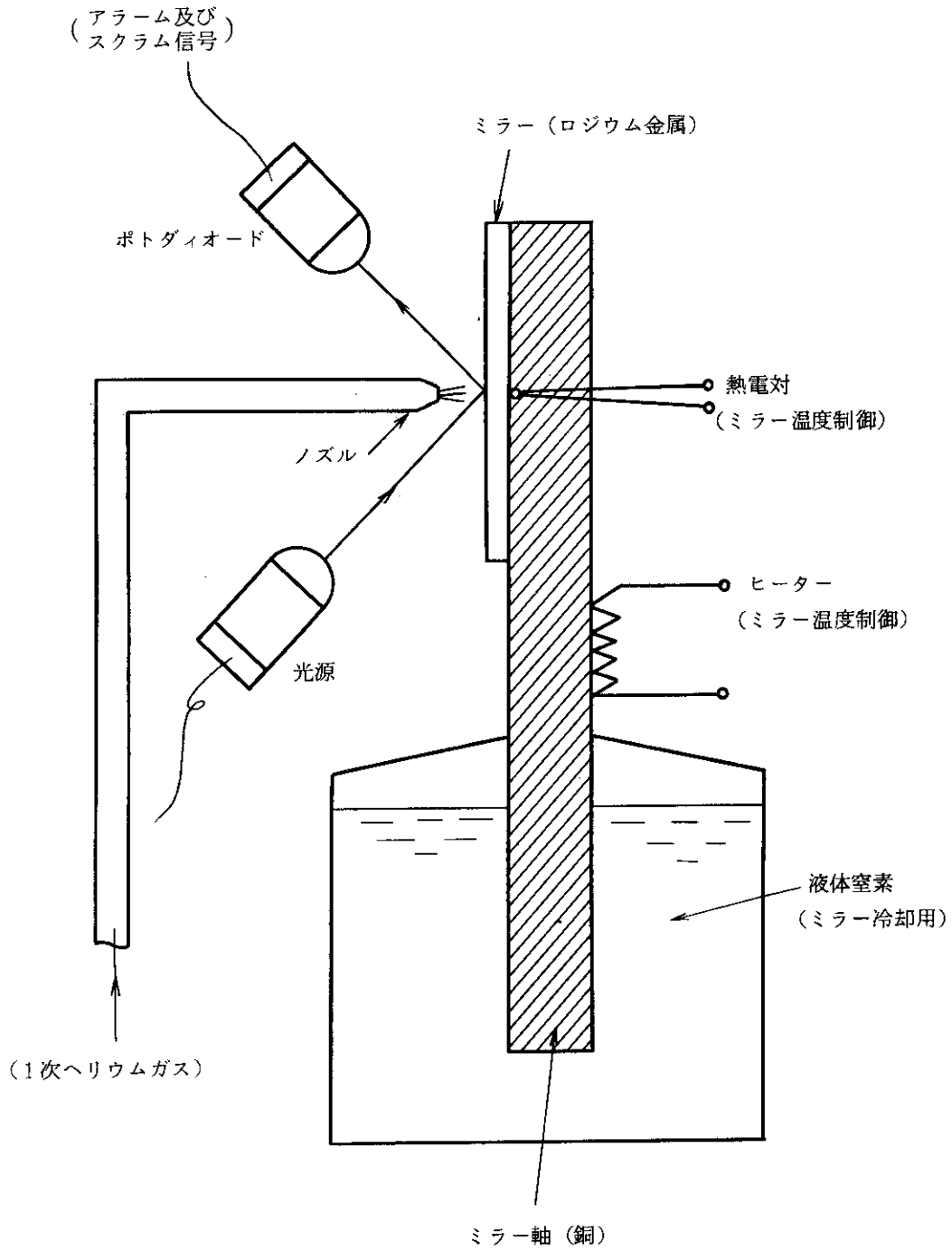


Fig. 8.1 ミラー型水分計の原理<sup>22), 23)</sup>



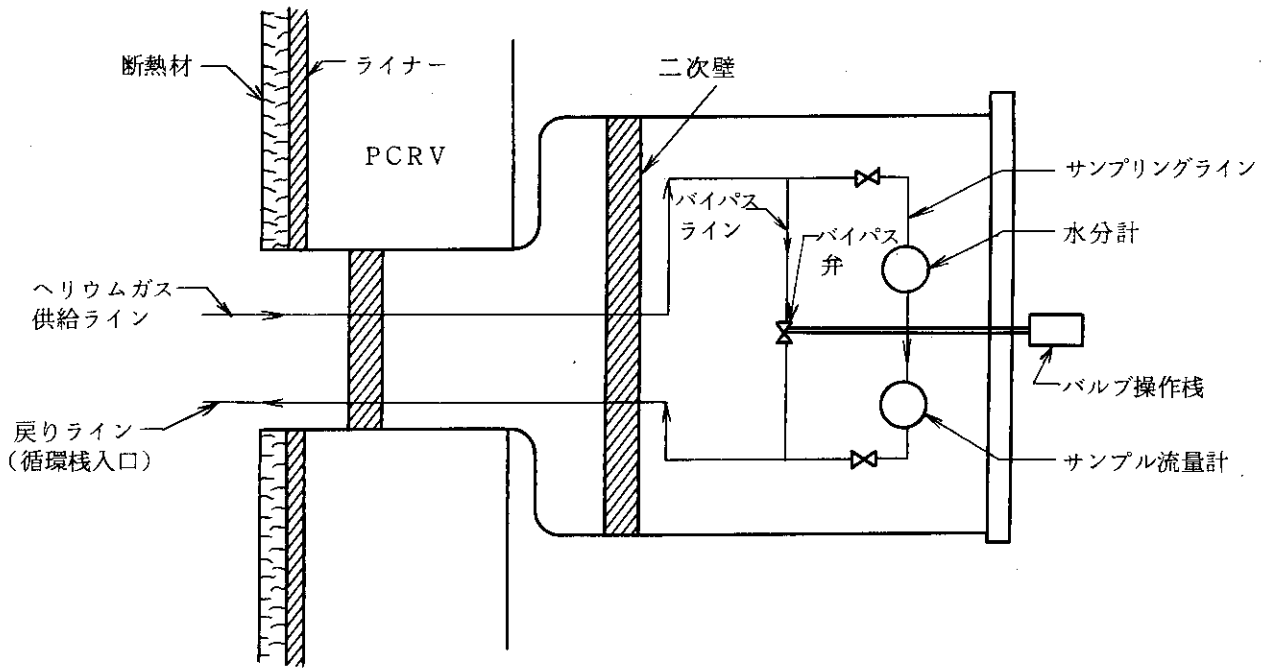


Fig. 8.2 フォートセントブレン炉水分計のサンプリングライン<sup>23)</sup>

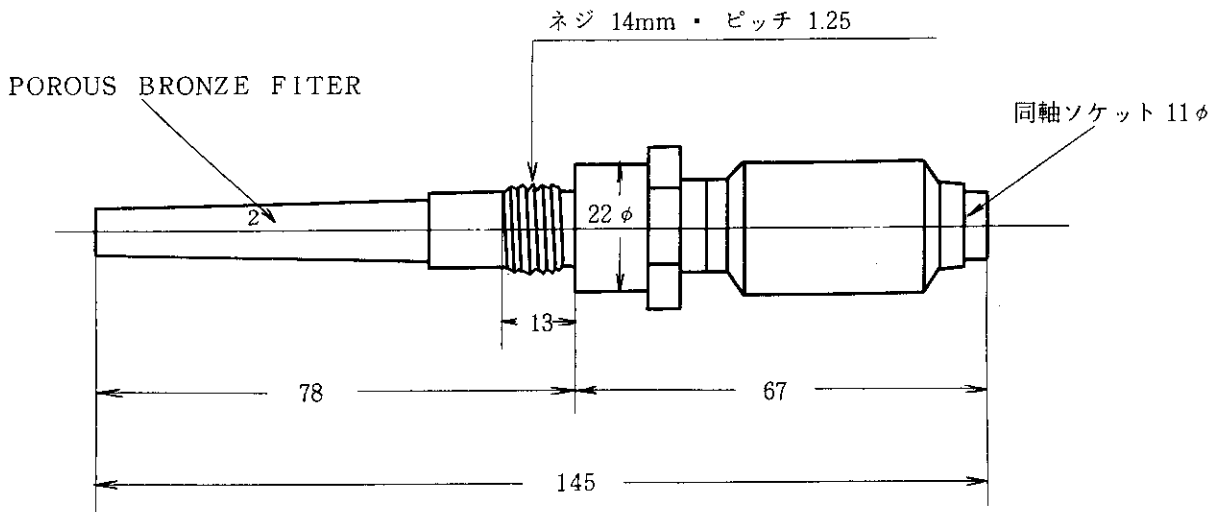


Fig. 8.3 SHAW水分計のセンサー<sup>28)</sup>

## 文 献

- 1) Linde Co.; Water Data Sheets, (1957).
- 2) A.C.Collins, B.J.Gliddon; Conference on Component Design in HTR using Helium as a coolant (1972).
- 3) J.M. Fernbacher; Ind. Eng. Chem. Fund. 11, (1972).
- 5) Linde Co.; Non-hydrocarbon Materials Data Sheets (1959).
- 6) A.M. Smith, R.E. MacPherson; ORNL-3049, 276-288 (1961).
- 7) R.M. Haag, F.J. Shipko; KAPL-955 (1953).
- 8) 戸根弘人; JAERI-M6505 (1976).
- 9) T. Murata; 空気清浄, 8, 41 (1971).
- 10) 仲川 勤; "ガス分離技術及び膜の産業利用技術資料集成" (1983).
- 11) "H.T.R. and the Dragon Project", J. of British Nuc. Eng. Soc. 5, 319 (1966).
- 12) Atomwirtschaft, 11, 217 (1966).
- 13) 40MW Prototype H.T.G.R. research and development Program; GA-1235 (1967).
- 14) M.E. Kantor; Nuclear Eng. and Design, 7, 297 (1968).
- 15) H.G. Olson, H.L. Brey, F.E. Swart; Nuclear Eng. and Design, 61, 315 (1980).
- 16) H. Harder, H. Oehme; Atomwirtschaft, 16, 238 (1971).
- 17) R.H. Simon; GA-5938 (1965).
- 18) H. Tone, K. Yokouchi, O. Baba; 質量分析, 22, 275 (1974).
- 19) Yale Strausser; 真空 12, 389 (1969).
- 20) 戸根弘人, 根小屋真一, その他; JAERI-M-8309 (1979).
- 21) 下村寛昭, 田中利幸, 高瀬和之, その他; J. of Atomic Ene. Soc. of Japan 26, 239 (1984).
- 22) 野村末雄, 青山功, 戸根弘人; JAERI-memo-4732 (1972).
- 23) H.G. Olson, H.L. Brey; Nuclear Eng. and Design 72, 139 (1982).
- 24) H. Tone; J. At. Energy Soc. Japan 7, 58 (1965).
- 25) L.G. Overholser, J.P. Blakely; TID-7622 (1966).
- 26) S. Kitani, J. Takada; J. of Nuc. Sci. and Tech. (Japan) 2, 51 (1965).
- 27) 戸根弘人; チタニウム・ジルコニウム 25, 167 (1977).
- 28) SHAW Moisture Meter カタログ