

## 小特集 トリチウム分離・濃縮技術

# 2. 気相吸着を用いた水素同位体分離

## 2. Hydrogen Isotope Separation by Gas Adsorption Processes

古藤 健司

KOTOH Kenji

九州大学大学院工学研究院

(原稿受付：2015年8月17日)

合成ゼオライトは液体窒素温度などの低温において  $H_2 < HD < HT < D_2 < DT < T_2$  の同位体効果をもって水素に対して有為な物理吸着力を示す。従って物理吸着法による同位体分離が可能であるが、吸着法は脱着操作が必要であり、従来の温度スイング吸着法では実用的な効率を期待できない。しかしながら、既に中小規模の空気分離に用いられるようになった圧力スイング吸着法を応用すれば格段の効率の向上が図れることを紹介する。

### Keywords:

hydrogen isotope separation, cryogenic adsorption, synthetic zeolite, adsorption isotherm, pressure swing adsorption

### 2.1 はじめに

ゼオライトは結晶性多孔質のアルミノケイ酸塩鉱物の総称であり、脱水されることによって結晶格子構造内に規則的な細孔と分子窓が形成される。窓径より小さい分子は結晶内に浸透して細孔内に吸着されるが、大きい分子は結晶内に進入できないので吸着されない。つまり、分子篩作用を呈する。水分子の結晶内配位空間を主たる吸着場とするゼオライトは強い極性吸着力を持っており、除湿・脱水剤として古くから工業的に用いられている。モルデナイト(斜方晶系)などの天然ゼオライトに加えて、ユニオンカーバイド社が開発した立方晶系のA型、X型、Y型などの合成ゼオライトが汎用されている[1, 2]。合成ゼオライトが“モレキュラシーブ”と通称されるのは、同社の“Molecular sieves 3A, 4A, 5A, 13X”などの商品名に由来している。合成ゼオライト研究は更に進展し、疎水性などの各種の機能性を持った製品が開発され商品化されている。

DT核融合炉開発に関連した技術[3]の中で、合成ゼオライトなどを用いた気相吸着には、水蒸気を取り扱うものとガスを処理するものがある。前者としては、トリチウム取扱施設のトリチウム安全閉込システム(室内漏洩トリチウム回収装置、グローボックス雰囲気浄化装置など)が代表的であり、雰囲気中の漏洩トリチウムを触媒酸化・吸着除去回収する方式が一般的である[4, 5]。吸着操作は回分操作であるので、操作を継続するには吸着剤の脱着再生が必要である。最近、水蒸気透過中空糸膜を用いたプロセスを採用して除湿操作の連続化を図ったトリチウム除去システムが開発されているが、バックアップとして合成ゼオライト吸着剤充填塔が依然として装備されている[5, 6]。

後者としては、プラズマ排ガス浄化システム(未燃焼DT燃料ガスの浄化回収(1段目:冷温でのメタンなどの

吸着除去、2段目:深冷温(液体窒素温度)での吸着回収・ヘリウム( $^4\text{He}$ ,  $^3\text{He}$ 除去))が考えられるが、パラジウム水素透過膜を用いた連続操作プロセスが効率的であり専ら採用されている。また、炉心プラズマ高真空排気クライオソープションポンプは極低温(液体ヘリウム温度)吸着装置であり、温度スイング吸着操作によって大容量真空排気を実現し、核融合炉開発の当初から燃焼プラズマ排気ポンプとして採用されてきた[5]。微量ヘリウムを含むDT未燃焼ガスのクライオソープションポンプの操作において同位体効果が昇温脱気過程で顕著に現れる。温度上昇に伴って軽成分が優先的に脱着脱気してくる。この効果を同位体分離に利用することもできるが、分離仕事は水素同位体分離システムに任せ、本務を優先し、速やかな昇温脱気再生操作による排気性能の維持・向上に努めるのが工学的に得策である。

液体窒素温度(77.4 K)で合成ゼオライトは水素同位体ガスを有効に物理吸着する。この吸着系の吸着脱着操作はDT燃料処理系プロセスラインの回分式移送ポンプに利用できる。多成分吸着挙動としては軽成分より重成分が選択的に吸着される。例えば、 $H_2$ - $D_2$ 系では常圧気相に対して2.0前後の吸着平衡同位体分離係数が得られている。このことは、合成ゼオライトは比較的安価な冷媒温度77.4 Kにおいて水素同位体ガスを吸着すると同時に、工学的に有為な同位体分離仕事を成し得ることを示している。しかしながら、吸着法は回分操作であり、処理を継続するには吸着剤の脱着再生を行う必要がある。

吸着剤の再生法としては、高い活性化率が得られる“昇温脱着・冷却再生”が古くからの常套的な手段である(温度スイング吸着法(Temperature Swing Adsorption(TSA) processまたはThermal Swing Adsorption process))。しか

Faculty of Engineering, Kyushu University, FUKUOKA 819-0395, Japan

author's e-mail: kotoh@nucl.kyushu-u.ac.jp & kotoh@har.bbq.jp

しながら、本法はこの脱着再生操作に時間を要し、その昇温工程と冷却工程の所要時間が本法の処理効率向上の限界を律している。したがって、TSA 法は微少・少量の吸着分離には簡便であり適しているが、工業的処理に用いる場合は深冷蒸留などの他の分離法に対して優位性を持ち難い。

一方、脱着活性化の高率化は犠牲にして“減圧脱着再生”あるいは“減圧脱着・昇圧再生”によって脱着再生工程の時間短縮を図り、処理効率の格段の向上を目論む方法が“圧力スイング吸着法 (Pressure Swing Adsorption (PSA) process)”である。種々のガス吸着系について、本法ガス分離プロセスが開発され、各種 PSA システムが工業化に至っている。特に、合成ゼオライトを用いた空気分離 PSA は有効であり、既に中小規模の酸素製造装置として随所に普及している [7-10]。しかしながら、本法は水蒸気/合成ゼオライトなどの強吸着系では有効な脱着率が得られないので不向きである。

DT 核融合炉燃料サイクルでは、回収・精製された未燃焼排ガス中に混在する同位体不純元素：H 成分を除去するための水素同位体分離システムは必要要素である。また、トリチウム増殖ブランケットからの T 回収ガスの H 浄化のための同位体分離システムも必要である。これら DT 燃料サイクルの水素同位体分離システムには、既に技術的完成度の高い深冷蒸留法が最有力と考えられている [3, 5]。

一方、著者らは、水素同位体 ( $H_2$ ,  $D_2$ , HD) / 合成ゼオライト低温吸着挙動を実験観察し解析検討を行ってきた。その結果、本吸着系の 77.4 K 深冷 PSA 操作は有為の水素同位体分離仕事を成し得ることがわかった。よって、合成ゼオライト (5A あるいは 13X) 充填塔を用いた PSA 水素同位体分離実験装置を製作し、 $D_2$ - $H_2$  混合ガス試料からの  $H_2$  単離回収 / 試料中の  $D_2$  濃縮の実験検証を行った。一連の PSA 実験解析研究の成果を踏まえ、実用化への設計操作問題を検討した。吸着分離-減圧脱着-昇圧再生の回分操作を複数塔の輪番組合せによって擬連続化した多塔式深冷 PSA 水素同位体分離プロセスを提案した。本式システムについて、核融合科学研究所 (NIFS) で概念設計が進められているヘリカル型核融合原型炉 (FFHR) の燃料サイクルに求められる未燃焼ガス同位体分離処理量を基準にスケールアップしたところ、工業的成立性が十分見込まれる設備規模になると予想される。

簡素な設備構造で廉価な冷媒を利用する深冷 PSA 水素同位体分離システムは、深冷蒸留システムに比較して、設備・運転・維持費を格段に軽減でき、更に、ガス処理プロセスなので DT 燃料のプロセスインベントリを低減できる。このことは、放射性可燃物取扱事故リスクを抑制すると共にトリチウム初期装荷必要量を削減できることを示唆する。このように、DT 核融合炉燃料サイクルの同位体分離操作に気相吸着法も有望であり、ここに紹介する。

## 2.2 吸着平衡特性

合成ゼオライトなどを用いた気相吸着法による水素同位体分離プロセスを考える場合、先ず、同位体単成分の吸着平衡特性 (吸着等温線) を知る必要があり、そして少なく

とも 2 成分以上の吸着平衡挙動を実験および解析的に把握する必要がある。吸着塔を用いた分離操作を行う場合は吸着剤充填床内の物質移動とその特性、つまり、物質移動係数などの特性因子とその依存性を把握しておく必要がある。

### 2.2.1 水蒸気吸着

蒸気の物理吸着現象は気液平衡関係の化学熱力学を拡張することで説明できる。したがって、水素同位体水 6 成分の吸着力の強さは比揮発度 (各成分の平衡蒸気圧比) の逆数に順じて  $H_2O < HDO < HTO < D_2O < DTO < T_2O$  の関係にあり、その比率 (吸着平衡分離係数に相当) は吸着ポテンシャルエネルギー差に起因する効果が加わって比揮発度の逆数より若干高目になる。しかしながら、水素同位体水は 次式： $H_2O + D_2O \rightleftharpoons 2 HDO$ ,  $D_2O + T_2O \rightleftharpoons 2 DTO$ ,  $H_2O + T_2O \rightleftharpoons 2 HTO$  の可逆反応は迅速でありほぼ平衡状態で存在するので、水素同位体分 (H, D, T) の分離係数は複雑になる。更に、吸着平衡における多成分挙動を推算するには単成分の吸着等温線を知る必要があるが、HDO, DTO, HTO の実測は不可能である。加えて、天然の酸素には  $^{17}O$  が 0.037%,  $^{18}O$  が 0.204% 含まれており、例えば  $D^{16}O$  や  $HT^{16}O$  と質量効果の近接した  $H^{18}O$  も存在している。よって、水分吸着系における水素同位体分離挙動の詳細な把握は極めて困難である。

トリチウム安全閉込システムでの T 汚染水蒸気 (極微量 HTO 含有) 除去回収では、 $H_2O$  に対する HTO の吸着分離係数が 1.1 程度であるので、汚染水分からの  $H_2O$  単離開放 / 汚染水分の濃縮減容回収の分離操作は非効率的である。したがって、トリチウム除染は専らバルク水分を吸着除去する (同位体分離をしない) 処理法が得策で一般的である。

### 2.2.2 ガス吸着

#### ・吸着等温線

77.4 K における合成ゼオライト (Synthetic Zeolite) 4A, 5A, 13X は水素同位体分子を有為に物理吸着して Langmuir 型等温線の平衡特性を示す。同位体効果として、吸着力の強さは次の関係： $H_2 < HD < HT < D_2 < DT < T_2$  にある [11]。吸着等温線は吸着処理プロセスを検討する上で最も重要な物性情報であり、プロセスの設計操作の工学では吸着等温式で整理された数値情報が求められる [12-15]。

吸着平衡についての理論的研究は古くからなされている。表面吸着説に基づく Langmuir 式や Polanyi の吸着ポテンシャル論に拠った Dubinin-Astakhov 半経験式、経験的相関式の Freundlich 式など、近年には、統計熱力学に基づく Ruthven 式など、多くの吸着式が提案されている。しかし、吸着剤内吸着場は活性的に不均一であり、吸着モデルを更に理論付けるには不均一エネルギー分布関数を考慮した記述が求められる。しかしながら、多くの相関因子からなる詳細な理論モデル式も、例えば、Clausius-Clapeyron の式から求められる吸着熱の吸着量依存性などの化学熱力学的な傍証がなければ、単なる複雑な経験式に過ぎないということになってしまい、理論モデルの意味を失う [16]。

#### ・多成分吸着挙動

同位体分離に応用するには多成分吸着平衡挙動を把握しておかなければならない。多成分挙動を記述するには各成

分の吸着等温線が既知でなければならない。最も簡単な吸着式として Langmuir モデルを拡張した Markham-Benton 式が挙げられる。その他、いくつかの経験的数学モデル式が提案されている。理論的な推算法としては、吸着相を理想溶液と仮定し、熱力学に基づいてラウール則 (Raoult's law) を適用した Myers-Prausnitz の理想溶液理論 (Ideal Adsorbed Solution Theory) が代表的である [14-17]。

### 2.2.3 水素同位体吸着特性

#### ・H<sub>2</sub> および D<sub>2</sub> の吸着等温線

水素同位体ガスは可逆反応： $H_2 + D_2 \rightleftharpoons 2HD$ ,  $D_2 + T_2 \rightleftharpoons 2DT$ ,  $H_2 + T_2 \rightleftharpoons 2HT$  の下に存在する。反応は遅鈍であるが、白金やパラジウムなどの触媒の存在下では迅速である。従って、H<sub>2</sub>, D<sub>2</sub>, T<sub>2</sub> の吸着等温線は実測できるが、HD, HT, DT の単離は極めて困難であり吸着等温線は実測不可能である。液体窒素などの冷媒温度での H<sub>2</sub> および D<sub>2</sub> の各種ゼオライトへの吸着実験データは比較的早くから報告されている。特に液体窒素冷却下の T<sub>2</sub> 吸着平衡データ [18] は、本格的トリチウム取扱施設でしか取得できない貴重な学術情報である。しかしながら、T<sub>2</sub> の測定系では崩壊熱の影響を除ききれないので、参考にはなるが 77.4 K での H<sub>2</sub> および D<sub>2</sub> の吸着等温線とは温度条件が厳密には異なる。

著者らは [19, 20], 図 1 に示す定容式吸着平衡測定装置を用いて、液体窒素および液体アルゴン温度における合成ゼオライト 4A, 5A, 13X (SZ-4A, SZ-5A, SZ-13X) への H<sub>2</sub> および D<sub>2</sub> の吸着平衡を気圧  $10^{-2} \sim 10^5$  Pa の広範囲で測定した。例として、図 2 に SZ-5A への吸着等温線を示す。図中プロットは実測値であるが、平衡圧力は熱遷効果 (Thermal Transpiration Effect) [21] を考慮して校正されている。実線は著者らが提案した“吸着ポテンシャル場空孔気液充填モデル”による吸着式：

$$\frac{Q}{Q_s} = \exp \left[ \frac{\mu_a - \bar{\mu}}{RT} \left\{ 1 - \int_{-\infty}^{\mu_a} G(\mu) d\mu \right\} - \frac{\sigma^2}{RT} G(\mu_a) \right] \quad (1)$$

による近似曲線である。ここで、 $Q$  と  $Q_s$  は平衡吸着量と飽和量を表す。本吸着モデルでは、平衡圧  $P$  における気相自

由エネルギーを  $\mu = RT \ln P$  と定義し、対応する吸着ポテンシャルの分布を関数  $G(\mu)$  で特徴付けられると仮定している。そして、 $\mu = \mu_a$  で吸着平衡にある吸着場空間内の吸着相は、 $\mu \leq \mu_a$  の空間域では拘束された凝縮相的状态、 $\mu > \mu_a$  の空間域では拘束までには至らない気相的状态の混相を想定している。本解析では吸着ポテンシャル分布に正規分布：

$$G(\mu) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{(\mu - \bar{\mu})^2}{2\sigma^2} \right\} \quad (2)$$

を仮定した。したがって、本吸着式は吸着ポテンシャル分布の平均値  $\bar{\mu}$  と標準偏差  $\sigma$  の 2 つのエネルギー因子と絶対容量  $Q_s$  の 3 つの特性因子で吸着等温線を表現している。

式 (1) は、図中の H<sub>2</sub> および D<sub>2</sub> の広範囲の実験値分布を全域に亘って忠実に近似している。各成分の等温線に対する特性値を表 1 に示す。これらは Marquardt 法による Curve-fitting 解析によって決定した。ただし、① H<sub>2</sub> と D<sub>2</sub> に対する  $Q_s$  は共通で、② 吸着ポテンシャル分布は相似である：

$$\frac{\bar{\mu}_{H_2} - \mu_0}{\sigma_{H_2}} = \frac{\bar{\mu}_{D_2} - \mu_0}{\sigma_{D_2}} \quad (3)$$

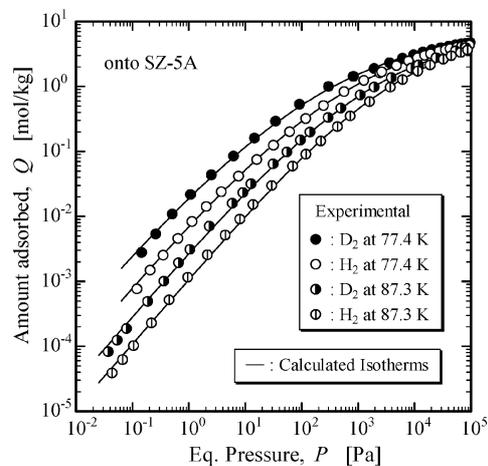
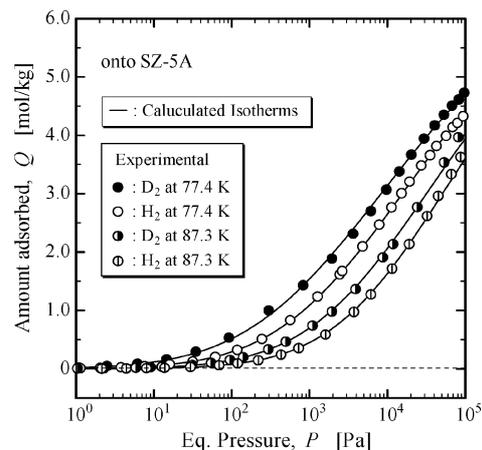


図 2 77.4 K および 87.3 K における SZ-5A への H<sub>2</sub> と D<sub>2</sub> の吸着等温線。

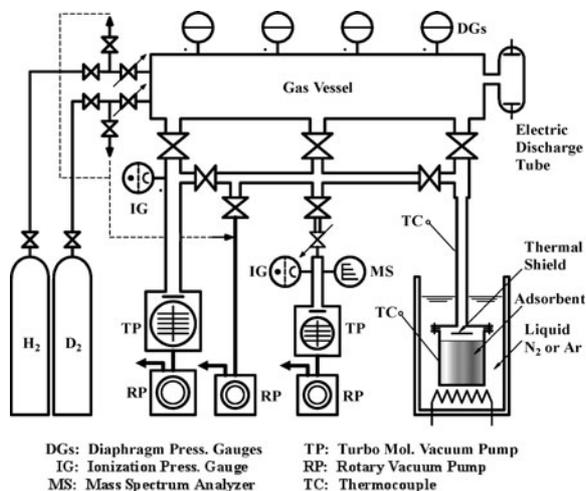


図 1 定容式吸着平衡測定装置。

表1 77.4 KにおけるSZ-5Aへの水素同位体吸着特性因子。

	$E^0$ [kJ/mol]	$\bar{\mu}$ [kJ/mol]	$\sigma$ [kJ/mol]	$\mu_0$ [kJ/mol]	$Q_S$ [mol/kg]
H <sub>2</sub>	25.96	4.291	3.071	12.09	6.495
HD	22.53	3.926	3.215		
HT	21.26	3.790	3.268		
D <sub>2</sub>	18.44	3.490	3.387		
DT	16.85	3.321	3.453		
T <sub>2</sub>	15.10	3.135	3.527		

を解析条件とした。ここで、吸着凝縮相の相圧を  $P_0$  として基準ポテンシャル  $\mu_0 = RT \ln P_0$  を定義した。両対数表示での相関性と片対数表示での相関性の両者を満足するように重みを付け適宜調整して最適値を決定した。

・HD, HT, DT および T<sub>2</sub> の吸着等温線

物理吸着力における差異は分子の零点エネルギー  $E^0$  に依存することから[11]、水素同位体  $i$  成分と  $j$  成分の吸着ポテンシャル分布平均値の差は零点エネルギー差  $\Delta E_{j-i}^0$  に比例する：

$$\bar{\mu}_i - \bar{\mu}_j = \bar{\kappa}_a \Delta E_{j-i}^0 \quad (4)$$

と仮定した。相関係数  $\bar{\kappa}_a$  は同位体間の共通因子であり、H<sub>2</sub> と D<sub>2</sub> の実験解析値の関係から決定できる。したがって、既知の  $\bar{\mu}_{H_2}$  あるいは  $\bar{\mu}_{D_2}$  を基準に式(3)から  $\bar{\mu}_{HD}$ ,  $\bar{\mu}_{HT}$ ,  $\bar{\mu}_{DT}$ ,  $\bar{\mu}_{T_2}$  が求まり、式(4)で  $\sigma_{HD}$ ,  $\sigma_{HT}$ ,  $\sigma_{DT}$ ,  $\sigma_{T_2}$  が決まる。77.4 K での結果を表1に示す。推算されるHD, HT, DT, T<sub>2</sub> の吸着等温線の妥当性は H<sub>2</sub>-HD-D<sub>2</sub> 系吸着平衡実験で得られる同位体分離係数：

$$S_{F,HD/H_2} = (x_{HD}/x_{H_2}) / (y_{HD}/y_{H_2}) \quad (5a)$$

または

$$S_{F,D_2/HD} = (x_{D_2}/x_{HD}) / (y_{D_2}/y_{HD}) \quad (5b)$$

の挙動と IAS 理論に基づく多成分吸着解析結果との整合性によって裏付けられる。ここで、 $x_i$  と  $y_i$  は  $i$  成分の吸着相組成と気相組成を表す。

2.2.4 多成分吸着における水素同位体分離

図1の吸着装置を用いて H<sub>2</sub>-D<sub>2</sub> および H<sub>2</sub>-HD-D<sub>2</sub> 混合ガス吸着平衡実験を行った。3成分実験では、定容槽に仕込まれた H<sub>2</sub>-D<sub>2</sub> 混合ガスを付設の放電管で H<sub>2</sub>+D<sub>2</sub> ⇌ 2HD の反応を右へ起こさせて H<sub>2</sub>-HD-D<sub>2</sub> 系試料を作成した。混合試料の初期組成と吸着平衡達成後の気相組成を質量分析計で測定し、吸着系の総括物質収支から吸着相組成を決定した。例として、77.4 K でのSZ-5Aへの水素同位体 2, 3 成分混合ガス吸着平衡における分離係数を図3に示す。気相組成は任意であるが全圧 1~10<sup>5</sup> Pa の広い吸着域で観察した値をプロットしている。一方、IAS 理論に則り、H<sub>2</sub>, D<sub>2</sub>, HD の吸着等温線を用いて計算したトレーサー混合系の分離係数の推算値を実線または破線で示している。ここでは、 $S_{F,D_2/H_2}$ ,  $S_{F,HD/H_2}$ ,  $S_{F,D_2/HD}$  の推算値曲線が実験値のプロットを良く近似している。特に、 $S_{F,HD/H_2}$  と  $S_{F,D_2/HD}$  についての実験値と解析値の良い近似は、HD 吸着等温線の推算の

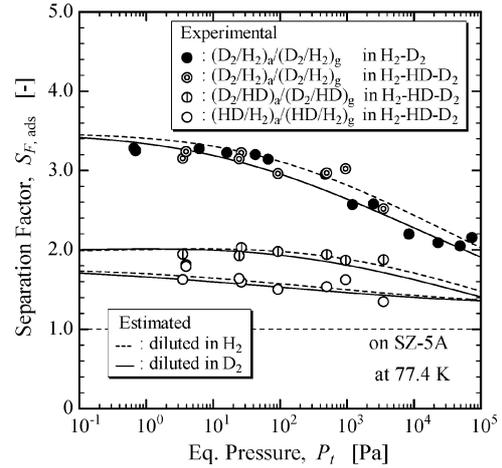


図3 77.4 KにおけるSZ-5AへのH<sub>2</sub>-D<sub>2</sub>系2成分およびH<sub>2</sub>-HD-D<sub>2</sub>系3成分吸着平衡における同位体分離係数。

妥当性を立証しており、相関係数  $\bar{\kappa}_a$  の信頼度を裏書している。

・多成分吸着理論と解析

IAS 理論では、吸着相を理想溶液とみなし、Gibbs-Duhem 式に類似の次式をもって熱力学的状態を仮定する：

$$\Pi = \frac{RT}{V_S} \int_0^{P_s} Q d \ln P \quad (6)$$

ここで、吸着場圧  $\Pi$  を定義する。ゼオライトなどの空孔充填吸着系であれば  $V_S$  は空孔容積、表面吸着系であれば吸着飽和面積であり  $\Pi$  は 2 次元圧 (広がり圧力: Spreading Pressure) となる。そして、平衡での混合吸着相における各成分の関係として

$$\Pi_1 = \Pi_2 = \dots = \Pi_n \quad (7)$$

が成立しており、この条件での各成分の平衡圧を  $P^*$  とすると

$$P_1 y_1 = P_1^* x_1, P_2 y_2 = P_2^* x_2, \dots, P_n y_n = P_n^* x_n \quad (8)$$

のラウール則が適用できる。  $P_t$  は平衡全圧であり、吸着平衡全量  $Q_t$  は各成分の吸着等温式による  $Q_i(P_i^*)$  と次の関係にある：

$$\frac{1}{Q_t} = \frac{x_1}{Q_1(P_1^*)} + \frac{x_2}{Q_2(P_2^*)} + \dots + \frac{x_n}{Q_n(P_n^*)} \quad (9)$$

しかしながら、式(7), (8), (9)の関係を満足する解を得るために Newton-Raphson 法などによる収束計算を必要とする。

これまでのところ、77.4 K におけるSZ-4A, SZ-5A, SZ-13X, 加えて 87.3 K におけるSZ-4A, SZ-5A による H<sub>2</sub>, HD, HT, D<sub>2</sub>, DT, T<sub>2</sub> の吸着等温線が把握できており 6 成分吸着平衡挙動を予測できる[19, 20]. その他として、河村らのゼオライトへの水素同位体 6 成分の深冷吸着等温線の報告[22]は貴重であるが、残念ながら同位体効果の相関などに理論性が乏しい。

### 2.3 圧カスイング吸着法水素同位体分離

PSA 水素同位体分離システム開発研究の当初の目的は、NIFS での LHD-HH 実験への天然水素からの高純度  $H_2$  の分離生産・供給であったが (HD を 0.03% 含む天然水素ガスの吸着操作による純  $H_2$  の単離回収の連続・高速化)、燃焼プラズマ排気 DT 燃料からの不純物 H 成分除去システムへの応用性に着眼し、図 4 に示す PSA プロセスの実証研究を行った。実験では 1%  $D_2+H_2$  混合ガスを用いて行った。

#### 2.3.1 PSA 水素同位体分離プロセス操作手順

図 4 の PSA プロセスは、①純  $H_2$  が吸着充填されている深冷吸着塔への原料水素ガスの供給で始まる。② 77.4 K での合成ゼオライトの  $D_2/H_2$  吸着平衡分離係数が 2 程度とすると吸着相には気相に対して約 2 倍  $D_2$  が濃縮されるので、(吸着塔内ステップ状濃度分布を仮定した場合) 吸着塔から  $D_2$  が破過するまでに純  $H_2$  塔吸着容量の約 2 倍の原料を塔に供給できる。その間、初期充填  $H_2$  に加えて、吸着容量と等量の純  $H_2$  が塔より単離流出する。③吸着塔を真空脱着再生する (15%程度が未脱着)。④純  $H_2$  で塔内を昇圧する (未脱着  $D_2$  を塔入口方向へフラッシュバック)。⑤再生吸着塔へ原料を供給する (2 サイクル目からは再生率が 85%程度程度の吸着塔で吸着操作が継続される)。

#### 2.3.2 深冷 PSA 法水素同位体分離塔破過特性実験解析

著者らは、合成ゼオライト SZ-4A, SZ-5A および SZ-13X について、単塔式 PSA 実験装置 (NIFS および九大) を用いて水素同位体吸着破過実験研究を行ってきた。その成果として、DT 核融合炉燃料サイクルへの応用を考慮した水素同位体多成分分離 PSA システムの設計操作問題に供する有用な工学データならびに学術情報を蓄積してきた [21-34]。

#### 2.3.3 多塔式 PSA 法水素同位体分離装置

これまでの経験と得られた知見を基に「多塔式 PSA 水素同位体分離実験装置」を設計・製作し、平成 25 年度に完成させた。核融合研究所に設置されている。図 5 にスナップ写真を示す。

### 2.4 おわりに

NIFS 共同研究として長年に亘って深冷 PSA 法水素同位

体分離プロセス開発研究を行ってきた。これまでの知見から、DT 核融合炉燃料サイクル水素同位体分離システムへの PSA プロセスの応用性が見えてきた。NIFS に新規設置された多塔式 PSA 水素同位体分離実験装置を使った連続運転実験など、開発研究の格段の進展に期待したい。

### 参考文献

- [1] D.W. Breck, *Zeolite Molecular Sieves: Structure, Chemistry and Use* (John Wiley & Sons Inc., 1974).
- [2] 富永博夫：ゼオライトの科学と応用 (講談社, 1993)。
- [3] 松田慎三郎他：プラズマ・核融合学会誌 87, 128 (2011)。
- [4] K. Kotoh and K. Kudo, *J. Nucl. Sci. Technol.* 34, 1099 (1997)。
- [5] 関昌弘編：核融合炉工学概論 (日刊工業新聞社, 2001) p.197, 205, 225, 229。
- [6] K. Munakata *et al.*, *J. Plasma Fusion Res.* 10, 36 (2013)。
- [7] 川井利長：圧カスイング吸着技術集成 (工業技術会, 1986)。
- [8] D.M. Ruthven, *Pressure Swing Adsorption* (VCH, 1994)。
- [9] 広瀬勉：化学工学 61, 579 (1997)。
- [10] 竹内雅監：最新吸着技術便覧 (NTS Inc., 1999)。
- [11] P.C. Souers, *Hydrogen Properties for Fusion Energy* (Univ. of California Press, Ltd., London, 1986) p.17, 158。
- [12] 北川浩, 鈴木謙一郎：吸着の基礎と設計 (槇書店, 1977)。
- [13] 化学工学会編：化学工学便覧改訂七版 (丸善, 2011)。
- [14] D.M. Ruthven, *Principles of Adsorption and Adsorption Processes* (John Wiley & Sons Inc., 1984)。
- [15] R.T. Yang, *Gas Separation by Adsorption Processes* (Butterworths, Boston, 1987)。
- [16] A.L. Myers 他：化学工学 50, 151 (1986)。
- [17] A.L. Myers and J.M. Prausnitz, *AIChE J.* 11, 121 (1965)。
- [18] Y. Kawamura *et al.*, *Fusion Sci. Technol.* 37, 54 (2000)。
- [19] K. Kotoh and K. Kudo, *Fusion Sci. Technol.* 48, 148 (2005)。
- [20] K. Kotoh *et al.*, *Fusion Eng. Des.* 85, 1928 (2010)。
- [21] K. Kotoh *et al.*, *Fusion Sci. Technol.* 56, 179 (2009)。
- [22] K. Kawamura *et al.*, *Fusion Sci. Technol.* 56, 168 (2009)。
- [23] T. Sugiyama *et al.*, *Fusion Sci. Technol.* 48, 163 (2005)。
- [24] K. Kotoh *et al.*, *Fusion Sci. Technol.* 54, 163 (2008)。
- [25] K. Kotoh *et al.*, *Fusion Sci. Technol.* 54, 415 (2008)。
- [26] K. Kotoh *et al.*, *Fusion Sci. Technol.* 56, 173 (2009)。

PSA水素同位体分離プロセス

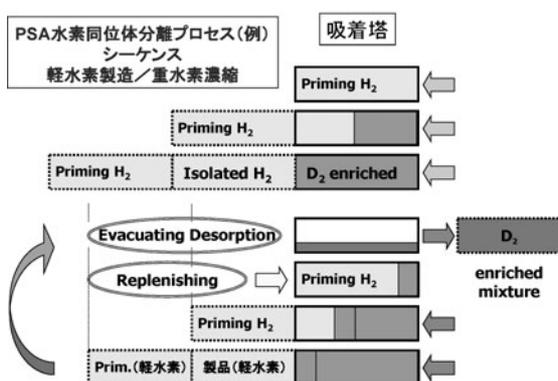


図 4 PSA 水素同位体分離プロセスのサイクル操作手順。

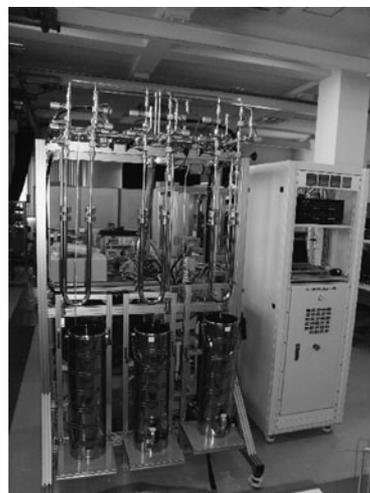


図 5 多塔式 PSA 水素同位体分離実験装置。

- [27] K. Kotoh *et al.*, Fusion Sci. Technol. **56**, 184 (2009).
- [28] K. Kotoh *et al.*, Fusion Eng. Des. **85**, 1992 (2010).
- [29] K. Kotoh *et al.*, Fusion Sci. Technol. **60**, 771 (2011).
- [30] K. Kotoh *et al.*, Fusion Sci. Technol. **60**, 1355 (2011).
- [31] K. Kotoh *et al.*, Fusion Sci. Technol. **60**, 1436 (2011).
- [32] K. Kotoh *et al.*, Fusion Eng. Des. **86**, 2799 (2011).
- [33] K. Kotoh *et al.*, Fusion Eng. Des. **88**, 2799 (2013).
- [34] K. Kotoh *et al.*, Fusion Sci. Technol. **67**, 439 (2015).