



3次元表示による2液相を呈するヨウ化水素、硫酸、 ヨウ素および水の4成分系溶液組成分布の解析

An Analysis of Composition Distributions for 2 Liquid Phase Separation Solution
Composed of HI, H₂SO₄, I₂ and H₂O by 3-Dimensional Visualization

中島 隼人 今井 良行 久保 真治

Hayato NAKAJIMA, Yoshiyuki IMAI and Shinji KUBO

大洗研究開発センター

技術開発部

Technology Development Department
Oarai Research and Development Center

August 2010

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2010

3次元表示による2液相を呈するヨウ化水素、硫酸、ヨウ素および水の 4成分系溶液組成分布の解析

日本原子力研究開発機構

大洗研究開発センター

技術開発部

中島 隼人⁺、今井 良行、久保 真治

(2009年12月25日受理)

熱化学水素製造法 I S プロセスにおいて、プラント運転時の操作条件決定に重要であるとともにプロセス熱効率に強く相関するヨウ化水素、硫酸、ヨウ素および水の4成分系による2液相分離特性を、3次元可視化手法により解析した。大気圧環境下で293 Kおよび363 Kの温度条件における4成分系溶液の組成を実験的に取得し、それらの分布と形状を正四面体を利用した3次元空間内に可視化することにより、2次元表示では得られなかった2液相分離を生じる組成領域の境界面を明らかにするとともに、各相の酸濃度(ヨウ素を除いた3成分系におけるヨウ化水素モル分率と硫酸モル分率の和)が等しいことを見出した。これにより、2液相分離を生じる組成領域、酸濃度といった、運転操作や熱効率推算に有用な組成情報を得ることができた。

An Analysis of Composition Distributions for 2 Liquid Phase Separation Solution Composed of HI, H₂SO₄, I₂ and H₂O by 3-Dimensional Visualization

Hayato NAKAJIMA⁺, Yoshiyuki IMAI and Shinji KUBO

Technology Development Department
Oarai Research and Development Center
Japan Atomic Energy Agency
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received December 25, 2009)

Concerning the thermochemical water-splitting Iodine-Sulfur process, understanding of solution compositions on 2 liquid phase separation is essential for making good choices of operating conditions and for accurate estimations of thermal efficiency. The compositions of 4-component system composed of HI, H₂SO₄, I₂ and H₂O were examined experimentally and were analysed by a 3-dimensional visualization technique. A chemical titration method was adapted to determine the mole fractions of the solutions at 293 K and 363 K, and the fraction were represented by scattered points in an equilateral tetrahedron. Two valuable features were found from a visualized shape viewed as an aggregate of the points, which were difficult to find out by 2-dimensional presentations: (a) a region where the solution exhibited the phase separation phenomenon; (b) an acid concentration of the one phase, which was defined as the sum of HI and H₂SO₄ mole fraction with exception of I₂, was equivalent of that of the another phase. In addition, the equality of the acid concentrations was derived from a examination of density data acquired for both the phases, which supported the finding through this visualization analysis.

Keywords: Hydrogen Production, Thermochemical Process, IS Process, Phase Separation, Visualization

⁺ Served as a researcher for Technology Development Department until March 2009

目次

1. 緒言	1
2. 2液相分離試験	1
3. 4成分組成の可視化手法	2
3.1 4成分組成の3次元空間への表示	2
3.2 3次元直交座標系への座標変換	2
4. 結果と考察	3
4.1 分析結果の評価	3
4.2 2液相分離領域の境界面	3
4.3 2液相分離組成の酸濃度	4
4.3.1 滴定を用いた組成分析による評価	4
4.3.2 2液相分離時の物質分配による評価	5
5. 結論	6
謝辞	6
参考文献	7
付録 ポリヨウ化水素酸におけるヨウ素飽和溶液濃度の推算	32

Contents

1. Introduction	1
2. Two Liquid Phase Separation Test	1
3. Three-Dimensional Visualization for 4-Component Solution Composition	2
3.1 Four-component expression method	2
3.2 Transformation of Coordinate System	2
4. Results and Discussion	3
4.1 Estimation of the Analysis Results	3
4.2 The Boundary Surface of the 2 Liquid Phase Separation Region	3
4.3 Acid Concentration of 2 Liquid Phase Separation Solutions	4
4.3.1 Experimental Results	4
4.3.2 Estimation of Mass Balance	5
5. Conclusions	6
Acknowledgments	6
References	7
Appendix Calculation of Iodine Saturation Solubility of Poly-Hydriodic Acid	32

Figure Captions

- Fig.3.1 Representation of 4-component composition by a point of equilateral tetrahedron coordinate system.
- Fig.3.2 Transformation from equilateral tetrahedron coordinate system to 3-dimensional rectangular coordinate system.
- Fig.3.3 Projected plan of Fig.3.2 on x-y plane.
- Fig.3.4 Projected plan of Fig.3.2 on y-z plane.
- Fig.4.1 Three-dimensional view of 4-component (HI/H₂SO₄/I₂/H₂O) mixtures in Table 4.1.
- Fig.4.2 View point near H₂O vertex.
- Fig.4.3 See through view of Fig.4.1 from view point of Fig.4.2.
- Fig.4.4 Three-dimensional view of compositions of 2 liquid phase separation solutions at 293 K.
- Fig.4.5 Partial view of Fig.4.4 near H₂O vertex.
- Fig.4.6 Plane of constant iodine concentration in equilateral tetrahedron coordinate system.
- Fig.4.7 Relation between compositions of 2 liquid phase separation solutions and planes of constant iodine concentration.
- Fig.4.8 Viewing screen of Fig.4.7 from H₂O-I₂-HI plane.
- Fig.4.9 Boundary surface of 2 liquid phase separation region (viewing from H₂O-HI-H₂SO₄ plane).
- Fig.4.10 Viewing screen of Fig.4.9 from H₂O-I₂-HI plane.
- Fig.4.11 Projection of a pair of 2 liquid phase separation solutions from I₂ vertex to H₂O-HI-H₂SO₄ plane.
- Fig.4.12 H₂O-HI-H₂SO₄ plane projection view of a pair of 2 liquid phase separation solutions in Fig 4.1.
- Fig.4.13 Projection view of 2 liquid phase separation solutions at 293 K.
- Fig.4.14 Projection view of literature data [2].
- Fig.4.15 Projection view of 2 liquid phase separation solutions at 363 K.
- Fig.4.16 Densities of HI/H₂SO₄/I₂/H₂O solutions under iodine saturation condition [7].
- Fig.4.17 Outline of density measurement experiment.
- Fig.4.18 Mass balance in 2 liquid phase separation.

Table Captions

- Table 4.1 An example of results of 2 liquid phase separation test.
- Table 4.2 Results of 2 liquid phase separation test at 293 K and 3-dimensional coordinates.
- Table 4.3 Results of 2 liquid phase separation test at 363 K.

1. 緒言

熱化学水素製造法 IS プロセスは、ヨウ素と二酸化硫黄を循環物質とし、水を熱化学的に分解して水素を製造するものであり、次の3つの反応で構成される。



反応(1)は2種類の酸(ヨウ化水素酸と硫酸)の生成、反応(2)でヨウ化水素酸の熱分解による水素を、また反応(3)では硫酸の熱分解から酸素をそれぞれ発生させることができる。分解生成物であるヨウ素と二酸化硫黄は原料水とともに反応(1)へ供給され酸の生成に再利用される。

反応(1)はブンゼン反応として知られ、原料となる水にヨウ素(試薬を粉砕したもの)を仕込み、これを攪拌しつつ二酸化硫黄を吹き込んで反応を進めることができる。反応初期は原料が量論的に消費されるため溶液は透明であるが、やがてヨウ素が過剰に溶解してポリヨウ化物が生成するようになると、反応溶液は褐色を呈してくる。さらに反応が進行すると2液相分離が始まり、上相に硫酸を主成分とする密度の小さな水溶液(硫酸相)、下相にはヨウ素およびヨウ化水素酸を主成分とする密度の大きな水溶液(ポリヨウ化水素酸相)が出現する [1]。このようにして2液相分離した硫酸相とポリヨウ化水素酸相の組成は、水と油のような完全な分離ではなく相互溶解性のため互いに他の相の成分を溶解し、それぞれ組成の異なる4成分溶液(ヨウ化水素/硫酸/ヨウ素/水)として2液相平衡に達する。この2液相分離や相互溶解性については、閉サイクル運転や熱効率上、重要な意味をもつが、実験的な困難さのため報告例は少ない [2,3,4]。また、これまでの報告では、いずれも溶液組成を三角図等で2次的に解析したため、3つの独立変数を持つ4成分系組成を同一空間、同一視野上に表示できず、3成分を抽出して系内ヨウ素濃度や酸濃度、温度等の効果を表現している。そのため2液相分離領域にある4成分系組成の相対的な関係を正確に表すことが困難であった。

本報では、3次元の可視化手法を用いて2液相平衡関係にある4成分組成をプロットすることで、2液相分離現象の発生する領域境界面を明らかにするとともに、新たな知見が得られたのでこれを報告する。

2. 2液相分離試験

2液相分離領域の境界面を明らかにするため、本試験で用いた試験溶液は、反応(1)を進めたものではなく、これまでの知見から2液相分離現象が発生すると想定される範囲の組成を試薬から調製したものをを用いた。また、本試験では実験手法の確立している大気圧環境下で293 Kの温度条件における試験を行い、補助データとして363 Kでの試験を追加した。293 Kの試験手順を以下に述べる。仕込み原料のヨウ化水素酸(55~57 wt%)、ヨウ素(99.8%)、(1+2)硫酸は関東化学

製の試薬特級を用いた。原料の合計が 40 ml 程度になるように試薬を調製した溶液を 50 ml の三角フラスコに仕込み、 293 ± 1 K の恒温水槽で一昼夜攪拌した。2 液相分離した場合は硫酸相とポリヨウ化水素酸相から溶液を各 2 ml 採取し、150 ml の水で希釈したものを分析用の試料とした。363 K の場合は、293 K に比べてヨウ素の溶解度が増加するため、ポリヨウ化水素酸相のサンプリングにおけるヨウ素の固化対策が必要となる。そのため、高温でのサンプリング機能を備えた装置 [5] で 2 液相分離試験を行った。

採取した試料の分析は中和滴定、ヨウ素酸塩滴定およびヨウ素還元滴定を組み合わせて $H^+/I^-/I_2$ 量をそれぞれ求め、硫酸量は H^+ と I^- の差を 2 で除して、また水は全量から 3 成分量を差し引いて求めた [6]。希釈中にヨウ素の沈殿が生じた試料は、ヨウ化カリウムを加えてヨウ素を溶解させた後、ヨウ素還元滴定を行い I_2 量を求めた。以上の分析結果を基にして硫酸相とポリヨウ化水素酸相の組成を算出した。滴定分析には平沼産業製自動滴定装置 COM-2500 を用いた。

3. 4 成分組成の可視化手法

3.1 4 成分組成の 3 次元空間への表示

4 成分組成の可視化を、各成分のモル分率を組成空間へプロットすることにより行った。一般に 3 成分系のデータは 2 次元平面上の三角線図を用いて表示でき、3 つの頂点で各成分の純物質を表す。本報で取り扱う溶液組成データ(モル分率)は、ヨウ化水素/硫酸/ヨウ素/水の 4 成分系であるため、組成空間として頂点数が 4 の正四面体を用い、一辺の長さはモル分率の合計(=1)とした。ここで、Fig.3.1 に示した頂点 A、B、C、D を持つ正四面体の内部の一点を用いて、モル分率 a, b, c, d ($a + b + c + d = 1$) を表示することを考える。頂点 D に対応した成分のモル分率が d である組成は底面の $\triangle ABC$ に平行な平面 $\triangle A_1B_1C_1$ 上に存在する。同様に、頂点 B に対応した成分のモル分率が b である組成は $\triangle ACD$ に平行な平面 $\triangle A_2C_2D_2$ 上に、また、頂点 A に対応した成分のモル分率が a である組成は $\triangle BCD$ に平行な平面 $\triangle B_3C_3D_3$ 上に存在する。いま、モル分率が (b, d) である組成は $\triangle A_1B_1C_1$ と $\triangle A_2C_2D_2$ の交線 M_1M_3 上に存在する。従って、モル分率が (a, b, d) である組成は線分 M_1M_3 と $\triangle B_3C_3D_3$ の交点 P として表示できる。また、 $A_1D = 1 - d = a + b + c$ 、 $A_1B_1 = a + b + c$ であることから、 $M_1M_2 = c$ である。このように、4 成分のモル分率 a, b, c, d を辺の長さが 4 成分のモル分率の合計(=1)とした正四面体の一点で表すことができる。

3.2 3 次元直交座標系への座標変換

上述の分析結果の 4 成分組成(モル分率)を汎用 3 次元表示ソフト (MicroAVS) で可視化するためには、モル分率を直交座標点に変換する必要がある。以下に変換式を記す。

Fig.3.2 において、 $\triangle ABC$ に平行な平面 $\triangle A_1B_1C_1$ 上の点 P の組成を a, b, c, d とし、点 P (x_P, y_P, z_P) を直交座標とする。D から xy 平面への投影図を Fig.3.3(a)、(b) で表せば、 $AB = a + b + c + d$ および $A_1B_1 = a + b + c$ から x_P, y_P はそれぞれ

$$\begin{cases} x_{A'} = \frac{1}{2}(AB - A_1B_1) = \frac{d}{2} \\ x_{P'} = b + \frac{1}{2}c \\ x_P = x_{A'} + x_{P'} \\ = \frac{1}{2}(2b + c + d) \end{cases} \quad \begin{cases} y_{A'} = \frac{d}{2\sqrt{3}} \\ y_{P'} = \frac{\sqrt{3}}{2}c \\ y_P = y_{A'} + y_{P'} \\ = \frac{1}{2\sqrt{3}}(3c + d) \end{cases}$$

となる。また、B から yz 平面への投影図を Fig.3.4 で表せば

$$EF = \frac{1}{2\sqrt{3}}, \quad DF = \sqrt{\frac{2}{3}} \quad \text{から } z_P \text{ は次のように求められる。}$$

$$z_P = \frac{DF}{EF} y_{A'} = \sqrt{\frac{2}{3}} d$$

本報では、成分 A、B、C、D をそれぞれヨウ化水素、硫酸、ヨウ素、水とした。

4. 結果と考察

4.1 分析結果の評価

2液相分離試験は、仕込み組成が2液相分離領域内かどうかは仕込みの段階では不明であり、組成によっては固体ヨウ素の沈殿、反応(1)の逆反応、副反応が生じる可能性がある。これらの有無を明らかにするため、仕込み成分のモル量と2液相を合計したモル量の差をとり評価した。一例を Table 4.1 に示す。この例では、2液相のヨウ素成分が仕込み量に比べて減少しており、ヨウ素の沈殿が考えられる。加えて、若干量のヨウ化水素の減少と水の増加がみられ、逆反応や副反応の可能性もあるが、有意な差かどうかは明らかでない。Table 4.1 の組成を3次元座標にプロットしたものを Fig.4.1 に示した。図中、仕込み組成、硫酸相組成、ポリヨウ化水素酸相組成をそれぞれ赤、黄、紫色の各点で示した。赤の仕込み組成は固体(ヨウ素)を含んでいるため、黄色と紫色を両端とする直線(タイライン)上から外れている。また、表中のヨウ素の減少分を沈殿量とみなして仕込み成分から差し引いたものを仕込み溶液組成とし、Fig.4.1 に緑色の座標点として示した。これはタイライン上に存在している。Fig.4.1 を Fig.4.2 のように水の頂点付近からヨウ素頂点を透視すれば、赤、緑およびヨウ素頂点の重なり合った状態(Fig.4.3)がみられる。このことは、ヨウ素頂点からの直線が赤と緑色の座標点を通ることを意味し、仕込み組成中のヨウ素を除いた成分組成を維持しつつヨウ素成分のみを変化させたものが緑の点、すなわち仕込み溶液組成であることがわかる。

4.2 2液相分離領域の境界面

本試験における仕込み組成、2液相分離組成の3次元表示を Fig.4.4~4.5 に、仕込み溶液組成、2液相分離組成データおよび直交座標点を Table 4.2 に示した。図中、青色の点は、2液相

分離しなかった試料である。

ここで、ヨウ化水素に対するヨウ素の濃度を表す指標 x を以下の式で定める。

$$x = 1 + \frac{2n_{\text{I}_2}}{n_{\text{HI}}}$$

n_{I_2} 、 n_{HI} は溶液中に溶解したヨウ素、ヨウ化水素の物質量を表す。 x はヨウ化水素 1 モルに対して溶解したヨウ素量を表し、ポリヨウ化水素酸を $\text{HI}x$ と表記することができる。 $x=4$ となる溶液組成点は、3次元座標上において Fig.4.6 に示した水、硫酸の頂点および、ヨウ素、ヨウ化水素の頂点を結ぶ線分を 0.4 : 0.6 に分割する点 P を頂点とする三角形の断面上に存在する。同様に $x=3$ の断面を定義することができ、 $x=3, 4$ のヨウ素濃度断面を試験結果と共に Fig.4.7 に示した。図から 293 K における 2 液相分離領域は $x=3\sim 4$ の間に存在している。また、 $x>4$ の領域ではヨウ素の沈殿が、 $x<3$ では均一溶液になることがわかる。Fig.4.7 を $\text{H}_2\text{O}-\text{I}_2-\text{HI}$ 平面から見たものを Fig.4.8 に示した。

これまでに示した 2 液相分離組成の座標点は、2 液相分離領域の境界面上に存在しているものと考えられる。そこで、この境界面を明らかにするため、隣接した座標点で囲まれる領域を作図し、Fig.4.9～4.10 に示した。これにより硫酸相付近では、ほとんど厚さがなく、全体としてカッターナイフのような形状を呈していることが明らかになった。また、高温になるにつれてヨウ素の溶解度が増加するため 2 液相分離領域を生じる指標 x 値は大きくなり、ポリヨウ化水素酸相付近で厚みのある形状になると考えられる。

2 液相分離領域の境界面のうちヨウ素の沈殿が生じる面は、付録に述べる推算式から求めることができる。

4.3 2 液相分離組成の酸濃度

4.3.1 滴定を用いた組成分析による評価

次に、2 液相分離組成の酸濃度の観点から、これまでの試験データを整理した。一对の 2 液相分離組成の座標点を、ヨウ素の頂点から水-硫酸-ヨウ化水素面に対して Fig.4.11 のように投影すれば、Fig.4.12 が得られる。この投影図は各組成からヨウ素成分を除いたモル分率表示の酸濃度を表わしている。このようにして全てのデータの投影図を Fig.4.13 に示した。Fig.4.13 から平衡関係にある黄色と紫を結んだ直線は、水の分率を示した三角形とほぼ平行であることがわかる。これは、一对の平衡関係にある溶液組成からヨウ素成分を除いた酸濃度が、ほぼ等しいことを示している。また、文献[2]の試験データについても同様の処理を施し、Fig.4.14 に示した。この場合も全ての条件で、本試験と同様の結果が得られた。しかしながら、本試験条件は濃度範囲は広いが 293 K のみであり、また、文献[2]では温度は広範囲であるが酸濃度やヨウ素濃度が低いため、上述の結果が全ての 2 液相分離領域に適用されるものかを判断することは困難である。そこで、反応(1)で到達可能な溶液組成を予備試験で取得し、それをもとに分離温度：363 K、仕込み原料の酸濃度：ヨウ化水素酸；56 wt%(モル分率=0.152)、硫酸；64 wt%(モル分率=0.246)、高ヨウ素濃度($x>10$)での分離試験を行った。結果を Table 4.3 と Fig.4.15 に示す。Fig.4.15 は、これまでの結果と同様であり、一对の 2 液相分離溶液の酸濃度がほぼ等しくなる現象は、広範囲な 2 液相分離領域で観察されるものと考えられる。

4.3.2 2液相分離時の物質分配による評価

ここでは、別途行った2液相分離溶液に関する密度測定実験の結果が示す意味、及び、2液相分離における物質収支を考察することにより、各相の H_2O, HI, H_2SO_4 水、ヨウ化水素、硫酸の濃度(ヨウ素を除く)の関係を推定する。Fig. 4.16 は、293 K、ヨウ素飽和条件において、2液相分離状態にある硫酸相(上相)とポリヨウ化水素酸相(下相)の密度を測定した実験結果 [7]、Fig. 4.17 は同実験の概要である。実験は原料を調製後、混合し、2液相分離させた後、上相と下相をサンプリングして密度測定を行ったものである。混合前の、水のモル分率 X_{H_2O} 、ヨウ化水素のモル分率 X_{HI} 、硫酸のモル分率 $X_{H_2SO_4}$ は既知であるが、混合前のヨウ素モル分率 X_{I_2} 、混合後2液相分離状態にある各相の組成は不明である。実験は、混合前の X_{H_2O} 、 X_{HI} 、 $X_{H_2SO_4}$ を様々に変えて2液相分離させ、各相の密度を測定してある。Fig. 4.16 から両相の密度測定値は、ほぼ一本の曲線上にプロットされていることが見てとれる。

さて、2液相分離状態にあるブンゼン反応溶液(ヨウ化水素/硫酸/ヨウ素/水系)のギブスの自由度=4を考慮し、ある密度値(上相と下相)の組み合わせにおいて、各相の組成は一意に決まると仮定する。この仮定のもとでは実験結果は以下の事象を示している。

- ・ ヨウ素飽和溶液において原料における水モル分率 X_{H_2O} (ヨウ素を除く)を決めると、任意の原料組成 X_{HI} 、 $X_{H_2SO_4}$ に対して、原料物質は上相組成および下相組成が一定になるように分配される

次に、Fig 4.18 に示す物質分配、すなわち I_2 を除いた物質の収支について考える。混合前、上相、下相をそれぞれ R、U、L とし、 n をモル数として物質収支を下式で表わす。

$$Xn = \begin{pmatrix} X_{H_2O}^R & X_{H_2O}^U & X_{H_2O}^L \\ X_{HI}^R & X_{HI}^U & X_{HI}^L \\ X_{H_2SO_4}^R & X_{H_2SO_4}^U & X_{H_2SO_4}^L \end{pmatrix} \begin{pmatrix} n^R \\ -n^U \\ -n^L \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (4)$$

ここで、 $\sum X^R = \sum X^U = \sum X^L = 1$ である。2液相分離状態にあるとき、(4)式は明らかに自明でない解 ($n \neq 0$) を持つ。従って、行列 X の行列式は

$$\det(X) = 0 \quad (5)$$

である。簡単のため、以下のように行列 X の表記を改めると、

$$X = \begin{pmatrix} R & U & L \\ 1-R-r & 1-U-u & 1-L-l \\ r & u & l \end{pmatrix} \quad (6)$$

X の行列式は

$$\det(X) = r(U-L) + u(L-R) + l(R-U) = 0 \quad (7)$$

となる。

実験結果が示す事象より、ある R 値 ($=X_{\text{H}_2\text{O}}^R$) のもと、任意の r ($=X_{\text{H}_2\text{SO}_4}^R$) で、 U 、 u 、 L および l (=各相の組成) は一定値をとる。よって、任意 r 、 u 、 l に対して (7) 式が成立するためには

$$R = U = L \quad (8)$$

となる。ここで、溶液の酸濃度を以下のように定義する。

$$S_{\text{acid}} = \frac{X_{\text{HI}} + X_{\text{H}_2\text{SO}_4}}{X_{\text{H}_2\text{O}}} \quad (9)$$

すると、(8)、(9) 式から、

$$S_{\text{acid}}^R = S_{\text{acid}}^U = S_{\text{acid}}^L = \frac{1-R}{R} \quad (10)$$

となる。したがって、原料および両相の酸濃度 S_{acid} は互いに等しい。

以上、まとめると以下の通りである。ある密度値 (上相と下相) の組み合わせにおいて、各相の組成は一意に決まると仮定した場合、原料における水モル分率 $X_{\text{H}_2\text{O}}$ を決めると、任意の原料組成 X_{HI} 、 $X_{\text{H}_2\text{SO}_4}$ に対して、原料物質は上相組成および下相組成が一定になるように分配されるというヨウ素飽和条件での実験事実がある。この知見のもとで 2 液相分離の物質収支を考察することにより、混合前の原料および混合後 2 液相に分離した両相の酸濃度 S_{acid} が等しいことを導いた。

5. 結論

熱化学水素製造法 I S プロセスで取り扱う 2 液相分離溶液組成 (ヨウ化水素/硫酸/ヨウ素/水) を、3 次元の可視化手法を用いることにより正確に表すことができるようにした。この可視化手法により 2 液相分離領域の境界面を明らかにし、さらに平衡関係にある一対の 2 液相分離溶液の酸濃度は、分離温度 ; 293~363 K、2 液相分離溶液中の酸濃度 (ヨウ素を除く 3 成分系におけるヨウ化水素の分率と硫酸の分率の和) ; 0.08~0.17、ポリヨウ化水素酸相中のヨウ素濃度 (HI x の x 値) ; 3.3~12.2 の範囲でほぼ等しいことがわかった。また、2 液相分離溶液の酸濃度が等しいことを溶液組成と密度の関係から導くことができた。

今後、さらにブンゼン反応の逆反応、副反応の生成領域や分離温度の影響などを加え、広範囲な 2 液相分離現象の特性を明らかにしていく計画である。

謝辞

本報の執筆において、貴重な助言をいただいた核熱応用工学ユニットの寺田敦彦氏に感謝いたします。

参考文献

- [1] Norman, J.H., K.J. Mysels, D.R. O'Keefe, S.A. Stowell and D.G. Williamson; "Water Splitting: The Chemistry of the I_2 - SO_2 - H_2O Reaction and the Processing of H_2SO_4 and HI Products," *Alternative Energy Sources: Proceedings of the Miami International Conference*, Miami Beach, Fla., December 5-7, 1977. Volume 8, pp. 3495-3526, Hemisphere Publishing Corp., Washington, D.C., U. S., (1978)
- [2] Sakurai, M., H. Nakajima, K. Onuki and S. Shimizu; "Investigation of 2 Liquid Phase Separation Characteristics on the Iodine-Sulfur Thermochemical Hydrogen Production Process," *Int. J. Hydrogen Energy*, 25, PP605-611 (2000)
- [3] Kang, Y., J. Ryu, C. Park, G. Hwang, S. Lee, K. Bae and Y. Kim; "The Study on Bunsen Reaction Process for Iodine-Sulfur Thermochemical Hydrogen Production," *Korean Chem.Eng.Res.*, 44, PP410-416 (2006)
- [4] Giaconia, A., G. Caputo, A. Ceroli, M. Diamanti, V. Barbarossa, P. Tarquini and S. Sau; "Experimental study of two phase separation in the Bunsen section of the sulfur-iodine thermochemical cycle," *Int. J. Hydrogen Energy*, 32 (5), PP531-536 (2007)
- [5] Nakajima, H., Y. Imai, S. Kasahara, S. Kubo and K. Onuki; "Effect of Sulfur Dioxide Partial Pressure on the Reaction of Iodine,Sulfur Dioxide and Water," *Kagaku Kougaku Ronbunshu*, 33 (3), PP257-260 (2007)
- [6] Nakajima, H.; Japan Patent (Tokugan 2003-305085)
- [7] Shimizu, S., H. Nakajima, K. Onuki, K. Ikenoya, C. Berndhauser, Y. Miyamoto, "Iodine-Sulfur process for thermochemical hydrogen production", Proc. of ICENES '93, Chiba, Japan, 20-24 Sep. pp. 533-534 (1993).

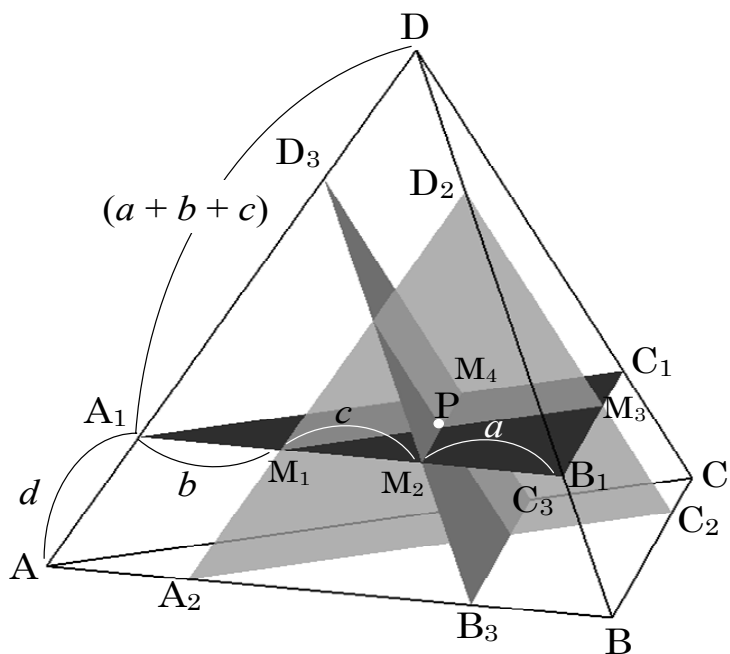


Fig.3.1 Representation of 4-component composition by a point of equilateral tetrahedron coordinate system.

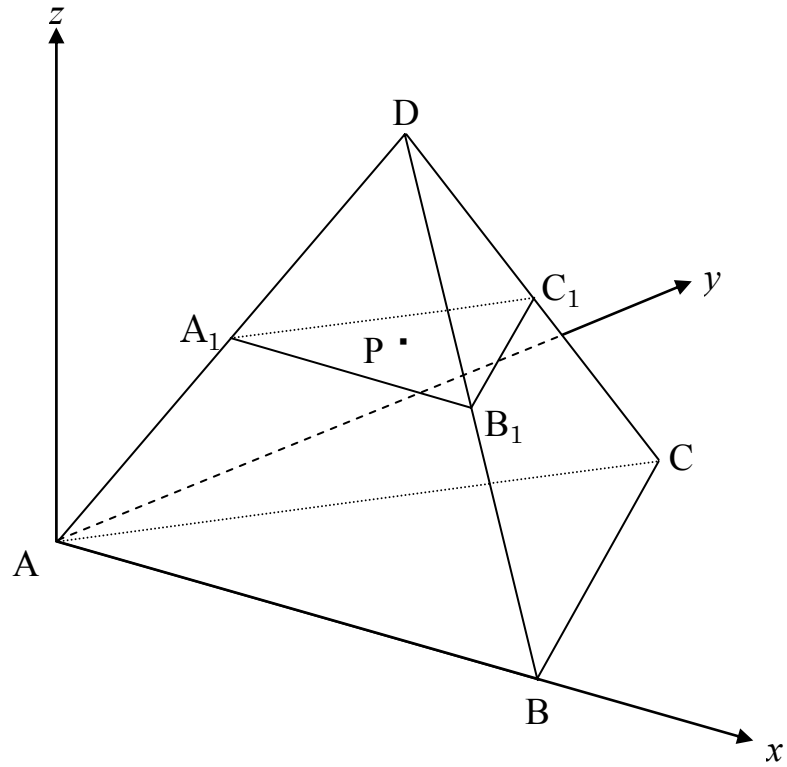
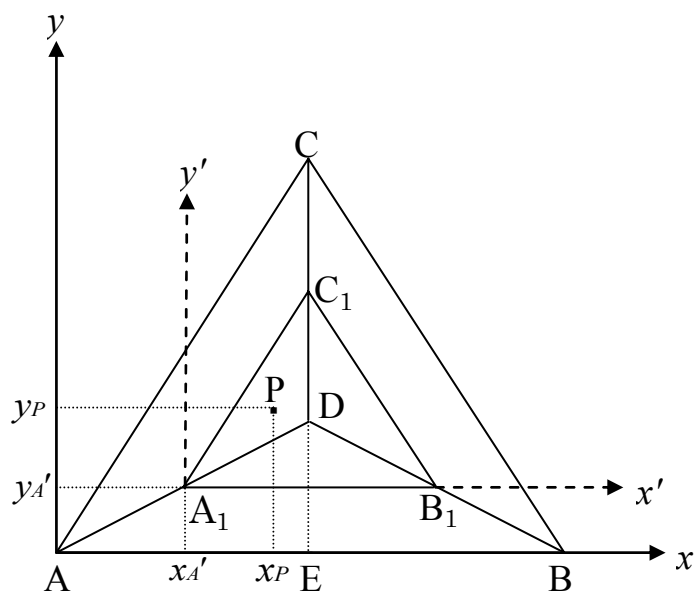
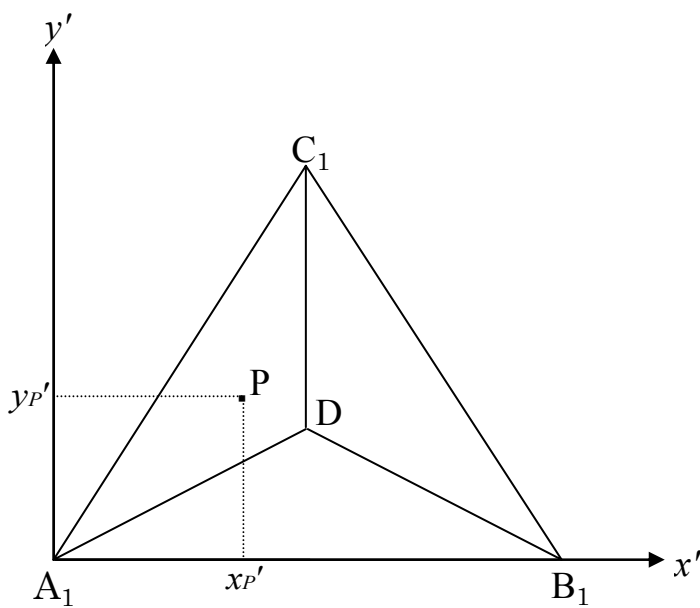


Fig.3.2 Transformation from equilateral tetrahedron coordinate system to 3-dimensional rectangular coordinate system.



(a)



(b)

Fig.3.3 Projected plan of Fig.3.2 on x-y plane.

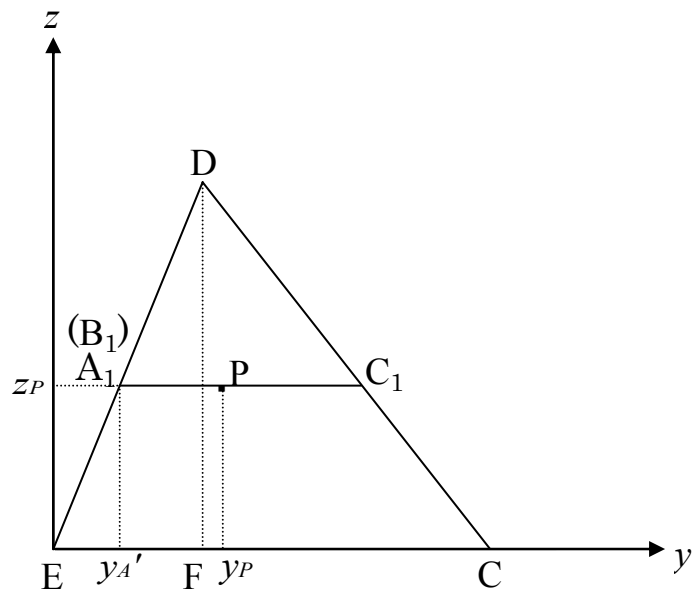


Fig.3.4 Projected plan of Fig.3.2 on y-z plane.

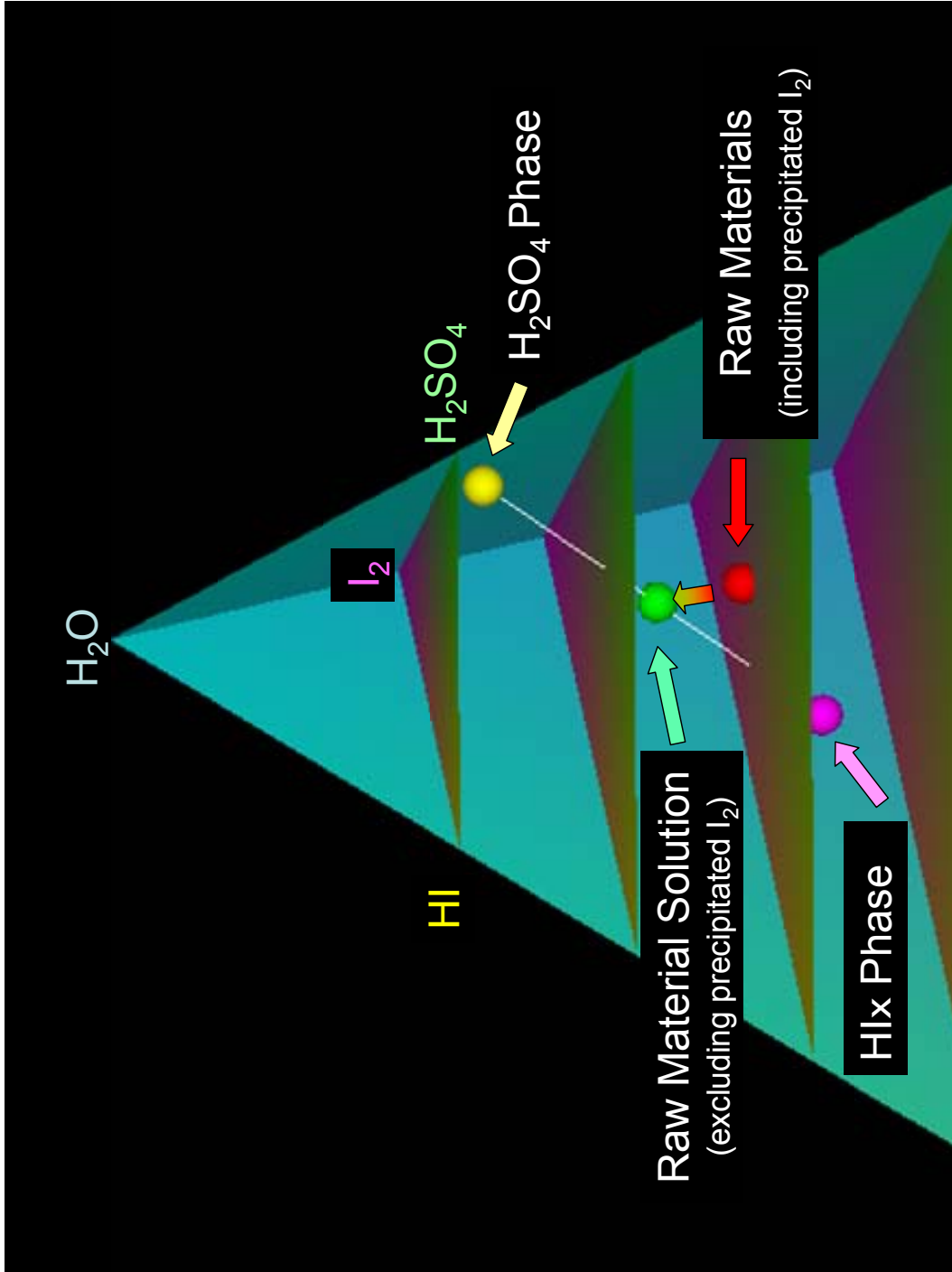


Fig. 4.1 Three-dimensional view of 4-component (HI/H₂SO₄/I₂/H₂O) mixtures in Table 4.1.

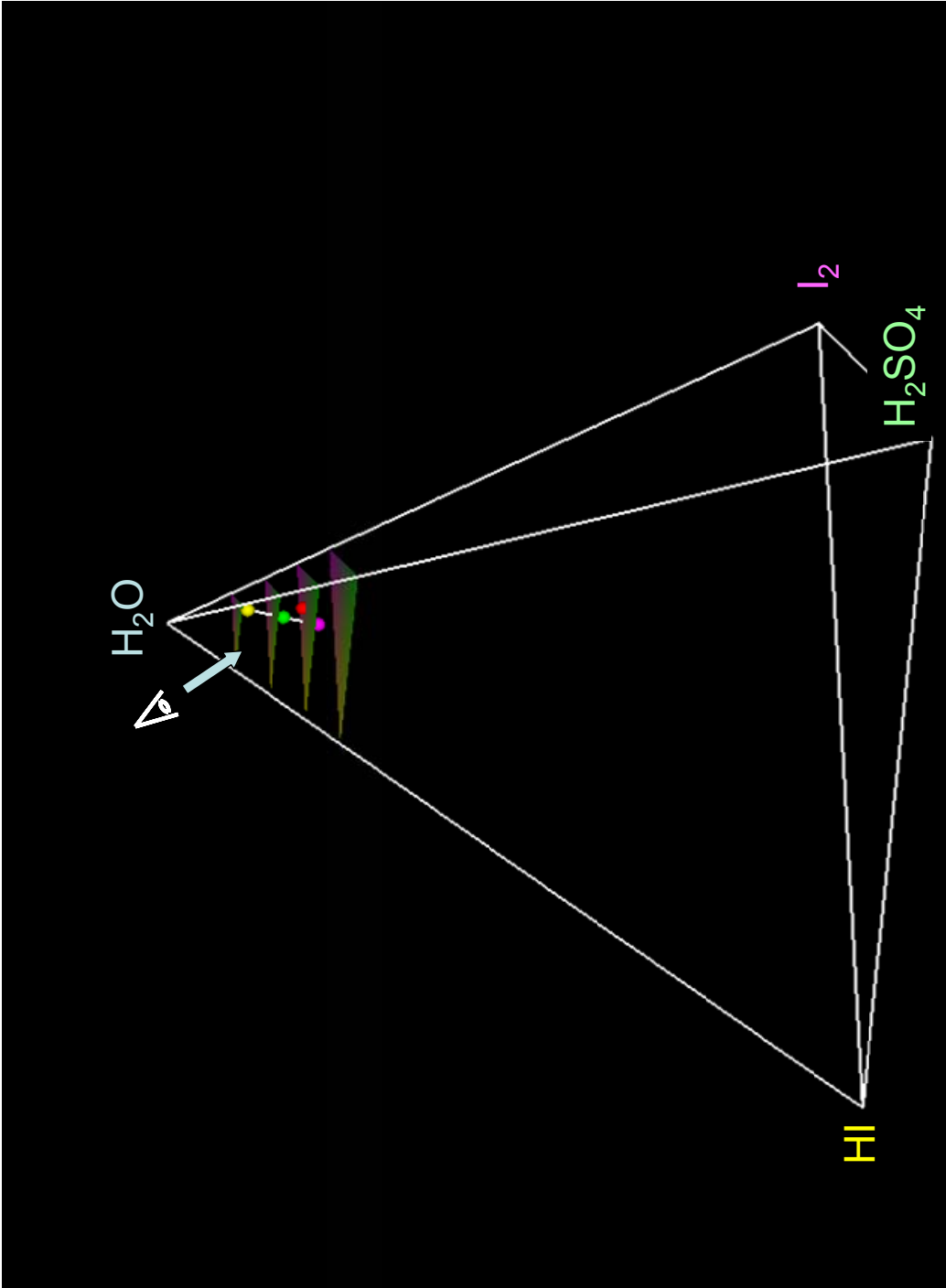


Fig. 4.2 View point near H₂O vertex.

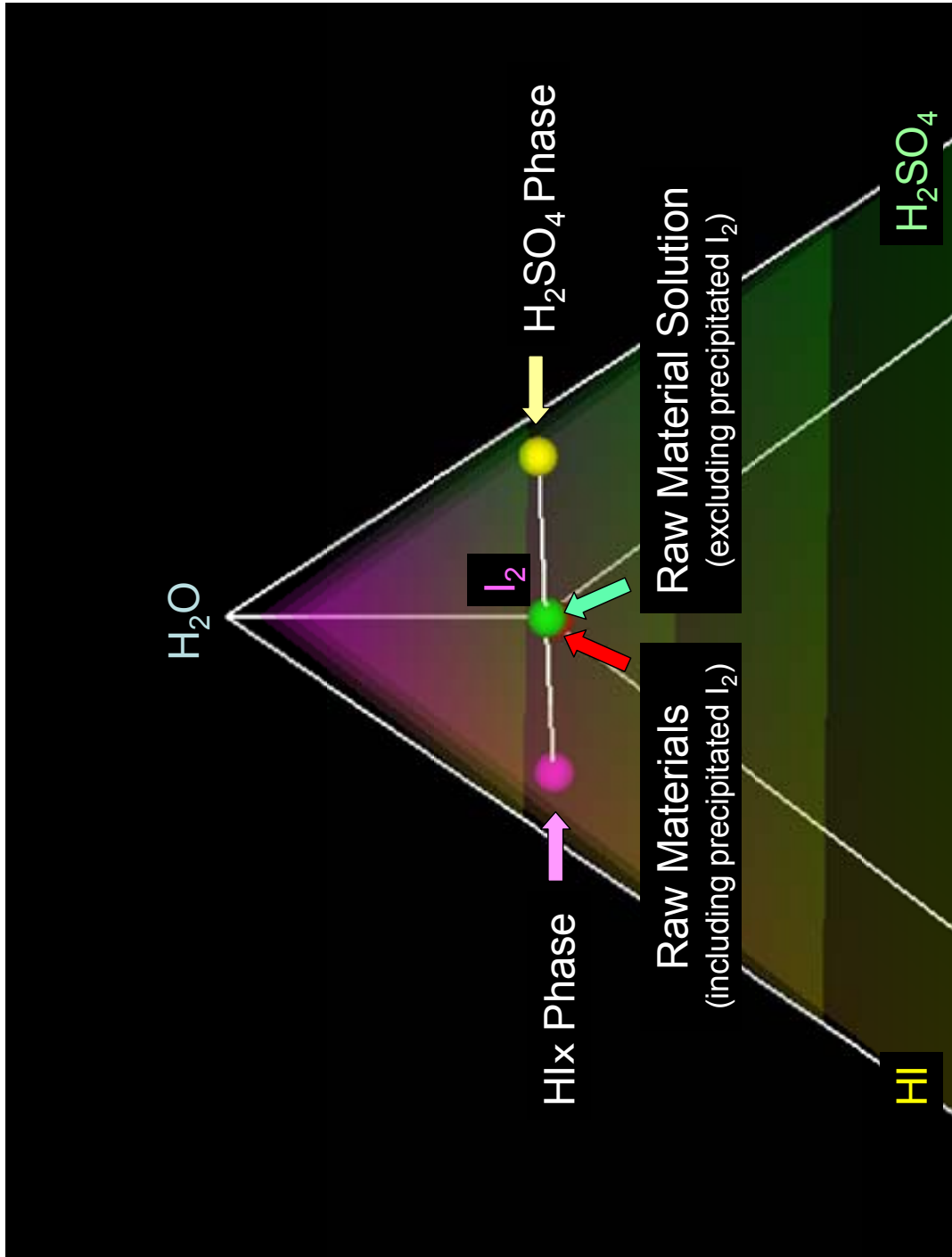


Fig. 4.3 See through view of Fig.4.1 from view point of Fig.4.2.

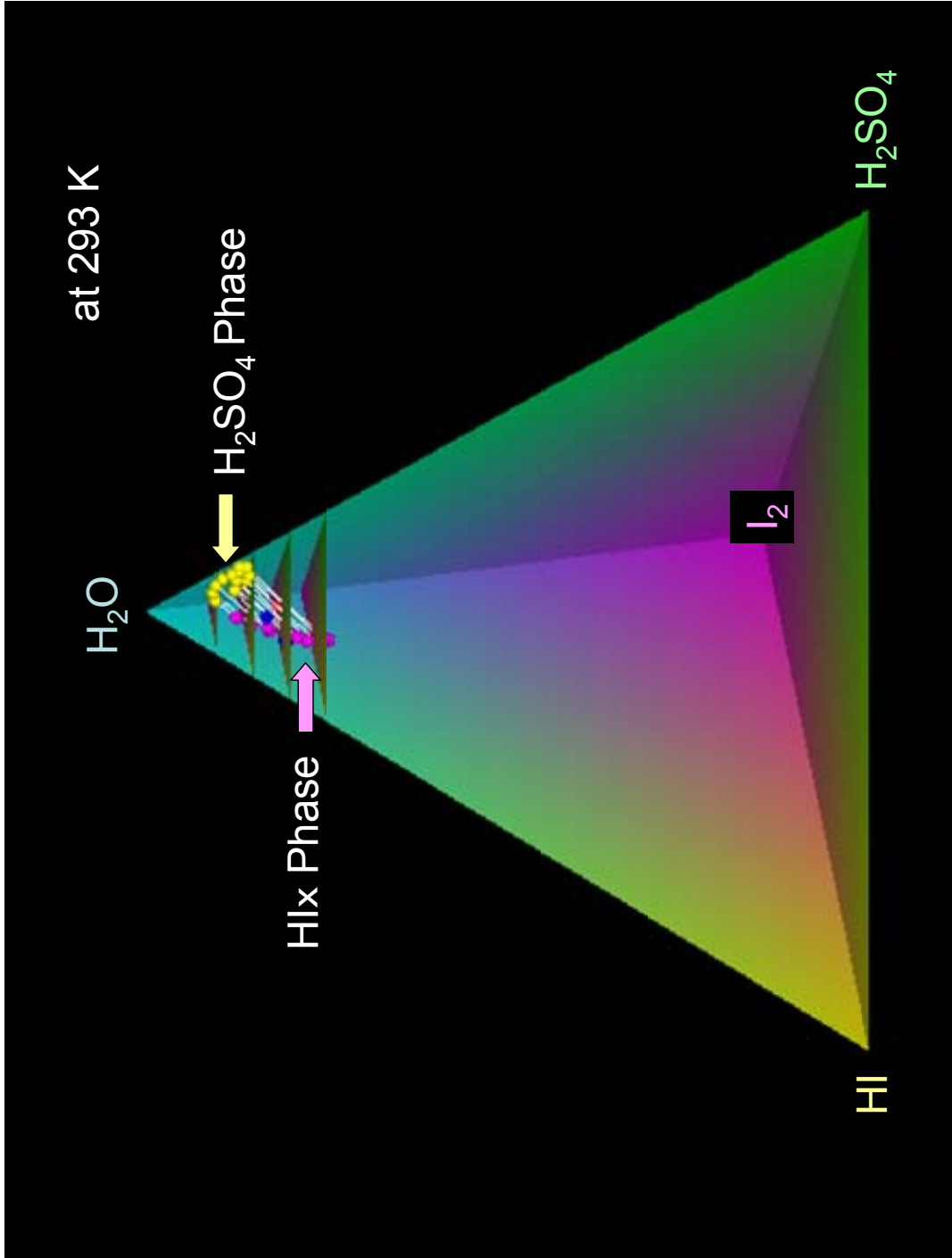


Fig. 4.4 Three-dimensional view of compositions of 2 liquid phase separation solutions at 293 K.

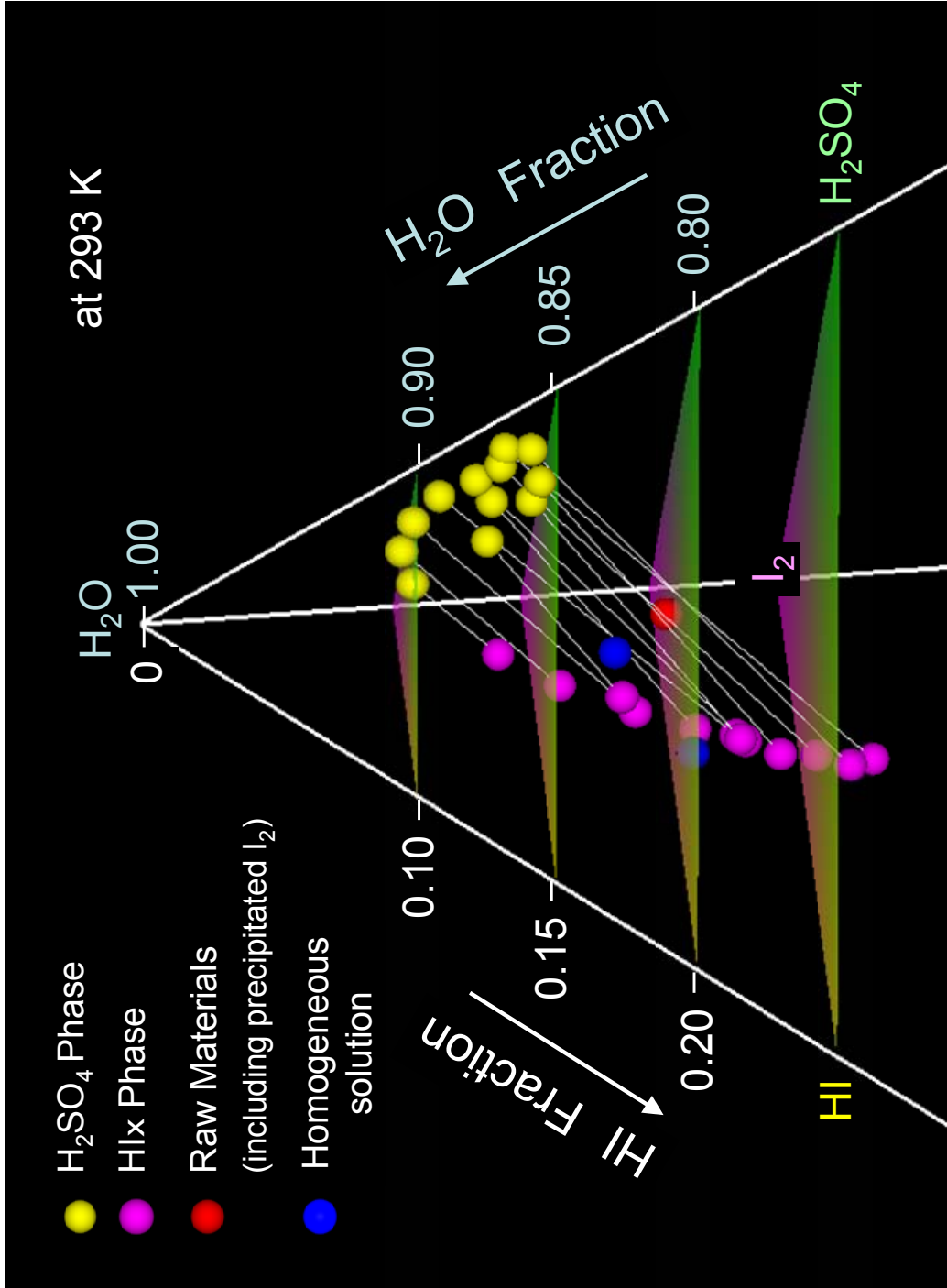


Fig. 4.5 Partial view of Fig.4.4 near H₂O vertex.

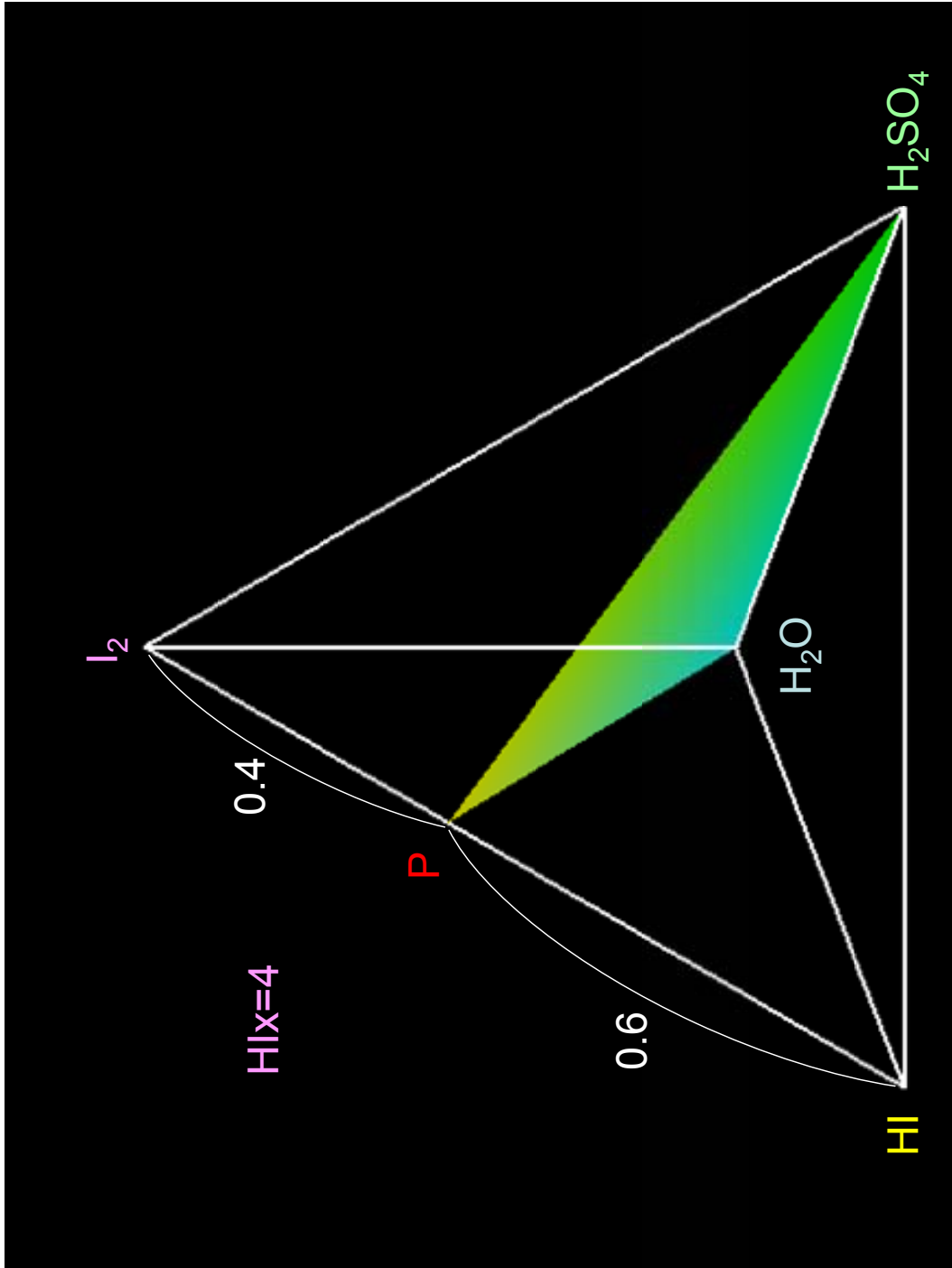


Fig. 4.6 Plane of constant iodine concentration in equilateral tetrahedron coordinate system.

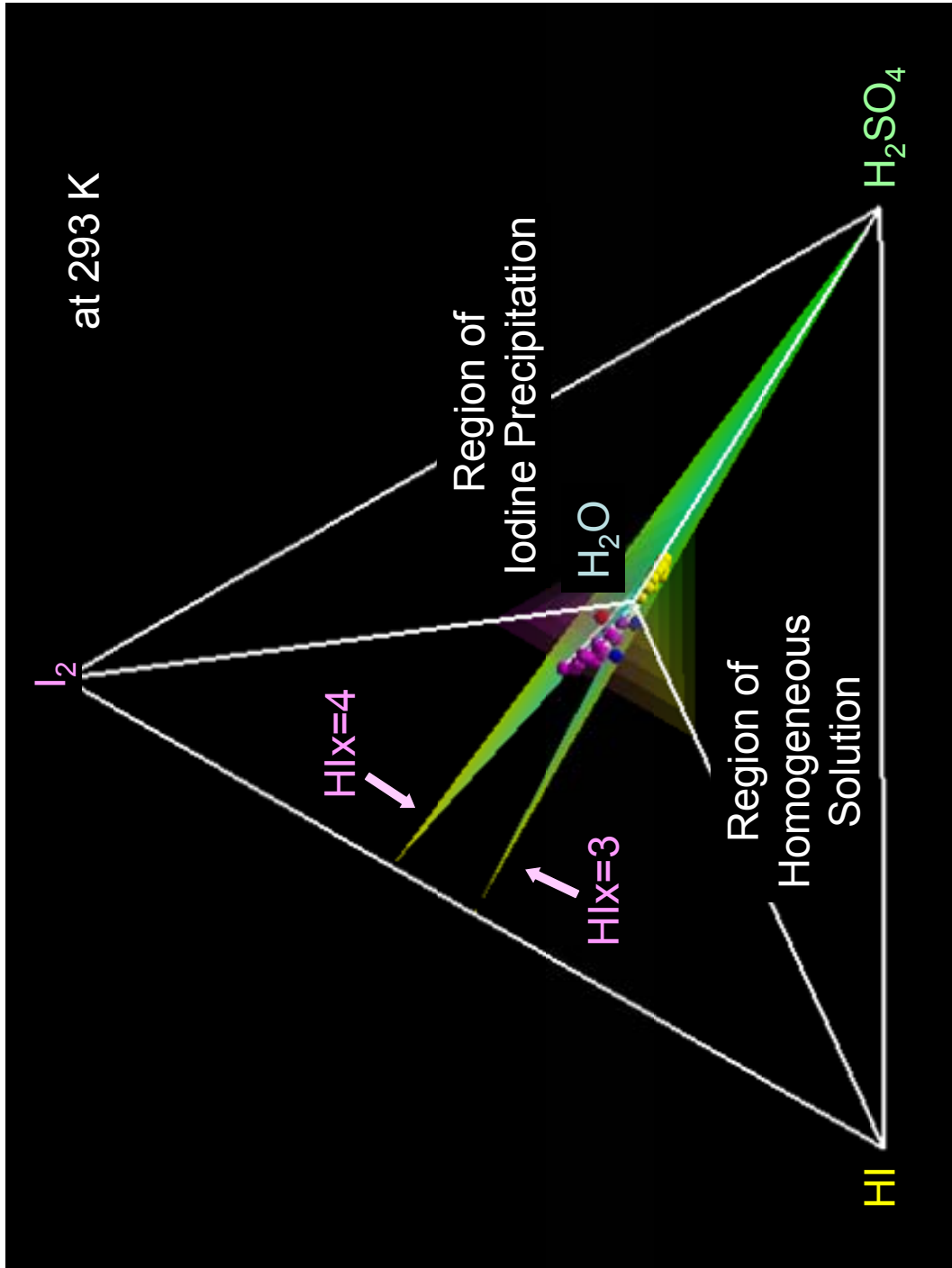


Fig. 4.7 Relation between compositions of 2 liquid phase separation solutions and planes of constant iodine concentration.

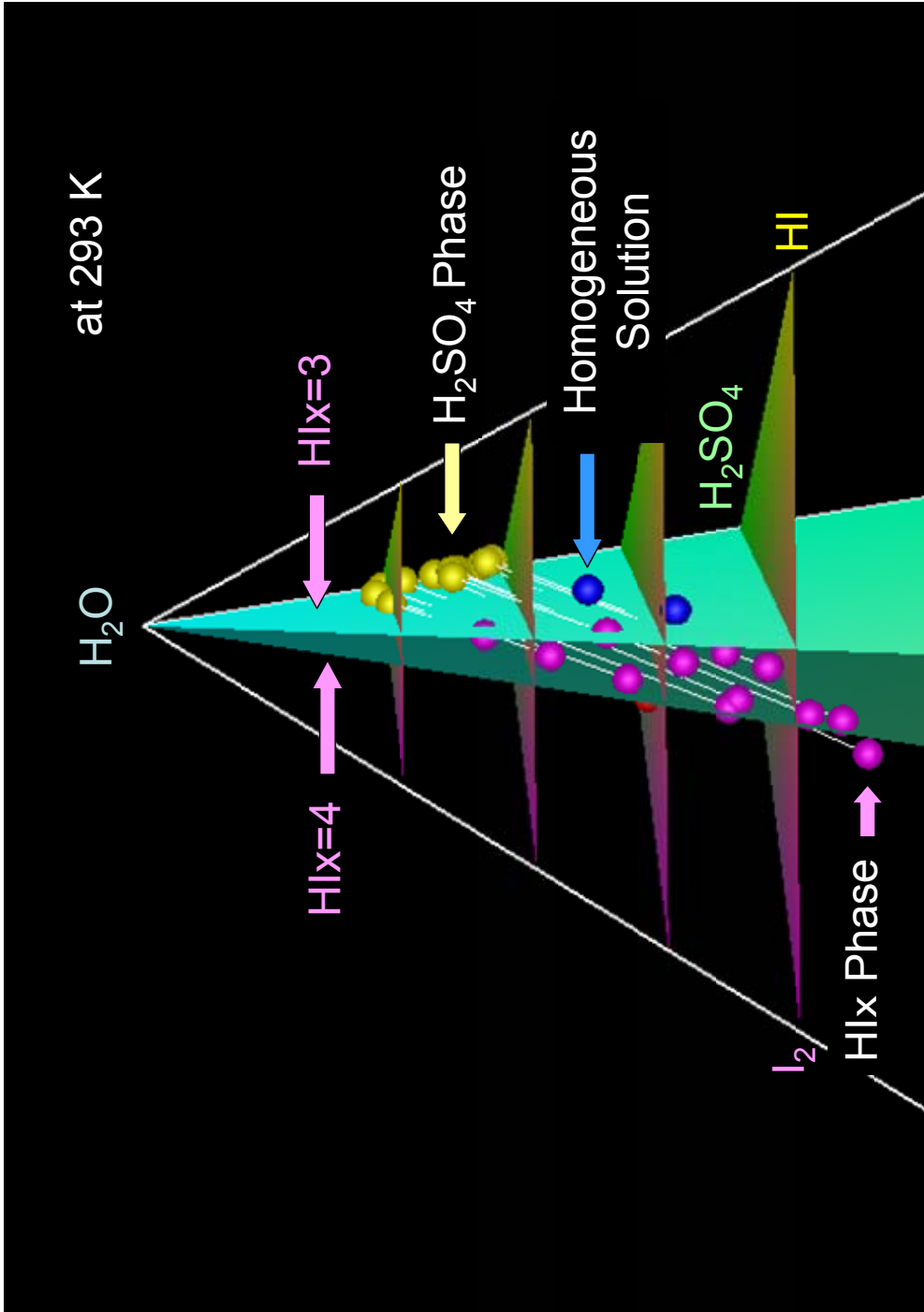


Fig. 4.8 Viewing screen of Fig.4.7 from H₂O-I₂-HI plane.

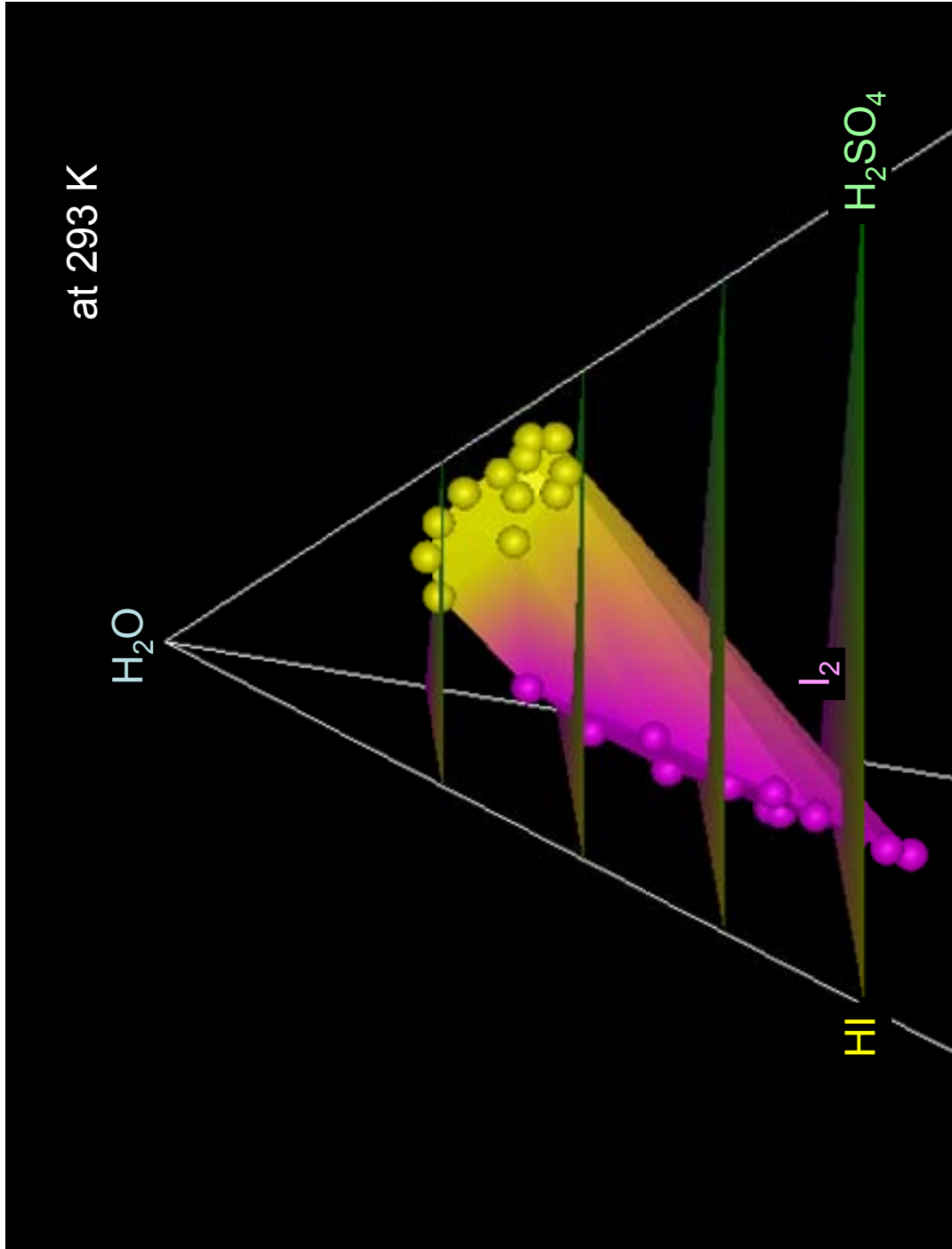


Fig. 4.9 Boundary surface of 2 liquid phase separation region (viewing from H₂O-HI-H₂SO₄ plane).

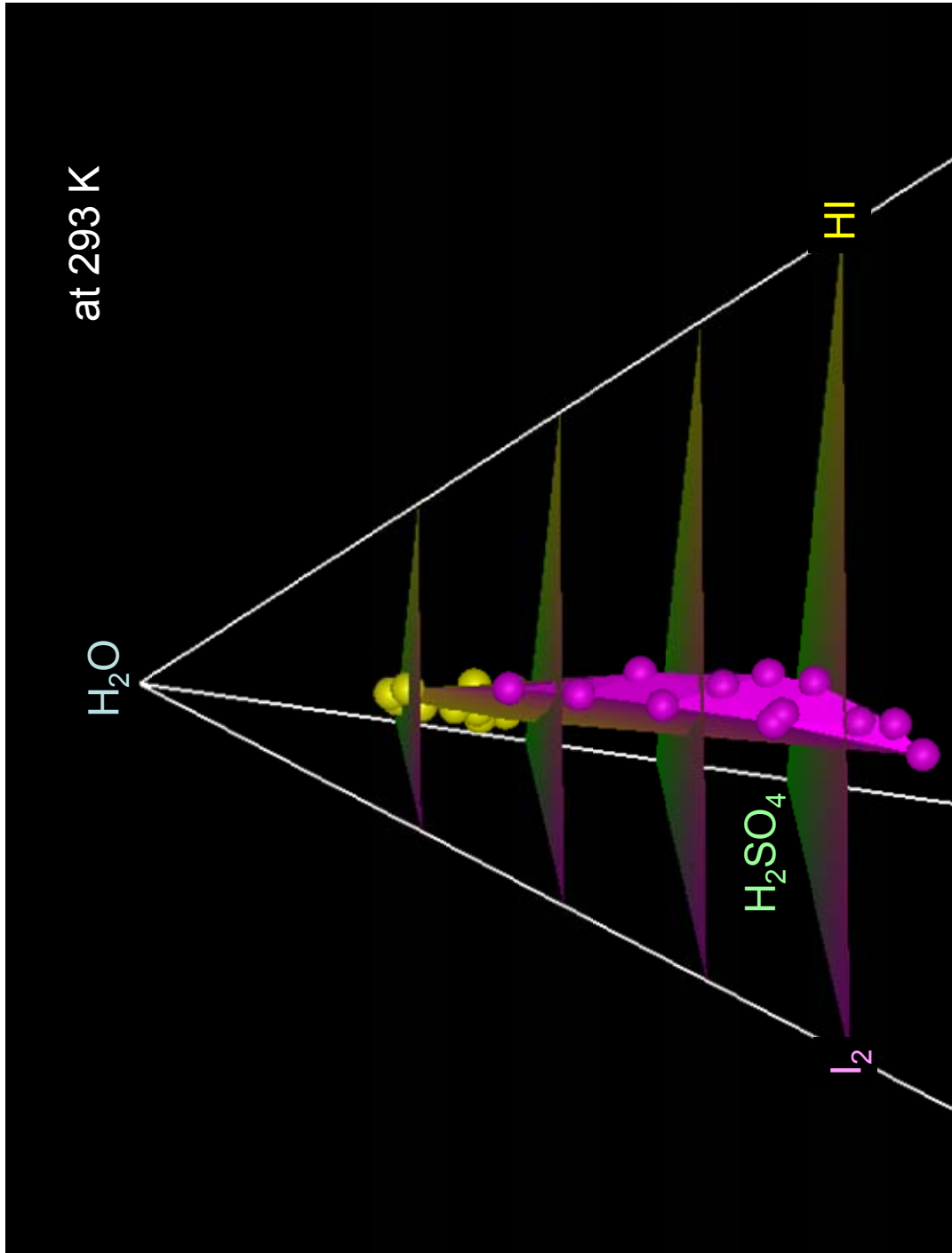


Fig. 4.10 Viewing screen of Fig.4.9 from H_2O - I_2 - HI plane.

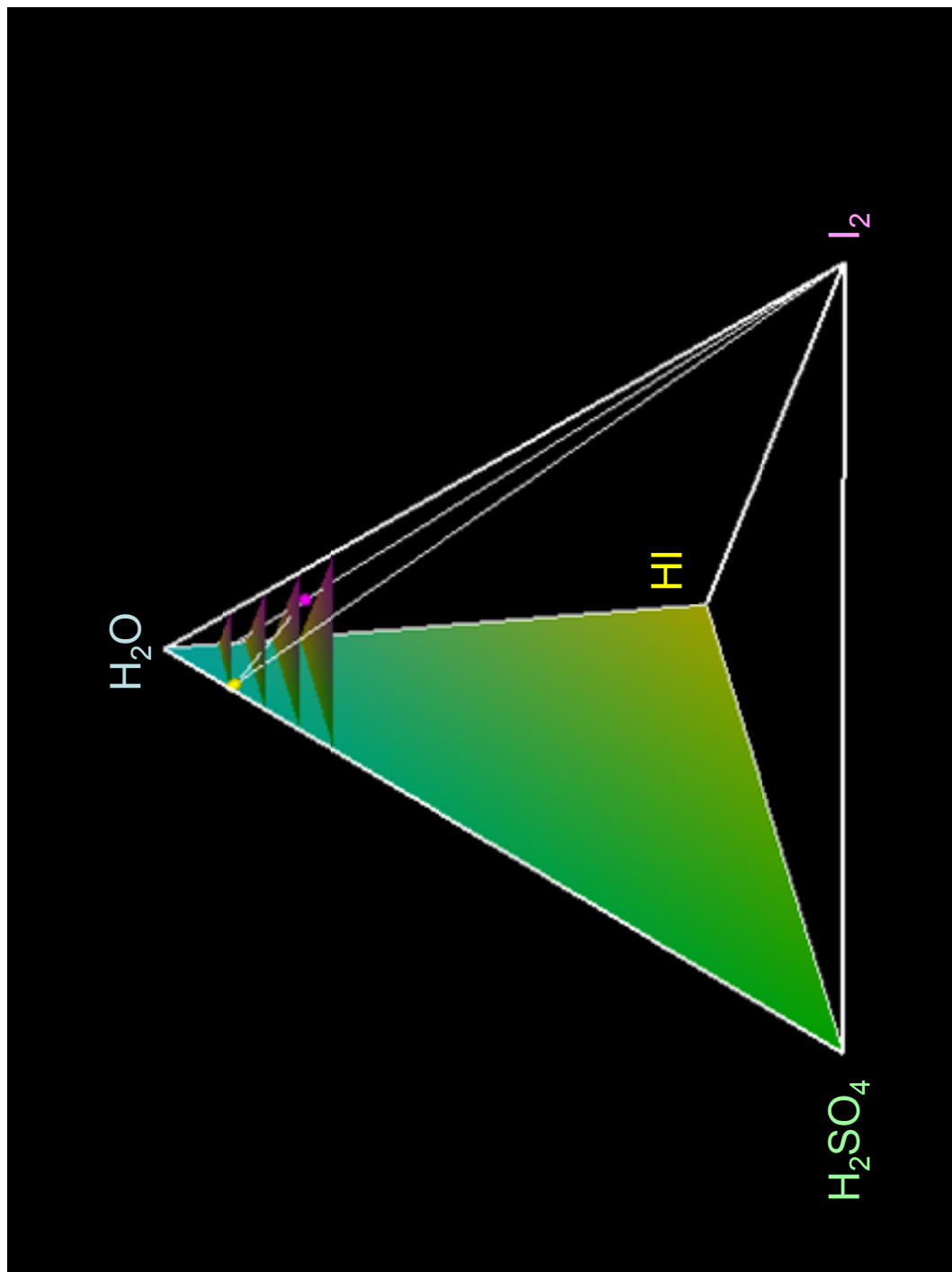


Fig. 4.11 Projection of a pair of 2 liquid phase separation solutions from I₂ vertex to H₂O-HI-H₂SO₄ plane.

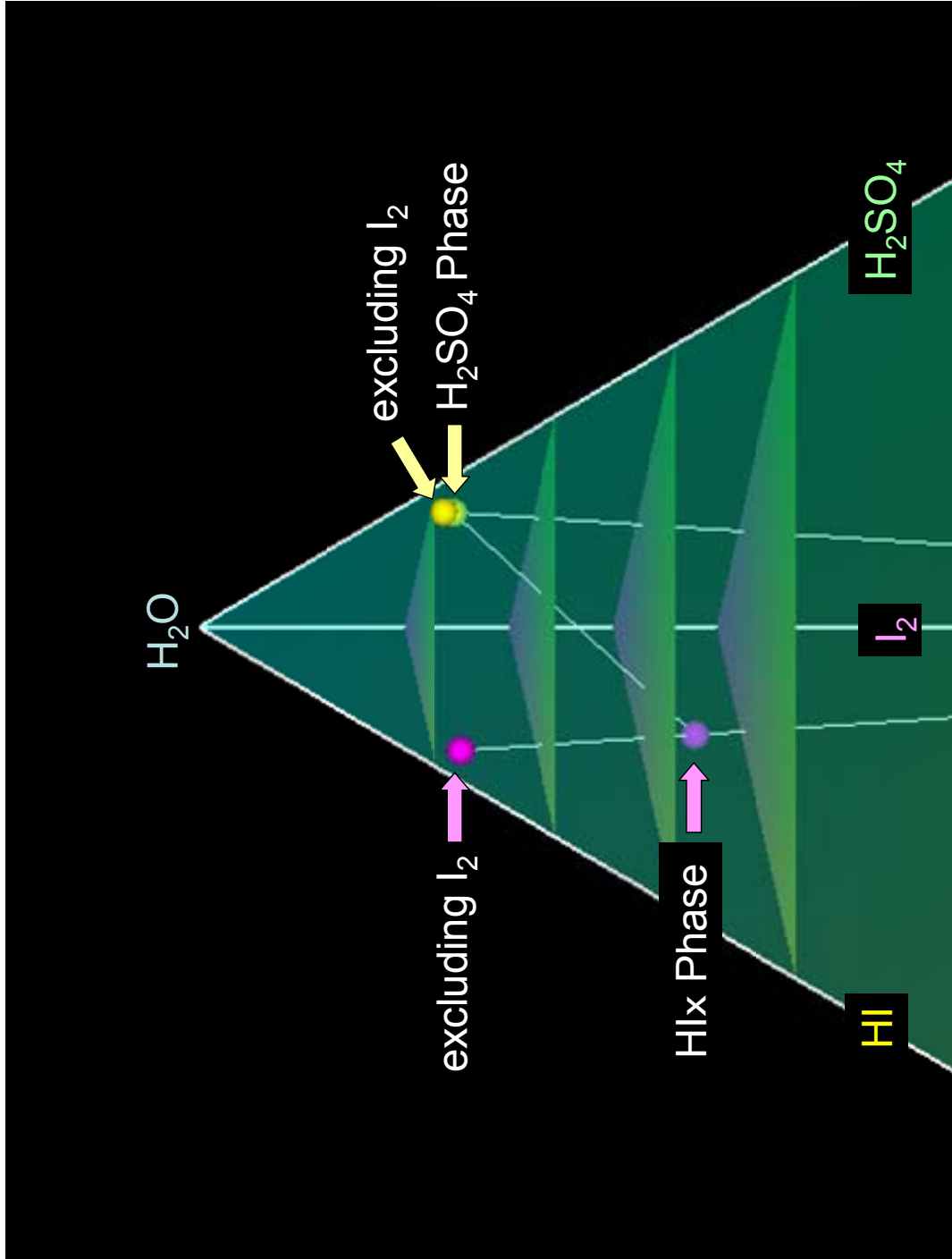


Fig. 4.12 H₂O-HI-H₂SO₄ plane projection view of a pair of 2 liquid phase separation solutions in Fig.4.1.

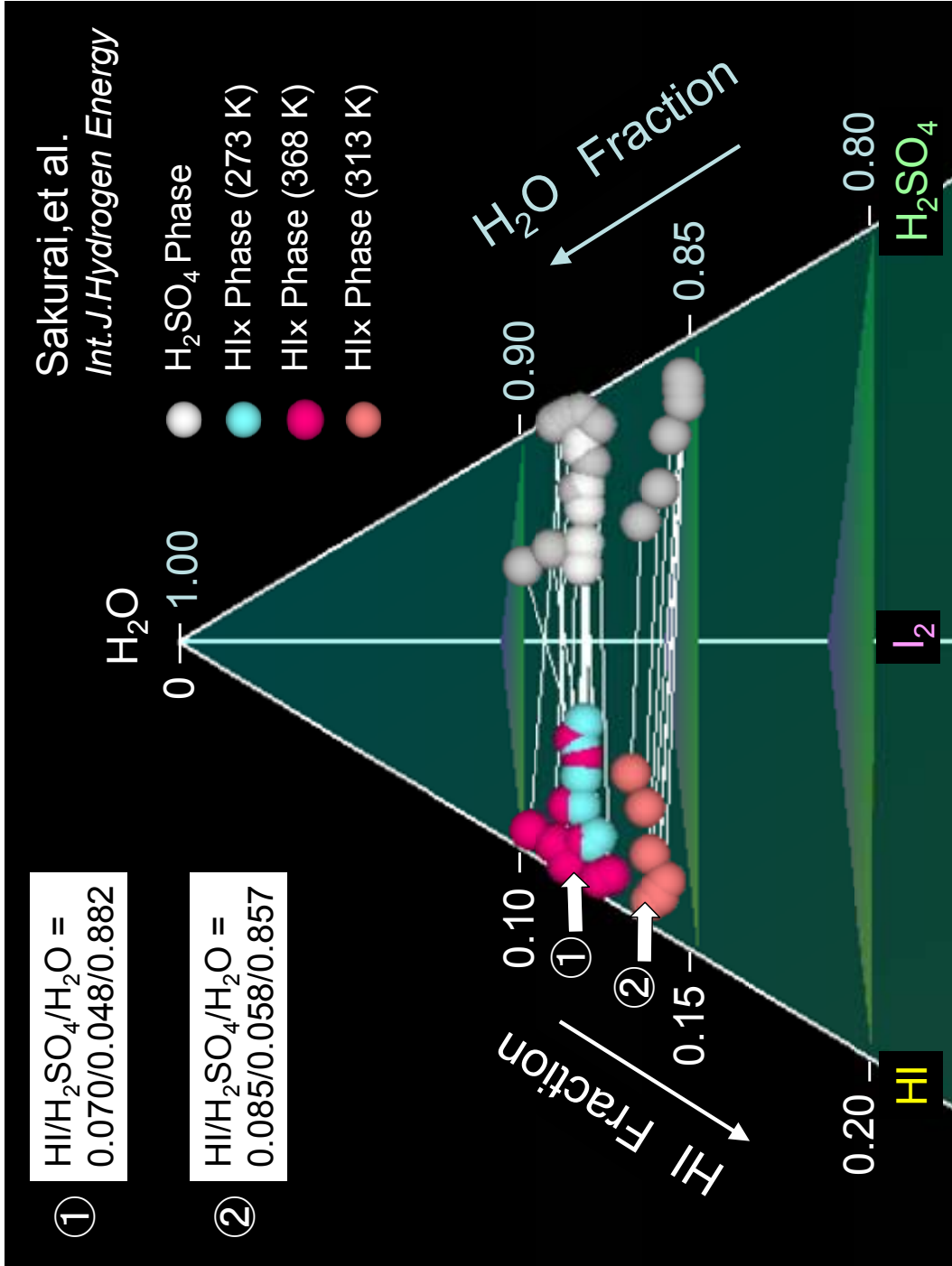


Fig. 4.14 Projection view of literature data [2].

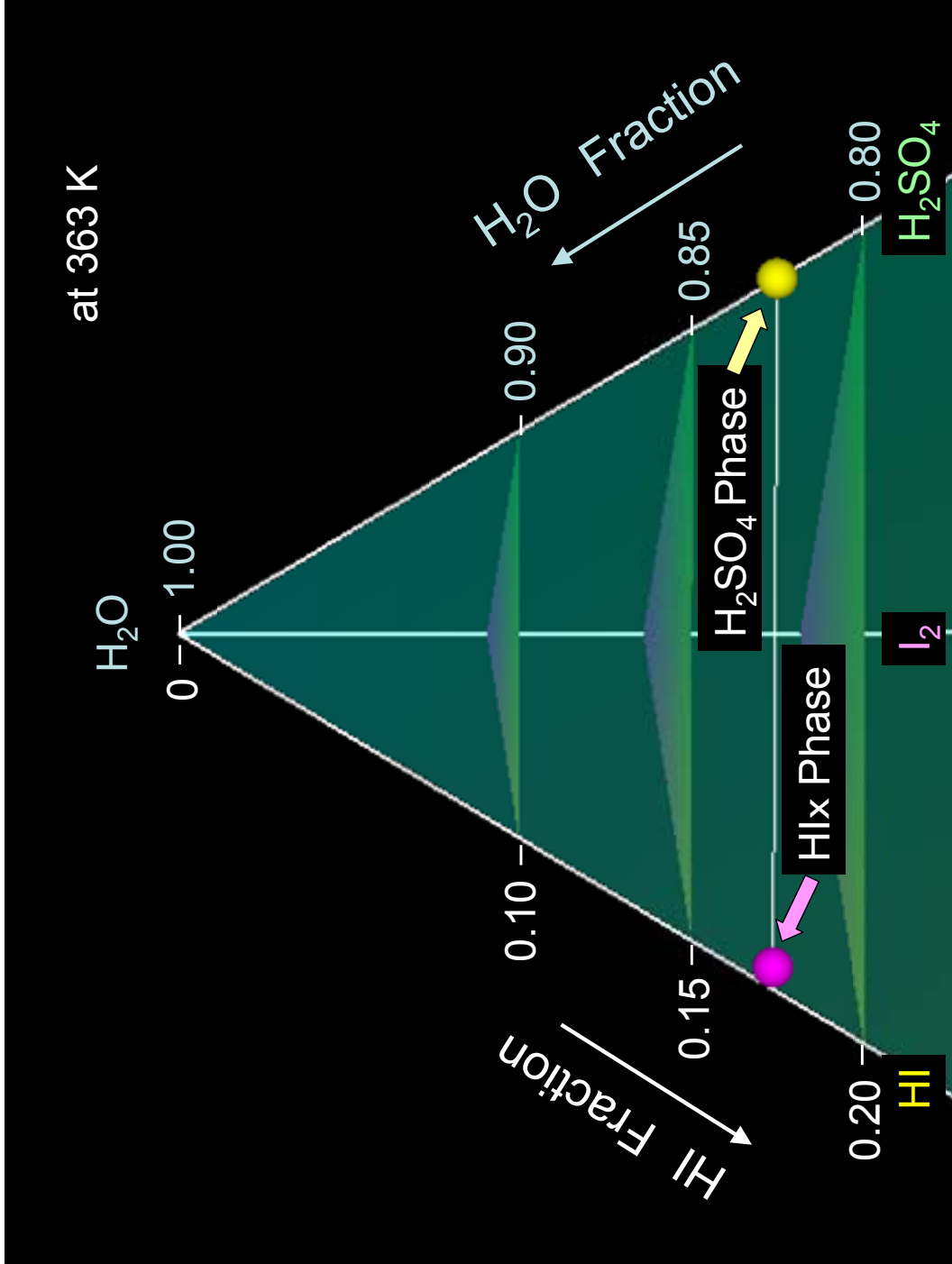


Fig. 4.15 Projection view of 2 liquid phase separation solutions at 363 K.

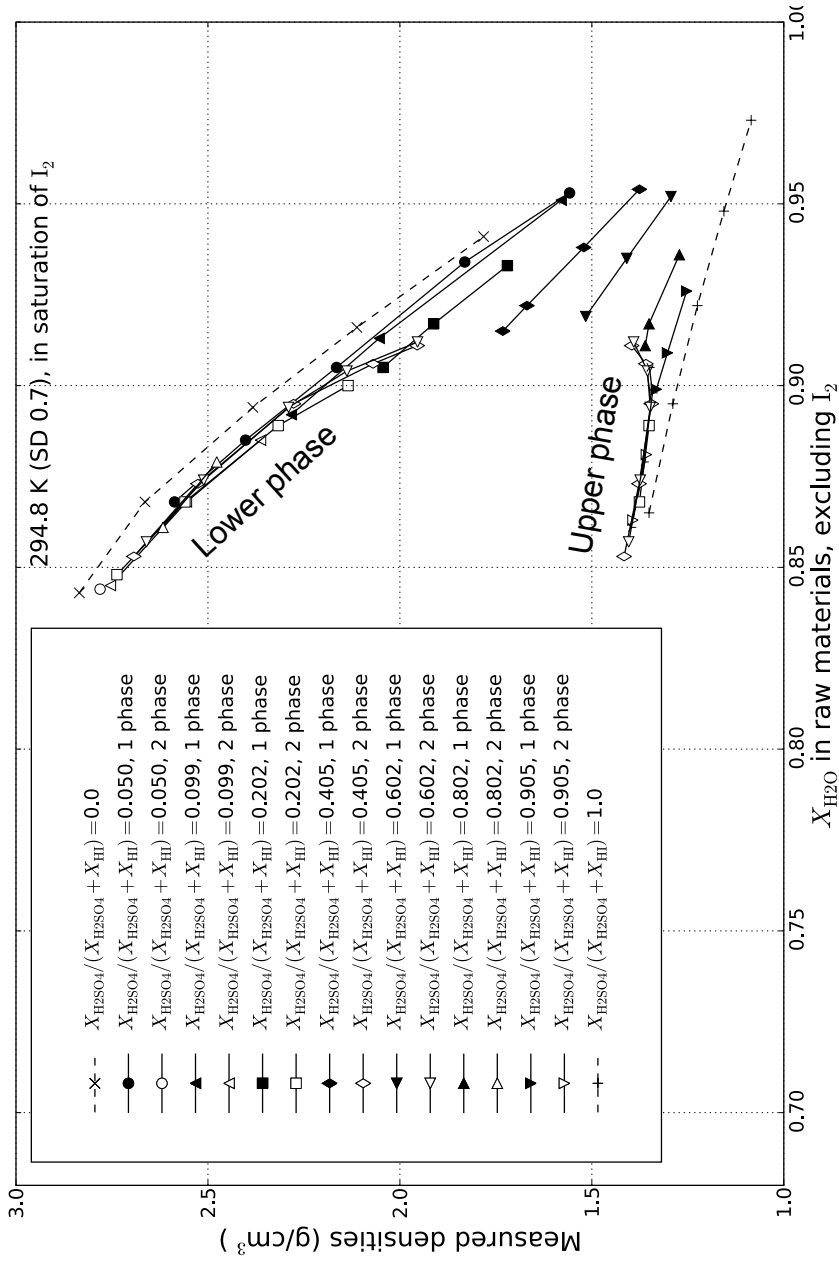


Fig. 4.16 Densities of $\text{HI}/\text{H}_2\text{SO}_4/\text{I}_2/\text{H}_2\text{O}$ solutions under iodine saturation condition [7].

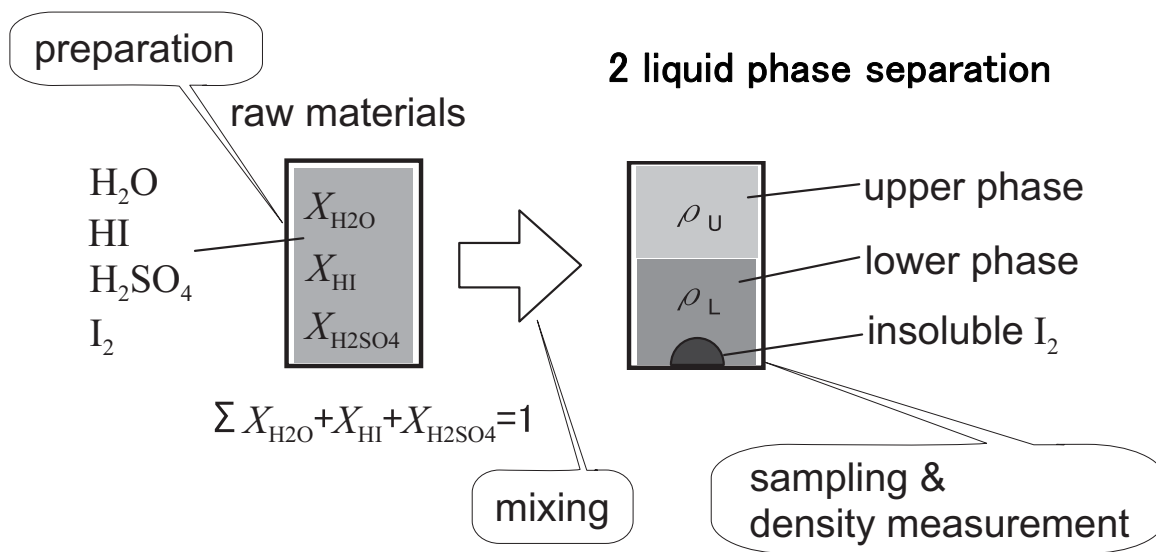


Fig. 4.17 Outline of density measurement experiment.

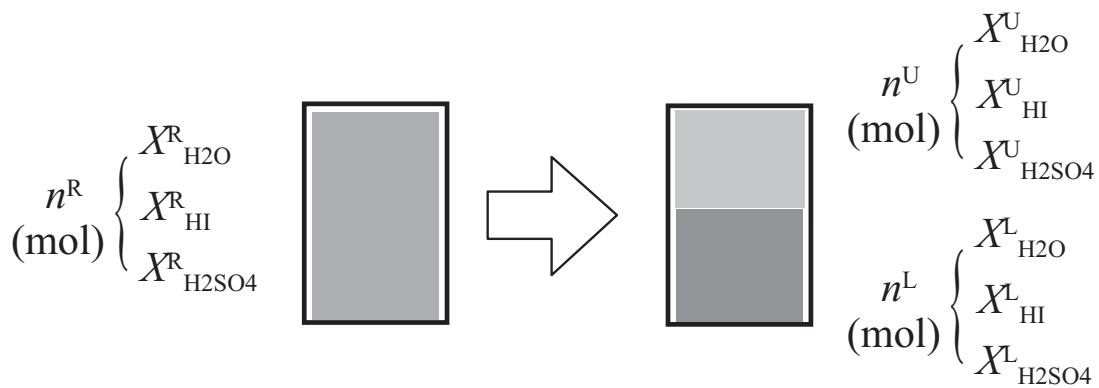


Fig. 4.18 Mass balance in 2 liquid phase separation.

Table 4.1

An example of results of 2 liquid phase separation test.

Mixture	Component				Total
	HI	H ₂ SO ₄	I ₂	H ₂ O	
(A) Raw materials	87 0.049	87 0.049	176 0.100	1415 0.802	1765 1.000
(B) H ₂ SO ₄ phase	9 0.011	77 0.092	4 0.005	745 0.892	835 1.000
(C) HIx phase	75 0.086	9 0.010	113 0.129	676 0.775	872 1.000
Differences (D=B+C-A)	-3	-1	-59 ^{a)}	6	
Raw material solution ^{b)}	87 0.051	87 0.051	117 0.069	1415 0.830	1705 1.000

Figures in the upper line and in the lower line expressed in mmol and in mole fraction respectively. ^{a)}Precipitated I₂. ^{b)}Precipitated I₂ component was excluded from raw materials.

Table 4.2

Results of 2 liquid phase separation test at 293 K and 3-dimensional coordinates.

Sample No.		Density	Composition [mole fraction]				3-dimensional coordinate		
		[g/cm ³] at 293K	HI	H ₂ SO ₄	I ₂	H ₂ O	x	y	z
1	Raw*		0.060	0.056	0.081	0.804	0.498	0.302	0.656
	H ₂ SO ₄ Phase	1.40	0.013	0.113	0.005	0.870	0.550	0.255	0.711
	HIx Phase	2.44	0.100	0.010	0.146	0.744	0.455	0.341	0.608
2	Raw*		0.062	0.067	0.063	0.809	0.502	0.288	0.660
	H ₂ SO ₄ Phase	1.46	0.023	0.114	0.008	0.856	0.546	0.254	0.699
	HIx Phase	2.36	0.103	0.017	0.121	0.759	0.457	0.324	0.620
3	Raw*		0.049	0.050	0.069	0.832	0.500	0.300	0.679
	H ₂ SO ₄ Phase	1.35	0.011	0.092	0.005	0.892	0.541	0.262	0.728
	HIx Phase	2.31	0.086	0.010	0.129	0.775	0.462	0.336	0.633
4	Raw*		0.080	0.040	0.083	0.796	0.480	0.302	0.650
	H ₂ SO ₄ Phase	1.48	0.026	0.105	0.010	0.859	0.540	0.256	0.701
	HIx Phase	2.26	0.097	0.021	0.107	0.775	0.462	0.316	0.633
5	Raw*		0.049	0.070	0.076	0.804	0.511	0.298	0.657
	H ₂ SO ₄ Phase	1.39	0.009	0.120	0.003	0.868	0.556	0.253	0.709
	HIx Phase	2.60	0.101	0.006	0.171	0.722	0.453	0.356	0.589
6	Raw*		0.057	0.070	0.073	0.800	0.507	0.294	0.654
	H ₂ SO ₄ Phase	1.41	0.014	0.124	0.004	0.857	0.555	0.251	0.700
	HIx Phase	2.52	0.106	0.010	0.151	0.733	0.452	0.342	0.598
7	Raw*		0.067	0.038	0.091	0.804	0.486	0.311	0.656
	H ₂ SO ₄ Phase	1.38	0.012	0.104	0.005	0.879	0.546	0.258	0.718
	HIx Phase	2.37	0.090	0.010	0.128	0.771	0.460	0.334	0.630
8	Raw*		0.078	0.029	0.091	0.803	0.476	0.310	0.655
	H ₂ SO ₄ Phase	1.44	0.020	0.098	0.008	0.873	0.539	0.259	0.713
	HIx Phase	2.22	0.087	0.017	0.104	0.792	0.465	0.318	0.646
9	Raw*		0.070	0.035	0.071	0.824	0.482	0.299	0.673
	H ₂ SO ₄ Phase	1.49	0.029	0.082	0.015	0.874	0.527	0.266	0.713
	HIx Phase	2.03	0.075	0.027	0.078	0.820	0.476	0.304	0.669
10	Raw*		0.043	0.045	0.055	0.857	0.501	0.295	0.700
	H ₂ SO ₄ Phase	1.36	0.013	0.078	0.008	0.901	0.532	0.267	0.736
	HIx Phase	2.17	0.073	0.013	0.101	0.813	0.470	0.322	0.664
11	Raw*		0.041	0.036	0.045	0.877	0.498	0.292	0.716
	H ₂ SO ₄ Phase	1.49	0.026	0.051	0.022	0.900	0.513	0.279	0.735
	HIx Phase	1.81	0.049	0.028	0.056	0.866	0.490	0.299	0.707
12	Raw*		0.036	0.046	0.040	0.878	0.505	0.288	0.717
	H ₂ SO ₄ Phase	1.40	0.018	0.064	0.013	0.905	0.523	0.272	0.739
	HIx Phase	1.99	0.061	0.019	0.077	0.842	0.479	0.310	0.688

*Raw describes raw material solution. Precipitated I₂ component was excluded.

Table 4.3

Results of 2 liquid phase separation test at 363 K.

	Composition [mole fraction]			
	HI	H ₂ SO ₄	I ₂	H ₂ O
Raw material solution*	0.031	0.097	0.268	0.604
H ₂ SO ₄ phase	0.000	0.174	0.000	0.826
HIx phase	0.087	0.003	0.484	0.426

*Precipitated I₂ component was excluded.

付録

A. ポリヨウ化水素酸におけるヨウ素飽和溶液濃度の推算

ヨウ素はヨウ化水素酸によく溶解してポリヨウ化水素酸となり、温度が高いほどその溶解度も高い。このため、原料の調製時や溶液の温度が下降した場合にヨウ素の析出が見られる。この析出は、溶液組成を原料重量から算出する際に誤差を生じさせ、また、管内を流動させる際に閉塞を誘発させる。したがって、ポリヨウ化水素酸を用いた実験をする場合や、プラント運転時の配管閉塞を防止する場合にヨウ素の飽和溶液濃度の推算が有用となる。そこで、ヨウ素飽和濃度の測定実験やブンゼン反応の測定実験結果を用いて、最小二乗法にてデータを回帰し、ポリヨウ化水素酸におけるヨウ素の飽和溶液濃度の推算式を作成した。以下に推算式を示す。

$$\frac{X'_{\text{HI}}}{X'_{\text{H}_2\text{O}}} = (p_1 T + p_2) X'_{\text{I}_2} \quad (\text{A.1})$$

ここで、 T は温度[K]、 p_1 と p_2 は定数である。

推算式には、ブンゼン反応実験の結果に硫酸の混入が認められるため、以下に示す硫酸を除いたモル分率を用いることとした。

$$X'_{\text{HI}} = \frac{X_{\text{HI}}}{X_{\text{HI}} + X_{\text{I}_2} + X_{\text{H}_2\text{O}}} \quad (\text{A.2})$$

$$X'_{\text{I}_2} = \frac{X_{\text{I}_2}}{X_{\text{HI}} + X_{\text{I}_2} + X_{\text{H}_2\text{O}}} \quad (\text{A.3})$$

$$X'_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{X_{\text{H}_2\text{O}}}{X_{\text{HI}} + X_{\text{I}_2} + X_{\text{H}_2\text{O}}} \quad (\text{A.4})$$

ただし、文献 [A1]、[A2] は、ヨウ素飽和状態のポリヨウ化水素酸をサンプリングし、滴定分析にてその組成を求めたものである。飽和状態は、調製した溶液が保持されている容器の底をガラス棒でつつき、固体の有無にて確認した。文献 [A3]、[A4] は、反応容器内に二酸化硫黄を吹き込むことによりブンゼン反応を生じさせ、生成した下相（ポリヨウ化水素酸に硫酸が混入した溶液）をサンプリングし、滴定分析にてその組成を求めたものである。文献 [A3] の結果は、溶液が 4 成分系（ヨウ化水素/硫酸/ヨウ素/水）と仮定した場合の組成を用いた。また、推算式の実験係数は、ヨウ化水素酸中のヨウ化水素濃度が高いほどヨウ素溶解度が高いこと、水にはヨウ素はほとんど溶解しないこと、が反映されるように決定した。実験係数は、 $p_1 = -6.34 \times 10^{-3}$ 、 $p_2 = 2.70$ である。データ回帰処理の際、水に対するヨウ素の溶解度をゼロと仮定している。Fig. A.1 は文献のヨウ素飽和状態の組成データと推算式(A.1)を、また、Fig. A.2は本報の結果と推算式(A.1)をプロットしたものである。推算式は本報の結果と良好に一致しており、実用上有用と考えられる。

参考文献

- [A1] 池野谷, 私信 (2001).
- [A2] 久保, 私信 (2009).
- [A3] 今井良行, 中島隼人, 笠原清司, 久保真治, 小貫薫, ヨウ素、二酸化硫黄及び水の反応に対する二酸化硫黄分圧の影響, 日本化学会第 88 春季年会, 平成 20 年 3 月, 3PA-126.
- [A4] S. Kubo, H. Nanajima, S. Kasahara, S. Higashi, T. Masaki, H. Abe, K. Onuki, A demonstration study on a closed-cycle hydrogen production by the thermochemical water-splitting iodine-sulfur process, Nuclear Engineering and Design 233, pp. 349-350 (2004).
- [A5] C. Berndhauser, K. Onuki, S. Shimizu, private communication (1994).

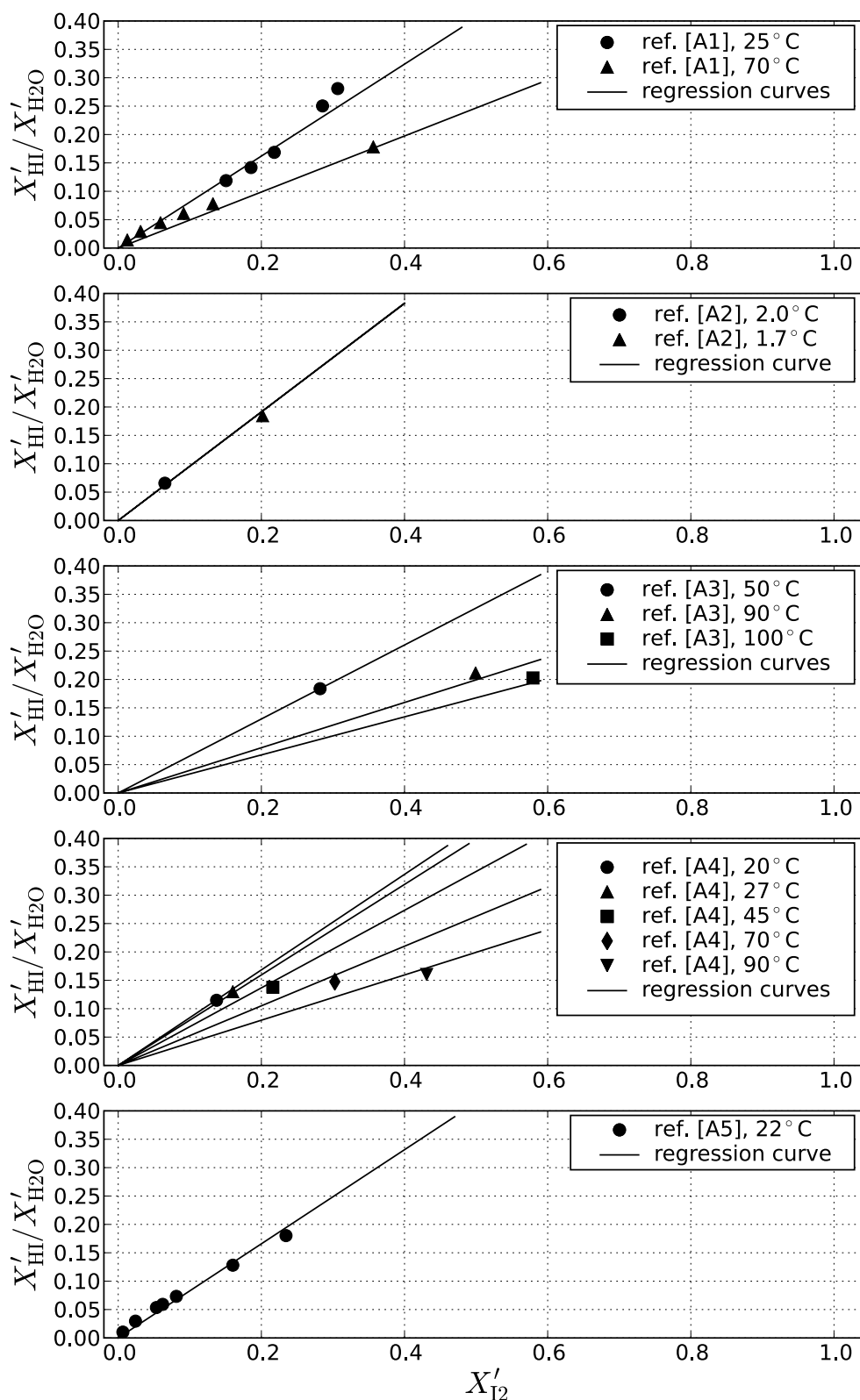


Fig.A.1 Iodine concentration in the poly-hydriodic acid under iodine saturation condition. Solid lines show regression curves in temperature of experimental data.

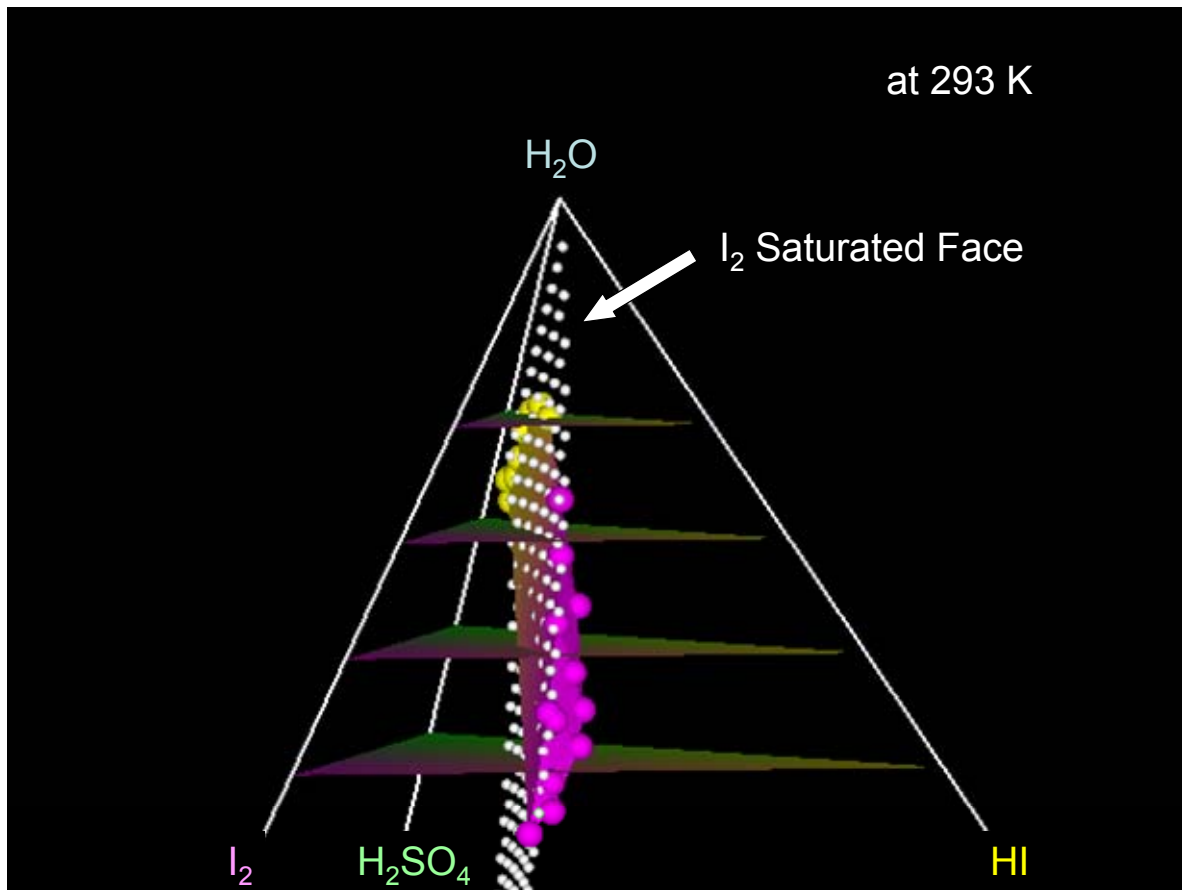


Fig.A.2 Calculation result of iodine saturated face and boundary surface of 2 liquid phase separation region at 293 K (Fig.4.10).

This is a blank page.

国際単位系 (SI)

表1. SI基本単位

基本量	SI基本単位	
	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
物質の量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立法メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹
密度、質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比体積	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 ^(a) 、濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率 ^(b)	(数字の)	1
比透磁率 ^(b)	(数字の)	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI組立単位		
	名称	記号	他のSI単位による表し方
平面角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(e)	1 ^(b)
周波数	ヘルツ ^(d)	Hz	s ⁻¹
力	ニュートン	N	m 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
仕事率、工率、放射束	ワット	W	J/s
電荷、電気量	クーロン	C	s A
電位差 (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	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 ^(e)	°C	K
光照射度	ルーメン	lm	cd sr ^(e)
放射線量	グレイ	Gy	J/kg
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq	s ⁻¹
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg
酸素活性化	カタール	kat	s ⁻¹ mol

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
 (b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。
 (c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d) ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の間には1:1の関係がある。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
 (f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
 (g) 単位シーベルト (PV.2002.70,205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI組立単位	
	名称	記号
粘力のモーメント	ニュートンメートル	N m
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m
角速度	ラジアン毎秒	rad/s
角加速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²
熱流密度、放射照度	ワット毎平方メートル	W/m ²
熱容量、エン트로ピー	ジュール毎ケルビン	J/K
比熱容量、比エン트로ピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m ³
電表面電荷	クーロン毎平方メートル	C/m ²
電束密度、電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²
誘電率	ファラド毎メートル	F/m
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol
モルエン트로ピー、モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s
放射線強度	ワット毎ステラジアン	W/sr
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² sr)
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m ³

表5. SI接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクタ	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1 L=1 dm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ kg

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI単位で表される数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1 MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322 Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1 nm=100 pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852 m
バイン	b	1 b=100 fm ² =(10 ¹² cm) ² =10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600) m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的關係は、 対数量の定義に依存。
ベール	B	
デジベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI単位で表される数値
エル	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1 Pa s
ストークス	St	1 St=1 cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1 cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻²
フオト	ph	1 ph=1 cd sr cm ⁻² 10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1 cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1 Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe _e =(10 ³ /4π) A m ⁻¹

(c) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「△」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1 cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	f	1 フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1メートル系カラット=200 mg=2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カロリ	cal	1 cal=4.1858 J (「15°C」カロリ)、4.1868 J (「IT」カロリ)、4.184 J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ=1 μm=10 ⁻⁶ m

