JAERI-Tech
98-003

シビアアクシデント時の強放射能FPの挙動予測に関する研究
―スコーピング実験とCs、Ba、Srに関する基礎的知見―

1998年2月

山脇道夫*・Jintao HUANG*・利根川雅久*・小野双葉*
安本　勝*・山口憲司*・杉本　純

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは，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，日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195　茨城県那珂郡東海村）あて，お申し越しください。なお，このほかに財団法人原子力弘済会資料センター〒319-1195　茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institure, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1998

編集兼発行　日本原子力研究所
印　　　刷　㈱原子力資料サービス

シビアアクシデント時の強放射能ＦＰの挙動予測に関する研究
-スコーピング実験とCs、Ba、Srに関する基礎的知見-

日本原子力研究所東海研究所安全性試験研究センター原子炉安全工学部
山脇　道夫*・Jintao　HUANG*・利根川雅久*・小野　双葉*・安本　勝*
山口　憲司*・杉本　純

（1998年1月5日受理）

シビアアクシデント時のソースタームを精度良く評価するため、原研では照射済燃料からのＦＰ放出実験（ＶＥＧＡ）計画を開始している。燃料から放出されるＦＰは、化学形に応じて蒸気圧が異なるため、それに応じて大きく異なった移行挙動を示す。そこで、燃料から放出されたＦＰの高温雰囲気下での化学形及び蒸気圧を精度良く知ることにより、捕集装置までのＦＰ移行挙動を明らかにするとともに、実炉での挙動を評価するためのモデルの開発を目指したＶＥＧＡ計画の補完的な基礎研究を開始した。

本研究では、ＦＰを模擬したCs、Ba、Sr化合物をクヌッセンセルに導入し、水蒸気や水素の存在する高温雰囲気でのＦＰの化学形と蒸気圧を求めるためのスコーピング実験を実施し、ソースターム評価上重要なCs、Ba、Srについて基礎的な知見を得た。

東海研究所：〒319-1195　茨城県那珂郡東海村白方白根2-4
＊　東京大学

Study of Prediction of Fission Product Behaviors in Severe Accident
-Scoping experiment and basic findings of Cs, Ba and Sr-

Michio YAMAWAKI*, Jintao HUANG*, Masahisa TONEGAWA*, Futaba ONO*, Masaru YASUMOTO*, Kenji YAMAGUCHI* and Jun SUGIMOTO

Department of Reactor Safety Research
Nuclear Safety Research Center
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received January 5, 1998)

Fission product release experiment (VEGA: Verification Experiments for fission product Gas/Aerosol release) has been started at JAERI, aiming at accurate source term evaluation during severe accident. Behaviors of fission products released from fuels largely differ with species due to different vapor pressures, which depend on the chemical forms. In response with VEGA, a complementary and basic experiment has been initiated in order to clarify the fission product behaviors up to FP collection chamber by estimating with high accuracy the chemical forms and vapor pressure of released fission products under high temperature environment, and to develop analytical models to evaluate the fission product behaviors in reactor situations.

In the present study, as a first step a scoping experiment has been conducted for the estimation of chemical forms and vapor pressure of fission products under high temperature conditions, by introducing oxide compounds of Cs, Ba, and Sr into Knudsen cell. Basic findings have been obtained for Cs, Ba, and Sr, which are important species for the source term evaluation.

Keywords: Severe Accident, Fission Product, Gas/Aerosol, Source Term, Chemical Form, Vapor Pressure, Irradiated Fuels, VEGA

---

* University of Tokyo

目　次

Contents

1．はじめに

1．1　研究概要

シビアアクシデント時に燃料から放出されたＦＰは、その化学形に応じて大きく異なった移行挙動を示す。これは、その化学形に応じて蒸気圧が大きく変化することが、主な要因となっている。従って、シビアアクシデント時ソースタームを精度良く評価するためには、シビアアクシデント条件を模擬した水蒸気や水素を含む高温条件でのＦＰの化学形および蒸気圧を精度良く知る必要がある。

原研の照射済み燃料からのＦＰ放出実験(VEGA)計画では、実際に軽水炉で照射された燃料からのＦＰ放出挙動を調べる。本研究では、ＶＥＧＡ計画の基礎実験として、燃料から放出されたＦＰの捕集装置までの移行挙動、さらには実炉での挙動を評価するためのモデルの開発と検証を３年計画で行うこととしている。*

1．2　研究内容

本研究における実験では、シビアアクシデント時に燃料から放出されたＦＰの高温水蒸気中および高温水素中での化学形と蒸気圧を高温質量分析計を用いて調べる。ＦＰを模擬したＣｓ，Ｂａ，Ｓｒ 化合物をクヌッセンセルに導入し、水蒸気や水素の存在する高温雰囲気でのＦＰの化学形と蒸気圧を実験的に求める。

初年度である平成８年度は、クヌッセンセルに水蒸気及び水素を導入するための装置の改造を行い、スコーピング実験を開始し、ソースターム評価上特に重要なＣｓ，Ｂａ，Ｓｒ等について基礎的な知見を得ることとした。

＊本研究は、東京大学が原研からの平成８年度委託研究として実施した成果である

2．雰囲気制御型高温質量分析計

2．1　高温質量分析装置

高温質量分析計は気相分子種の同定が可能であり、特に多種類の分子種が共存する場合には圧倒的に有利であり、またこのような場合における定量性も分光学的方法などの他の方法よりはるかに優れている。

質量分析装置は機能上（1）試料系、（2）イオン源、（3）分析部、（4）検出部、の各部に分けられる。

2．1．1　試料系

高温の蒸気を得る方法としては真空中にさらされた試料の表面から蒸発させるラングミューアー法とクヌーセンセルを用いる方法の二つがあるが、ラングミューアー法は

（1）均一な試料温度を得ることが難しい

（2）圧力の絶対値をえるための校正方法が複雑である

などの理由から一般的にはクヌーセンセル法が用いられる。

2．1．2　イオン源

試料系から導入された蒸気種（原子、分子）からイオンを作るシステムである。一般に高温質量分析法においては電子衝撃型のイオン源が用いられており、本実験においてもこの方式を採用している。この方式は衝撃電子のエネルギーを連続的に変化させられるので、イオン化効率曲線の作成が可能であり、重要な情報源になる。なお、イオン源の好ましい条件として

（1）生成されたイオンのエネルギーが単一で効率がよい。

（2）イオン化の際、なるべく分解（フラグメンテーション）を起こさずに中性蒸気種と同一構造のイオンを生成する。

等が挙げられる。

2．1．3　分析部

質量分析計には磁場走査型や四重極型、マスフィルター型、オメガトロン型、飛行時間型などがあるが、本研究で使用したのは磁場走査型である。図2．1に扇形磁場型質量分析計の概要を示す。

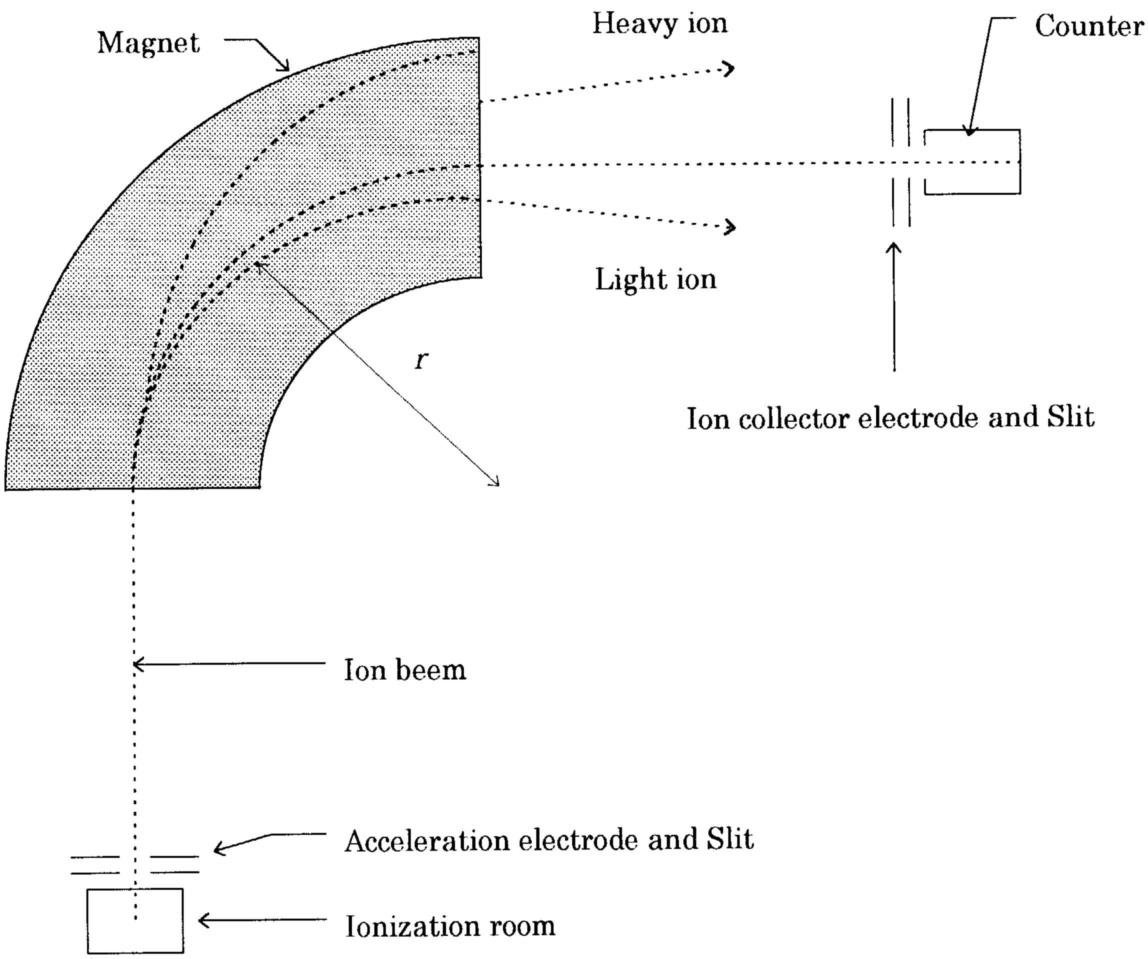


図2．1　扇形磁場型質量分析計の概要

イオン源で生成したイオンは電位差により加速され、スリットを通りビーム状になって静磁場内に入る。イオンの運動方向と磁場の方向が直角な場合、イオンはロー

レンツ力を向心力として等速直線運動をする。その円運動の半径はイオンの質量によって異なる。例えば質量が大きいイオンはあまり曲がらずに半径 r は大きくなるが、質量が小さいイオンでは r が小さくなる。このイオンの軌道半径が質量と電荷の比によって異なることを利用して質量分析するのが扇形質量分析計の原理である。

電荷が q [C]、質量 m[kg]、平均速度 $\bar{v}$ [m/s]のイオンが、磁場の強さ H [Wb/m^2]の中に垂直に入射すると、ローレンツ力を受け、円運動をする。この時、イオンの向心力とローレンツ力とが釣り合うので、イオンの軌道半径を r [m]としたとき

$$\frac{m\bar{v}^2}{r} = q\bar{v}H \qquad (2.1)$$

が成立する。また、イオン加速電圧を V[V]とすると、イオンの運動エネルギーは

$$\frac{1}{2}m\bar{v}^2 = qV \qquad (2.2)$$

となる。質量数 M [kg]とイオンの質量 m の間には M = 6.023×m の関係があるので、式(2.1)、(2.2)より軌道半径は

$$r = 5.764 \times 10^{-14}\frac{1}{H}\sqrt{\frac{MV}{q}} \qquad (2.3)$$

となる。ここで、q とイオンの価数 Z の間の関係は q =e Z=1.6×10^{-4} Z であるから、

$$r = 1.445 \times 10^{-4}\frac{1}{H}\sqrt{\frac{MV}{q}} \qquad (2.4)$$

である。この式から H と V が一定ならば、重いイオンほど軌道半径が大きくなることがわかる。また、式(2.3)の磁場の強さを B[gauss]、 r の単位を cm に直すと

$$\frac{M}{Z} = 4.82 \times 10^{-5} \frac{r^2 B^2}{V} \qquad (2.5)$$

となる。これが扇形磁場型質量分析計の基本式である。

ここで r を固定し、B か V を変化させる装置を質量分析計という。B と V のパラメータのうち、永久磁石を用いて V を変化させるのが電気走査で、電磁石で B を変化させる方法を磁場走査という。本実験では磁場走査型の質量分析計を使用する。

2．1．4　検出部

磁場の強さによって分離されたイオンはスリットを通り、二次電子増倍管で増幅される。イオン強度は計数法で求める。

2．2　クヌーセンセルと雰囲気制御

2．2．1　クヌーセンセル

高温質量分析計の試料系で用いられるクヌーセンセルの材料としては、高温で安定で蒸気圧が低いこと、および試料と反応しないことなどが必要で、白金、タングステン、モリブデンなどが用いられる。

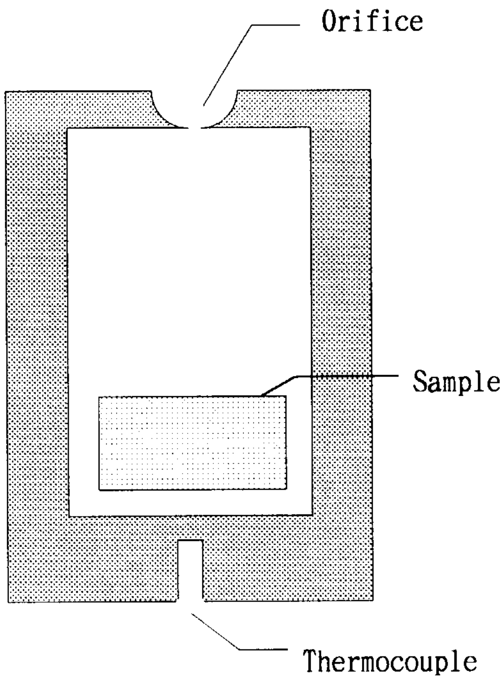


図２．２　一般的なクヌーセンセル

セル内においては凝縮相と気相との間に平衡が成立することが理想とされるが、セル内の蒸気種を測定するためにオリフィスからガスが流出するようになっているので完全な平衡ではない。ここで測定される蒸気圧 P_k と平衡蒸気圧 P_{eq} の間には次のような関係がある。

$$P_{eq} = P_k \left\{ 1 + \frac{K_c A}{A_S} \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{w} - 2 \right) \right\} \tag{2.6}$$

ここで A、K_C、A_S、α、w はそれぞれ、オリフィスの面積、オリフィスのクラウジングファクター、試料の表面積、試料の蒸発係数、セル自体のクラウジングファクターである。

蒸気圧の測定可能な上限は、セル内の蒸気の分圧とオリフィスから逸出する分子ビームのフラックスが比例するためにはオリフィスを通過する蒸気の流れが分子

流でなければならないという条件で抑えられる。このような条件はオリフィスの直径が気体の平均自由行程の 1/10 以下なら満たされるといわれている。

2．2．2　雰囲気制御

核融合炉ブランケットにおいて、トリチウムを回収するためのスイープガスに H_2 を加えることが検討されており、セラミックス増殖材と H_2 との反応性、または O_2 との反応によって生成する H_2O との反応生を評価することがブランケットを設計する上で必要となっている。そこで、本実験では図２．３のようなガス導入型のクヌーセンセルを用いて D_2 や D_2O を導入することにより、スイープガスを模擬した条件下でのトリチウム増殖材の平衡蒸気種の圧力測定ができるように改良したものである。

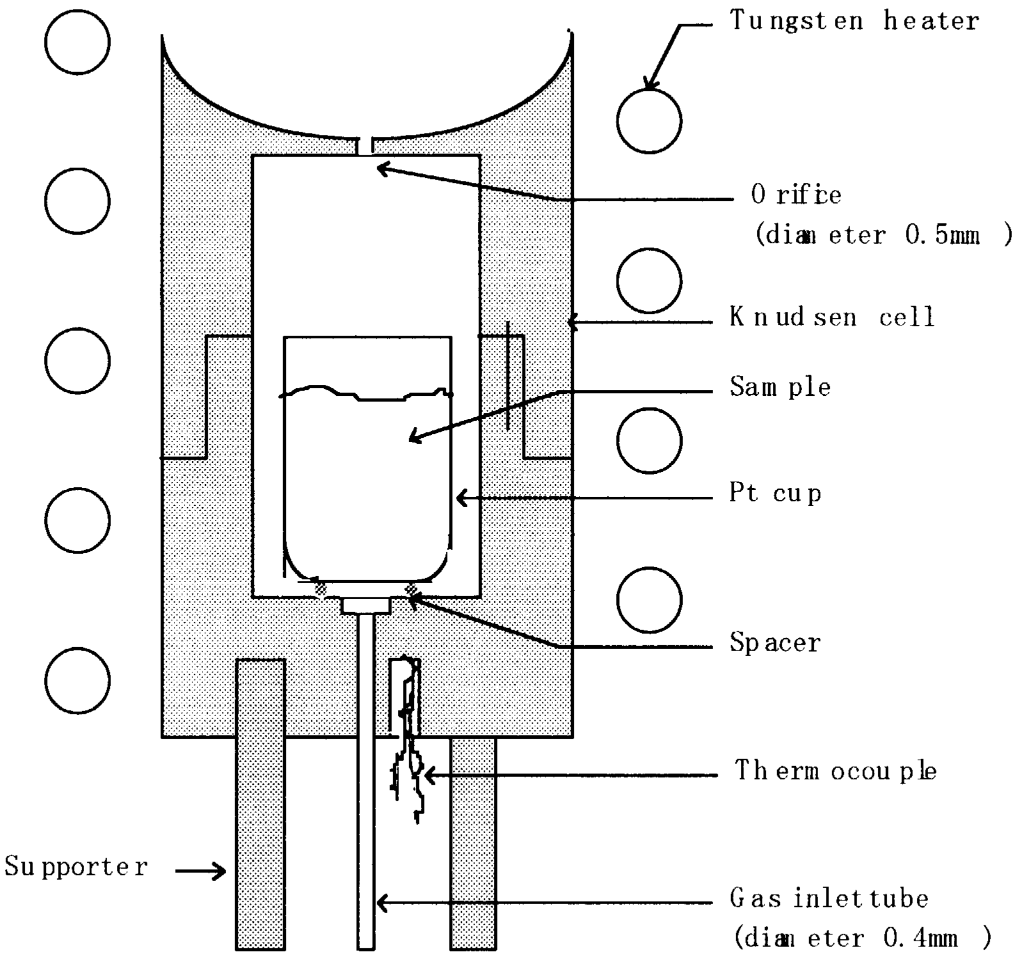


図２．３　ガス導入型クヌーセンセル

２．３　平衡分子種の定量

２．３．１　蒸気圧とイオン強度の関係

ある蒸気分子 i について、その分子種のセル内の圧力 P_i はオリフィスから流出する分子ビームの流束 Z_i と流出分子種の分子量のある関数 A_i、温度 T[K] で次のように表される。

$$P_i = A_i Z_i \sqrt{T} \tag{2.7}$$

流出分子から生じたイオン電流の大きさ I^{+} は Z の大きさと、この蒸気がイオン化さ

れる空間に滞在する時間 t に比例し、t はこの蒸気がこの空間を通過する時の速度 v に反比例する。すなわち、次の関係がある。

$$I^{+} \propto Zt \propto \frac{Z}{v} \tag{2.8}$$

また、ある分子の平均速度はその分子の温度(K)の平方根に比例する。したがって式(2.7)、(2.8)から次の関係が得られる。

$$I^{+} \propto \frac{Z}{T^{1/2}} \propto \frac{P}{T} \tag{2.9}$$

ゆえに

$$P = K \cdot I^{+} \cdot T \tag{2.10}$$

となる。ここで比例定数 K はイオン化断面積 σ_i、二次電子増倍管のゲイン ν_i、同位体存在比 n_i に依存する。よって P_i は装置定数 k を用いて

$$P_i = \frac{k \cdot I^{+} \cdot T}{s_i \cdot u_i \cdot n_i} \tag{2.11}$$

で表される。

2．3．2　装置定数

（1）標準物質測定法

蒸気圧が温度の関数として正確に測定されている標準物質Ag数mgを試料と同時にクヌーセンセル内に装荷して両者のイオン強度を測定すれば

$$P_i = \frac{s_{Ag} \cdot u_{Ag} \cdot n_{Ag}}{s_i \cdot u_i \cdot n_i} \left(\frac{P_{Ag}}{I^{+}_{Ag} \cdot T_{Ag}} \right) I^{+}_i \cdot T \tag{2.12}$$

が得られる。

しかし、標準物質と試料を同時にセル内な入れて加熱すると両者の間で反応が起こる可能性がある。このため、標準物質の測定を行い、k を求めた後に試料を測定する方法を行う場合が多い。

（２） monomer-dimer 法

試料からの蒸気種が複数でありそれらの間の平衡定数が既知であるならば、装置定数を求めることができる。

例として、Li(g)と Li_2(g)の平衡について考える。

$$2Li(g) = Li_2(g) \tag{2.13}$$

式(2.12)の平衡定数を K_p とおくと

$$K_p = \frac{P_{Li_2}}{(P_{Li})^2} \tag{2.14}$$

となるが、これと式(2.11)より

$$k = s_{Li_2} u_{Li_2} n_{Li_2} \cdot \frac{I^+_{Li_2}}{(I^+_{Li})^2 T} \cdot \frac{1}{K_p} \tag{2.15}$$

となり、k が得られる。

（３） ガス消費量法

ガス導入型クヌーセンセルを用いる方法で、ガスの消費量より装置定数を求める。隣接する容器で高圧側から低圧側へガスが流入する場合を考える。ガスの流量を Q、オリフィスのコンダクタンスを C, 高圧側の容器の圧力を P_2、低圧側の容器の圧力を P_1 とすると、

$$Q = C(P_2 - P_1) \tag{2.16}$$

という関係式が成り立つ。

ところで、オリフィスには厚さがないと考えるとき、

$$C = A\left(\frac{RT}{2pM}\right)^{1/2} = 3.64\,A\left(\frac{T}{M}\right)^{1/2} \text{ liters} \cdot \text{sec}^{-1} \tag{2.17}$$

である。ここで A[cm^2]はオリフィスの面積、T [K]は温度、M[g ・ mol^{-1}]は分子量である。しかしオリフィスには厚さがあるので、オリフィスのコンダクタンスはクラウジング係数 Kで補正される。

$$C = 3638KA\left(\frac{T}{M}\right)^{1/2} \mathrm{cm^3 \cdot sec^{-1}} \qquad (2.18)$$

ここでクヌーセンセル内の圧力を P_{in}[Pa]、外側の圧力を P_{out}[Pa]とし、セル内の温度を T_{kc}[K]、実験室内の温度を T_r[K]とすると式(2.16)より

$$Q \times \frac{T_{kc}}{T_r} = C(P_{in} - P_{out}) \qquad (2.19)$$

ここで、P_{in}-P_{out} ≒P_{in}と近似すると

$$P_{in} = \frac{Q}{C}\frac{T_{kc}}{T_r} \qquad (2.20)$$

となる。Cは計算値、Q、T_{kc}、T_rは測定値を用いることにより、P_{in}が得られる。このとき、導入したガスの I^{+}を測定すると式(2.11)より

$$k = P_{in}\frac{s\,u\,n}{I^{+}T} \qquad (2.21)$$

となり、装置定数 kを求めることができる。

2．3．3　イオン化断面積

原子のイオン化断面積は Mann が計算した最大イオン化断面積が用いられることが多い。測定電子衝撃エネルギーでのイオン化断面積を求めるにはイオン化効率曲線が利用されるが、これはイオン強度の電子衝撃エネルギー（イオン化電圧）依存性を表したものである。典型的なイオン化効率曲線の例を図２．４に表す。

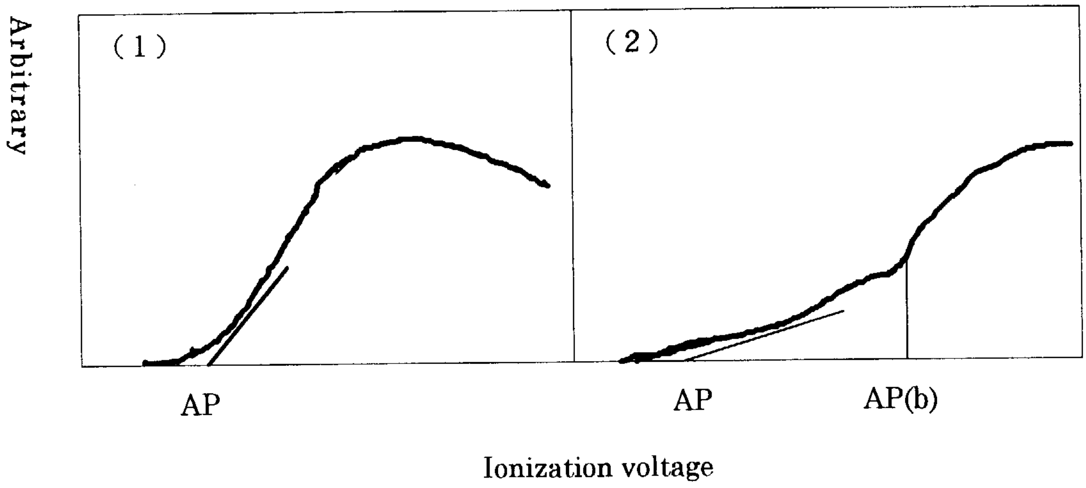


図２．４　イオン化効率曲線の例

（１）フラグメンテーションがない場合

（２）フラグメンテーションがある場合

（１）フラグメンテーションがない場合

これは気相化学種の単純なイオン化によるものであり、式(2.22)のようなイオン化が起こっていると考えられる。

$$M + e^- \rightarrow M^+ + 2e^- \qquad (2.22)$$

イオン化は電子がある一定以上のエネルギーを持つ場合に起こり、そのしきい値を出現電圧（Appearance Potential:A.P.）と呼ぶ。（なお、出現電圧は蒸気種に固有の値であり、原子についてはすべて、分子についても幾つかは知られている。）そのため、これを測定することにより蒸気種を確認することができる場合もある。最大イオン強度を I_{max} とすると、測定電子衝撃エネルギーでのイオン化断面積σは次式で求められる。

$$s = s_{max} \times \frac{I}{I_{max}} \qquad (2.23)$$

（２）フラグメンテーションがある場合

解離的イオン化をともなったイオン化を示しており、式(2.24)に対応する。

$$MX + e^- \rightarrow M^+ + X + 2e^- \qquad (2.24)$$

この場合、I_{max}が得られない場合がある。イオン化断面積が最大となる電子衝撃エネルギー、E_{max}の文献値は既知であるので次式で測定電子衝撃エネルギーでのイオン化断面積σを求められる。

$$s = s_{max}\frac{E - E_{AP}}{E_{max} - E_{AP}} \qquad (2.25)$$

なお、ＡＰ$_b$で折点（クリック）が見られるが、これはフラグメントによるものであり、蒸気圧測定の際のイオン化電圧をＡＰ$_b$より低くする必要がある。

ところで、前出のようにイオン化断面積は多くの場合Mannの値が用いられるが、分子のイオン化断面積はKordisとGingerich[1]の方法で求められることが多い。本実験ではこの方法を採用している。また、Ｄのイオン化断面積はＨの値で代用し、それぞれの分子種のイオン化断面積は次のように求めた値を用いる。

$$s_{Li} = 3.29$$
$$s_{LiOD} = 0.75(s_{Li} + s_O + s_H) = 3.59$$
$$s_{Li_2O} = 1/3\left(2s_{Li_3} + s_{O_3}\right) = 1/3(2 \times 1.88s_{Li} + 1.88s_O) = 4.92$$
$$s_{D_2} = 1.5s_H = 0.330$$
$$s_{D_2O} = 1/3(2 \times 1.88s_H + 1.88s_O) = 1.07$$

２．３．４　イオン強度、温度、二次電子増倍管のゲイン

イオン強度は直流法、またはパルス計数法で求める。直流法に比べてパルス計数法ではより低いイオン強度を測定することができる。本実験では二次電子増倍管によるパルス計数法を用いている。

温度は熱電対で測定する。熱電対はクヌーセンセルの外側にSpot Weldするため、セル内部の試料の温度と熱電対より求めた温度は異なるが、Agの融点を測定することにより、補正を行った。

二次電子増倍管のゲインはパルス波高分布により計数効率を求める。これにより、相対値が得られる。

2．4　反応エンタルピーの算出

高温質量分析計において、測定された蒸気種の圧力と温度の逆数の関係により、ある反応のエンタルピー変化を算出することができる。

ここで、次の平衡について考える。

$$\mathrm{aA} + \mathrm{bB} + \cdots = \mathrm{mM} + \mathrm{nN} + \cdots \tag{2.26}$$

この式の平衡定数Kは

$$K = \frac{(p_M/p^\circ)^m (p_N/p^\circ)^n \cdots}{(p_A/p^\circ)^a (p_B/p^\circ) \cdots} \tag{2.27}$$

とおける。ただし、固相の活量は１とする。

第二法則処理

ギブズ自由エネルギー変化ΔG° [$\mathrm{J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}}$]と平衡定数の間には

$$DG^\circ = -RT\ln K \tag{2.28}$$

の関係があるから、$\ln K$の温度変化は

$$\frac{d\ln K}{dT} = -\frac{1}{R}\frac{d}{dT}\left(\frac{DG^\circ}{T}\right) \tag{2.29}$$

である。これと Gidds-Helmholtz の式

$$\frac{d}{dT}\left(\frac{DG^\circ}{T}\right) = -\frac{DH^\circ}{T^2} \tag{2.30}$$

を組み合わせると van't Hoff の式

$$\frac{d\ln K}{dT} = -\frac{DH^{\circ}}{RT^{2}} \tag{2.31}$$

を得る。さらに $\frac{d}{dT}\left(\frac{1}{T}\right) = -\frac{1}{T^{2}}$ したがって $\frac{dT}{T^{2}} = -\frac{1}{T}$ であることに注意すれば

$$\frac{d\ln K}{d(1/T)} = -\frac{DH^{\circ}}{R} \tag{2.32}$$

のように書ける。

*lnK*を *1/T*に対してプロットすると、式(2.32)から勾配が－*H°／R*にあたるので、－*H°(T)*が求められる。さらに、*H°(298)*は

$$DH^{\circ}(T) = DH^{\circ}(298) + \int_{298}^{T} DC_{P}\,dT = DH^{\circ}(298) + D(H^{\circ}(T) - H^{\circ}(298)) \tag{2.33}$$

の関係式から各成分の熱容量の差*Δ(H°(T)-H°(298))*の値を用いて求められる。

ここで、式(2.33)における熱容量の差は *dH(T)=Δ(H°(T)-H°(298))*とすると、*dH(T)*はＪＡＮＡＦデータなどを用いて求めることができる。そこで

$$\sum dH(T) = -a\cdot dH(T)_{A} - b\cdot dH(T)_{B} - \cdots\cdots + m\cdot dH(T)_{M} + n\cdot dH(T)_{N} + \cdots\cdots \tag{2.34}$$

を求めると、反応の*ΔH°(298)*は次のように求まる。

$$DH^{\circ}(298) = DH^{\circ}(T) - \sum dH(T) \tag{2.35}$$

第三法則処理

自由エネルギー関数*(fef)*から$\Delta H°(298)$を求めることができる。温度Tにおける*fef*は

$$\mathrm{fef(T)} = \frac{\{G°(T) - H°(298)\}}{T} \tag{2.36}$$

これより$\Delta H°(298)$は

$$\mathrm{DH°(298) = DG°(T) - T \cdot Dfef(T)} \tag{2.37}$$

であり式(2.28)より

$$\mathrm{DH°(298) = T\{-RlnK - Dfef(T)\}} \tag{2.38}$$

となる。ただし、*fef(T)*はＪＡＮＡＦデータなどの熱力学データを用いる。

３．　強放射能 FP とウランの複合酸化物の蒸発挙動の測定

３．１　はじめに

ウラン酸化物を照射燃焼させている間中、大量の核分裂生成物（FP）が生成することは良く知られている。それらの中でも I, Te, Cs, Sr, Ru および Ba は、揮発性で人間環境に侵入しやすく有害であるために Xe, Kr とならんで最も重要視されている。

原子炉炉心の重大な事故時におけるこれらの物質の放出挙動は、公衆の健康障害を考えた場合、非常に重要である。一方、これら FP と酸化物燃料との間に多量の化合物が生成される。これら化合物の化学的安定性は、燃料の熱伝導率、スウェリング、クリープ、融点および FP の揮発性、物理的特性に関して大きな影響を与える。多くの FP 化合物について以前から研究されているが、 $BaUO_3$ および $SrUO_3$ の蒸発特性に関する研究は少なく、さらに Cs_2UO_4 の蒸発特性に関しても、十分な知識は得られていなかった。しかしながら、これらの熱力学的データは、定常時およびと非定常時におけるの炉心内の主要 FP の化学的状態の解析に重要である。

この研究では、高温でのクヌーセン蒸発質量分析法によって、 $BaUO_3$ 、 $SrUO_3$ および Cs_2UO_4 の蒸発特性を調べた。軽水炉（ LBR ）における事故状況を予測するためにクラッディングのジルコニウムと H_2O の反応によって水素が生成されることから、 H_2O あるいは H_2 環境におけるこれらの蒸発挙動に関して研究した。同様の試験は、高温ガス炉（ HTGR ）の安全解析のために、黒鉛環境においても行った。質量分析および TG-DTA/DSC 熱分析の結果から $BaUO_3$ と $SrUO_3$ の標準生成エンタルピーを求めた。ペロブスカイト型化合物 (Ba, Sr)(U, Th, Mo, Zr, Ti, Ce, Te)O_3 の熱力学的データをそれらの構造の特異性に基づいて評価した。

３．２　実験方法

３．２．１　試料調整

全ての試料は、日本核燃料開発株式会社（ＮＦＤ）の協力を得て作成した。試料の合成は以下に示す生成反応に基づいて行われた。

$$BaCO_3(s)/SrCO_3(s) + UO_3(s) \rightarrow BaUO_4(s)/SrUO_4(s) + CO_2(g), \quad (1053K,\ 24h\ in\ air) \qquad (3.1)$$

$$BaUO_4(s)/SrUO_4(s) + H_2(s) \rightarrow BaUO_3(s)/SrUO_3(s) + H_2O(g) \quad (1673K,\ 8h\ in\ H_2) \qquad (3.2)$$

および

$$Cs_2CO_3(s) + UO_3(s) \rightarrow Cs_2UO_4(s) + CO_2(g). \quad (1200\ K,\ 24h\ in\ air) \qquad (3.3)$$

純粋な $BaUO_4$ の生成は、X 線回折により確認した。他方、純粋な $SrUO_3$ を生成することが難しかったため $SrUO_3$+23wt%UO_2 混合物を用いた。

全ての試料の X 線回折パターンは、JCPDS/ASTM に示されているデータと良く一致した。

3．2．2　質量分析

この研究では、Nuclide 社・12-90-HT 型の 高温質量分析計（90°偏角磁場走査型）を用いた。全ての測定で直径 0.5mm のオリフィスを有するクヌーセンセルを使用した。クヌーセンセルは、目的によって白金あるいは、グラファイトを用いた。温度測定は、クヌーセンセル底部に溶接された白金ー白金ロジウム熱電対を使用した。標準参照試料として、銀を使用することによって蒸気圧と温度を校正した。おのおのの蒸気圧測定前に試料表面の汚染物質を取り除くために 400～700℃で 24 時間真空中で熱処理した。使用した 3 つのタイプのクヌーセンセルの概略図を図 3.1 に示す。

3．3　実験結果と考察

3．3．1　$BaUO_3$ と $SrUO_3$ の蒸発熱力学

初めにクヌーセン高温質量分析法により、$BaUO_3$ と $SrUO_3$ の蒸発挙動について実験した。$BaUO_3$ と $SrUO_3$ の主な蒸発種の蒸気圧の分圧の絶対値をおのおのについて測定した。

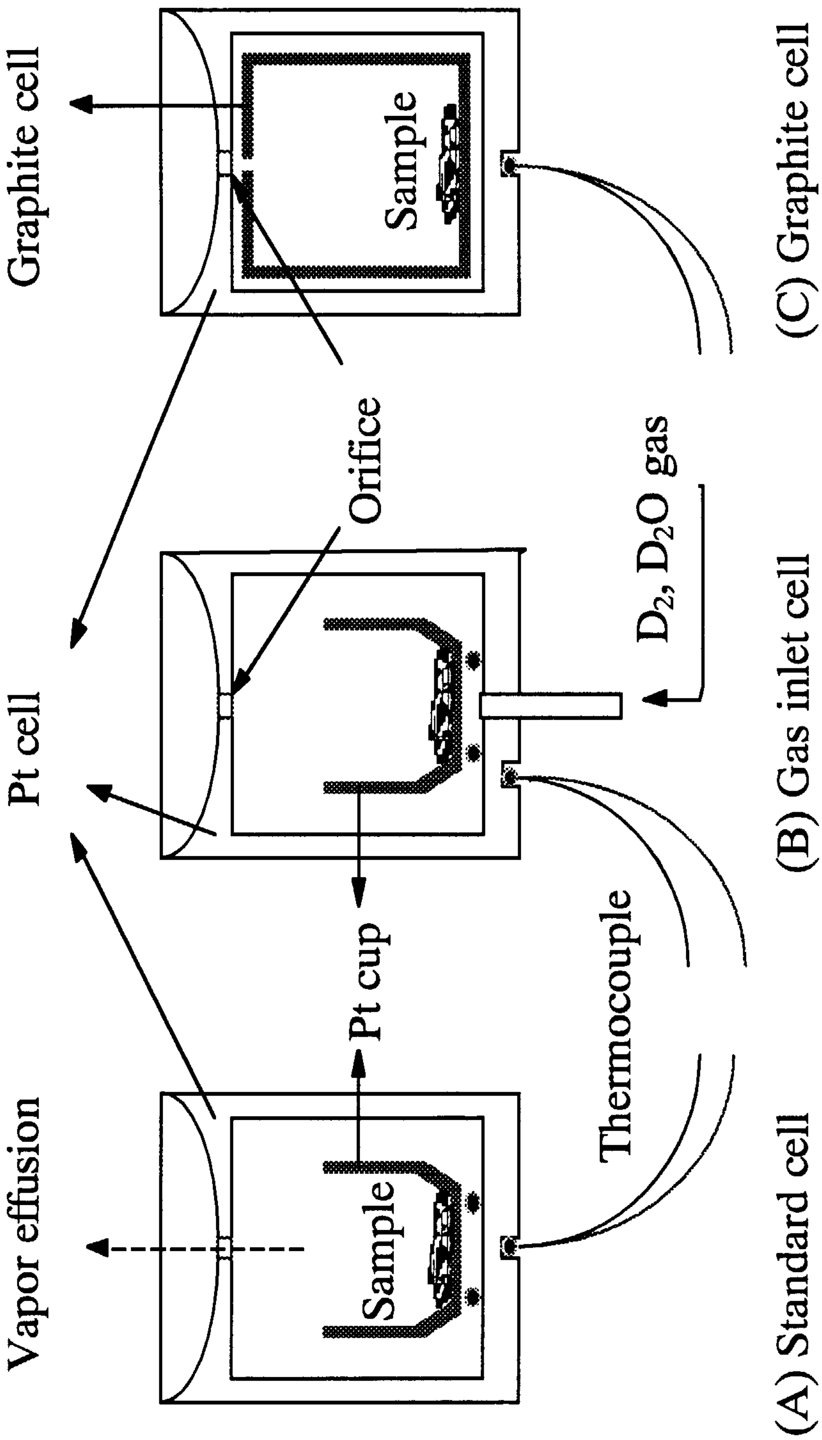


図 3.1 : Schematic diagram of the Knudsen cells

平衡反応はおのおの次のように示される。

$$BaUO_3(s) \leftrightarrow BaO(g) + UO_2(s), \tag{3.4}$$

$$BaO(g) \leftrightarrow Ba(g) + 0.5O_2(g); \tag{3.5}$$

$$SrUO_3(s) \leftrightarrow Sr(g) + 0.5O_2(g) + UO_2(s), \tag{3.6}$$

$$Sr(g) + 0.5O_2(g) \leftrightarrow SrO(g). \tag{3.7}$$

$BaUO_3$ と $SrUO_3$ のエンタルピー増加量 $\Delta(H^\circ(T)-H^\circ(298.15))$ とギブスエネルギー関数 $gef(T)$ のいくつかの推定値から第二法則および第三法則処理により、これらの生成標準エンタルピーを計算した。結果を 表 1に示す。

表 1　$BaUO_3$ および $SrUO_3$ の標準生成エンタルピー

Standard enthalpies of formation	By the second law treatment (kJ/mol)	By the third law treatment (kJ/mol)
$\Delta_fH^\circ(298.15)$ of $BaUO_3$	−1681.8 ± 20.8	−1742.5 ± 16.5
$\Delta_fH^\circ(298.15)$ of $SrUO_3$	−1785 ± 60	−1698.6 ± 21.9

質量分析実験後、X 線回折により決定した格子定数の変化によっておのおのの試料の化学形は、$BaUO_{3.02}$ から $BaUO_{3.12}$ に、$SrUO_3$ から $SrUO_{3.1}$ に変化することが分かった。第三法則処理によって得られた $BaUO_{3.12}$ (すなわち $BaUO_{3+x}$ に対する $x=0.12$) は、第二法則処理で得られた値よりも、確かな値と思われる。これは、文献値 Williams らの結果 ($x=0.06$ と 0.20) からの外挿値とよく一致することから明らかである。これまで、$SrUO_{3.1}$ に対する我々の結果は、低い酸素含有量における $SrUO_{3+x}$ ($x = 0$ ～1) に対して図 3. 2 に示すように唯一の既知のデータである。

3．3．2　ペロブスカイト型化合物の生成エンタルピー評価

実験結果に基づいて、1983 年 Morss によって報告されたように M^{4+}イオンの半径 R と関係づけてペロブスカイト型化合物 $BaMO_3$ と $SrMO_3$ (M=U, Th, Mo, Zr, Ti, Ce, Te) の標準生成エンタルピー$\Delta_fH^\circ(298.15)$ を確定した。

カチオン M^{4+}のより大きな半径 $BaMoO_3$ と $BaPrO_3$ に対する予測は、$\Delta_fH^\circ(BaMO_3)$ と

$\Delta_f H^o(BaO)$ + $\Delta_f H^o(MO_2)$ 間の差はより小さかった。この関係の処理によって、いくつかの $SrMO_3$ 化合物の未知の値が図 3.3 に示すように精度良く評価できた。

３．３．３　$BaUO_3$ と $SrUO_3$ の蒸発への雰囲気効果

(A) グラファイト環境の効果

基準である白金製クヌーセンセルにおける蒸発挙動と比較することによって、グラファイトセル中の Ba(g)の分圧は白金セルにおける Ba を含む全蒸気種の分圧の和よりも約 3 桁高くなることが明らかになった。グラファイトセルでの BaO(g) の蒸気圧は、あまりに低くて検出できなかった。

$SrUO_3$ に対しても白金セルに比べて Sr(g) の蒸気圧の上昇が確認されたけれども、$BaUO_3$ の時の増加に比べると、その増加率は小さく約 2 倍程度高くなっただけであった。 SrO(g) の蒸気圧は装置の検出限界以下に減少することが分かった。

$SrUO_3$+UO_2 混合物と比較するとグラファイトセルにおける減少効果は図 3.4 に示すように、 $BaUO_3$ の蒸発の場合よりも大きいものであった。

(B) 水素雰囲気での蒸発特性

D_2(g) がクヌーセンセルに導入されると、主たる蒸発種の分圧、すなわち、BaO(g) $BaUO_3$ からの BaO(g) と $SrUO_3$ からの Sr(g) は減少する。Ba(g) と SrO(g) の分圧は、図 3.5 に示すように、余りにも低くて、検出不可能であった。

Cordfunke によって与えられている相図から評価にすれば、$BaUO_3$ あるいは $SrUO_3$ は、非常に低濃度酸素ポテンシャルの条件下でのみ存在できる。これらは、質量分析計での測定温度では、白金セル中であっても不安定である。そのため、これらは、白金セルで測定後、高酸素含有化合物の $BaUO_{3.12}$ と $SrUO_{3.}$ へと酸化された。対照的に、水素は、 $BaUO_3$ あるいは $SrUO_3$ の酸化を妨げることができた。そこで、これら 2 つの試料 $BaUO_3$ と $SrUO_3$ では、クヌーセンセルに D_2(g)を導入すれば、酸素含有量に殆ど変化を与えないと期待された。実際に、反応 (3.2) に示したように、これらの試料では、 水素を用いた処理により U^{+6} から U^{+4} へ還元されたことからも妥当である。水素雰囲気中での主な蒸気種の蒸気圧が減少することが示唆されたことから、化学量論的 $BaUO_3$ と $SrUO_3$ は、これらの超化学量論的化合物 $BaUO_{3+x}$ と $SrUO_{3+x}$ に比べてより低い蒸気圧をもつと言える。

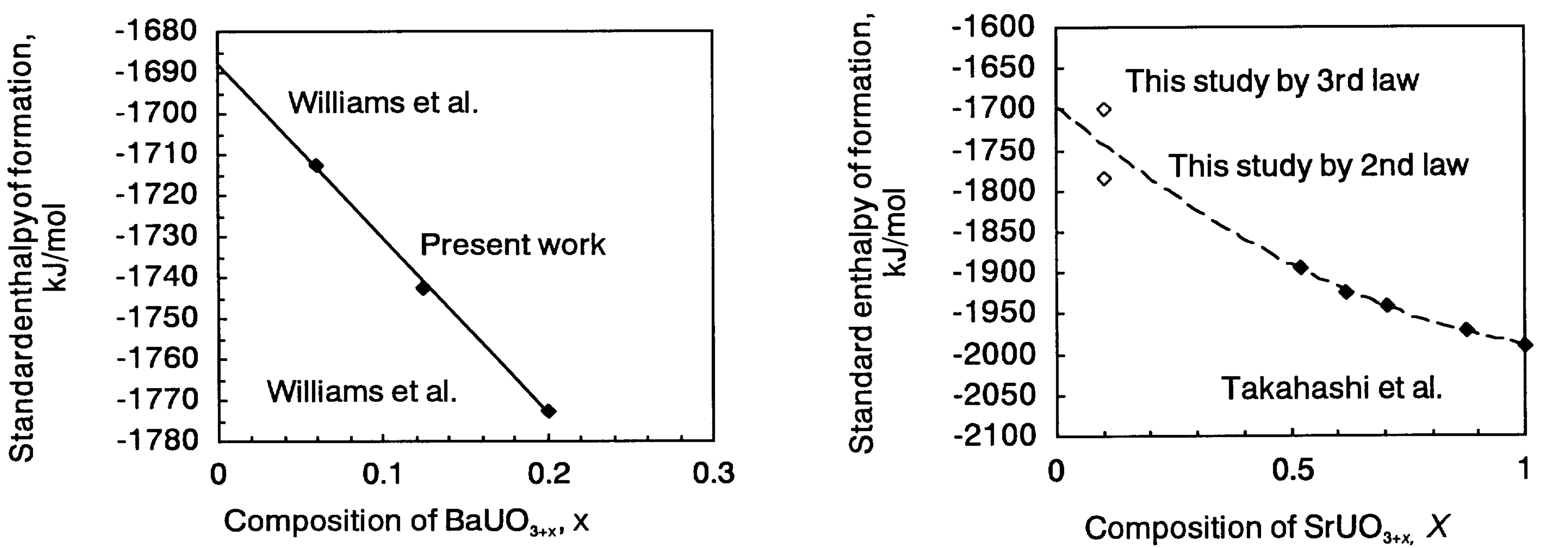
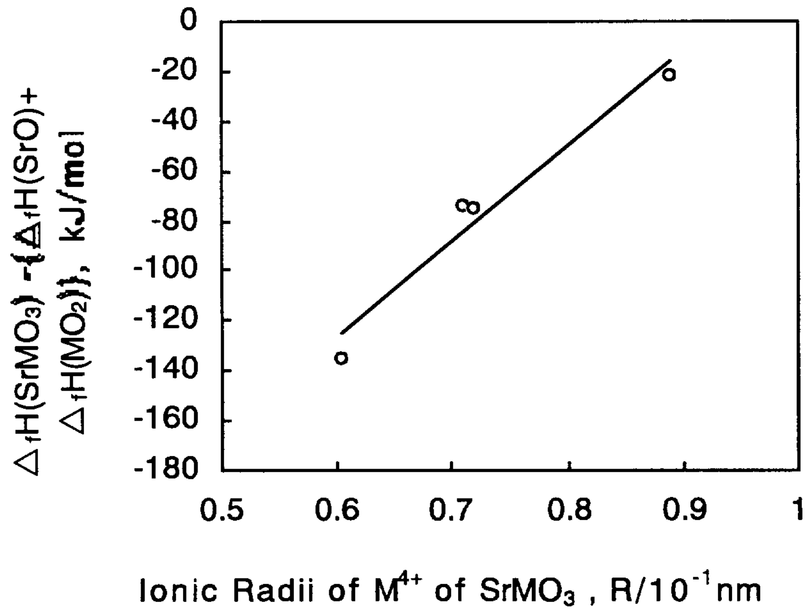


図3.2： (Left) Comparison of $\Delta_f H°(298.15)$ values of $BaUO_{3+x}$
(Right) Comparison of $\Delta_f H°(298.15)$ values of $SrUO_{3+x}$



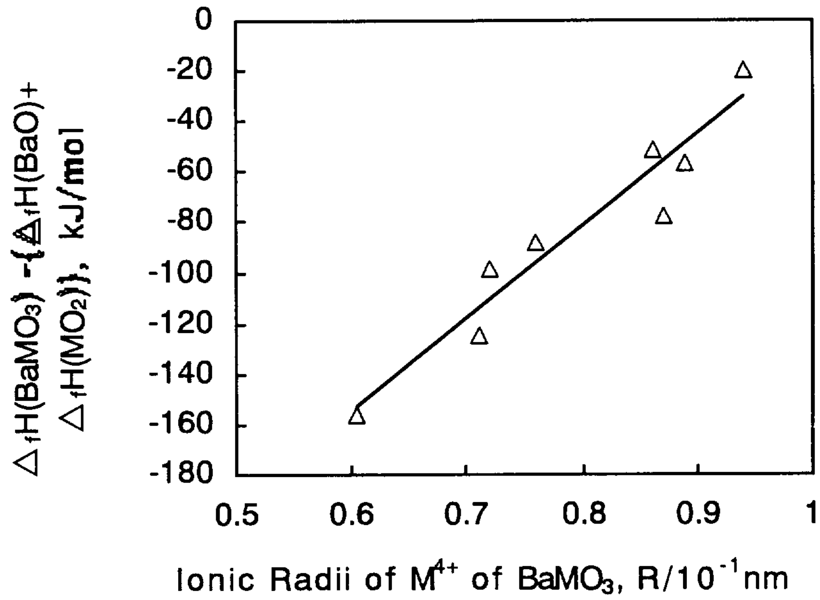


図3.3 : (Left) Relationship between $\Delta_f H^o(BaMO_3) - \{\Delta_f H^o(BaO) + \Delta_f H^o(MO_2)\}$ and the ionic radii of M^{4+} in $BaMO_3$.

(Right) Relationship between $\Delta_f H^o(SrMO_3) - \{\Delta_f H^o(SrO) + \Delta_f H^o(MO_2)\}$ and the ionic radii of M^{4+} in $SrMO_3$

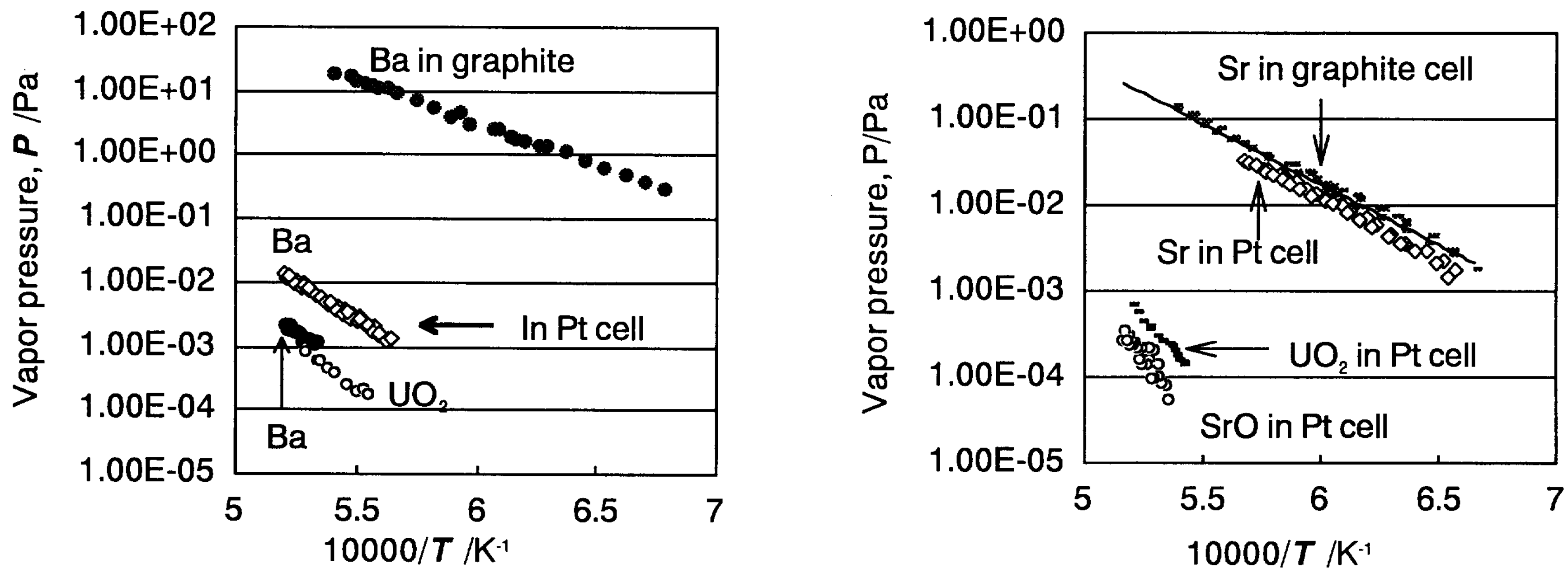


図 3.4 : Effect of graphite on vaporization of $BaUO_3$ and $SrUO_3$

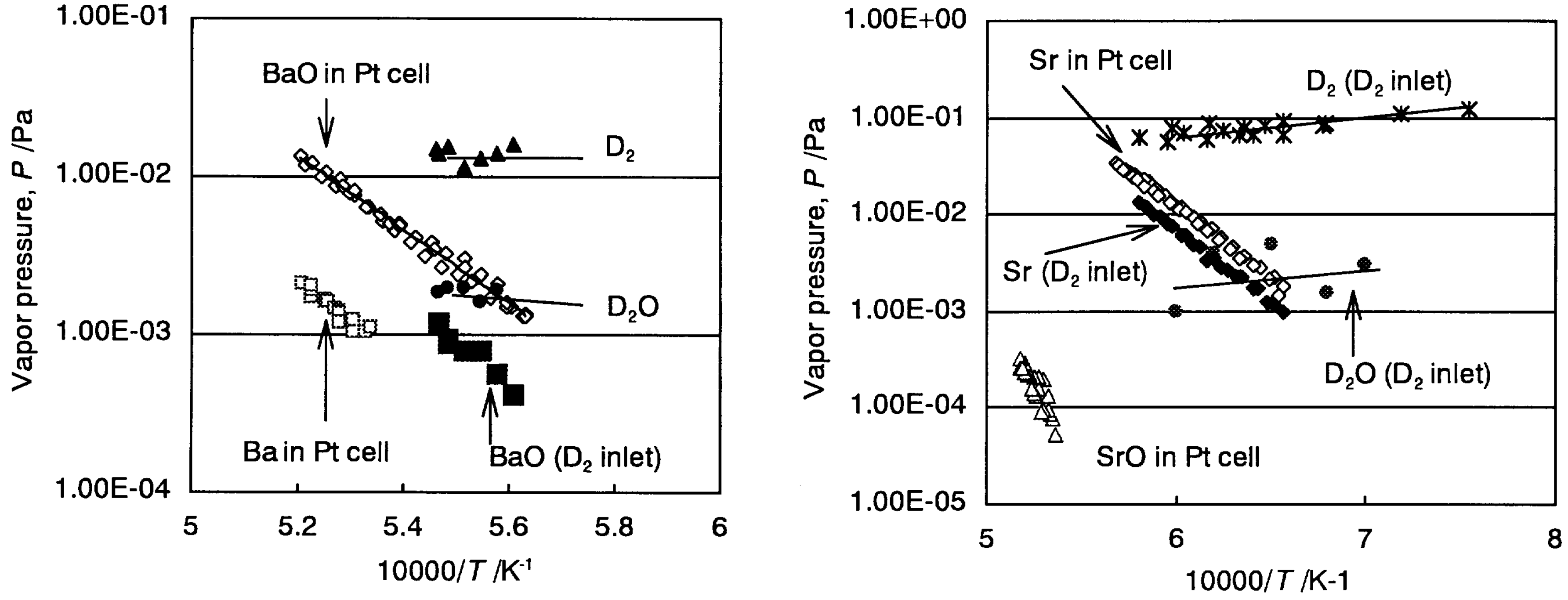


図 3.5 : Effect of D_2(g) admission on vaporization of $BaUO_3$ and $SrUO_3$

(C) 水蒸気雰囲気での蒸発特性

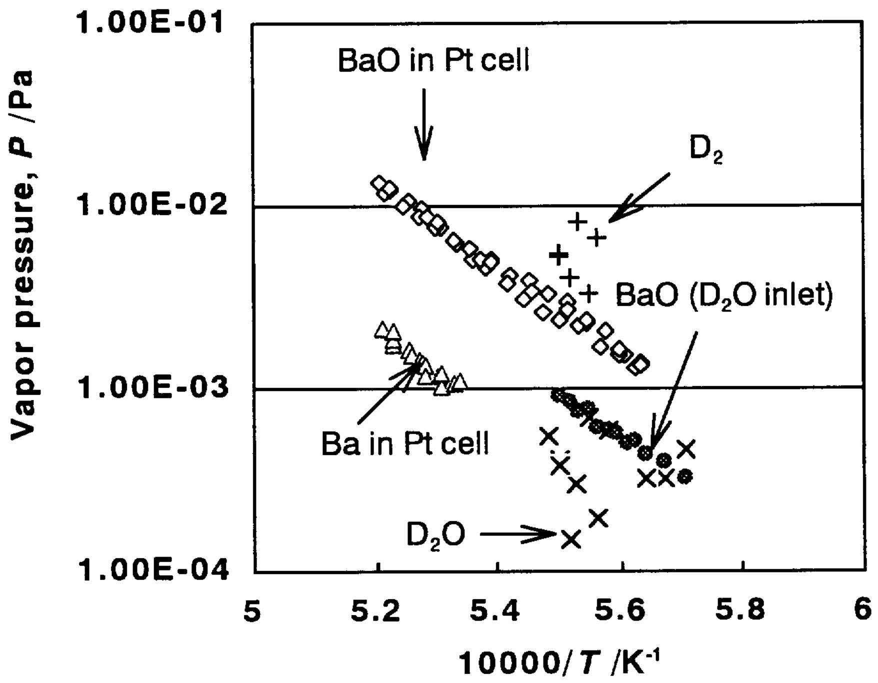
$D_2O(g)$ が、外部よりクヌーセンセルに導入されると、 $SrUO_3$+UO_2 からの Sr(g) と SrO(g) の分圧も、 $BaUO_3$ からの BaO(g) と Ba(g) の分圧と同じように、白金セル中の分圧に比較して、減少することが示された。図 3.6 に示すように蒸発特性は大きく異なった。外部から導入されたガスは $D_2(g)$ あるいは $D_2O(g)$ であったが $D_2(g)$ の分圧は、 $D_2O(g)$ の分圧より常に高かった。 $D_2O(g)$ 環境における蒸発パターンは、 $D_2(g)$ 環境での蒸発パターンと同じようになると予測さたけれども、起こった反応は全く異なった。 $D_2O(g)$ 環境で質量分析測定した後の X 線回折結果に基づいて、 $SrUO_{3.597}$ と $SrUO_3$ の 2 つの層の生成が $SrUO_3$ 試料の主要な部分に見出された。それは、 $D_2O(g)$ 環境における $SrUO_3$ が、反応 (3.8) で示されるように、より高い酸素含有量のものに酸化されたのである。 $BaUO_3$ の $BaUO_{3+x}$ への酸化の出現もまた、同様であった。

$$SrUO_3(s) + 0.579D_2O(g) \leftrightarrow SrUO_{3.579}(s) + 0.579D_2(g) \qquad (3.8)$$

固体複合酸化物間のバランスは、雰囲気条件と、主要蒸気種の分圧の減少のためと確定した。

3．3．4 セシウムウラネートの蒸発特性と雰囲気効果

高温での Cs_2UO_4 の蒸発特性は、まだ完全には、知られていない。そこで、600°C から 1100°C の温度範囲で Cs_2UO_4 の蒸発について、 D_2 あるいは D_2O の導入される場合とされない場合とで研究した。得られた蒸気種分圧の温度依存性は、図 3.7 にプロットした。 Cs_2UO_4 全体の主要な蒸気種は、Cs(g) だけであった。 $Cs_2O(g)$ と CsO(g) の分圧は、Cs(g) の分圧より約 3 桁低かった。クヌーセンセルに $D_2(g)$ あるいは $D_2O(g)$ のどちらかが導入されると主要な蒸気種は Cs(g) , CsOD(g) , $D_2O(g)$ となった。 $UO_2(g)$ と $D_2(g)$ が非常に少なかったことと、並びに、Cs(g) の圧力が、D_2/D_2O を導入しない場合に比べて、 $D_2(g)$ あるいは $D_2O(g)$ のいずれかが導入された条件で上昇することは、注目すべきである。 $D_2(g)$ あるいは $D_2O(g)$環境における酸素ポテンシャルの計算値は、 D_2/D_2O を導入しない場合での酸素ポテンシャルよりも低く、これは、Cs(g) 圧の上昇に起因する。 $D_2/D_2O(g)$導入条件での Cs(g) 圧



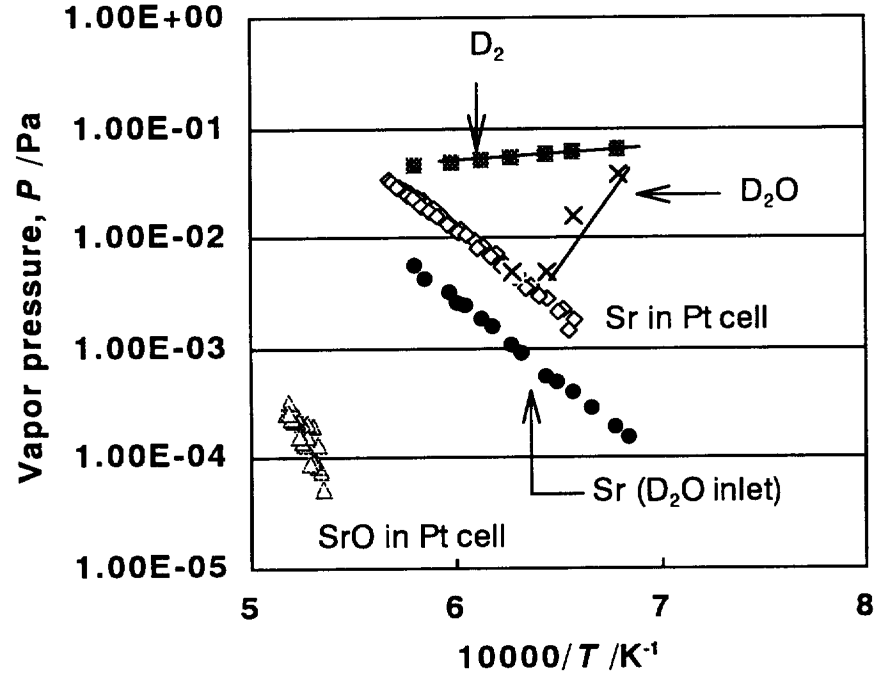


図 3.6 : Effect of D_2O(g) admission on vaporization of $BaUO_3$ and $SrUO_3$

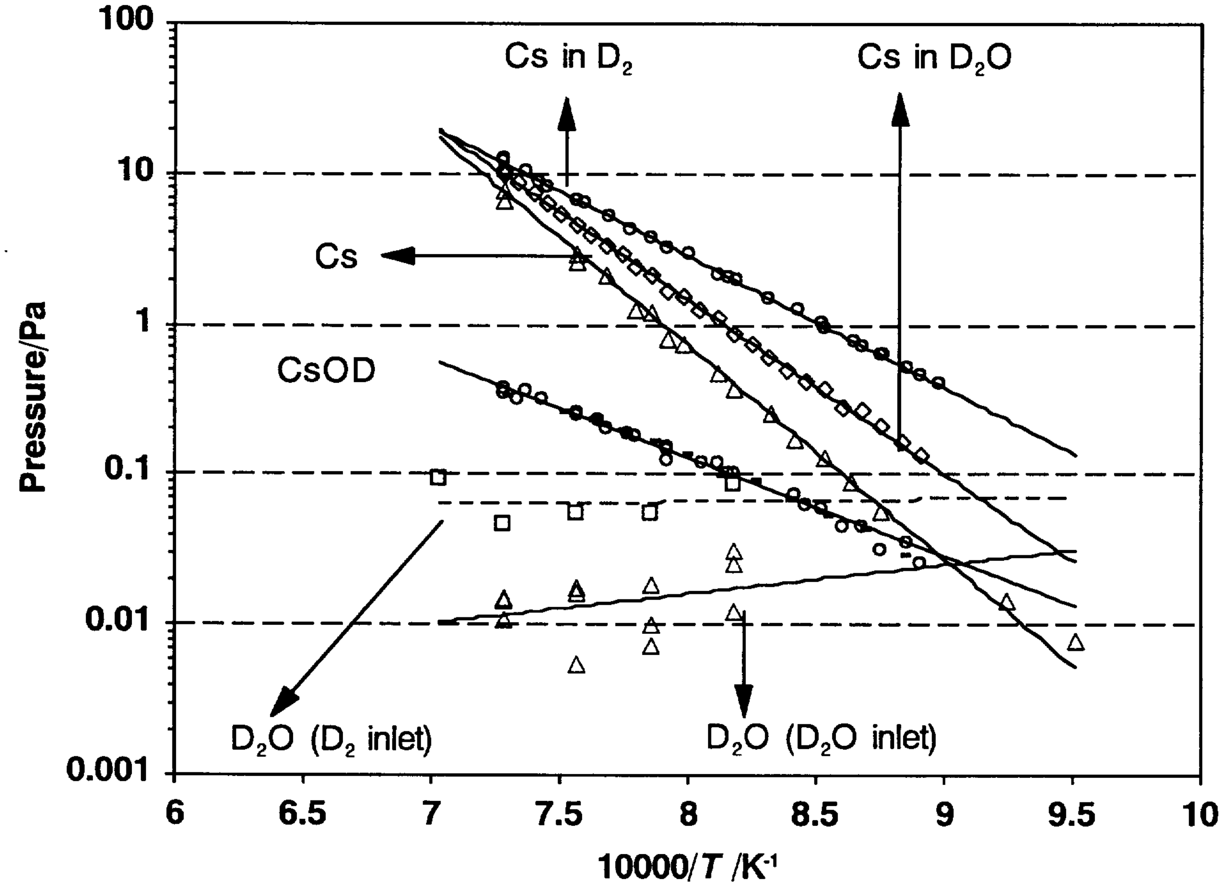


図 3.7 : Vaporization over Cs_2UO_4

の上昇は、かなり大きかった。これは、核分裂により生成したセシウムが、 LWR のシビアアクシデント状況下で、炉心から漏洩する可能性が高いことを推定させるものである。

3．4　結論

1．　まず初めに $BaUO_3$ と $SrUO_3$ の蒸発特性を高温クヌーセン蒸発質量分析計を用いて研究した。この実験で得られた、 $BaUO_3$ と $SrUO_3$ の $\Delta_f H°(298.15)$ の値は、$BaUO_{3+x}$ と $SrUO_{3+x}$ の $\Delta_f H°(298.15)$ と良く一致した。

ペロブスカイト型型化合物の構造特性に基づき、 $BaMO_3$ と $SrMO_3$ (M=U, Th, Mo, Zr, Ti, Ce, Te) 型化合物についても $\Delta_f H°(298.15)$ の値を評価した。

2．　原子炉のシビアアクシデント状況を予測するために、 $BaUO_3$, $SrUO_3$ と Cs_2UO_4 の蒸発についてのグラファイト雰囲気同様に、水素、水蒸気の雰囲気効果について、研究した。

D_2/D_2O 雰囲気では Cs(g) 圧は上昇し、Ba(g), Sr(g) の分圧は、全て減少することが分かった。それは、核分裂生成物の Cs は、LBR 事故時には、Ba と Sr の放出よりも確率で放出されうることを示した。

一方、グラファイト雰囲気では、 $BaUO_3$ の蒸発は大きな影響を受けることが示され、Ba(g) 圧は、白金セル中の Ba(g) 圧の場合よりも、約 4 桁高かった。一方、 $SrUO_3$ の蒸発に関しては、このような強い影響は見られなかった。

４．おわりに

本研究成果を以下にまとめる。

1. 高温質量分析計による高放射能ＦＰ－ウラン複合酸化物（ペロブスカイト型化合物）の蒸発特性の定量的評価方法を確立した。特に雰囲気制御型クヌーセンセルの改造を行い、水素、水蒸気等の反応性ガスを直接セル内に注入することにより、上記化合物のこれら反応ガス雰囲気での蒸発特性を評価する手法の確立を行った。

2. 雰囲気制御型高温質量分析計による強放射能ＦＰ－ウラン複合酸化物の蒸発への水素、水蒸気雰囲気効果について測定し、測定結果の解析を行った。それらの雰囲気下では各強放射能物質の蒸気圧は著しく高くなることを実証した。

今後の課題としては、以下の項目がある。

シビアアクシデント時に燃料から放出されるＦＰの移動挙動を最も強く支配する要因と考えられるＦＰの化学形を、より実際に近い条件で解明するために、さらに装置の改良を行い、蒸発実験を実施する必要がある。

1. 雰囲気制御型質量分析計をさらに改良し、従来単一ガスの導入しか行えなかったのを、混合ガス（H_2+O_2，CO_2+H_2，---）のクヌーセンセルへの導入が可能になるようにする。

2. 上記改良質量分析装置を用いることにより、Ｃｓ，Ｂａ，Ｓｒとウランの各複合酸化物の蒸発への複合的雰囲気効果を解明し、水素効果、水蒸気効果のほか酸素ポテンシャル効果等をも明らかにする。

参考文献

[1] 加藤栄一、佐多敏之、浅野満、“質量分析法の高温化学への応用（Ｉ）”、Vol.28,No.1,March h 1980

[2] M.Lafferty, "SCIENTIFIC FOUNDATIONS OF VACUM TECHNIQUE SECOND EDITION" (1962)

[3] J.M.Mann, The Journal of Chemical Physics, 46,1646, (1967)

[4] J.Kordis and K.A.Gingrich, The Journal of Chemical Physics, 11,58 (1973)

[5] 平井睦、東京大学修士論文 (1979).

[6] Hamazo Nakagawa, Mitsuru Asano and Kenji Kubo, Journal of Nuclear Materials 110 (1982)158-163.

[7] H.R.Ihle, R.D.Penzhorn and P.Schuster, SOFT Conf, Rome, Italy, September(1992).

[8] M.Yamwaki, A.Suzuki, M.Yasumoto and K.Yamaguchi, Journal of Nuclear Materials 223 (1995).

[9] A.Suzuki, M.Yamwaki, M.Yasumoto and K.Yamaguchi, Journal of Nuclear Materials 233-237 (1996)1452-1456.

[10] Y. Hinatsu, J. Solid State Chem. 102 (1993) 566.

[11] M. Yamawaki, M. Yasumoto, C. Nakano and M. Kanno, High Temp. High Press.14 (1982)423.

[12] J. E. Battles, J. W. Reishus and W. A. Shin, in Chemical Engineering Division, Ann. Rep. 1968 (eds. R. C. Vogel, M. Levenson and E. R. Proud), ANL-7575 (1969) pp.77-82.

成果の公表

学会等発表

(1) J. Huang, M. Yamawaki, K. Ymaguchi, M. Yasumoto and H. Sakurai, "Funcamental study of fission product behavior in HTGR; effect of graphite environment on vaporization of $SrUO_3$ and $BaUO_3$", presented at 3rd JAERI Symp. HTGR Technologies, Oarai, Fevruary 1516 (1996).

(2) 黄 錦涛、山脇 道夫、山口 憲司、安本 勝、鈴木 康文、"UO_2 基複合酸化物の蒸発の質量分析的研究", 1996 年度質量分析連合討論会、福井、4 月 24～26 日 (1996).

(3) 安本 勝、鈴木 敦士、黄 錦涛、山脇 道夫、"高温質量分析計のクヌーセンセル内雰囲気ガス制御系の開発（・）"、1996 年度質量分析連合討論会、福井、4 月 24～26 日 (1996).

(4) J. Huang, M. Yamawaki, K. Yamaguchi, M. Yasumoto, H. Sakurai and Y. Suzuki, "Vaporization properties of $SrUO_3$ and $BaUO_3$ in atmospheres simulating accidental conditions", presented at Int. Workshop Interfacial Effects in Quantum Engineering Systems, Mito, Japan, August 21-23, 1996.

(5) M. Yamawaki, M. Yasumoto, A. Suzuki, J. Huang and K. Yamaguchi, "Application of atmosphere-controlled Knudsen cell mass spectrometry to high temperature thermochemistry", presented at 14th IUPAC Conf. Chemical Thermodynamics (9th Int. Symp. Thermodynamics of Nuclear Materials), Osaka, Japan, August 25-30, 1996.

(6) J. Huang, M. Yamawaki, K. Yamaguchi, M. Yasumoto and H. Sakurai, "Environmental effects on vaporization of $BaUO_3$ and $SrUO_3$", presented at 14th IUPAC Conf. Chemical Thermodynamics (9th Int. Symp. Thermodynamics of Nuclear Materials), Osaka, Japan, August 25-30, 1996.

(7) M. Yamawaki, J. Huang, M. Yasumoto, K. Yamaguchi and J. Sugimoto, "Effects of Hydrogen and Water Vapor Atmosphere on Vaporization of Sr, Ba and Cs from Oxide Fuel Compounds", presented at Workshop on Severe Accident Research in Japan, Sept. (1996).

国際単位系 (SI) と換算表

表 1　SI 基本単位および補助単位

量	名　称	記　号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表 2　SI と併用される単位

名　称	記　号
分，時，日	min，h，d
度，分，秒	°，′，″
リットル	l，L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$1\ \mathrm{eV} = 1.60218 \times 10^{-19}\ \mathrm{J}$

$1\ \mathrm{u} = 1.66054 \times 10^{-27}\ \mathrm{kg}$

表 5　SI 接頭語

倍数	接頭語	記　号
10^{18}	エクサ	E
10^{15}	ペタ	P
10^{12}	テラ	T
10^{9}	ギガ	G
10^{6}	メガ	M
10^{3}	キロ	k
10^{2}	ヘクト	h
10^{1}	デカ	da
10^{-1}	デシ	d
10^{-2}	センチ	c
10^{-3}	ミリ	m
10^{-6}	マイクロ	μ
10^{-9}	ナノ	n
10^{-12}	ピコ	p
10^{-15}	フェムト	f
10^{-18}	アト	a

表 3　固有の名称をもつ SI 組立単位

量	名　称	記号	他の SI 単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s^{-1}
力	ニュートン	N	$m \cdot kg/s^2$
圧力，応力	パスカル	Pa	N/m^2
エネルギー，仕事，熱量	ジュール	J	N·m
工率，放射束	ワット	W	J/s
電気量，電荷	クーロン	C	A·s
電位，電圧，起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m^2
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	℃	
光束	ルーメン	lm	cd·sr
照度	ルクス	lx	lm/m^2
放射能	ベクレル	Bq	s^{-1}
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表 4　SI と共に暫定的に維持される単位

名　称	記　号
オングストローム	Å
バーン	b
バール	bar
ガル	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

$1\ \text{Å} = 0.1\ \mathrm{nm} = 10^{-10}\ \mathrm{m}$

$1\ \mathrm{b} = 100\ \mathrm{fm}^2 = 10^{-28}\ \mathrm{m}^2$

$1\ \mathrm{bar} = 0.1\ \mathrm{MPa} = 10^5\ \mathrm{Pa}$

$1\ \mathrm{Gal} = 1\ \mathrm{cm/s^2} = 10^{-2}\ \mathrm{m/s^2}$

$1\ \mathrm{Ci} = 3.7 \times 10^{10}\ \mathrm{Bq}$

$1\ \mathrm{R} = 2.58 \times 10^{-4}\ \mathrm{C/kg}$

$1\ \mathrm{rad} = 1\ \mathrm{cGy} = 10^{-2}\ \mathrm{Gy}$

$1\ \mathrm{rem} = 1\ \mathrm{cSv} = 10^{-2}\ \mathrm{Sv}$

(注)

1. 表 1 − 5 は「国際単位系」第 5 版，国際度量衡局 1985 年刊行による。ただし，1 eV および 1 u の値は CODATA の 1986 年推奨値によった。
2. 表 4 には海里，ノット，アール，ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
3. bar は，JIS では流体の圧力を表わす場合に限り表 2 のカテゴリーに分類されている。
4. EC 閣僚理事会指令では bar，barn および「血圧の単位」mmHg を表 2 のカテゴリーに入れている。

換　算　表

力

N($=10^5$dyn)	kgf	lbf
1	0.101972	0.224809
9.80665	1	2.20462
4.44822	0.453592	1

粘　度　1 Pa·s(N·s/m²)＝10 P(ポアズ)(g/(cm·s))

動粘度　1 m²/s＝10⁴St(ストークス)(cm²/s)

圧力

MPa($=10$ bar)	kgf/cm²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in²(psi)
1	10.1972	9.86923	7.50062×10^3	145.038
0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
0.101325	1.03323	1	760	14.6959
1.33322×10^{-4}	1.35951×10^{-3}	1.31579×10^{-3}	1	1.93368×10^{-2}
6.89476×10^{-3}	7.03070×10^{-2}	6.80460×10^{-2}	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量

J($=10^7$erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft·lbf	eV
1	0.101972	2.77778×10^{-7}	0.238889	9.47813×10^{-4}	0.737562	6.24150×10^{18}
9.80665	1	2.72407×10^{-6}	2.34270	9.29487×10^{-3}	7.23301	6.12082×10^{19}
3.6×10^6	3.67098×10^5	1	8.59999×10^5	3412.13	2.65522×10^6	2.24694×10^{25}
4.18605	0.426858	1.16279×10^{-6}	1	3.96759×10^{-3}	3.08747	2.61272×10^{19}
1055.06	107.586	2.93072×10^{-4}	252.042	1	778.172	6.58515×10^{21}
1.35582	0.138255	3.76616×10^{-7}	0.323890	1.28506×10^{-3}	1	8.46233×10^{18}
1.60218×10^{-19}	1.63377×10^{-20}	4.45050×10^{-26}	3.82743×10^{-20}	1.51857×10^{-22}	1.18171×10^{-19}	1

1 cal ＝ 4.18605 J (計量法)
　＝ 4.184 J　(熱化学)
　＝ 4.1855 J　(15 °C)
　＝ 4.1868 J (国際蒸気表)

仕事率　1 PS (仏馬力)
　＝ 75 kgf·m/s
　＝ 735.499 W

放射能

Bq	Ci
1	2.70270×10^{-11}
3.7×10^{10}	1

吸収線量

Gy	rad
1	100
0.01	1

照射線量

C/kg	R
1	3876
2.58×10^{-4}	1

線量当量

Sv	rem
1	100
0.01	1

(86 年 12 月 26 日現在)

シビアアクシデント時の強放射能FPの挙動予測に関する研究—スコーピング実験とCs、Ba、Srに関する基礎的知見—